



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Combinación de enfoques *Top-down* y *Bottom-up* para la estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en el valle geográfico del Río Cauca.

Angela Cristina Vargas Burbano

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Bogotá, Colombia
2023

Combinación de enfoques *Top-down* y *Bottom-up* para la estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en el valle geográfico del Río Cauca.

Angela Cristina Vargas Burbano

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Ambiental

Director:

Ph.D. Rodrigo Jiménez Pizarro

Codirector:

Ph.D. Germán Rueda Saa

Línea de Investigación:

Calidad del aire

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Calidad del Aire (GICA)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Bogotá, Colombia

2023

Dedicada a mi familia, padres, hermanos, sobrinos, especialmente sobrinos. Quienes fueron el motor para avanzar y más aún en momentos de desaliento y dificultades.

A todas las mujeres que han luchado por cada uno de los privilegios que gozo hoy. Especialmente, mi abuela, una mujer incansable, luchadora, inteligente, fuerte, amorosa, sabia, resiliente, creativa, segura, visionaria, paciente, generosa, trabajadora, intuitiva, bondadosa, caritativa... quien es la base de la gran familia que me rodea hoy.

También a aquellas mujeres como Maire Curie, Irene Joliot-Curie, Agnodice de Atenas, Ana Comneno, Caroline Herschel, Emmy Noether, Lise Meitner, Lynn Margulis, Rita Levi Montalcini, Bertha Benz, Frances Holberton, Kathleen McNulty, Marlyn Wescoff, Ruth Lichterman, Grances Bilas, Jean Jenningsz, Margaret Rossiter, Hedy Lamarr, Jane Goodall, Marian Croak, entre muchas otras, que tuvieron la valentía de hacer ciencia y visibilizaron la importancia de las mujeres en la ciencia, la investigación y la ingeniería.

Dedicada con profundo agradecimiento a Jaime Quevedo, Ernest Karl Saenz y Mauricio Lovato, cuya vasta sabiduría en la medicina neurológica ha posibilitado que hoy en día, mi cerebro funcione con admirable plenitud, a pesar de no ser completo.

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.

Angela Vargas B.

Angela Cristina Vargas Burbano

Fecha 31/07/2023

Fecha

Agradecimientos

Agradecimiento especial a mis tutores y asesores, Rodrigo Jiménez Pizarro, Germán Rueda Saa y Sonia Cecilia Mangones, profesores de la Universidad Nacional de Colombia, quienes guiaron mi paso por la maestría y la escritura de esta tesis. Además de participar en la formulación y ejecución de los proyectos que hicieron parte fundamental de este trabajo investigativo.

Agradezco también a la Corporación Autónoma regional del Valle del Cauca (CVC) y el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) de Cali, por la financiación de los convenios 036 de 2021 CVC-UNAL y No. 4133.010.27.1.041-2022 DAGMA-UNAL, respectivamente. En los cuales tuve la oportunidad de participar activamente y a través de los cuales se logró obtener los datos de aforo vehicular y las estimaciones de emisiones vehiculares de Cali, Palmira y Yumbo.

A todo el equipo de los proyectos vinculados a esta tesis. Especialmente a Pablo Gutiérrez Espada, por su disposición, apoyo, paciencia, tiempo y conocimiento en los Sistemas de Información Geográfica, y a Luis David López Buitrago, por su apoyo, tiempo y conocimiento en la ingeniería de transporte.

Resumen

Combinación de enfoques *Top-down* y *Bottom-up* para la estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en el valle geográfico del Río Cauca.

La actividad vehicular es una de las fuentes de contaminación atmosférica que tiene efectos en el cambio climático y la salud humana. Los inventarios de emisiones son una herramienta estratégica para la identificación de fuentes de contaminación y la gestión de la calidad del aire. Esta tesis presenta un enfoque metodológico innovador, donde se combinan los enfoques *Bottom-up* y *Top-down* para la estimación de emisiones vehiculares exhosto y por resuspensión, en 25 municipios del valle del río Cauca. Los cuales cuentan con actividad vehicular “On Road” en vías locales y la malla vial nacional, y “Off Road” en las actividades agrícolas de la cañicultura y la agricultura de otros cultivos.

Para la estimación de las emisiones se aplicó el enfoque *Top-down* o *Bottom-up*, de acuerdo con la disponibilidad de datos para cada fuente y municipio. Para lo cual, se desarrollaron estrategias de estimación según los datos de: Ventas de combustibles fósiles, características del parque automotor, factores de emisión, aforos vehiculares, características de la malla vial, actividad vehicular, entre otros datos. De tal forma que se combinaron ambos enfoques para obtener la estimación de 12 contaminantes para las emisiones exhosto y PM₁₀ resuspendido.

Para el año base 2021 se estima que el contaminante con mayores emisiones vehiculares fue el CO₂ con 4,093,147 toneladas, seguido de CO>VOC>VOCNM>NO_x>PM₁₀Resuspendido>CH₄>NO₂>PM₁₀>PM_{2.5}>BC>N₂O>SO₂. Las cuales se emitieron principalmente en vías locales, seguido de las vías nacionales y las actividades agrícolas. Además, los vehículos livianos, que consumen principalmente

X Combinación de enfoques Top-down y Bottom-up para la estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en el valle geográfico del Río Cauca.

gasolina, son los mayores generadores de emisiones. Cali, Palmira, Yumbo, Tuluá, Buga y Candelaria generan el 80% de las emisiones del área de estudio.

Palabras clave: Conteos vehiculares; Actividad vehicular; Flujo de tráfico; Deodata; Factores de emisión; Emisiones vehiculares; COPERT

Abstract

Combination of *Top-down* and *Bottom-up* approaches to estimate atmospheric emissions from mobile sources in the geographic valley of the Cauca River.

Vehicular activity is an air pollution source and has an impact on climate change and human health. Emission inventories are a strategic tool for pollution source identification and air quality management. This thesis presents an innovative methodological approach, combining bottom-up and top-down approaches for the estimation of exhaust and resuspension emissions due to vehicular activity in 25 municipalities of the Cauca River valley. These municipalities have "On Road" vehicular activity on local roads and the national road network, and "Off Road" in the agricultural activities of sugar cane and other crops.

The top-down or bottom-up approach was applied to estimate emissions, according to the availability of data for each source and municipality. For this purpose, estimation strategies were developed according to data on: sales of fossil fuels, characteristics of the vehicle fleet, emission factors, vehicle counts, characteristics of the road network, vehicle activity, and other data. Thus, both approaches were combined to obtain the estimation of 12 pollutants for exhaust emissions and resuspended PM₁₀.

For 2021, it is estimated that the pollutant with the highest vehicle emissions was CO₂ with 4,093,147 tons, followed by CO>VOC>VOCNM>NO_x>PM₁₀Resuspendido>CH₄>NO₂>PM₁₀>PM_{2.5}>BC>N₂O>SO₂. These were mainly emitted on local roads, followed by national roads and agricultural activities. In addition, light vehicles, which mainly consume gasoline, are the largest emissions generators. Cali, Palmira, Yumbo, Tuluá, Buga and Candelaria generate 80% of the emissions in the study area.

Keywords: Vehicle counts; Vehicle activity; Traffic flow; Deodata; Emission factors; Vehicle emissions; COPERT

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XIX
Introducción	1
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
1. Marco teórico	7
1.1 Emisiones por fuentes móviles	8
Emisiones exhosto	10
Emisiones por resuspensión	12
1.2 Inventario de emisiones	13
Enfoque <i>Top-down</i>	14
Enfoque <i>Bottom-up</i>	16
1.3 Factor de actividad	18
Polígonos de Thiessen	19
1.4 Factores de emisión	21
COPERT	23
2. Contexto y consolidación de información	27
2.1 Área de estudio	28
2.2 Flota vehicular	30
2.3 Ventas de combustible	33
2.4 Malla vial	36
2.5 Cultivos y mecanización agrícola	39
2.6 Aforos vehiculares	41
2.7 Actividad vehicular diaria	44
2.8 Selección de estrategia de estimación	47
3. Cuento vehicular en tres ciudades del VGRC: Una ciudad densamente poblada, una ciudad agroindustrial y una ciudad industrial	53
3.1 Recolección y análisis de datos	54
3.2 Perfiles de tráfico vehicular	63

4. Combinación de enfoques <i>Bottom-up</i> y <i>Top-down</i> para la estimación de emisiones vehiculares	73
4.1 Estimación <i>Bottom-up</i> en Cali, Palmira y Yumbo.....	75
4.1.1 Enfoque metodológico.....	75
4.1.2 Emisiones vehiculares en Cali, Palmira y Yumbo	98
4.2 Estimación <i>Bottom-up</i> de la malla vial Nacional	108
4.2.1 Enfoque metodológico.....	108
4.2.2 Emisiones vehiculares de la malla vial nacional.....	111
4.3 Estimación <i>Top-down</i> de la cañicultura.....	117
4.3.1 Enfoque metodológico.....	117
4.3.2 Emisiones vehiculares asociadas a la cañicultura.....	121
4.4 Estimación <i>Top-down</i> de la agricultura de otros cultivos	125
4.4.1 Enfoque metodológico.....	125
4.4.2 Emisiones vehiculares por el uso de maquinaria agrícola en otros cultivos..	126
4.5 Estimación <i>Top-down</i> de vías locales de los otros municipios	128
4.5.1 Enfoque metodológico.....	128
4.5.2 Emisiones vehiculares de otros municipios	130
4.6 Emisiones vehiculares del área de estudio	134
4.7 Conciliación de emisiones de CO ₂	143
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	151
5.1 Conclusiones.....	151
5.2 Recomendaciones	155
Bibliografía	181

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Emisiones relacionadas a la actividad vehicular.	9
Figura 1-2: Polígonos de Thiessen de acuerdo con puntos de conteo vehicular en la ciudad de Bogotá.	20
Figura 1-3: Parámetros de entrada para la estimación de emisiones en Copert V. ..	24
Figura 2-1: Municipios del área de influencia del inventario regional.	29
Figura 2-2: Distribución del parque automotor registrado en los 25 municipios del área de estudio.	31
Figura 2-3: Distribución del parque automotor registrado en el área de estudio, agrupado por categoría vehicular y tipo de combustible, según datos reportados por el RUNT, 2021.	32
Figura 2-4: Distribución de las ventas de combustibles líquidos en cada municipio del área de estudio.	35
Figura 2-5: Ejemplo de vías con reducción de capacidad.	38
Figura 2-6: Distribución de cultivos en la región de estudio.	40
Figura 2-7: Tramos viales y estaciones con valores de TPD.	42
Figura 2-8: Malla vial con aforos vehiculares en horas pico en la ciudad de Cali.	43
Figura 2-9: Esquema metodológico de estimación de emisiones por enfoque <i>Top-down</i> y <i>Bottom-up</i>	51
Figura 3-1: Ubicación de los sitios de conteo en Cali, Palmira y Yumbo.	59
Figura 3-2: Captura del proceso Deodata.	60
Figura 3-3: Perfil horario a categorías vehiculares por tipo de vía en Cali, Palmira y Yumbo, durante un día típico.	65
Figura 3-4: Perfil horario a categorías vehiculares por tipo de vía en Cali, Palmira y Yumbo, durante un día atípico.	66
Figura 3-5: Conteo normalizado horario por ciudad y día típico en Cali, Palmira y Yumbo, y día atípico en Palmira y Yumbo.	67
Figura 3-6: Conteo normalizado diario por categoría de vehículo en las ciudades de Cali, Palmira y Yumbo, durante un día típico.	69
Figura 3-7: Conteo normalizado diario por categoría de vehículo en las ciudades de Cali, Palmira y Yumbo, durante un día atípico.	70
Figura 3-8: Distribución de las categorías de vehículos por tipo de vía durante un día normal en cada ciudad.	71
Figura 3-9: Distribución de categorías de vehículos por tipo de vía durante un día atípico en Palmira y Yumbo.	72

Figura 4-1:	Grilla para distribución de emisiones DROVE y municipios del área de influencia.	74
Figura 4-2:	Flujograma para la estimación de flujo vehicular en la malla vial usando polígonos de Thiessen.....	76
Figura 4-3:	Mapa de flujo vehicular durante un día típico de Cali.	79
Figura 4-4:	Mapa de flujo vehicular durante un día típico de Palmira.	80
Figura 4-5:	Mapa de flujo vehicular durante un día típico de Yumbo.	81
Figura 4-6:	Rutas de Sistema MIO según sus componentes.	84
Figura 4-7:	Rutas de TPCT en Santiago de Cali.....	87
Figura 4-8:	Emisiones de CO ₂ en un día típico de Cali por tramo vial (t/km).	100
Figura 4-9:	Emisiones de CO ₂ en un día típico de Palmira por tramo vial (g/km)....	101
Figura 4-10:	Emisiones de CO ₂ en un día típico de Yumbo por tramo vial (g/km)....	102
Figura 4-11:	Proporción de emisiones vehiculares por categoría vehicular en a) Cali, b) Palmira, c) Yumbo.	105
Figura 4-12:	Emisiones de contaminantes por tipo de combustible consumido.	106
Figura 4-13:	Distribución de emisiones <i>Bottom-up</i> en la malla vial nacional del área de estudio.	113
Figura 4-14:	Emisiones de PM ₁₀ asociadas a exhosto y resuspensión en la malla vial nacional, desagregadas por municipio.....	116
Figura 4-15:	Distribución municipal de las emisiones de PM ₁₀ resuspendido asociado a la cañicultura.	124
Figura 4-16:	Emisiones del área de estudio por contaminante y fuente.	135
Figura 4-17:	Desagregación espacial de las emisiones anuales de CO ₂ (t año ⁻¹) en las vías locales y nacionales del área de estudio.....	136
Figura 4-18:	Aporte por municipio a las emisiones de CO ₂ , según la fuente vehicular estimada en el área de estudio, a) Todos los municipios, b) “Otros municipios”.....	138
Figura 4-19:	Aporte por municipio a las emisiones de PM ₁₀ , según la fuente vehicular estimada en el área de estudio.	140
Figura 4-20:	Emisiones anuales de CO ₂ per cápita, asociadas al transporte en cada municipio del área de estudio.....	142
Figura 4-21:	Discrepancia entre la combinación de enfoques y el enfoque Top-down a partir de CDA.	147
Figura 4-22:	Discrepancia entre la combinación de enfoques y el enfoque <i>Top-down</i> a partir de ventas de combustible.....	148
Figura 4-23:	Comparativo de emisiones de CO ₂ estimadas por enfoque <i>Bottom-up</i> , <i>Top-down</i> (SICOM), <i>Top-down</i> (CDA), EN Cali, Palmira y Yumbo.....	150

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Ventas de combustibles en el área de estudio por tipo de combustible.	33
Tabla 2-2: Jerarquización vial para la región de estudio.	37
Tabla 2-3: Kilómetros de malla vial en el área de estudio.	38
Tabla 2-4: Resumen del procesamiento de datos provenientes de los CDA de Cali, Palmira y Yumbo.	46
Tabla 2-5: Actividad vehicular diaria por cada categoría, en las ciudades de Cali, Palmira y Yumbo.	47
Tabla 2-6: Información necesaria para aplicar cada enfoque de estimación de emisiones y su desagregación.	48
Tabla 2-7: Matrix de información disponible por municipio y fuente de emisión, y enfoque que puede ser aplicado.	49
Tabla 3-1: Localización y descripción de las fuentes de datos.	56
Tabla 3-2: Norma GEH utilizada por Highways England.	61
Tabla 3-3: Estimación de los perfiles de los vehículos a partir de los recuentos de vehículos.	61
Tabla 3-4: Campos clave del conjunto de datos.	63
Tabla 4-1: Agrupación de puntos de aforo para definición de polígonos de Thiessen.	76
Tabla 4-2: Relación de vehículos particulares y taxis.	82
Tabla 4-3: Frecuencia de buses de TPCT en Cali.	85
Tabla 4-4: Kilómetros recorridos por día y tipo de vehículos en los días evaluados.	89
Tabla 4-5: Actividad acumulada por categoría vehicular, estándar Euro y tipo de combustible, según los datos de CDA.	91
Tabla 4-6: Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular en $g\ km^{-1}$, para Cali.	93
Tabla 4-7: Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular en $g\ km^{-1}$, para Palmira.	95
Tabla 4-8: Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular en $g\ km^{-1}$, para Yumbo.	95
Tabla 4-9: Variables para la estimación de emisiones por resuspensión en vías pavimentadas y sin pavimentar.	97
Tabla 4-10: Factores de emisión de PM_{10} resuspendido, por categoría vehicular y tipo de vía.	97
Tabla 4-11: Emisiones diarias de contaminantes para los días evaluados.	99

Tabla 4-12:	Relación de expansión de emisiones para el mes de noviembre.....	103
Tabla 4-13:	Emisiones atmosféricas totales por fuentes móviles en Cali, Palmira y Yumbo.	103
Tabla 4-14:	Emisiones de PM ₁₀ por resuspensión para Cali, Palmira y Yumbo.	107
Tabla 4-15:	VKT diarios totales por tipo de vehículo y departamento.....	109
Tabla 4-16:	Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular en g km ⁻¹ , para la malla vial nacional.	110
Tabla 4-17:	Emisiones anuales en vías nacionales según departamento.	112
Tabla 4-18:	Emisiones exhosto anuales en las vías nacionales en el área de estudio (t año ⁻¹).	114
Tabla 4-19:	Factores de emisión de la UPME para cada tipo de combustible.	120
Tabla 4-20:	Emisiones anuales de la agricultura de caña de azúcar en el área de estudio.	122
Tabla 4-21:	Emisiones anuales de la agricultura de otros cultivos en el área de estudio.	127
Tabla 4-22:	Emisiones anuales de los otros municipios del área de estudio.....	131
Tabla 4-23:	Emisiones exhosto en las vías locales de cada uno de los otros municipios en t año ⁻¹	132
Tabla 4-24:	Desagregación municipal de las emisiones de PM ₁₀ resuspendido.	133
Tabla 4-25:	Estimación de consumo de combustible a partir de datos de CDA y RUNT.	145
Tabla 4-26:	Estimación de emisiones de CO ₂ en el área de estudio, a partir del <i>Top-down</i> con datos de CDA.....	146
Tabla 4-27:	Discrepancia entre los enfoques de estimación de emisiones de CO ₂ de Cali, Palmira y Yumbo.	149

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura Término

<i>CDA</i>	Centro de diagnóstico automotriz
<i>COPERT</i>	Computer Program to calculate Emissions from Road Transport, desarrollado por European Topic Centre on Air and Climate Change
<i>COV</i>	Compuestos orgánicos volátiles
<i>COVNM</i>	Compuestos orgánicos volátiles no metánicos
<i>CUP</i>	Corredor urbano principal
<i>CVC</i>	Corporación autónoma regional del Valle del Cauca
<i>DAGMA</i>	Departamento Administrativo de la Gestión del Medio Ambiente
<i>EDS</i>	Estaciones de servicio
<i>INVIAS</i>	Instituto Nacional de vías
<i>IVE</i>	
<i>MOVES</i>	
<i>PM₁₀</i>	Material particulado menor a 10 micras
<i>PM_{2.5}</i>	Material particulado menor a 2.5 micras
<i>RUNT</i>	Registro Único Nacional de Tránsito
<i>RVB</i>	Red vial básica
<i>SICOM</i>	Sistema de Información de Combustibles
<i>SUI</i>	
<i>TSP</i>	Partículas suspendidas totales
<i>UPME</i>	Unidad de Planeación Minero Energética
<i>VAP</i>	Vías arterias principales
<i>VAS</i>	Vías arterias secundarias
<i>VCM</i>	Vía de conectividad municipal
<i>VCP</i>	Vía colectora principales
<i>VCS</i>	VCS: Vía colectora secundaria
<i>VKT</i>	Vehículos kilómetro recorridos en una red de transporte
<i>VL</i>	Vías locales
<i>VNA</i>	Vía Nacional

Introducción

La contaminación del aire representa un factor de riesgo para la calidad de vida de la comunidad a nivel mundial. Se han reportado efectos adversos en la conservación del medio ambiente y relacionado con cambio climático, además de considerarse como uno de los mayores riesgos para la salud humana (Anenberg et al., 2019; Currie & Walker, 2011; Hao et al., 2022; Kampa & Castanas, 2008; Miller & Newby, 2020). Los principales efectos negativos en la salud de las personas están relacionados con la disminución de la función pulmonar y afectación del sistema cardiovascular. Los más afectados son los receptores sensibles (niños y adultos mayores), quienes están expuestos por periodos prolongados a concentraciones que exceden los límites máximos permisibles en el aire (HEI & IHME, 2019). Se ha estimado que reducir la contaminación del aire a los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), $PM_{2.5} < 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{10} < 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{NO}_2 < 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS, 2021), aumentaría la esperanza de vida en 0.6 años (Apte et al., 2018). Una de las razones de estas sorprendentes cifras es que la exposición a la contaminación del aire es casi omnipresente. Se estima que, en 2019, el 99% de la población residía en lugares que no cumplían con las directrices de calidad del aire, recomendadas por la OMS (PNUMA, 2021). En el mismo año, según el informe "State of Global Air/2020", la calidad del aire fue la cuarta causa de mortalidad, con 6.67 millones de muertes. En este sentido, el material particulado fino ($PM_{2.5}$), fue el contaminante criterio que causó mayores pérdidas de vida con más de 4 millones de muertes (HEI, 2020).

En algunos países en desarrollo, como Colombia, se han presentado ciertos desafíos relacionados con la calidad del aire, y en algunas regiones se ha informado que los niveles de contaminantes atmosféricos han aumentado. Esto probablemente debido a al aumento de la actividad industrial, el parque automotor y otras actividades generadoras de emisiones. De acuerdo con el Parlamento Europeo, el sector transporte genera cada

vez más emisiones, ya que más personas requieren más vehículos para su movilidad (Parlamento Europeo, 2019). A esto se le suma la exportación de vehículos usados a algunos países en desarrollo, donde la reglamentación y cumplimiento de las normas de emisión son más débiles y, por consiguiente, se generan mayores emisiones (PNUMA, 2020). Como compromiso ante la Convención Marco de las Naciones Unidas, Colombia debe elaborar estrategias de reducción de emisiones, con el objetivo de lograr la reducción del 51% de las emisiones globales de GEI al 2030. Para eso es necesario cuantificar las emisiones atmosféricas, y de esta forma desarrollar estrategias enfocadas a las fuentes de mayor emisión de contaminantes.

Las emisiones de contaminantes a la atmósfera se pueden cuantificar mediante el desarrollo de inventarios de emisiones. En el año 2017, en el marco de la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire en Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, presentó la “*Guía para la Elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas*”, un documento de referencia que incluye los criterios técnicos para determinar las emisiones asociadas a diferentes tipos de fuentes en un área geográfica y en un intervalo de tiempo. El resultado del inventario de emisiones atmosféricas (IEA) constituye un conjunto de datos que caracterizan las emisiones y consolidan la sumatoria de los contaminantes ($t \text{ año}^{-1}$) en función del tipo de fuente.

La estimación de emisiones vehiculares se calcula como el producto entre la actividad vehicular, ya sea consumo de combustible o kilómetros recorridos, y los factores de emisión, que tienen en cuenta las características de los vehículos. Existen dos enfoques principales para llevar a cabo dicha estimación: *Top-down* y *Bottom-up*. Se puede utilizar uno de los enfoques de acuerdo con la disponibilidad de recursos (información, presupuesto, entre otros) y el alcance y objetivo del inventario. El enfoque *Top-down* se basa en parámetros agregados sobre la actividad vehicular e información general, como las ventas de combustible, mientras que el enfoque *Bottom-up* emplea datos de actividad del vehículo como el conteo de vehículos, kilómetros recorridos y los factores de emisión según las características del parque automotor, con el fin de estimar las emisiones.

De acuerdo con el primer Inventario Nacional de Emisiones de GEI para Colombia, se estimó que en el país se emitieron 258.8 Mt de CO₂ EQ en el año 2012, de los cuales el 11% están asociadas al sector transporte, donde el transporte terrestre es el responsable del 91% (IDEAM et al., 2016). Por su parte, el Valle del Cauca, con 2.99 Mt de CO₂ EQ en 2012, fue la tercera región del país con mayores emisiones en el sector transporte, después de Bogotá D.C., y Antioquia. De las cuales, 2.8 Mt de CO₂ EQ se asocian al uso de combustibles en el transporte terrestre (IDEAM et al., 2016). En los últimos años se han realizado inventarios de GEI y contaminantes criterio por fuentes móviles en algunas ciudades del país como: Bogotá (Mangones et al., 2019; Pachón, 2020), Medellín, Manizales (Valencia, 2019), Barranquilla (Méndez, 2018), Cartagena (Álvarez et al., 2019), y en algunos municipios del Valle del Cauca como: Cali, Cartago, Tuluá, Jamundí y Buga (CVC & Fulecol, 2018; CVC & K2, 2018d, 2018a, 2018c, 2018b). Sin embargo, la mayoría de las estimaciones se encuentra focalizada en las principales ciudades del país. Desconociendo las posibles dinámicas regionales que se generan en dichas ciudades, o en algunos casos se encuentra desactualizada o se ha realizado con información general. Esto se debe principalmente a la falta de información disponible y al bajo presupuesto para la elaboración de inventarios de emisiones, en la mayoría de los casos. En otros casos, como el de esta investigación, se dispone de información de alta calidad para algunos municipios de una región, pero para otros la información disponible es insuficiente para una aproximación *Bottom-up*.

En consecuencia, el objetivo de esta tesis de maestría es desarrollar una propuesta metodológica para la estimación de emisiones de contaminantes criterio y GEI por la actividad vehicular (exhosto y resuspensión), combinando las aproximaciones *Top-down* (22 municipios del Valle geográfico del Río Cauca -VGRC y *Bottom-up* (Palmira, Yumbo y Cali). Si bien cada enfoque tiene sus ventajas y limitaciones, la combinación de ambos enfoques puede proporcionar una estimación más precisa de las emisiones vehiculares en los casos en que la información no está disponible o necesita actualizarse y el presupuesto es ajustado. Los resultados de esta investigación constituyen una herramienta que nos lleva a comprender de manera más clara las emisiones por fuentes móviles en la región y permiten priorizar campañas de medición para la elaboración de inventarios en municipios del VGRC. El inventario de emisiones por fuentes móviles contribuirá significativamente a la gestión de la calidad del aire en la región y es una

herramienta técnica para la definición de estrategias de reducción de las emisiones atmosféricas. Además, se convierte en una línea base o de referencia para futuras estimaciones de emisiones.

Objetivo general

Desarrollar una metodología híbrida que combina aproximaciones *Top-down* y *Bottom-up* para la estimación de emisiones de contaminantes criterio y GEI por actividad vehicular, y aplicarla al valle geográfico del río Cauca.

Objetivos específicos

- Consolidar la información disponible y proponer alternativas para la estimación de emisiones por fuentes móviles en el valle geográfico del río Cauca.
- Seleccionar y aplicar una estrategia de estimación de emisiones vehiculares adaptada a la información disponible para el VGRC
- Presentar y discutir elementos de comparación cuantitativos y cualitativos entre las metodologías *Top-down* y *Bottom-up* utilizadas.

Esta tesis está organizada en 5 capítulos, el capítulo 1. “Marco Teórico”, describe los conceptos frecuentemente utilizados en esta tesis. Incluye las variables que controlan cada uno de estos conceptos, con la finalidad de dar un marco conceptual.

El capítulo 2 “Contexto y consolidación de información”, aborda el objetivo específico 1. Este capítulo describe la región de estudio y presenta los datos de flota vehicular, ventas de combustible, malla vial que se logró consolidar en el diseño de la estrategia metodológica para la estimación de las emisiones vehiculares de los 25 municipios en el área de estudio.

El capítulo 3 “Cuento de tráfico en 3 ciudades del VGRC” presenta el análisis de los conteos vehiculares realizados en las ciudades de Cali, Palmira y Yumbo y como pueden

ser utilizados para la estimación de emisiones los perfiles de tráfico vehicular encontrados.

En el capítulo 4 “Combinación de *Bottom-up* y *Top-down* para la estimación de emisiones regionales” se presentan de forma ordenada las emisiones vehiculares estimadas en los 25 municipios del área de estudio. Combina los dos enfoques de estimación, incluye la determinación de emisiones de fuentes móviles de vías nacionales, por resuspensión y emisiones agrícolas. Además, incluye un análisis de conciliación entre las aproximaciones, las diferencias, fuentes de incertidumbre en cada método.

Finalmente, las conclusiones, recomendaciones y perspectivas se presentan en el capítulo 5.

Esta tesis se logró realizar mediante la ejecución de los convenios CVC-UNAL 036 de 2021 y No. 4133.010.27.1.041-2022 entre la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira y el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA). A través de los cuales se logró realizar los inventarios detallados *Bottom-up* de Cali, Palmira y Yumbo.

Los resultados de esta investigación serán publicados en revistas revisadas por pares, hacen parte de documentos técnicos y han sido presentados en conferencias:

Conferencias

Vargas, A., López L.D, Gutiérrez P, González L.A, Mangones S.C, Rueda G, Jimenez R. (2023). Estimación del inventario de emisiones asociadas a la actividad vehicular en el área de influencia de palmira y yumbo (Presentación oral). IX Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública. Santa Marta, Colombia.

Vargas, A., López L.D, Gutiérrez P, González L.A, Mangones S.C, Rueda G, Jimenez R. (2023). Vehicle exhaust emissions in a densely populated tropical inter-Andean valley (Poster). 20th GEIA conference Towards mitigating air pollutant and greenhouse gas emissions. Bruselas, Bélgica.

Documentos técnicos

UNAL & CVC. (2023). Inventario de emisiones a la atmósfera por fuentes móviles para el municipio de Palmira – año base 2021. Cali, Colombia

UNAL & CVC. (2023). Inventario de emisiones a la atmósfera por fuentes móviles para el municipio de Yumbo – año base 2021. Cali, Colombia

UNAL & DAGMA. (2023). Inventario de emisiones a la atmósfera por fuentes móviles para el municipio de Santiago de Cali – año base 2022. Cali, Colombia

Manuscritos

Vargas-Burbano A. C., López L.D., Gutiérrez-Espada P., Arias-Arana D., Chávez J., Mangones S. C., Rueda-Saa G.H., Jiménez, R., (2023). A machine-learning derived traffic count dataset for three cities in an inter-Andean valley: A densely urbanized, an agro-industrial, and an industrial city. *Transpormetrica B*.

Vargas-Burbano A. C., López L.D., Gutiérrez-Espada P., Mangones S. C., Rueda-Saa G.H., Jiménez, R., (2023). Combining bottom-up and top-down methodologies for regional inventories estimation: a case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.

1. Marco teórico

Las emisiones pueden ser partículas o gases que se liberan al aire por diversas fuentes (US EPA, 2016). Los gases son sustancias y compuestos gaseosos que influyen en la composición de la atmósfera y pueden provocar alteraciones en el ambiente y la salud de las personas. Por otro lado, las partículas tienen una amplia gama de tamaño, forma y composición. Están constituidas por una mezcla heterogénea de partículas líquidas y/o sólidas de origen orgánico e inorgánico, con una composición variable de acuerdo con las fuentes de emisión. Además, las partículas pueden ser primarias si son emitidas directamente a la atmósfera, o secundarias, si se producen en la atmósfera a partir de las reacciones químicas de gases precursores.

Las principales fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos están relacionadas con descargas en fuentes fijas, fuentes móviles, fuentes biogénicas y fuentes de área (US EPA, 2016). Las emisiones por fuentes fijas son aquellas que se descargan al aire en un lugar específico o puntual, y generalmente son generadas por fábricas, plantas de energía eléctrica y algunos restaurantes. Las emisiones por fuente móviles se producen por la actividad vehicular, tanto por la combustión de combustibles fósiles, como por el desgaste del vehículo y la resuspensión del material particulado del suelo. Por otro lado, las emisiones biogénicas o naturales se generan por la vegetación, procesos de digestión aerobia y anaerobia, los volcanes, entre otros. Las fuentes de área se caracterizan por ser abundantes y dispersas, y se generan con frecuencia en la explotación de minas a cielo abierto, estaciones de servicio y rellenos sanitarios (MADS, 2017).

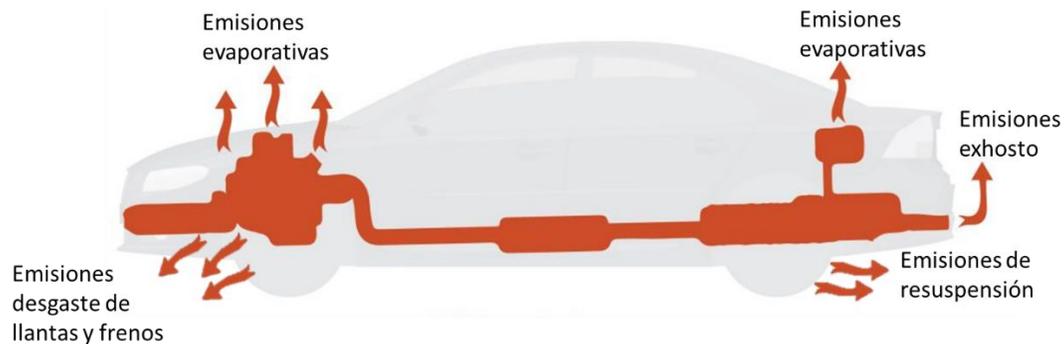
La gestión de la calidad del aire demanda esfuerzos significativos en lo que respecta al monitoreo y seguimiento de contaminantes criterio, tales como el CO, NO₂, SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5}. Estos contaminantes atmosféricos se encuentran presentes en todas partes, y sus efectos repercuten directamente en la salud de las personas. Además, resulta de vital

importancia llevar a cabo un seguimiento minucioso de las emisiones de gases de efecto invernadero, como el CO₂, CH₄, N₂O y el O₃, ya que estos gases desempeñan un papel primordial en el fenómeno del cambio climático (MADS, 2017).

1.1 Emisiones por fuentes móviles

Existen múltiples productos creados por el hombre los cuales contribuyen a la alteración de la calidad del aire, siendo el automóvil una fuente relevante de contaminación atmosférica y con grandes aportes al cambio climático. Se estima que existen más 1400 millones de automóviles en el mundo en la actualidad, casi todos funcionando con gasolina (Amadoz, 2022). Debido a los cambios en el proceso de combustión, se generan compuestos diferentes al CO₂ (Özener et al., 2014). Los principales compuestos de las emisiones vehiculares son los precursores de ozono (CO, NO_x, COVNM, gases efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O), sustancias acidificantes (NH₃, SO₂), material particulado (MP), especies carcinogénicas (hidrocarburos aromáticos policíclicos (PHA) y compuestos orgánicos persistentes (COP), sustancias tóxicas (dioxinas y furanos) y metales pesados (EEA, 2019).

Las emisiones vehiculares se descargan al aire a través del tubo de escape o exhosto, pueden ser en frío, antes de que el motor alcance la temperatura normal de funcionamiento, o en caliente, cuando el motor está a una temperatura estable. También se generan emisiones evaporativas por la volatilización del combustible, emisiones de partículas por la resuspensión desde el suelo y por el desgaste del vehículo (frenos, llantas, carrocería) (Amato et al., 2009; MADS, 2017).

Figura 1-1: Emisiones relacionadas a la actividad vehicular.

Fuente: Adaptado de ACELA, n.d.

Las emisiones evaporativas de los vehículos se producen por la evaporación de los compuestos orgánicos volátiles (COV) de los combustibles. Las emisiones se liberan a la atmósfera a través de la ventilación del tanque de combustible, el sistema de ventilación del cárter y otros componentes del sistema de combustible (ACELA, n.d.). Están compuestas principalmente por COV, OC y óxidos de nitrógeno (NO_x) (Liu et al., 2015; MADS, 2017; Ntziachristos & Samaras, 2021). Un mayor impacto de las emisiones evaporativas depende principalmente de: 1) La temperatura ambiente, por lo que en climas cálidos tienden a ser mayores, 2) Temperatura del motor, el calentamiento del motor aumenta la tasa evaporativa de los COV, 3) Sistema de evaporación, tanto el mantenimiento como el diseño del sistema de evaporación permiten capturar y recircular los vapores, por lo que el correcto funcionamiento permite disminuir las emisiones, 4) Tipo de combustible, de acuerdo con el contenido de COV de los combustibles se generan las emisiones, por lo que la gasolina al contener más hidrocarburos volátiles genera mayores emisiones al diésel (Liu et al., 2015; Song et al., 2020).

Al igual que las emisiones exhosto, las emisiones evaporativas pueden tener un impacto negativo en la calidad del aire y contribuir a problemas de salud pública (Gordian et al., 2010; Luo et al., 2022; Nault et al., 2021; Soni et al., 2018; Srivastava et al., 2022). Además de los riesgos para la salud humana, las emisiones evaporativas también pueden tener efectos negativos en el medio ambiente, como la formación de smog y la lluvia ácida (Zhou et al., 2023). Sin embargo, en esta investigación no se tendrá en cuenta las emisiones evaporativas, ya que los factores de emisión y datos obtenidos fueron desproporcionados, comparados con los obtenidos en estudios realizados en

Manizales y Bogotá (Trejos, 2021; Jaime 2022). De manera específica se incluirá la estimación de las emisiones por fuentes móviles (emisiones exhosto) y las emisiones por resuspensión on road y of road.

Las emisiones en carretera, también conocidas como emisiones “on-road”, se refieren a las emisiones que se producen durante la circulación de vehículos motorizados en las carreteras y calles públicas del territorio, tales como motocicletas, vehículos de pasajeros, buses, camiones, entre otras. Estas emisiones son una combinación de las emisiones de escape, las emisiones evaporativas y las emisiones por resuspensión, las cuales son liberadas directamente a la atmósfera o pueden ser transformadas en aerosoles secundarios mediante procesos químicos en la atmósfera (MADS, 2017).

Las emisiones fuera de carretera, también conocidas como emisiones “off-road”, son las generadas por los vehículos, máquina móvil, equipo industrial transportable o cualquier vehículo con o sin carrocería, que no han sido diseñados para el transporte de pasajeros o carga en carretera. Son generadas regularmente en las plataformas industriales, la agricultura por los tractores, trilladoras y en la construcción por motoniveladoras, excavadores hidráulicos, etc. Al igual que las emisiones “on-road”, estas emisiones son una mezcla de las emisiones de escape y las emisiones evaporativas, y también pueden contribuir al cambio climático y la contaminación del aire (MADS, 2017).

Emisiones exhosto

Las emisiones del escape se generan a través del proceso de combustión en vehículos motorizados. Los principales componentes de esta combustión son CO₂ y H₂O. Además, la combustión produce una variedad de subproductos que se originan debido a la oxidación incompleta del combustible, como CO, hidrocarburos (THC) y partículas en suspensión. También se generan a partir de la oxidación de sustancias no combustibles presentes en la cámara de combustión, como los NO_x a partir del nitrógeno en el aire, y SO_x a partir del azufre presente en el combustible y el lubricante, entre otros.

El proceso de combustión puede darse tanto en motores de encendido por chispa (motores ciclo Otto), como en motores de encendido por compresión (motores ciclo diésel) (Basshuysen & Schafer, 2016; Mollenhauer & Tschoeke, 2010). No obstante, las emisiones no solo dependen del tipo de combustible, también dependen de varios factores como la aceleración del automóvil, el modo de conducción, resistencia al viento, la temperatura, presión y la eficiencia del dispositivo de control de emisiones, entre otros.

Los motores de gasolina y otros motores de encendido por chispa son usados en vehículos pequeños de hasta 3.5 t de peso bruto vehicular (GVW), principalmente debido a su relación potencia/peso superior, pero también por menor ruido y operación más refinada (Ntziachristos & Samaras, 2021). En el caso de vehículos tipo motocicleta se han usado ampliamente los motores de dos tiempos por su alta relación potencia/peso, sin embargo, su uso ha disminuido debido a las reglamentaciones de emisiones. Por otro lado, los motores diésel (y otros de encendido por compresión) suelen ser utilizados para tareas de carga pesada debido a su mayor eficiencia de combustible. Sin embargo, en los últimos años en los países europeos ha habido un cambio significativo hacia los motores diésel en los vehículos livianos (Ntziachristos & Samaras, 2021).

Los contaminantes emitidos por los vehículos tienen un impacto negativo en la calidad del aire y pueden contribuir a los problemas de salud pública (Bhandarkar, 2013). La congestión o alta densidad del tránsito aumenta los niveles de contaminación del aire, lo que está relacionado con mayores tasas de mortalidad infantil y el deterioro en la salud de los bebés (Currie & Walker, 2011; Knittel et al., 2016). En particular, la exposición a los gases de escape tipo diésel genera efectos nocivos en el sistema cardiovascular de las personas (Miller & Newby, 2020). Igualmente, se ha asociado con trastornos mentales (Conceição et al., 2022; Hao et al., 2022). Asimismo, las emisiones de escape también pueden contribuir al cambio climático debido a la liberación de gases de efecto invernadero, tales como el CO₂ (Anenberg et al., 2019).

Con el fin de cumplir con la normativa concerniente a las emisiones, los fabricantes de vehículos han implementado diversos dispositivos de postratamiento, tales como convertidores catalíticos y filtros de partículas diésel (DPF), con el fin de disminuir las emisiones contaminantes. Así mismo, se han hecho mejoras para la reducción de consumo de energía. Estas mejoras incluyen nuevos tipos de motores de combustión

interna, como inyección directa de gasolina (GDI), encendido automático controlado (CAI), encendido por compresión de carga homogénea (HCCI); nuevos combustibles, como GNV, sistemas de propulsión alternativos, como los híbridos (es decir, una combinación de un motor de combustión interna y un motor eléctrico), vehículos de pila de combustible, eléctricos, etc. (Gago, 2017; Ladino, 2019).

Emisiones por resuspensión

Las emisiones vehiculares por resuspensión son un tipo de emisiones que se producen cuando las partículas finas, tales como el polvo y los contaminantes del pavimento, son levantadas por la turbulencia de los vehículos en movimiento y se liberan a la atmósfera. Estas emisiones se producen principalmente en las carreteras pavimentadas y sin pavimentar que son transitadas por vehículos. Debido a su origen, estas emisiones son diferentes a las emisiones exhosto y están constituidas principalmente por partículas, cuya composición es diversa ya que pueden provenir del suelo, del desgaste de los frenos, o llantas. La tasa de emisión depende principalmente del peso de los vehículos, el estado de las vías, y la humedad del suelo (US EPA, 2011).

En las vías pavimentadas, el aporte de partículas se genera principalmente por el desgaste de frenos, neumáticos y la resuspensión del material fino sedimentado en la vía. De acuerdo con el uso de la vía, la cantidad y composición de las partículas puede variar. En vías de uso industrial los sedimentos son afectados proporcionalmente por el tránsito de vehículos pesados, dependen de la carga y descarga de materiales y el derrame de líquidos. Mientras que en vías residenciales o de conexión municipal, los sedimentos dependen principalmente de la abrasión de las ruedas y desgaste de frenos (Amato et al., 2009; US EPA, 2011).

En vías sin pavimentar la resuspensión de partículas se asocia principalmente por la pulverización del material depositado en la superficie, que, junto con la fuerza abrasiva de las llantas, levanta una estela turbulenta detrás del vehículo (Mathissen et al., 2012). Las partículas generadas durante este proceso también dependen de las características,

contenido de limo del suelo y su humedad, así como también del tipo de vehículo que frecuentan las vías sin pavimentar (US EPA, 2011). Los suelos con mayor contenido limoso, secos, y con tránsito de vehículos pesados, son los que mayores emisiones generan.

1.2 Inventario de emisiones

Es una herramienta cuantitativa que representa las emisiones contaminantes generadas en un área delimitada. Los inventarios de emisiones disponen de un conjunto de datos que caracterizan las emisiones, de acuerdo con el tipo de fuente y contaminantes emitidos. Además, son una herramienta fundamental para comprender la contaminación del aire o afectación de la calidad del aire en un área urbana o intermunicipal, debido a las emisiones de la flota vehicular. Los inventarios de fuentes móviles proporcionan información acerca de las emisiones contaminantes del parque automotor, tales como los precursores de ozono troposférico (CO, NO_x, COV), gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O), sustancias acidificantes (NH₃, SO₂) y material particulado (MP), entre otros contaminantes. Por consiguiente, los inventarios de emisiones son empleados durante el proceso de planeación y la gestión de la calidad del aire del lugar de estudio, ya que proporcionan una visión general de las causas de incumplimiento de las normas de calidad del aire y datos fundamentales para los modelos de calidad aire (SMARN et al., 2009).

Para la estimación de las emisiones por fuentes móviles, es necesario determinar el factor de actividad, el cual se refiere al dato que contiene la información sobre la magnitud de la actividad generadora de la emisión y se relacionan con el consumo de combustible y kilómetros recorridos. Estos datos provienen de datos estadísticos locales y oficiales. En el cálculo de las emisiones vehiculares, es necesario considerar factores de emisión representativos que relacionen la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión del contaminante, que, en general, para las fuentes móviles se refiere al consumo de combustible y/o kilómetros recorridos.

En la Ecuación (1-1) se presenta la fórmula general para la estimación de emisiones vehiculares en ruta.

$$E_{ij} = FE_{i,j} \times FA_j \times N_{veh,j} \quad (1-1)$$

Donde:

E_{ij} es la emisión del contaminante i para cada categoría vehicular j . $FE_{i,j}$, son los factores de emisión ajustados a condiciones locales. FA_j , es el factor de actividad vehicular. $N_{veh,j}$, es el número total de vehículos de cada categoría vehicular j .

Enfoque *Top-down*

El enfoque *Top-down* se basa en la estimación de las emisiones en una escala más amplia y global, a partir de la observación de los patrones de actividad vehicular diaria. Este enfoque requiere el uso de valores agregados o información general para inferir las emisiones de una región o país (MADS, 2017). Una de las ventajas del enfoque *Top-down* es que permite obtener estimaciones de emisiones a gran escala, lo que resulta útil para planificar políticas públicas y tomar decisiones en el ámbito gubernamental. Sin embargo, una desventaja es que no permite obtener información detallada sobre las emisiones por cada tipología vehicular, lo que es necesario para llevar a cabo estrategias específicas de control de emisiones. Entre las técnicas para la estimación de emisiones por el enfoque *Top-down* están:

- Actividad diaria a partir de datos de Centros de Diagnóstico Automotor (CDA)
- Análisis de ventas de combustible
- Rendimiento de combustible

- ***Top-down por CDA***

Uno de los métodos para aplicar este enfoque es mediante la actividad reportada en centros de diagnóstico automotor (CDA). Los CDA son establecimientos donde los propietarios de vehículos pueden llevar sus vehículos para realizar pruebas de emisiones y asegurarse de que cumplan con los estándares establecidos por la ley. Estos establecimientos suelen reportar los resultados de las pruebas de emisiones a las autoridades competentes, lo que permite obtener información sobre la actividad vehicular.

Esta técnica se fundamenta en la estimación del consumo de combustible del parque automotor registrado en la ciudad, con base en reportes de consumo de combustible para cada tipo de vehículo y la actividad promedio diaria de los vehículos. Se utiliza regularmente para la estimación de las emisiones de CO₂. Sin embargo, esta metodología tiene limitaciones, ya que se asume que la muestra de vehículos que realizan la revisión técnico-mecánica en los CDA del municipio es representativa de la flota vehicular que circula, sin tener en cuenta la evasión de la revisión técnico-mecánica en motocicletas. Para los vehículos particulares, la revisión es requerida a partir de los 6 años de rodamiento. Se asume que todos los vehículos que realizan la revisión en la ciudad son parte del parque automotor de la ciudad y que la flota que circula en el municipio, está registrada en la Secretaria de Tránsito del municipio. Otro supuesto es que todos los vehículos de una categoría vehicular consumen la misma cantidad de combustible, lo cual puede ser variable de acuerdo con la edad del vehículo, el mantenimiento de este y la incorporación de nuevas tecnologías.

▪ ***Top-down por ventas de combustible***

Otro método para aplicar el enfoque *Top-down*, es la estimación de las emisiones a partir del reporte de ventas de combustible. Se fundamenta en que la cantidad de combustible vendido en una región puede usarse como un indicador de la cantidad de energía consumida por los vehículos en esa región. Al conocer los factores de emisión de cada tipo de combustible, se puede estimar la cantidad de emisiones vehiculares generadas en dicha región. El reporte de las ventas de combustible puede ser obtenido a través de las compañías petroleras y/o organismos gubernamentales que regulan la venta de combustibles. Sin embargo, este procedimiento presenta limitaciones al asumir que solo el parque automotor de la ciudad compra el combustible, sin considerar que las dinámicas de conexión regionales podrían influir en las ventas. Además, no permite la identificación de emisiones de fuentes específicas de contaminación, tales como las emisiones de vehículos livianos, pesados o buses. No obstante, esta aproximación sigue siendo una herramienta valiosa para la estimación de emisiones vehiculares a nivel regional o nacional.

Enfoque *Bottom-up*

La estimación de emisiones vehiculares mediante el enfoque *Bottom-up* se basa en la recopilación de datos detallados de vehículos y su actividad en una zona específica. Este enfoque se centra en la caracterización detallada de los vehículos, teniendo en cuenta factores como la marca, el modelo, el año, el tipo de combustible, el desgaste del motor, la velocidad de circulación, la carga, kilometraje, entre otros, para determinar los factores de emisión de la flota vehicular. Posteriormente, a través de un modelo matemático basado en el tipo de vehículo, velocidad promedio y kilometraje recorrido, se puede estimar la actividad vehicular en la zona y, junto con los factores de emisión, estimar las emisiones por fuentes móviles.

La estimación de emisiones vehiculares mediante el enfoque *Bottom-up* se basa en la recopilación de datos detallados de vehículos y su actividad en una zona específica. Este enfoque es particularmente útil para estimar las emisiones de vehículos en zonas urbanas densamente pobladas, donde la actividad de los vehículos es muy variada y diversa. Además, el enfoque *Bottom-up* brinda una mayor precisión en la estimación de las emisiones vehiculares, ya que se tiene en cuenta la variabilidad en las características de los vehículos y su actividad. Sin embargo, es un enfoque costoso, requiere tiempo y personal capacitado para estimar los factores de emisión y desarrollo del modelo. Entre las técnicas para la estimación de emisiones mediante el enfoque *Bottom-up* están:

- Conteos vehiculares
- Modelos de transporte

- **Conteos vehiculares**

El enfoque *Bottom-up* a partir de conteos vehiculares es una técnica empleada para estimar las emisiones de contaminantes atmosféricos generadas por los vehículos en un área o región determinada. Este enfoque se fundamenta en la recopilación de datos de conteo vehicular y la utilización de modelos matemáticos para estimar las emisiones de los vehículos. El enfoque *Bottom-up* a partir de conteos vehiculares es particularmente útil en zonas donde no se dispone de datos precisos sobre la actividad de los vehículos.

El primer paso en el enfoque *Bottom-up* es la recopilación de datos de conteo vehicular en una zona determinada. Estos datos pueden ser obtenidos mediante diversas técnicas, tales como cámaras de video, sensores de detección de vehículos y sistemas de aforo vehicular. Una vez que se han obtenido los datos, se utiliza un modelo matemático para estimar las emisiones producidas por los vehículos en esa zona.

- **Modelos de transporte**

El enfoque *Bottom-up* a partir de un modelo de transporte es una técnica que se basa en la creación de un modelo de transporte a partir de datos socioeconómicos y de transporte, como el número de habitantes, la distribución geográfica de los lugares de trabajo y la oferta de transporte público y privado. A partir de datos socioeconómicos y de transporte, tales como el número de habitantes, la distribución geográfica de los lugares de trabajo y la oferta de transporte público y privado. Con estos datos, se simulan los patrones de movilidad de la población y se estima la cantidad de tráfico vehicular en una zona determinada, lo que describe la demanda de viajes y la elección del modo de transporte por parte de los usuarios, así como el tráfico vehicular resultante.

De acuerdo con los datos de tráfico, se pueden estimar las emisiones de contaminantes de cada vehículo y de toda la flota vehicular en la zona evaluada. Este enfoque permite evaluar las emisiones en diferentes escenarios, por ejemplo, al introducir nuevas medidas de transporte público o al construir nuevas infraestructuras de transporte.

- **Observaciones satelitales**

Las observaciones satelitales son una técnica *Bottom-up* utilizada para estimar las emisiones vehiculares a partir de datos satelitales que permiten determinar la concentración de contaminantes en la atmósfera, como el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el monóxido de carbono (CO). A partir de estas mediciones, se pueden identificar las áreas de alta concentración de contaminantes y pueden ser asociadas con la presencia de fuentes de emisiones, tales como carreteras o áreas urbanas.

Asimismo, se utilizan datos de tráfico y de actividad económica para estimar la cantidad de emisiones de contaminantes producidas por los vehículos en las áreas identificadas. Los datos obtenidos se emplean para calibrar los modelos de dispersión de

contaminantes, para estimar las emisiones de vehículos en toda la zona evaluada, y proporcionar una visión detallada de la distribución espacial de las emisiones vehiculares.

1.3 Factor de actividad

En la estimación de emisiones por fuentes móviles, el factor de actividad se refiere al dato que contiene la información sobre la magnitud de la actividad que genera la emisión. Se relacionan con el consumo de combustible y los kilómetros recorridos, de acuerdo con las categorías vehiculares del inventario, en un período de tiempo determinado. La información presentada puede ser detallada o general, según el enfoque metodológico empleado. De acuerdo con el enfoque *Top-down* previamente expuesto, la actividad vehicular puede ser obtenida mediante el análisis de los datos reportados por los CDA, las ventas de combustible, o la estimación del consumo de combustible a partir de la flota vehicular registrada y el rendimiento vehicular. Mientras que, para el enfoque *Bottom-up* los datos de actividad son más detallados y pueden ser obtenidos a partir de conteos vehiculares, conocido como tráfico promedio diario y la aplicación de modelos de transporte del área de estudio; encuestas de tráfico, datos de viajes de transporte público (CONAMA, 2009).

Cabe señalar que la precisión del factor de actividad puede variar en función de la fuente de datos utilizada y la metodología de estimación empleada. Por lo tanto, se recomienda el uso de múltiples fuentes de datos y técnicas de estimación para mejorar la precisión de la estimación de emisiones vehiculares.

El factor de actividad para la estimación bajo el enfoque *Top-down* de este proyecto fue el consumo de combustible líquido reportado por el Sistema de Información de Combustibles (SICOM), así como el gas natural vehicular (GNV) por el Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios (SUI). Esta información se explica con más detalle en la sección 4.5. Por otro lado, el enfoque *Bottom-up* estimó las emisiones a partir de conteos vehiculares, los cuales se detallan en la sección 4.1. Estas

estimaciones fueron extrapoladas a toda la malla vial de los municipios estudiados mediante la técnica de polígonos de Thiessen, que se describe a continuación.

Polígonos de Thiessen

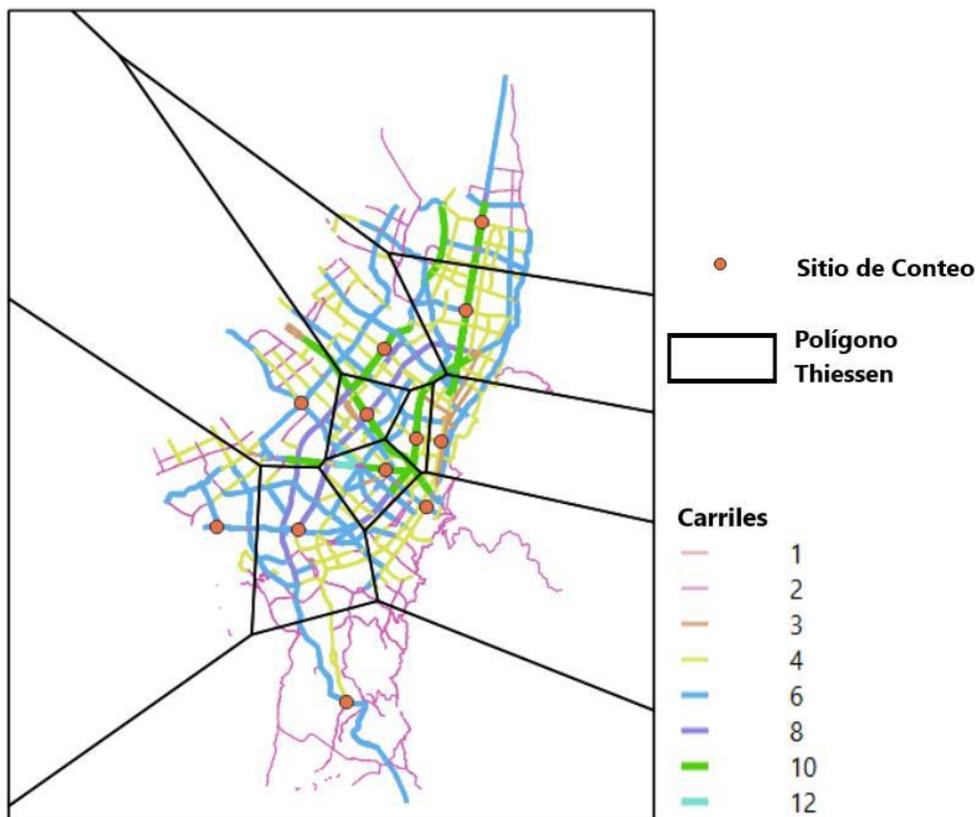
Los Polígonos de Thiessen son una técnica utilizada en geografía y cartografía para establecer una división de un espacio en regiones contiguas. También se conocen como diagramas de Voronoi o teselaciones de Dirichlet, en honor a los matemáticos que han desarrollado esta técnica.

Los polígonos de Thiessen se establecen a partir de una serie de puntos de interés o de muestra en un espacio geográfico. Se utilizan estos puntos como base para crear áreas de influencia alrededor de cada punto, de manera que cada punto esté en el centro de su propio polígono de Thiessen, de forma tal que la distancia euclidiana desde cualquier lado de los polígonos sea igual a cualquiera de los puntos más cercanos y las áreas de influencia de los puntos vecinos no se superponen. En donde se asumen características propias del punto de medición que lo genera.

Esta técnica es útil en diversos campos, como la planificación urbana, la gestión de recursos naturales y la epidemiología. Se han utilizado en materia de Transporte para determinar áreas de influencia de aeropuertos, así como para establecer la cobertura de centros médicos (Cuza-Sorolla et al., 2021). Los Polígonos de Thiessen se utilizan con frecuencia en la planificación y el diseño de infraestructuras de transporte, ya que permiten obtener estimaciones precisas del flujo vehicular en áreas donde no se han realizado mediciones directas. Además, esta técnica puede usarse para simular el comportamiento del tráfico en diferentes escenarios y para evaluar el impacto de nuevas infraestructuras en el flujo vehicular de una zona determinada.

En cuanto a la extrapolación de flujo vehicular, los Polígonos de Thiessen son una técnica utilizada para estimar el flujo vehicular en áreas donde no se han realizado mediciones directas. Esta técnica se fundamenta en la idea de que los vehículos que transitan por una carretera determinada son atraídos por la misma debido a factores como la ubicación, la accesibilidad y las características del camino (**Figura 1-2**).

Figura 1-2: Polígonos de Thiessen de acuerdo con puntos de conteo vehicular en la ciudad de Bogotá.



Fuente: SDA, 2018

Para aplicar esta técnica, se emplean datos de flujo vehicular medidos en puntos estratégicos de una red vial, los cuales son empleados para generar polígonos de Thiessen alrededor en cada punto de medición. Posteriormente, se estima el flujo vehicular en una ubicación determinada en el área de influencia de cada polígono, mediante la utilización de factores tales como la distancia al punto de medición, la capacidad de la carretera y la demanda de tráfico en la zona. También, son utilizados para generar áreas de influencia en función del tipo de vía de cada punto de medición y estimar la actividad vehicular de las vías de la misma tipología en el área de influencia. Esta última aproximación es la que se aplica en esta investigación, en función del número de carriles de cada vía y la longitud vial. Por lo tanto, para cada tipología vial el flujo vehicular se determina aplicando la ecuación (1-2).

$$FV_{n,c,h,d,t} = FN_{t,h,d} * C_n \quad (1-2)$$

Donde:

$FV_{n,c,h,d,t}$ Flujo vehicular en el segmento vial “n”, para la tipología vehicular “m”, en la hora “h” del día “d” en el polígono de Thiessen “t”. $FN_{t,h,d}$ Flujo vehicular normalizado por carril del nodo “t”, para la hora “h” del día “d”. C_n Número de carriles del segmento vial “n”

1.4 Factores de emisión

Los factores de emisión son valores empleados para calcular las emisiones de contaminantes provenientes de vehículos. Se trata de un valor representativo que relaciona la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión del contaminante, que, en general corresponde al consumo de combustible y/o kilómetros recorridos. El factor de emisión puede ser obtenido mediante una medición directa, un balance de masa o investigaciones a nivel local, nacional o internacional. La medición directa se realiza mediante analizadores de emisiones de gases utilizados en las pruebas de dinamómetro de chasis, en el caso de vehículos a gasolina y motocicletas, o en un banco de pruebas para motores pesados, en el caso de vehículos a diésel. En tanto que el balance de masa se fundamenta en la aplicación inversa de modelos de dispersión en condiciones controladas (túneles vehiculares y cañones urbanos). Las investigaciones tienden a utilizar software o modelos que pueden ajustarse de acuerdo con las condiciones específicas del municipio o país estudiado, así como también pueden obtenerse a partir de mediciones directas, balances de masa, o documentos compilatorios como la Guía de inventarios de emisiones contaminantes al aire de la Agencia Ambiental Europea, para cada categoría vehicular estudiada (EEA, 2019; MADS, 2017).

La estimación de factores de emisión a través de softwares o modelos ha sido utilizada ampliamente (Cifuentes et al., 2021; Dey et al., 2019; Freire Lascano, 2021; Grassi et al., 2021; Vasques & Hoinaski, 2021; Viteri et al., 2023). Esto debido a la complejidad de estimación de este tipo de emisiones, ya que su aplicación involucra diferentes tipos de emisiones y están en función de diversas características de los vehículos que transitan en cada zona de estudio tales como el tipo de vehículo, el año y el modelo del vehículo,

la tecnología vehicular, el combustible, el kilometraje recorrido y los ciclos de conducción, entre otros.

Existen diferentes modelos computacionales de emisiones vehiculares, como:

- MOBILE, una serie de modelos desarrollada en Estados Unidos por la EPA, basada en los resultados de las pruebas estándar nacionales de chasis dinamométrico (FTP – federal test procedure y SFTP - supplemental federal test procedure) (EPA, 2016). Sin embargo, fue remplazado por el modelo MOVES (motor vehicle emission simulator). (EPA, 2004), ya que no tiene en cuenta las normas de emisión a partir del 2004.
- MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator), es un simulador de emisiones vehiculares en los Estados Unidos (Contaminantes criterio, gases de efecto invernadero y sustancias tóxicas), tanto a nivel nacional como a nivel de condado (EPA, 2020). Fue desarrollado por la EPA, con base en la introducción gradual de las normas federales de emisiones, la actividad de vehículos, los combustibles, las temperaturas, la humedad y las actividades de control de emisiones, como los programas de inspección y mantenimiento. Permite la entrada detallada de datos para el ajuste de los factores de emisión a las condiciones de cada lugar de estudio (EPA, 2020; Vallamsundar & Lin, 2011).
- IVE (International Vehicle Emissions Model), un programa diseñado principalmente para naciones en desarrollo, con base en factores de emisión por defecto y una serie de factores de corrección de acuerdo con variables locales (Nicol Davis & Tolvet, 2008). Fue desarrollado por la Universidad de California en Riverside, Center for Environmental Research and Technology (CE-CERT), Global Sustainable Systems Research (GSSR), y The International Sustainable Systems Research Center (ISSRC) (Davis et al., 2005).
- COPERT (International Vehicle Emissions Model), un modelo desarrollado inicialmente para condiciones de la Unión Europea, pero que en la actualidad se pueden adaptar algunos parámetros, para el ajuste de los FE a condiciones locales del sitio de estudio.

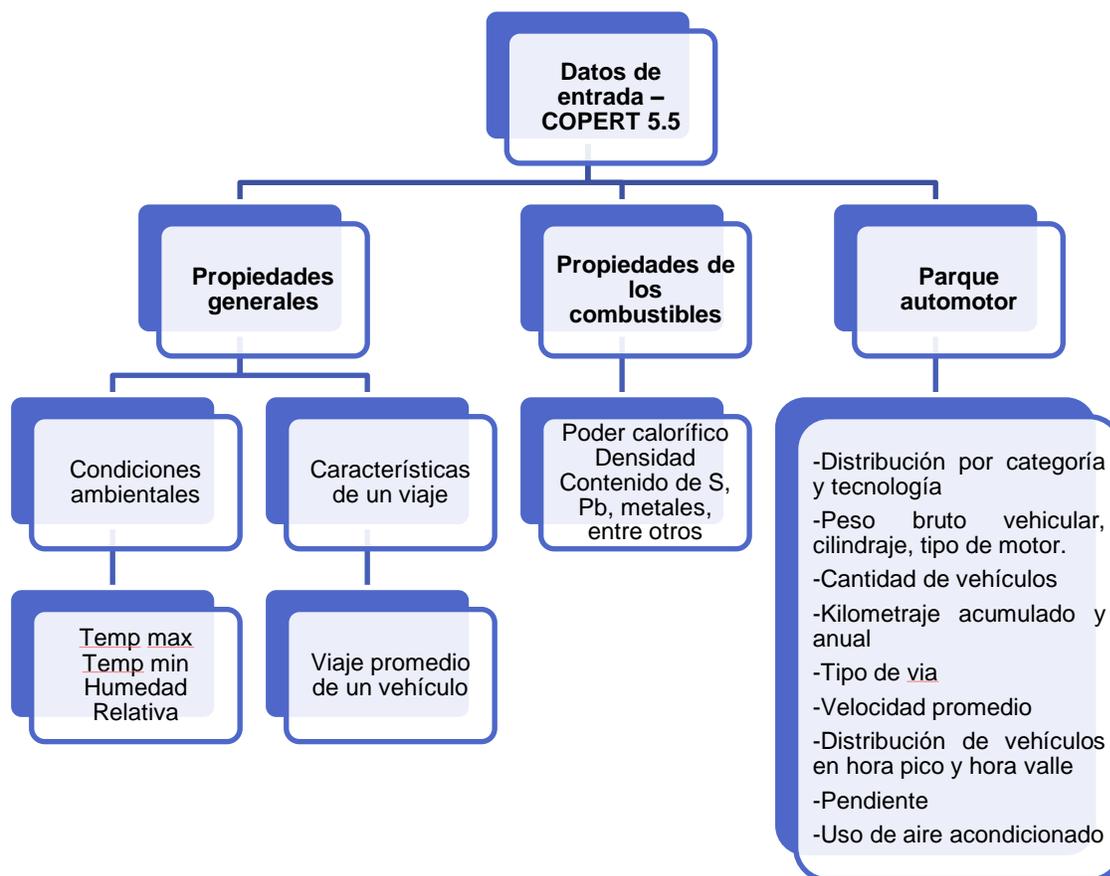
Estos modelos han sido desarrollados bajo condiciones específicas de un área de estudio, sin embargo, permiten ser aplicados para otras zonas de estudio, bajo el ajuste de diferentes parámetros relacionados con el parque automotor, combustibles, entre otros. Todos los modelos difieren principalmente en el tipo y cantidad de información de entrada, contaminantes estimados, las tecnologías vehiculares que contienen y tipo de corrección y/o ajuste.

Para la presente investigación se seleccionó el Software Copert para la determinación de los factores de emisión. Lo anterior teniendo en cuenta que se disponía de la información necesaria y porque ha sido aplicado en otros estudios de emisiones vehiculares desarrollados en el país (Arroyave, 2022; Cifuentes et al., 2021; Cuéllar-Álvarez et al., 2023; Jaime, 2022; Mangones et al., 2019; Osorio Silva & Rodríguez Gómez, 2022).

COPERT

Es un modelo desarrollado en Microsoft Windows por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) y EMISIA, con el propósito de cuantificar las emisiones vehiculares en carretera a nivel local y nacional. Presenta actualizaciones periódicas en relación con los factores de emisión y disponibilidad en las tecnologías vehiculares (última actualización año 2023). El modelo fue desarrollado inicialmente para condiciones de la Unión Europea, sin embargo, se presenta una versión diferente para uso en otros países y puede ser aplicado a través del software libre que dispone (<https://www.emisia.com/utilities/copert/download/>) (Ntziachristos & Samaras, 2021).

Es importante destacar que el modelo, a diferencia de otros, permite estimar tanto factores de emisión como emisiones, estas últimas incluyen emisiones asociadas al tubo de escape, evaporativas y no exhosto. Además, el software permite estimar los factores y las emisiones de acuerdo con la disponibilidad de información en nivel 2 o nivel 3. Los factores de emisión están en función de la velocidad promedio vehicular. Otros parámetros para el ajuste a condiciones locales incluyen las características del parque automotor, la actividad vehicular, la distribución horaria, las características del combustible y las condiciones meteorológicas, como se muestra en la **Figura 1-3**.

Figura 1-3: Parámetros de entrada para la estimación de emisiones en Copert V.

Fuente: Elaboración propia.

- **Propiedades generales**

Las propiedades generales de entrada para el modelo COPERT se refieren a la información ambiental de las temperaturas máximas y mínimas y la humedad relativa de cada mes del año del estudio, así como a las características de un viaje típico, es decir, longitud que se recorre típicamente por el parque automotor cada vez que se enciende y el tiempo que la flota se demora en recorrer ese trayecto.

- **Propiedades de los combustibles**

Las características de los combustibles se refieren a la relación H:C, O:C, densidad, contenido de S, Pb, Cd, Cu, Cr, Ni, Se, Zn, Hg y As. Las cuales son determinantes para la estimación y composición de las emisiones.

- **Características del parque automotor**

La caracterización y distribución del parque automotor es fundamental para la determinación de los factores de emisión, ya que estos están relacionados con la tecnología de cada vehículo, el combustible que utiliza, la actividad vehicular, entre otras.
- **Estándar euro**

El estándar EURO indica el nivel de las tecnologías que un vehículo puede tener en términos de control de emisiones. Se trata de una variable importante, ya que a lo largo de los años las normas de emisión han sido más estrictas, y a medida que aumenta el estándar Euro los factores de emisión suelen ser menores.
- **Segmento**

El segmento es una variable clasificatoria de los vehículos de acuerdo con las reglas del software, las cuales se fundamentan en el cilindraje para los autos particulares y taxis; el peso vehicular (PBV) en vehículos pasados y buses; y el tipo de motor y cilindraje en el caso de las motocicletas. Esta clasificación facilita que los factores de emisión y emisiones sean estimados para un grupo de vehículos con características similares.
- **Kilometraje del parque automotor**

El kilometraje acumulado de cada tecnología vehicular puede aumentar las emisiones de los vehículos, debido al desgaste de este. Así que es importante tener en cuenta esta variable para la estimación de los factores de emisión. Regularmente este valor es obtenido a través de lecturas de odómetro o estudios de transporte del lugar de estudio.
- **Condiciones de manejo**

Las condiciones de manejo o “Driving Conditions” se deben al porcentaje de carga promedio, en comparación con la capacidad de cada categoría vehicular, de vehículos de carga y buses. Lo cual influye en las emisiones, ya que, cuanto mayor es la carga, mayor es el esfuerzo del vehículo y probablemente las emisiones de este.

- Aire acondicionado

El uso del aire acondicionado durante la circulación de un vehículo es un factor que contribuye a un mayor consumo de combustible y, por ende, mayores emisiones. En este sentido, el uso del aire acondicionado depende en gran medida de las condiciones ambientales del lugar de estudio.

2.Contexto y consolidación de información

La estimación de las emisiones vehiculares se basa en la recopilación y el análisis de datos relacionados con la actividad vehicular, los factores de emisión, las características del parque automotor, las características de los combustibles, el estado de la malla vial, entre otros datos. Por consiguiente, es esencial disponer de información adecuada y consistente para obtener resultados fiables y representativos.

El análisis del contexto tiene un impacto significativo en la interpretación y aplicación de los resultados. Comprender el contexto implica la consideración de factores tales como las características socioeconómicas y demográficas de la región de estudio, así como las particularidades del parque automotor y la infraestructura vial. Estos elementos ayudan a la estimación de las emisiones y permiten ajustar los resultados de acuerdo con las condiciones específicas de cada caso.

Por otro parte, la consolidación de información se refiere al proceso de recopilación, organización y análisis de los datos necesarios para realizar las estimaciones de emisiones vehiculares. Este proceso implica la selección de fuentes de información confiables y representativas, así como la verificación y validación de los datos recolectados. Además, se requieren establecer metodologías que permitan garantizar la consistencia y comparabilidad de los datos, de manera que permita la integración de diversas fuentes de información. Es un paso importante para la estimación de emisiones, ya que, de acuerdo con la disponibilidad de información, se pueden desarrollar estrategias de estimación para cada una de las fuentes estudiadas.

En consecuencia, para la estimación de emisiones por fuentes móviles en 25 municipios de la región del VGRC, se revisó información oficial de las Alcaldías, secretarías de tránsito y transporte, RUNT, SICOM, SUI, entre otras entidades.

2.1 Área de estudio

La región del valle geográfico del río Cauca se encuentra localizada en el suroccidente de Colombia, en un rango que comprende entre los 900 y 1100 msnm y tiene un área total que rodea los 5287 km². Se estima que en el año 2021 la región tenía aproximadamente 4.7 millones de habitantes (DANE, 2018). La temperatura promedio de la región es de 26 a 29°C, y presenta una precipitación anual que oscila entre 1000-1500 mm, con un régimen bimodal de lluvias en los meses de abril y mayo para el primer semestre y octubre a noviembre en el segundo semestre (IDEAM, 2021).

Los municipios de Cali, Palmira y Yumbo están influenciados meteorológicamente por los municipios de Tuluá, San Pedro, Buga, Yotoco, Guacarí, Ginebra, Vijes, El Cerrito, Pradera, Candelaria, Florida, Jamundí y Río frío del departamento del Valle del Cauca y los municipios de Puerto Tejada, Miranda, Padilla, Villa Rica, Corinto, Caloto, Guachené, Buenos Aires y Santander de Quilichao del departamento del Cauca, los cuales conforman el área de estudio (**Figura 2-1**).

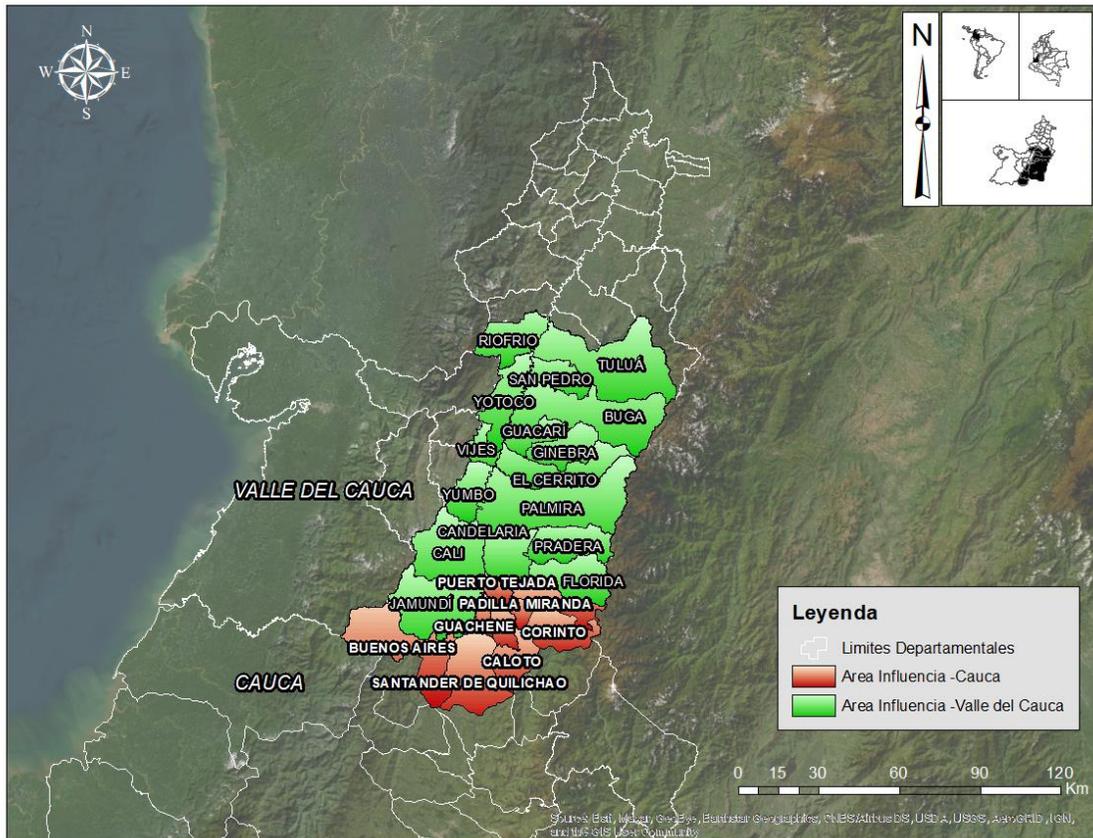
El área de estudio concentra más de 3.7 millones de habitantes, cerca del 80% de los habitantes de la región del VGRC (DANE, 2018). Cuenta con más de 8 mil km de vías (locales y nacionales) (INVIAS, 2022), por las que transitan los cerca de 2 millones de vehículos matriculados en los 25 municipios del área. El parque automotor está constituido en su mayoría por motocicletas (~64%) y automóviles particulares (~31%) (RUNT, 2021). Adicionalmente, debido al desarrollo industrial en el área de interés y a la proximidad con el puerto de Buenaventura, las vías de conexión nacional y regional entre municipios presentan un importante tráfico de vehículos pesados que transportan productos y materias primas desde y hacia el puerto de Buenaventura y el complejo industrial de Yumbo. Igualmente, debido a la necesidad de personal en las áreas industrializadas, las personas se trasladan constantemente en las vías de conexión para llegar a sus lugares de trabajo.

En relación con el consumo de combustibles fósiles para el transporte de vehículos, SICOM ha reportado ventas de 183 y 136 millones de galones de gasolina y *Diésel*, para los 25 municipios, incluyendo las ventas a grandes consumidores (SICOM, 2021). Lo que

equivale al 8.31% y 7.83% de las ventas a nivel nacional, respectivamente. Esto quiere decir que, en la región de estudio, se consume anualmente aproximadamente 46.3 y 34.37 galones de gasolina y diésel por persona.

En cuanto a la actividad agrícola, la zona tiene una extensión de ~202 mil hectáreas de cultivos, donde el 75% corresponde a caña de azúcar; estos cultivos presentan el mayor nivel de productividad de caña de azúcar del mundo con 127 t ha⁻¹ (Agronet, 2021; ASOCAÑA, 2022). La mecanización de los cultivos, tanto de caña como de otros, es ampliamente utilizada, debido a las grandes extensiones de cultivos y la pendiente del terreno. Por lo cual, es habitual observar el paso de vehículos agrícolas en la región. Además, el procesamiento de algunos productos agrícolas como la caña de azúcar requiere que las cosechas sean transportadas a los ingenios, mediante vehículos de carga pesada como las tractomulas, y camiones.

Figura 2-1: Municipios del área de influencia del inventario regional.



Fuente: Elaboración propia.

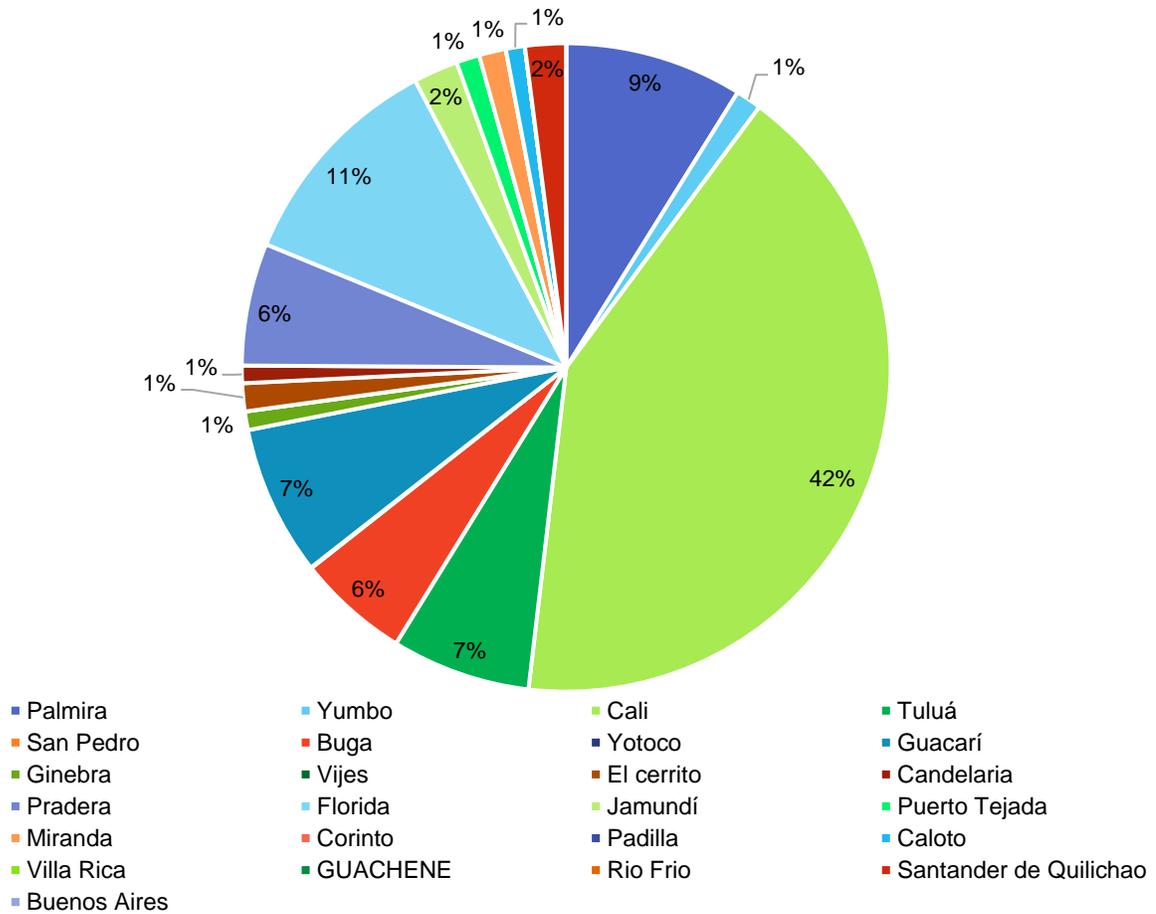
2.2 Flota vehicular

Se analizó el parque automotor del área de estudio, teniendo en cuenta los datos reportados por el Registro Único Nacional de Tránsito - RUNT para el departamento del Valle del Cauca y Cauca en el año 2021. Las categorías vehiculares fueron definidas como se muestra a continuación:

- Vehículo Particular: automóvil particular, campero y camioneta.
- Taxi: automóvil público.
- Motocicleta: moto, motocicleta, motocarro y cuatrimoto.
- Bus: microbús, buseta y bus.
- Vehículos de Carga: volqueta, tractocamión y camión.

La flota vehicular registrada en los 25 municipios del área de estudio es de 1,782,487 vehículos, de los cuales el 64.4% se concentran en los municipios de Cali, Palmira, Yumbo, Tuluá y Buga, los cuales a su vez concentran la mayor población de la región con cerca de 3.1 millones de habitantes. El 35.6% del parque automotor se concentra en los 20 municipios restantes, con 0.8 millones de habitantes (**Figura 2-2**).

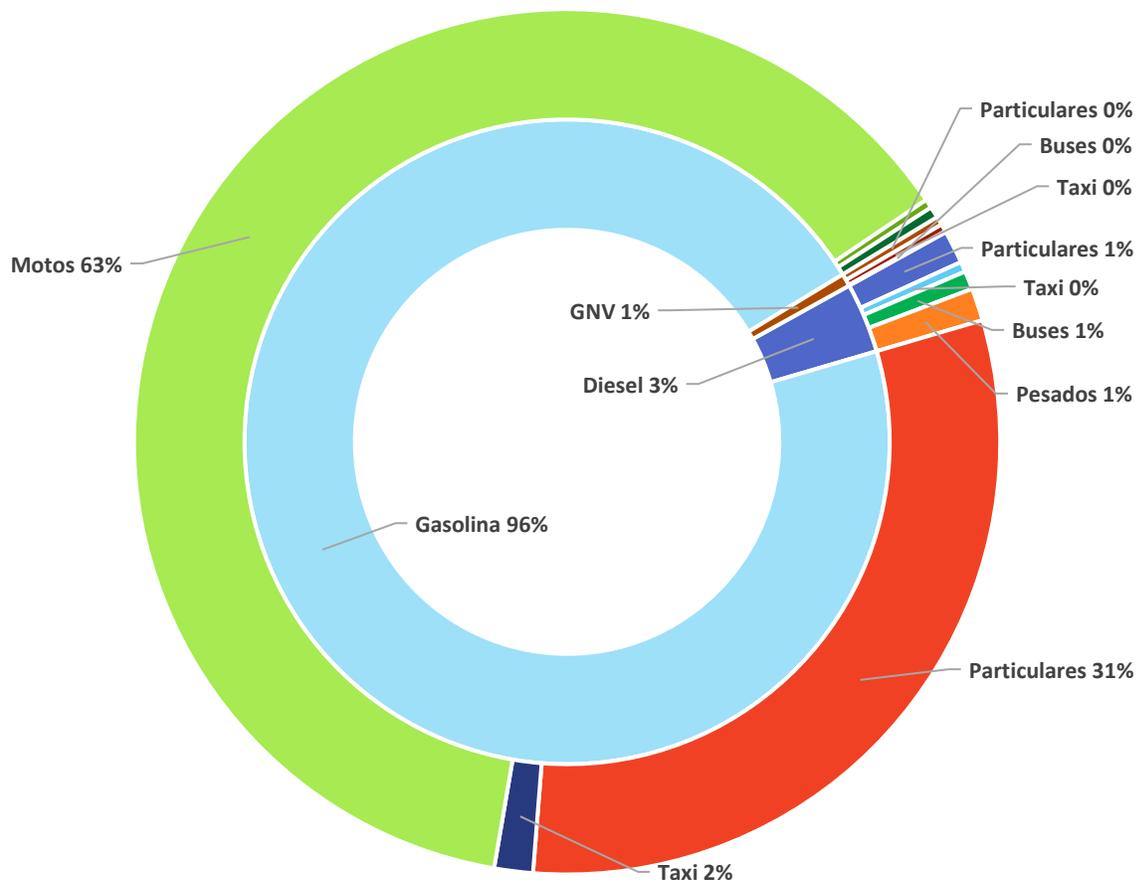
Figura 2-2: Distribución del parque automotor registrado en los 25 municipios del área de estudio.



Fuente: RUNT, 2021.

De acuerdo con la distribución porcentual de la flota vehicular, los vehículos de transporte particular y motocicletas en el área de estudio representan el 95% del total del parque automotor registrado en la región. En contraste, los buses y vehículos de carga representan el 2.7%, mientras que los taxis son el 2.1%, como se puede observar en la **Figura 2-3**

Figura 2-3: Distribución del parque automotor registrado en el área de estudio, agrupado por categoría vehicular y tipo de combustible, según datos reportados por el RUNT, 2021.



Fuente: RUNT, 2021.

En relación con el combustible utilizado por los automotores registrados en la región, según el RUNT, el 96% de los vehículos utilizan gasolina en el proceso de combustión, seguido del diésel, con un 3% de participación. Los vehículos que más funcionan a gasolina son las motos (100%), los vehículos particulares (95%) y los taxis (68%). Por otro lado, los vehículos de carga y buses tienden a utilizar diésel para su funcionamiento (74% y 63% respectivamente). El 1% de la flota vehicular utiliza GNV, de los cuales el 13% de la flota son vehículos tipo taxi y el 1% vehículos particulares, buses y pesados registran que consumen GNV (**Figura 2-3**).

2.3 Ventas de combustible

La información de las ventas de combustibles son un factor esencial en la estimación de las emisiones vehiculares. Este enfoque requiere el análisis y seguimiento de las ventas de combustibles para determinar la cantidad de combustible consumido por los vehículos en un lugar determinado, lo que a su vez permite estimar un proxy de las emisiones asociadas, ya que el consumo de combustible está directamente relacionado con la generación de emisiones contaminantes. En consecuencia, la disponibilidad de datos precisos y confiables sobre las ventas de combustibles resulta fundamental para realizar estimaciones precisas de las emisiones vehiculares. Las compañías distribuidoras de combustibles registran detalladamente la cantidad de combustible comercializado durante un determinado periodo de tiempo, tales como litros de gasolina, diésel u otros combustibles utilizados en el sector del transporte.

En Colombia, el SICOM reporta las ventas de combustibles líquidos, mientras que el SUI reporta las ventas de combustibles gaseosos (residencial, comercial y vehicular). Para llevar a cabo esta investigación se consultaron los datos reportados en la sección de “EDS automotriz y fluvial” de SICOM, para cada municipio, los cuales corresponden a las ventas realizadas en las estaciones de servicio de cada municipio. Así mismo, se tuvo en cuenta los datos de la sección de “Distribuidor mayorista”, que corresponde a las ventas a grandes consumidores en los municipios con plantas de distribución, como Yumbo y Buga. En cuanto al GNV, se utilizó el reporte de ventas del SUI (**Tabla 2 1**). Asumiendo que las ventas de combustible en estaciones de servicio son consumidas dentro del área de estudio, y que las ventas reportadas en “Gran consumidor” se relacionan con la actividad vehicular de grandes empresas que se encuentran en la región.

Tabla 2-1: Ventas de combustibles en el área de estudio por tipo de combustible.

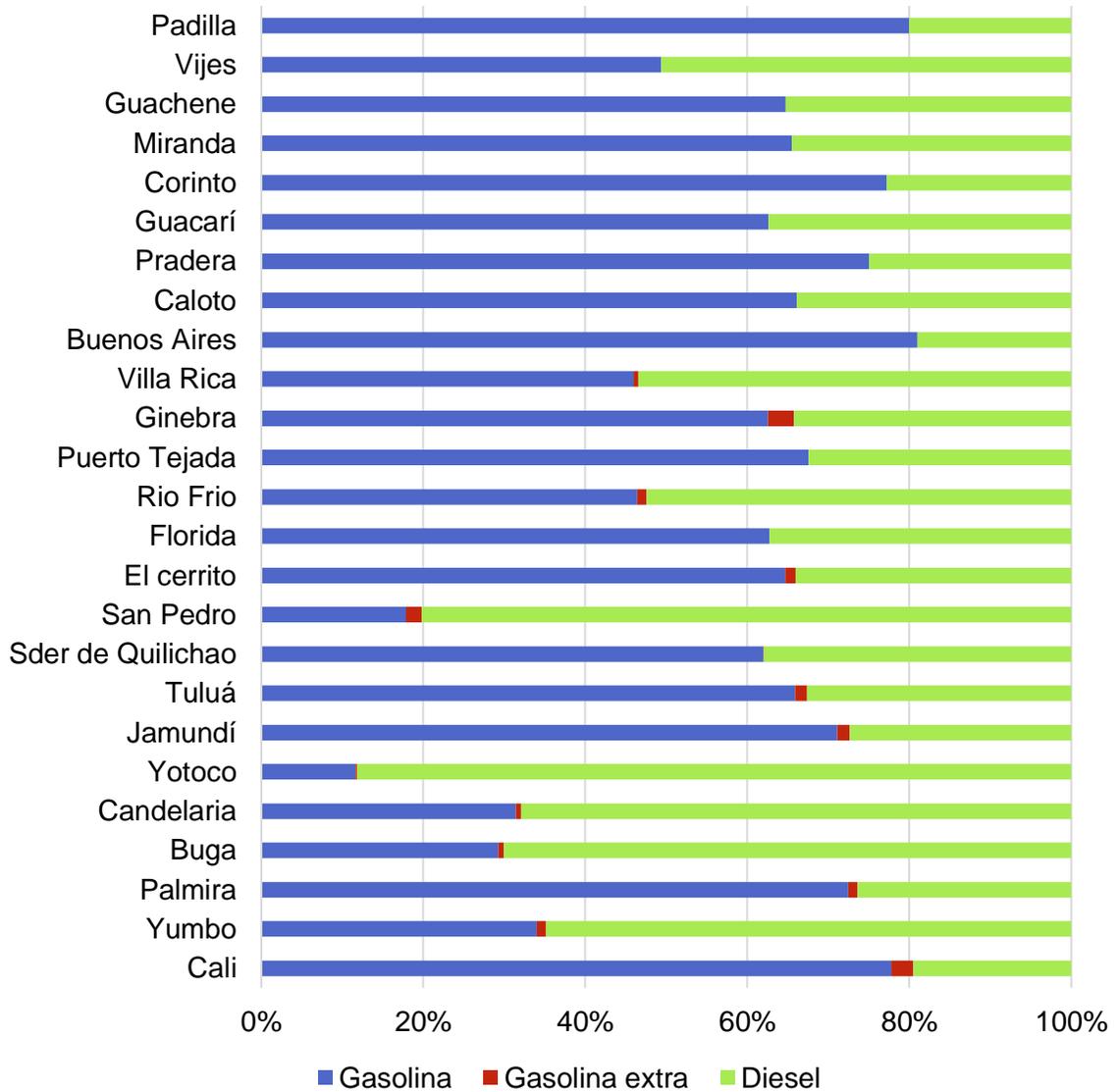
	Gasolina (10⁶ galones)	Gasolina extra (10⁶ galones)	Diésel (10⁶ galones)	GNV (m³)
Palmira	16.64	0.27	6.06	2,117,068
Yumbo	13.05	0.44	24.91	7,047,964
Cali	99.72	3.54	24.98	11,625,621

	Gasolina (10⁶ galones)	Gasolina extra (10⁶ galones)	Diésel (10⁶ galones)	GNV (m³)
Otros municipios	52.17	0.89	60.43	5,468,770
Gran consumidor	1.66		19.29	
Región, total	183.24	5.14	135.67	26,259,423

Fuente: Elaboración propia a partir de ventas reportadas por SICOM y SUI (2021).

Como se muestra en la **Figura 2-4**, tanto la gasolina corriente como el diésel son ampliamente consumidos en la región. En algunos municipios, tales como Yumbo, Yotoco, Buga, Candelaria, San Pedro, Riofrío, Villa Rica y Vijes, el combustible diésel es el que más se vende. Esto podría estar relacionado con sus actividades económicas, y en algunos casos, como Yotoco, Buga y San Pedro, podría ser asociado a las vías que conectan al puerto de Buenaventura.

Figura 2-4: Distribución de las ventas de combustibles líquidos en cada municipio del área de estudio.



Fuente: SICOM, 2021.

2.4 Malla vial

La malla vial es la infraestructura de carreteras y calles que conecta y organiza el flujo de tráfico en una ciudad. Se compone de diferentes tipos de vías, tales como autopistas, avenidas principales, calles secundarias, entre otras. Cada una de las vías tiene características específicas, tales como el número de carriles, la velocidad máxima permitida, el tipo de tráfico al que está destinada, el material de construcción, entre otras. La caracterización detallada de la malla vial proporciona una valiosa información para la estimación de emisiones vehiculares; por ejemplo, la velocidad promedio en una vía influye en la generación de emisiones exhosto, así como el material de construcción de la vía tiene un impacto en la emisión del material particulado resuspendido. Además, conocer los detalles de la malla vial, permite la desagregación de las emisiones vehiculares estimadas a nivel espacial.

Para la caracterización de la malla vial del área de estudio se revisó la información suministrada por el geovisor Openstreet maps. No obstante, para la ciudad de Cali, se consideró la información oficial disponible del geovisor de la Alcaldía de Santiago de Cali (IDESC), la cual incluía información acerca de las vías, una clasificación por tipo de vía (Arteria Principal, Arteria Secundaria, Colectora y Local), así como reportes de velocidad máxima en algunos tramos viales (Vel Max, km/h) y tipo de superficie (asphalt, concrete, unpaved). Para Palmira y Yumbo la jerarquización de la malla vial se fundamentó en la clasificación establecida en el Plan Maestro de Movilidad del 2013, en Palmira y en 2014 en Yumbo. Por otro lado, la malla vial nacional fue descargada del geovisor del INVIAS, el cual disponía del reporte de tráfico promedio diario (TPD) en algunos tramos viales, los cuales fueron utilizados para la estimación de emisiones en este tipo de vías.

Para la unificación de la tipología vial en toda el área de estudio, se utilizó la **Tabla 2 2**, de tal forma que toda la malla vial de la región estuviera jerarquizada en 4 tipologías viales, vías primarias, secundarias, primarias y vías nacionales.

Tabla 2-2: Jerarquización vial para la región de estudio.

	Categoría	Acrónimo	Clasificación para este estudio
Yumbo	Vías Arterias Principales	VAP	Primaria
	Vías Arterias Secundaria	VAS	Secundaria
	Vías Colectoras Principales	VCP	Secundaria
	Vías Colectoras Secundaria	VCS	Secundaria
	Vías Locales	VL	Terciaria
Palmira	Vías Nacionales	VNA	Primaria
	Vías de Conectividad Municipal	VCM	Secundaria
	Corredores Urbanos Principales	CUP	Secundaria
	Red Vial básica	RVB	Terciaria
Cali	Vías Arterias Principales	VAP	Primarias
	Vías Arterias Secundarias	VAS	Secundarias
	Vías Colectoras	VC	Secundarias
	Vías locales	VL	Terciarias
Vías Nacionales	Vías Nacionales	VN	Vías Nacionales

Fuente: Elaboración propia.

El proceso de estimación del flujo vehicular y la desagregación espacial tiene como insumo la malla vial y sus características de tipo de vía, longitud y número de carriles por sentido y número de sentidos de flujo. Debido a esto, se llevó a cabo una revisión de estas características mediante el geovisor Google Street View Maps, ajustando las propiedades de cada objeto espacial, especialmente en las vías que se encuentran representadas en dos calzadas y de esta manera evitar la duplicidad geográfica. Adicionalmente, las vías que presentaban cambio de sección fueron divididas y ajustadas, con el fin de que cada tramo representara únicamente secciones con igual número de carriles y sentidos.

Otro de los procesos de ajuste que se llevó a cabo, fue la reducción de capacidad vial en función de las características físicas de las vías, especialmente en vías locales con un ancho efectivo reducido (**Figura 2-5**). Si bien estas vías pueden ser funcionales en ambos sentidos, su ancho efectivo no equivale a un carril por sentido, y por esta razón se le asignan un número de carriles por sentido de 0,5 en 2 sentidos.

Figura 2-5: Ejemplo de vías con reducción de capacidad.

Fuente: Google Maps

Se llevaron a cabo dos etapas de depuración para completar este proceso. En la primera se eliminó la malla vial en predios privados, ya que estas no presentan el comportamiento de la malla vial general. En segundo lugar, se verificaron y eliminaron las vías duplicadas para evitar sobre estimaciones.

De tal forma que la distribución de la malla vial del área de estudio es:

Tabla 2-3: Kilómetros de malla vial en el área de estudio.

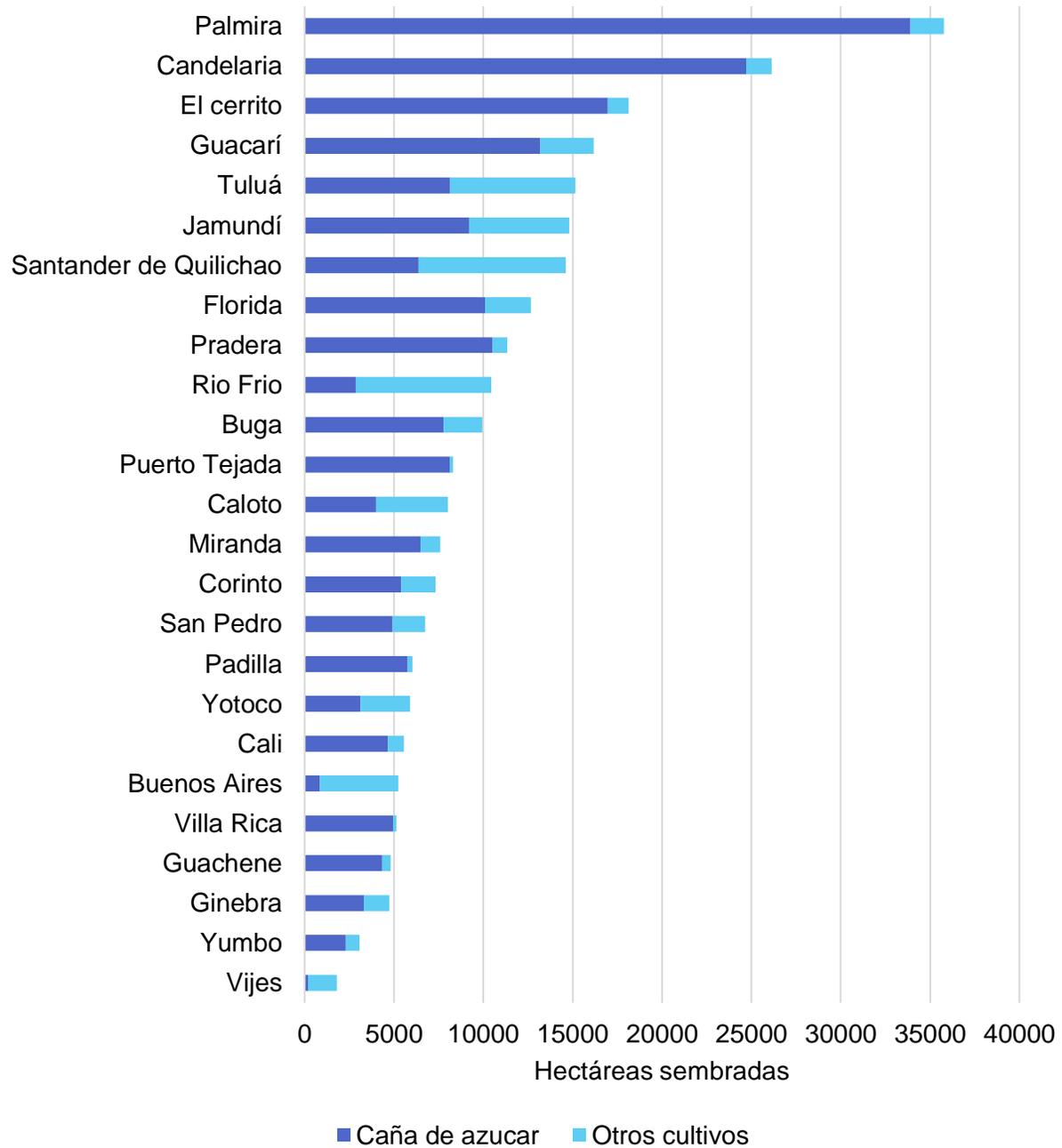
Municipio	Primaria	Secundaria	Terciaria	Nacional
Cali	167	346	1827	19
Palmira	54	65	706	130
Yumbo	75	63	256	141
Otros municipios	164	677	2170	345
Area de estudio	460	1151	4959	635

Fuente: Elaboración propia.

2.5 Cultivos y mecanización agrícola

La agricultura tiene un papel fundamental en la alimentación y el sustento de la población mundial. Sin embargo, al igual que otros sectores, también contribuye a las emisiones de contaminantes, principalmente gases de efecto invernadero, óxidos de nitrógeno y partículas, que contribuyen al deterioro de la calidad del aire y al cambio climático. Especialmente en el campo de la maquinaria y equipos utilizados en la mecanización agrícola, las cuales se consideran emisiones “Off Road”. En función del cultivo, se establece la demanda de maquinaria y equipos agrícolas, así como la frecuencia y duración de su uso. Esto involucra una variedad de equipos, tales como: tractores, cosechadoras, pulverizadoras, entre otros, cada uno con sus propias características y emisiones asociadas.

Debido a que el VGRC es una región agroindustrial con una extensión de tierras planas, la mecanización de la agricultura es una práctica frecuente. Por consiguiente, las emisiones móviles, tanto exhosto como por resuspensión, se consideran una fuente importante de emisiones en la región. En este sentido, se analizó la información disponible de los cultivos sembrados en cada municipio, según la Secretaria de Agricultura del Valle del Cauca y Agronet en el Cauca (**Figura 2-6**). La región cuenta con 265,420 hectáreas de cultivos, donde se desarrollan 40 tipos de cultivos, tales como caña de azúcar, arroz, café, frutales, musáceas, tubérculos, entre otros. A excepción de Vijes, Buenos aires, Santander de Quilichao, Riofrío y Caloto, el cultivo de mayor extensión en cada municipio es la caña de azúcar, con un total de 202,145 hectáreas (76%), mientras que los otros cultivos en conjunto suman 63,275 hectáreas (24%).

Figura 2-6: Distribución de cultivos en la región de estudio.

Fuente: Elaborado con información de Agronet y secretaria de Agricultura del Valle, 2021

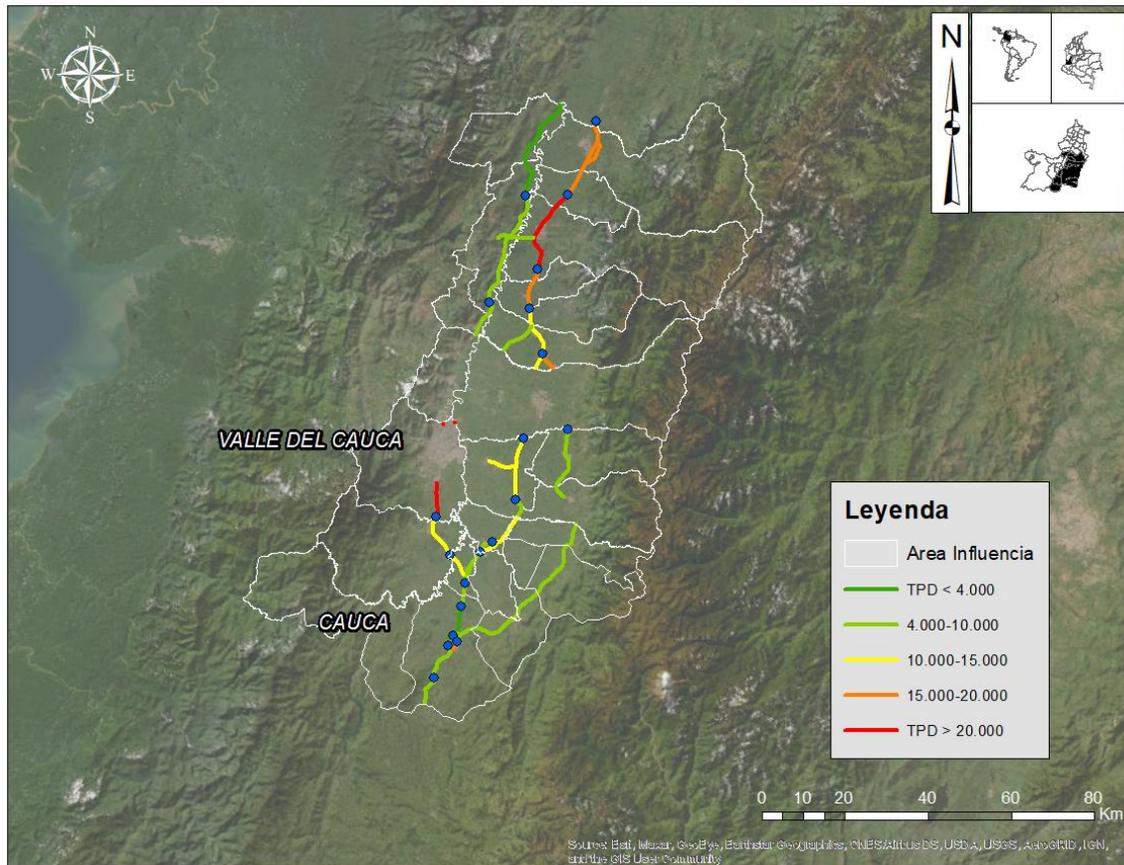
2.6 Aforos vehiculares

Los aforos vehiculares permiten obtener información detallada acerca de la cantidad de vehículos que circulan por una determinada zona, así como datos específicos sobre su tipo, categoría y patrones de movimiento. Esta información es esencial para estimar las emisiones vehiculares, ya que proporciona una base sólida para calcular la cantidad de emisiones generadas por los vehículos en función de su número y características.

El instituto nacional de vías de Colombia – INVIAS, es el ente encargado de la planificación vial, la construcción y el mantenimiento de las vías de conexión nacional, entre otras funciones. Dicha entidad cuenta con reportes de tráfico promedio diario (TPD) para los tramos viales de la malla vial nacional. Los tramos viales de la malla vial nacional están definidos como aquellos que cumplan con la función de integrar las principales zonas de producción y consumo del país y que comuniquen con los puertos y aeropuertos de nivel nacional e internacional. En el área de estudio en el VGRC existen 335 km de vías nacionales, divididas en 52 tramos viales, de los cuales 34 se encuentran ubicados en el Valle del Cauca (247 km) y 18 en el departamento del Cauca (88 km),

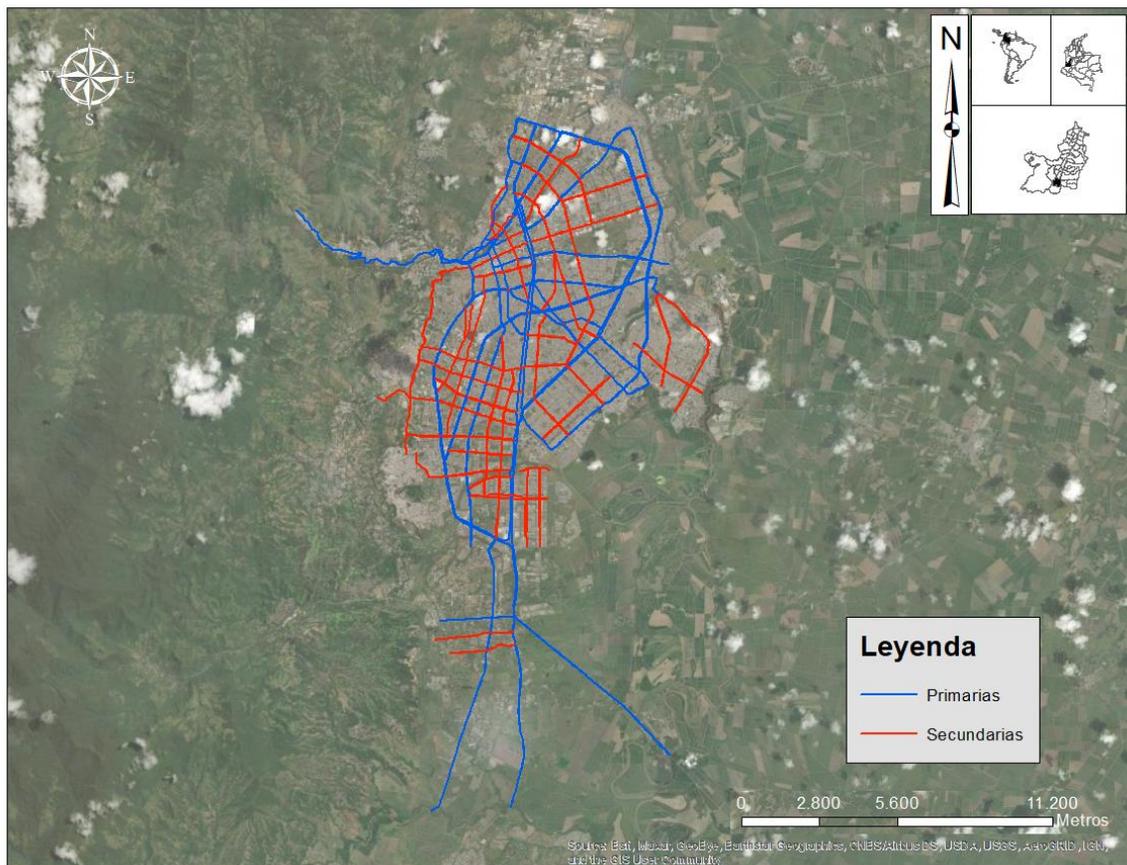
Figura 2-7.

De acuerdo con la información reportada el tramo Cali-Jamundí tramo presenta un mayor flujo de vehículos con 37294 vehículos diarios, seguido de los tramos Tuluá-Buga y cruce ruta 25 Palmira, con 23,884 y 18371 vehículos diarios cada uno. Por otro lado, los tramos Cruce paso elevado- glorieta a timba y Riofrío-Bolívar son los tramos con menor flujo vehicular, con 2890 y 2154 vehículos diarios, respectivamente. La categoría vehicular que transitó con mayor frecuencia las vías nacionales son los vehículos livianos, seguido de los camiones, motos y buses, con 207,355; 158,516; 138,236 y 34,458 vehículos cada una.

Figura 2-7: Tramos viales y estaciones con valores de TPD.

Fuente: Elaboración propia.

Además, la Universidad del Valle en el año 2015 publicó el estudio “*Análisis integral de la red de infraestructura vial para la movilidad motorizada en el municipio de Santiago de Cali*”. En 2013 se realizaron conteos vehiculares en las vías primarias y secundarias de la ciudad, de los cuales 10 se llevaron a cabo en puntos estratégicos de la ciudad durante 24 horas, mientras que 113 se realizaron solo en tres horas pico del día, en la mañana, mediodía y tarde (**Figura 2-8**).

Figura 2-8: Malla vial con aforos vehiculares en horas pico en la ciudad de Cali.

Fuente: Elaboración propia.

De estos aforos se usaron 13 aforos, a los cuales se les realizó un proceso de extrapolación de acuerdo con el crecimiento demográfico. Este análisis se detalla en sección 4.1.

Al igual que en Cali, en Yumbo para el año 2018 se realizaron aforos vehiculares manuales en cuatro puntos estratégicos de las vías primarias de la ciudad, durante las 24 horas de un día típico. Estos aforos se llevaron a cabo en las categorías vehiculares de taxis, Autos (Autos, camperos y camionetas), Microbus, Bus, Camiones de 2 ejes pequeños, Camiones de 2 ejes grandes, Camiones de 3 y 4 ejes, Bicicletas y Motos. Los

datos obtenidos fueron extrapolados mediante el crecimiento del parque automotor de la ciudad.

Además de los datos de aforo de la red vial nacional, de Cali y Yumbo, se dispone de los aforos de Cali realizados en Octubre-Noviembre del 2022 mediante la ejecución del convenio 4133.010.27.1.041-2022 entre el DAGMA y UNAL y los aforos de Palmira y Yumbo realizados en Noviembre del 2021, mediante la ejecución del convenio 036 de 2021 entre la CVC y UNAL. Los cuales se analizan de manera detallada en el capítulo 4 y hacen parte del desarrollo de esta investigación.

2.7 Actividad vehicular diaria

Los kilómetros diarios recorridos son un factor clave en la estimación de las emisiones vehiculares, ya que proporciona una medida cuantitativa de la distancia recorrida por los vehículos en un día. La estimación precisa de la actividad vehicular promedio diaria requiere la recopilación y el análisis de datos detallados sobre los patrones de viaje, la movilidad de los vehículos, las lecturas de odómetro por categoría vehicular, entre otros. Estos datos se obtienen a través de diferentes fuentes, como encuestas de movilidad, sistemas de conteo, registros administrativos y/o datos de navegación GPS.

En Colombia, los Centros de Diagnóstico Automotriz (CDA) son entidades, tanto públicas como privadas, responsables de la revisión técnico-mecánica de vehículos automotores y la revisión del control de emisiones al ambiente conforme a las normas (Artículo 53 de la Ley 729 de 2002). La revisión tecno-mecánica debe incluir el registro de la lectura del odómetro (contador de kilometraje) del vehículo. Esta información permite estimar la actividad vehicular, es decir, los kilómetros recorridos anuales de los vehículos que realizan su procedimiento de revisión técnico-mecánica en los CDA. Sin embargo, no todos los CDA registran apropiadamente las lecturas de odómetro, por lo que las bases

de datos suministradas requieren un análisis estadístico riguroso, para extraer información válida que permita la obtención de la actividad vehicular.

Con el apoyo del DAGMA y la CVC, durante la ejecución de los convenios, se logró obtener información de 35 CDA ubicados Cali, 8 CDA de Palmira y 3 CDA en Yumbo. Las bases de datos contienen información de: fecha de revisión técnico-mecánica del automotor; placa; línea de vehículo; modelo; tipo de vehículo; tipo de combustible; tipo de servicio; cilindraje; tipo de motor; kilometraje. Las bases de datos incluían revisiones tecno-mecánicas realizadas en el periodo comprendido entre 2015 y 2022 en Cali y 2015 y 2019 en Palmira y Yumbo. Las cuales fueron procesadas mediante el software estadístico *Rstudio* (R Core Team, 2020), que incluyó: 1) Unificación de bases de datos y agrupación de categorías vehiculares, 2) Depuración de datos atípicos y 3) Test de hipótesis.

De acuerdo con la legislación colombiana, según la Ley 1383 de 2010, las revisiones técnico-mecánicas deben ser periódicas y deben ser realizadas tantas veces como sea necesario para que el vehículo sea certificado. Por lo que, en una base de datos multianual de múltiples CDA, es posible encontrar múltiples registros de un mismo vehículo. Por lo tanto, para los vehículos con múltiples reportes en un corto periodo de tiempo (horas o días), solo se tuvo en cuenta el primer registro. Así mismo, si se encontraba inconsistencia entre los reportes anuales, por ejemplo, kilometraje igual o menor al registro del año anterior, se tomó referencia el primer reporte del vehículo. Para efectos de la estimación de emisiones por categorías vehiculares, los datos fueron agrupados en las 5 categorías estudiadas así: vehículo particular (Automóvil particular, campero, camioneta), taxi (automóvil público), motocicleta (moto, motocicleta, motocarro), bus (microbús, buseta, bus), vehículos de carga (volqueta, tractocamión y camión). Una vez unificada la base de datos, se llevó a cabo la estimación de la actividad promedio para cada registro mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$AV \left[\frac{km}{día} \right] = \frac{Kilometraje [km]}{(Fecha\ revisión - Fecha\ modelo)} \quad (2-1)$$

A partir de ese procesamiento se identificaron datos atípicos mediante histogramas de frecuencias relativas y gráficos de cuantiles, con el propósito de identificar la concentración de los datos y visualizar las posibles discrepancias del conjunto de datos, con base en la función de distribución normal. Los valores que se alejaban del comportamiento normal fueron eliminados, teniendo en cuenta cuantiles e intervalos determinados. De este modo, de los 476,444 registros recibidos, se eliminaron aproximadamente el 36% de los datos (**Tabla 2 4**). Al 64% restante se les aplicó pruebas de hipótesis, con el objetivo de verificar la existencia de diferencias estadísticas entre las actividades vehiculares reportadas por los CDA en las diferentes categorías vehiculares. De acuerdo con el valor de $p < 0.01$ de la prueba de t-student aplicada a cada categoría vehicular, se estableció que la actividad de cada categoría es independiente de las demás.

Tabla 2-4: Resumen del procesamiento de datos provenientes de los CDA de Cali, Palmira y Yumbo.

Cantidad de datos registrados por ciudad		
Cali	Palmira	Yumbo
305,000	80,998	90,446
Total = 476,444 datos registrados		
Cantidad de datos válidos por ciudad		
Cali	Palmira	Yumbo
248,000	33,120	24,581
Total = 305,701 datos válidos		

Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, la estimación de los kilómetros diarios por cada categoría vehicular en las 3 ciudades fue la reportada en la **Tabla 2-5**. Se aprecia que la actividad de vehículos particulares y motos en Cali es inferior comparado con Yumbo y Palmira. Lo cual podría deberse a las actividades propias de cada ciudad, siendo Palmira una ciudad dormitorio y Yumbo una ciudad de empleo, de tal forma que los vehículos podrían realizar recorridos más extensos dada la interacción intermunicipal.

Tabla 2-5: Actividad vehicular diaria por cada categoría, en las ciudades de Cali, Palmira y Yumbo.

Categoría	Cali	Palmira	Yumbo
	km día ⁻¹		
Bus	103	56	98
Motocicleta	20	25	35
Taxi	125	172	114
Vehículo de Carga	61	56	98
Vehículo Particular	28	36	45

Fuente: Elaboración propia.

2.8 Selección de estrategia de estimación

La selección de la estrategia de estimación de emisiones vehiculares es un aspecto esencial en la investigación de estas emisiones. Existen diferentes enfoques y metodologías disponibles, cada uno con sus ventajas y limitaciones. La elección adecuada de la estrategia de estimación se basa en diversos factores, tales como el propósito del estudio, la disponibilidad de datos, la escala espacial y temporal, y la precisión requerida. En cuanto a la escala espacial y temporal de este estudio, se busca desagregar en la malla vial las emisiones vehiculares del año 2021. Asimismo, es fundamental establecer una estrategia de desagregación al nivel de la malla vial, para la cual se evaluaron dos opciones: 1) Desagregación espacial en función de la distribución del flujo vehicular de acuerdo con los aforos vehiculares y los polígonos de Thiessen, 2) Aplicación del software DROVE en el nivel 2, el cual se basa en la longitud de malla vial, categorías viales y flujo relativo de tráfico según el tipo de vía.

Para la definición del nivel de detalle, se realizó un análisis de la información necesaria para la estimación de las emisiones con el enfoque *Bottom-up* o *Top-down* (**Tabla 2-6**). El enfoque *Bottom-up* estima las emisiones vehiculares a un nivel de detalle mayor que el enfoque *Top-down*. Utiliza información de la malla vial detallada, flota vehicular registrada o circulante, aforos vehiculares, estos dos últimos permiten la estimación de factores de emisión propios, de acuerdo con las condiciones propias de cada ciudad, una variable

importante en el enfoque *Bottom-up*. No obstante, por el nivel de detalle implica costos de personal especializado y estudios detallados. Por otro lado, el enfoque *Top-down* utiliza información general y que frecuentemente está disponible al público, tales como las ventas de combustible, la flota vehicular registrada, los km promedio diarios, el rendimiento del combustible por vehículo y/o los factores de emisión agregados, de tal manera que es una estimación menos precisa pero menos costosa.

Tabla 2-6: Información necesaria para aplicar cada enfoque de estimación de emisiones y su desagregación.

Enfoque	Estimación						Desagregación		
	Información necesaria								
	C	M	F	A	FE	km	A	M	
Bottom-up									
Top-down – Ventas de combustible									
Top-down - CDA									

C= Consumo de combustibles, M=Malla vial, F=Flota vehicular, A=Aforos vehiculares, FE=Factores de emisión propios, km = diarios recorridos.

Fuente: Elaboración propia

Considerando que la información disponible es escasa y que el presupuesto y alcance del Convenio 036 entre la CVC y UNAL y el Convenio 4133.010.27.1.041-2022 entre DAGMA y UNAL, solo permitió realizar aforos vehiculares en las ciudades de Cali, Palmira y Yumbo, se llevó a cabo una evaluación de los posibles enfoques para estimar las emisiones vehiculares en cada municipio o fuente de emisión (**Tabla 2-7**).

Tabla 2-7: Matrix de información disponible por municipio y fuente de emisión, y enfoque que puede ser aplicado.

Municipio	Información disponible						Enfoque		
	C	M	F	A	FE	km	Bottom-up	Top-down Ventas	Top-down CDA
Cali									
Palmira									
Yumbo									
Otros municipios									
Malla vial nacional									
Agricultura									
Cañicultura									
Método de desagregación							Distribución del flujo vehicular	Software DROVE	

C= Consumo de combustibles, M=Malla vial, F=Flota vehicular, A=Aforos vehiculares, FE=Factores de emisión propios, km = diarios recorridos.

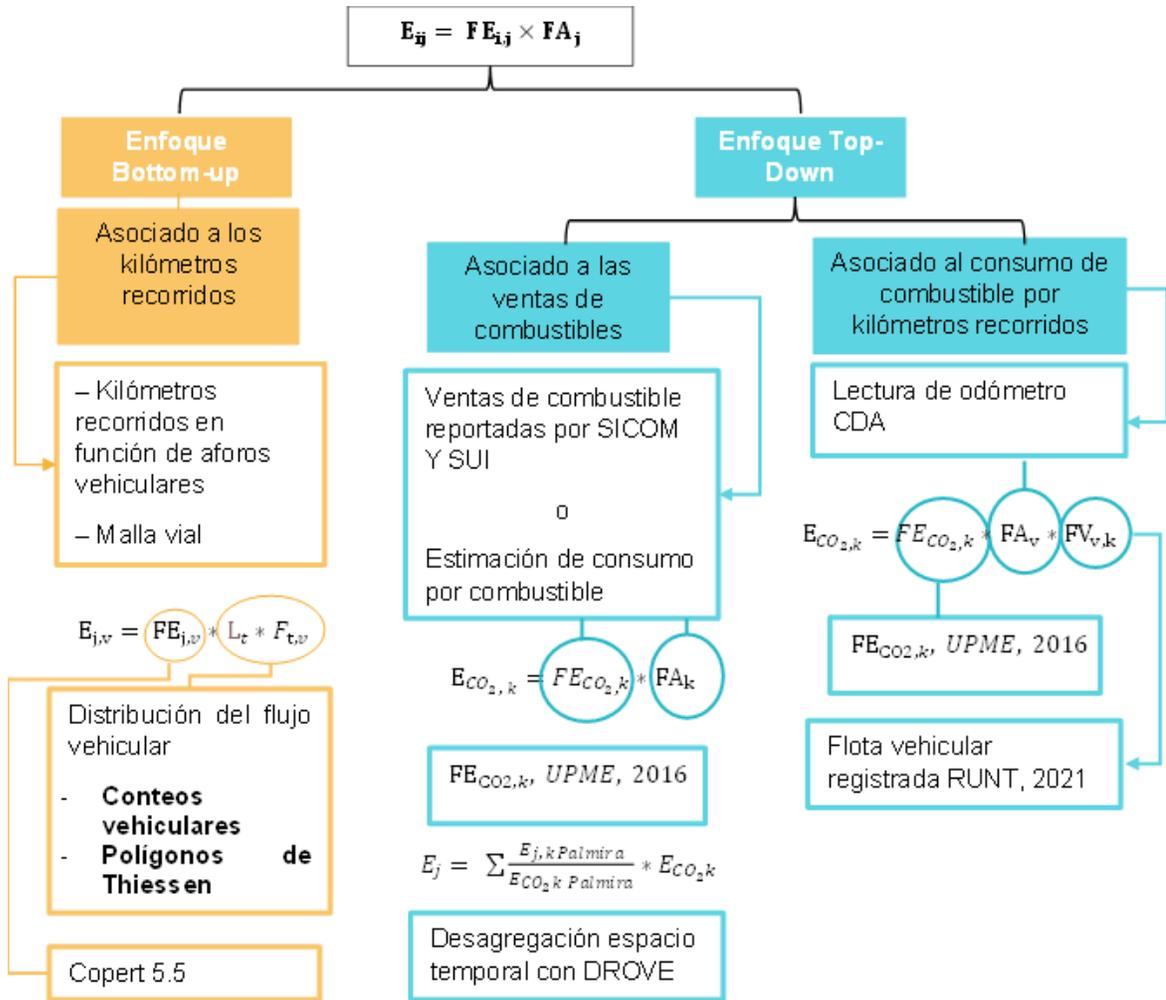
Fuente: Elaboración propia

Una vez definido los enfoques posibles para aplicar en cada caso, se desarrolló una estrategia de estimación en concordancia con la información disponible para cada uno de los enfoques (**Figura 2-9**). Cali, Palmira y Yumbo fueron estimados mediante el enfoque *Bottom-up*, que se basa en el desarrollo de aforos vehiculares, la distribución del flujo vehicular a través de polígonos de Thiessen. Se estimaron factores de emisión según las condiciones de cada municipio, a través del Software Copert 5.5. Este Software utiliza información meteorológica, flota vehicular e información derivada de aforos vehiculares permite estimar factores vehiculares asociados a cada categoría vehicular. De forma similar, se estimarán las emisiones asociadas a las vías nacionales, en función del tráfico promedio diario reportado por el INVIAS. A partir de este enfoque, asumimos que los factores de emisión obtenidos mediante el modelo COPERT reflejan las condiciones al conducir, la infraestructura de las ciudades y el mantenimiento de la flota vehicular.

Las emisiones por fuentes móviles de “otros municipios”, se estimarán usando el enfoque *Top-down* a partir de las ventas de combustible y los factores de emisión agrupados por

tipo de combustible, reportados por la UPME (2016). Se asume que el combustible que se compra en la región es consumido dentro de la región y no en otros lugares aledaños, o que, por el contrario, no ingresan vehículos con combustibles vendidos en otros municipios. De manera similar se estimarán las emisiones por la agricultura y cañicultura, las cuales se fundamentarán en el estimado de consumo de combustibles por cada tipo de cultivo, según la literatura reportada. Finalmente, para efectos de comparación, se estimaron las emisiones de CO₂ por enfoque *Top-down* a partir de datos de actividad promedio diaria de acuerdo con los reportes de CDA de las ciudades de Cali, Palmira y Yumbo, y el resto de los municipios.

Figura 2-9: Esquema metodológico de estimación de emisiones por enfoque *Top-down* y *Bottom-up*.



Fuente: Elaboración propia

Se considera que la combinación de ambos enfoques en la región nos permite realizar una estimación acertada de las emisiones móviles. Ya que, al estimar detalladamente Cali, Palmira y Yumbo, como principales municipios de la región, y las vías nacionales, nos permite conocer gran parte de la actividad vehicular que ocurre en la región del VGRC. Esto se complementa con las estimaciones de las emisiones *Top-down*, sumado a las estimaciones de la agricultura y cañicultura. De tal forma que la estimación combinada de las emisiones vehiculares será una herramienta para las autoridades ambientales y tomadores de decisiones al momento de priorizar estudios más detallados y gestionar la calidad del aire.

3. Conteo vehicular en tres ciudades del VGRC: Una ciudad densamente poblada, una ciudad agroindustrial y una ciudad industrial.

Se realizó un estudio de conteo de tráfico en Cali, Palmira y Yumbo, tres ciudades importantes del valle del río Cauca. El conjunto de datos fue recopilado como parte de un estudio comparativo con el objetivo de comprender y analizar los patrones de tráfico y la actividad vehicular en una ciudad urbana, una ciudad agroindustrial y una ciudad industrial. El cual se obtuvo mediante una combinación de: 1) monitorización del tráfico basada en vídeo, 2) algoritmos de aprendizaje automático (DeoData) y 3) procesos de validación manual. El análisis de datos se realizó para vehículos livianos, motocicletas, buses y camiones que transitaban por vías primarias, secundarias y terciarias, durante 4 días en 2021 y 2 días en 2022, incluyendo días hábiles y fines de semana, en intervalos de 15 minutos, durante 24 horas cada día. Con base en los datos recopilados, se propone un perfil de tráfico normalizado para las tres ciudades, como una representación generalizada del comportamiento del tráfico. Los cuales pueden ser utilizados por tomadores de decisión en municipios, investigadores e ingenieros para estimar la actividad de los vehículos en ciudades industriales, agroindustriales y metrópolis de países en desarrollo con características similares. Además, los datos de tráfico pueden utilizarse para estimar las emisiones del tráfico y desarrollar estrategias para reducir la contaminación vehicular. Ello contribuirá significativamente a la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible y las metas medioambientales, así como a mejorar la salud de los habitantes.

3.1 Recolección y análisis de datos

La recolección de datos sobre flujo vehicular se realizó en tres ciudades con características contrastantes en la región del Valle del Río Cauca, una ciudad densamente poblada, una agroindustrial y una industrial. Para cada ciudad se realizó un conteo aleatorio mediante grabaciones de video, las cuales fueron procesadas con tecnología de aprendizaje automático. Asimismo, los vídeos procesados se validaron mediante recuento manual. Con el fin de obtener perfiles horarios del flujo vehicular para cada categoría de vehículos, el conteo se normalizó para cada ciudad.

Cali, ciudad densamente poblada con 183,46 habitantes por ha, está situada al sur del valle del río Cauca. Es la principal ciudad de la región y tiene una superficie de 561.7 km² a una altitud de 1070 m.s.n.m., una temperatura media de 23.9 °C y una precipitación de 457.4 mm (Alcaldía de Cali, 2021). Cali cuenta con una red vial de 2,359 km, de los cuales 2,340 km son locales y 19 son intermunicipales. Está estratégicamente conectada con el puerto de Buenaventura y municipios como Palmira y Yumbo, así como con el resto del país. Además de vehículos pesados y buses, por las vías de Cali transitan más de 700 mil vehículos que se encontraban matriculados para el año 2021, de los cuales la mayoría son automóviles particulares y motocicletas (94,1%) (RUNT, 2021).

Palmira es una ciudad agrícola ubicada al suroriente del Valle del Río Cauca. Tiene un área de 1,132 km² a una altitud de 1,001 m.s.n.m, con una temperatura promedio de 23 °C y una precipitación de 1,020 mm. El centro urbano está rodeado por 357,79 km² de cultivos, de los cuales 339 km² son de caña de azúcar en las zonas más llanas (pendiente < 5%). Palmira es una ciudad de aproximadamente 356,259 individuos, con aproximadamente 90% de sus habitantes residiendo en el centro urbano. Está conectada internamente y con otros municipios y regiones a través de kilómetros de vías, de las cuales 825 km son vías locales, y 130 km son vías de conexión regional y nacional. Al igual que Cali y Yumbo, en Palmira no sólo circulan 158,020 vehículos matriculados, sino también buses intermunicipales, camiones de más de 6 ejes para el transporte de caña de azúcar y otros vehículos de carga pesada.

Yumbo es un polo industrial ubicado en el suroccidente del Valle del Río Cauca, a 1,021 m.s.n.m., con una temperatura promedio de 24 °C y una precipitación de 972 mm. Es más pequeño que Palmira y Cali, con un área de 228 km², pero concentra 583 industrias manufactureras y 110,683 habitantes, de los cuales el 86.5% vive en zonas urbanas. Sus principales industrias se dedican a la fabricación de cemento, papel, cartón, productos metalúrgicos y otros. Debido al desarrollo industrial, las industrias requieren trabajadores, y la gente se desplaza constantemente desde Cali, Palmira y otras poblaciones cercanas para cumplir con su jornada laboral. Además de los buses y carros que transportan a los trabajadores, también transitan vehículos de carga pesada debido a la vocación industrial. Además del flujo vial intermunicipal y el transporte de carga, hay 22,879 vehículos matriculados, según el RUNT (2021). La mayoría son motocicletas (14,227) y vehículos livianos (6,599).

Para cada ciudad, seleccionamos los lugares de recuento basándonos en el análisis de información secundaria teniendo en cuenta la cobertura, representatividad y seguridad de cada punto. Para la caracterización de la malla vial utilizamos Open Street Maps para obtener los segmentos viales, coordenadas geográficas, longitud, número de carriles y tipo de vía (primaria, secundaria y terciaria) en Palmira y Yumbo. Además, en Cali utilizamos IDESC (Geovisor de la Alcaldía de Santiago de Cali), que se complementó con mapas Open Street y rutas de Metrocali (Metrocali es una entidad para desarrollar el Sistema Integrado de Transporte Masivo SITM en Cali). Para mayor verificación de los atributos viales, se utilizó Google Earth y Google Maps (sección 2.4). Una vez caracterizada la malla vial, se eligieron por lo menos 3 sitios por cada tipo de vía, con la finalidad de brindar representatividad de la tipología vial. Además, los puntos se ubicaron a lo largo y ancho de cada ciudad, de tal forma que se representara el comportamiento vial de la ciudad en distintos sectores.

Las cámaras de video de cada punto registraron información de 48 horas para el día típico de martes, miércoles o jueves (25, 27 de octubre y 1, 2 de noviembre de 2022), en 16 sitios en Cali. Mientras que en Palmira y Yumbo se grabó jueves, viernes, sábado y domingo en 11 sitios en Palmira y 9 sitios en Yumbo entre las 0:00 horas del jueves 4 de noviembre de 2021 y hasta las 23:59 horas del domingo 7 de noviembre de 2021, de

manera continua. La ubicación y características de cada uno de los puntos aforados se describen en la **Tabla 3-1** y **Figura 3-1**.

Tabla 3-1: Localización y descripción de las fuentes de datos.

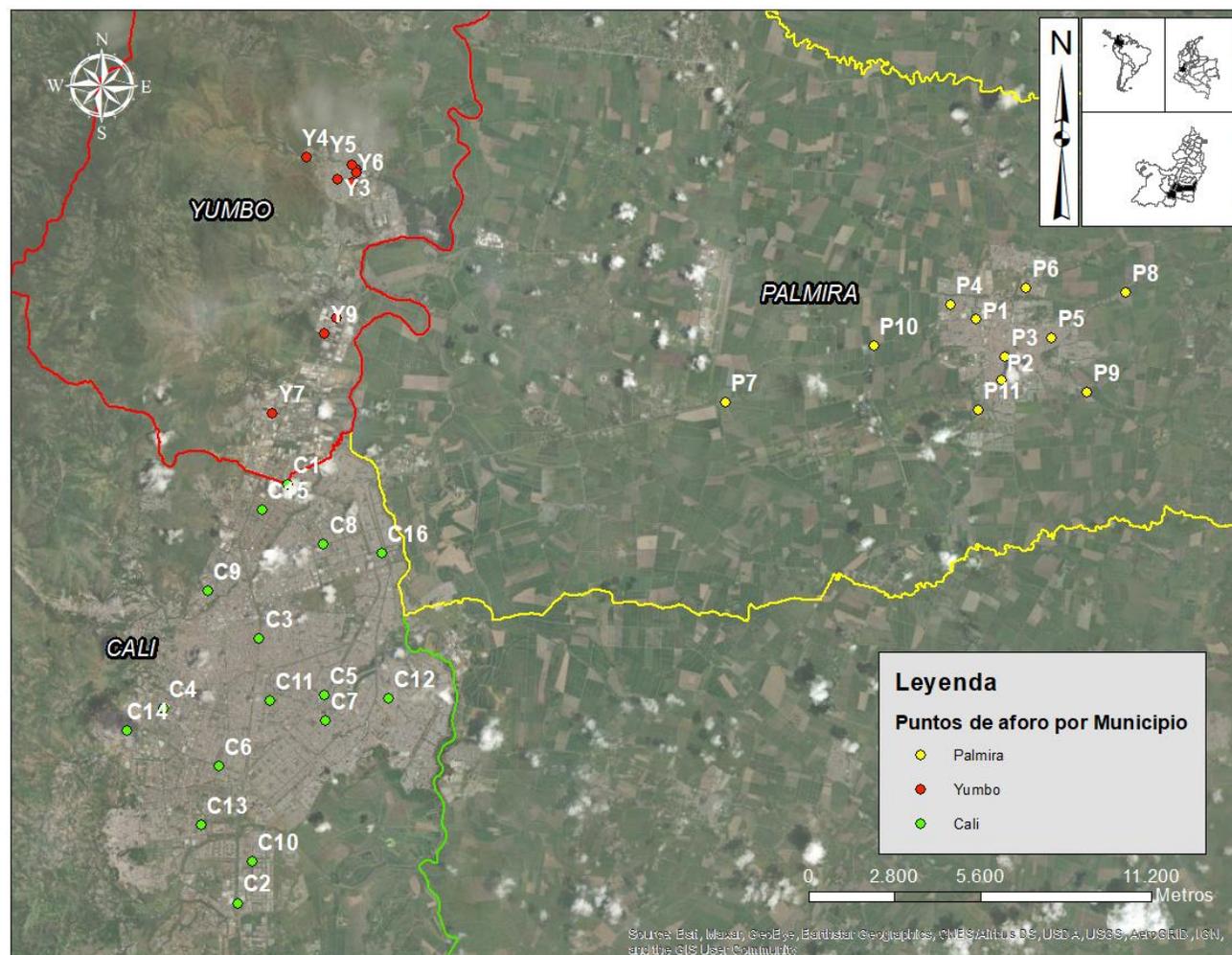
Id	Descripción	Uso de la vía	Coordenada X	Coordenada Y	Velocidad kmh⁻¹
P1	Vía secundaria, 2 direcciones, 2 carriles en cada dirección	Vías urbanas, de entrada y salida	-76.3078	3.5389	21
P2	Vía secundaria, 1 dirección, 2 carriles en cada dirección	Urbano	-76.2998	3.5210	18
P3	Vía secundaria, 2 direcciones, 2 carriles en cada dirección	Urbano	-76.2988	3.5279	17
P4	Vía terciaria, 2 direcciones, 2 carriles en cada dirección	Urbano	-76.3149	3.5409	28
P5	Vía terciaria, intersección de la Carrera 21 con un carril, y la Calle 37 con 2 carriles.	Urbano, residencial	-76.2922	3.5329	23
P6	Vía terciaria, 2 direcciones, 2 carriles en cada dirección	Urbano	-76.2931	3.5482	19
P7	Vía principal, 2 direcciones, 3 carriles en cada dirección	Vía de conexión entre Cali-Palmira	-76.3578	3.5203	90
P8	Vía secundaria, 2 direcciones, 3 carriles en cada dirección	Vía de conexión	-76.2642	3.5464	29
P9	Vía principal, 2 direcciones, 1 carril en cada dirección	Vía de conexión entre Pradera-Palmira	-76.2715	3.5144	51
P10	Vía principal, 2 direcciones, 1 carril en cada dirección	Vía de conexión entre el norte y el sur de VRC	-76.3374	3.5276	76
P11	Vía secundaria, 2 direcciones, 1 carril en cada dirección	Vías urbanas, de entrada y salida	-76.3068	3.5111	26
Y1	Vía secundaria, 1 dirección, 2 carriles en cada dirección	Vías urbanas, de entrada y salida	-76.4896	3.5830	19
Y2	Vía secundaria, 1 dirección, 2 carriles en cada dirección	Vías urbanas, de entrada y salida	-76.4898	3.5821	18
Y3	Vía terciaria, 1 dirección, 2 carriles en cada dirección	Zona urbana, ladera	-76.4953	3.5800	25
Y4	Vía secundaria, 2	Urbano	-76.5044	3.5866	44

Id	Descripción	Uso de la vía	Coordenada X	Coordenada Y	Velocidad kmh⁻¹
	direcciones, 1 carril en cada dirección				
Y5	Intersección de la Carrera 2 con un carril (vía secundaria), y la Calle 10 con 1 carril (vía terciaria).	Urbana, zona de carga y descarga de productos	-76.4911	3.5845	18
Y6	Intersección de la Carrera 8 con un carril (vía terciaria), y la Calle 11 con 1 carril (vía secundaria).	Urbano	-76.4912	3.5793	26
Y7	Vía secundaria, 2 direcciones, 1 carril en cada dirección	Vía industrial	-76.5089	3.5113	50
Y8	Vía secundaria, 2 direcciones, 1 carril en cada dirección	Vía industrial	-76.5004	3.5499	44
Y9	Vía secundaria, 2 direcciones, 1 carril en cada dirección	Vía industrial	-76.4991	3.5347	36
C1	Vía principal, 2 direcciones, 3 carriles en cada dirección	Vías urbanas, de entrada y salida	-76.5101	3.4903	43.5
C2	Vía principal, 2 direcciones, 3-4 carriles en cada dirección	Vías urbanas, de entrada y salida	-76.5248	3.3671	55
C3	Vía principal, 2 direcciones, 3 carriles en cada dirección	Urbano, entrada al centro de la ciudad	-76.5184	3.4449	48.5
C4	Vía principal, 2 direcciones, 2 carriles y 1 carril exclusivo para transporte público en cada dirección.	Urbano	-76.5466	3.4244	35.5
C5	Vía principal, 2 direcciones, 4 carriles y 1 carril exclusivo para transporte público en cada dirección.	Urbano	-76.4993	3.4284	35
C6	Vía secundaria, 2 direcciones, 2 carriles en cada dirección	Urbano	-76.5303	3.4076	34
C7	Vía secundaria, 1 dirección, 2 carriles en cada dirección	Urbano	-76.4991	3.4209	30
C8	Vía secundaria, 2 direcciones, 2 carriles en cada dirección	Urbano	-76.4995	3.4727	31

Id	Descripción	Uso de la vía	Coordenada X	Coordenada Y	Velocidad kmh⁻¹
C9	Vía secundaria, 1 dirección, 3 carriles en cada dirección	Urbano, sector turístico	-76.5335	3.4589	29
C10	Vía secundaria, 2 direcciones, 3 carriles en cada dirección	Urbano	-76.5204	3.3792	27
C11	Vía terciaria, 2 direcciones, 1 carril en cada dirección	Urbano	-76.5153	3.4268	23.5
C12	Vía terciaria, 1 dirección, 2 carriles en cada dirección	Urbano	-76.4803	3.4275	19
C13	Vía terciaria, 2 direcciones, 1 carril en cada dirección	Urbano	-76.5356	3.3901	23.5
C14	Vía terciaria, 2 direcciones, 1 carril en cada dirección	Zona urbana, ladera	-76.5573	3.4179	26
C15	Vía terciaria, 2 direcciones, 1 carril en cada dirección	Urbano	-76.5176	3.4829	23
C16	Vía terciaria, 2 direcciones, 1 carril en cada dirección	Urbano	-76.4822	3.4700	23

Fuente: Elaboración propia.

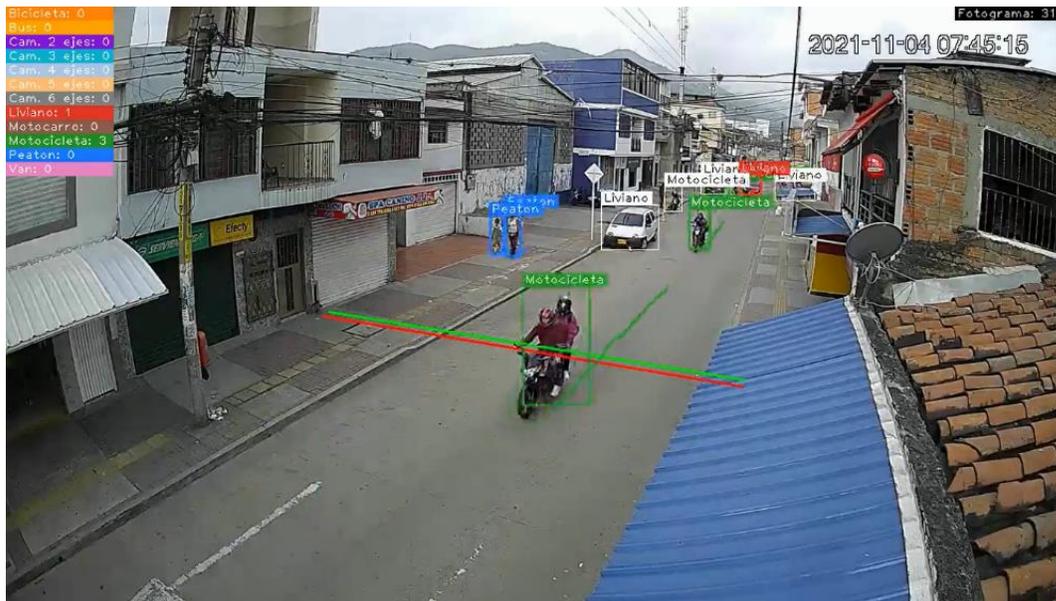
Figura 3-1: Ubicación de los sitios de conteo en Cali, Palmira y Yumbo.



Fuente: Elaboración propia.

Los videos recolectados en cada uno de los puntos de aforo fueron procesados utilizando el software DeoData, que utiliza tecnología de aprendizaje automático para contar y categorizar los diferentes tipos de vehículos (**Figura 3-2**). Posteriormente se analizaron las series temporales de cada punto y para los datos faltantes (<5%) se utilizó un método basado en la interpolación lineal para imputar dichos datos de la serie desestacionalizada (método Hyndman – Forecasting).

Figura 3-2: Captura del proceso Deodata.



Fuente: Elaboración propia.

Además, durante el registro del tráfico, se realizaron 85 conteos manuales en una muestra aleatoria durante 15 minutos, para cada punto. Mediante el indicador estadístico GEH (en honor a Geoffrey E. Havers) (Ecuación 3-1), utilizado en la ingeniería de transporte, comparamos los recuentos de tráfico manuales y automatizados. Comprobamos que los resultados se ajustan al estado estándar de la práctica en ingeniería de tráfico. La norma empleada por Highways England estipula que el 85% de los valores GEH deben ser inferiores a 5 (**Tabla 3-2**). Según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México, los conteos se aceptan si cumplen las siguientes condiciones: menos del 60% del GEH es inferior a 5, el 95% de los controles son inferiores a 10 y todos los controles son inferiores a 12 (Cuellar Cepeda, 2016).

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M-C)^2}{M+C}} \quad (3-1)$$

Dónde:

M = Conteo modelizado (recuentos DeoData), y C = Conteo recontado (manual).

Tabla 3-2: Norma GEH utilizada por Highways England.

Estándar	Número de casos	Valor	En rango
85% GEH <5	55	89%	Sí
95% GEH <10	62	100%	Sí
100% GEH <12	62	100%	Sí

Fuente: Cuéllar Cepeda, 2016.

Una vez validados los conteos vehiculares, las categorías de vehículos asociadas a los vehículos de carga, a saber, camiones de 2 ejes, camiones de 3 y 4 ejes, camiones de 5 ejes y camiones de 6 ejes, se agruparon en la categoría única denominada "Camiones". Además, los cuatro recuentos de 15 minutos de cada hora se agruparon para obtener los recuentos horarios de cada categoría. Los perfiles de vehículos para cada ciudad se construyeron entonces normalizando los recuentos horarios, tanto para los días típicos como para los atípicos (fin de semana), de la siguiente manera (**Tabla 3-3**):

Tabla 3-3. Estimación de los perfiles de los vehículos a partir de los recuentos de vehículos.

Estimación	Ecuación	Variables
Conteo diario normalizado por categoría vehicular	$P_{v,h} = \frac{C_{v,h}}{C_{v,24h}}$	$P_{v,h}$, corresponde a la proporción de vehículos (v) para la hora (h). $C_{v,h}$, conteo de la categoría vehicular (v) en la hora (h). $C_{v,24h}$ conteo diario ($24h$) de la categoría vehicular (v).

Estimación	Ecuación	Variables
Conteo normalizado por hora por ciudad	$P_v = \frac{C_{v,h}}{C_h}$	P_v , es la contribución de la categoría vehicular (v), al conteo total horario (h). $C_{v,h}$, conteo de la categoría vehicular (v) en la hora (h). C_h conteo total de todas las categorías vehiculares en la hora (h).
Perfil horario de las categorías vehiculares por tipología vial	$P_{v,R,h} = \frac{C_{v,R,h}}{C_{v,R,24h}}$	$P_{v,R,h}$, corresponde a la proporción de vehículos (v) en la tipología vial (R) en la hora (h). $C_{v,R,h}$, conteo de la categoría vehicular (v), en la tipología vial (R) durante la hora (h). $C_{v,24h}$ conteo total de la categoría vehicular (v), en la tipología vial (R) durante las 24 horas del día ($24h$)
Distribución de la categoría vehicular por tipo de vía	$D_{v,R} = \frac{\sum_h^{24} C_{v,R}}{\sum_v^4 C_R}$	$D_{v,R}$, distribución de la categoría vehicular (v) en el tipo de vía (R). $\sum_h^{24} C_{v,R}$, conteo diario de la categoría vehicular (v) en el tipo de vía (R) $\sum_v^4 C_R$, conteo total de vehículos en la categoría vial (R).

Fuente: Elaboración propia.

De este modo, se puede utilizar un recuento diario normalizado por categoría de vehículo en situaciones en las que la información disponible son recuentos diarios por categoría de vehículo. Además, utilizando nuestros perfiles, es posible obtener un recuento horario por categoría de vehículo, basado en el tipo de ciudad. Si la información disponible son recuentos horarios de todos los vehículos que pasan por una vía en una ciudad industrial, agroindustrial o urbana, entonces se pueden utilizar los perfiles de recuento horario normalizado por ciudad. Es posible obtener conteos horarios desagregados para cada categoría vehicular en una vía primaria, secundaria o terciaria a través del perfil horario por categorías vehiculares por tipo de vía. Por último, si se necesita conocer la composición del parque circulante en un tipo de vía, se podrían utilizar los valores de la distribución de categorías de vehículos por tipo de vía.

Durante las dos campañas de recuento de vehículos de 2021 y 2022, se recogieron 15,816 datos. Tras el procesamiento de los datos para la estimación de los perfiles de los

vehículos, se obtuvieron 3,954 datos de conteo vehicular (UNAL & CVC, 2023a, 2023b, 2023c). El conjunto de datos obtenido contiene 12 elementos, que se describen en la **Tabla 3-4**.

Tabla 3-4: Campos clave del conjunto de datos.

Nombre de columna	Descripción
Ciudad	Punto de conteo ciudad
Ubicación	Nombre de la vía contada
Tipo_ vía	Clasificación de las vías en el punto de conteo
Número_carril	Número de carriles en la vía de conteo
Id	Identificación de puntos de conteo. C a los puntos de Cali, P a Palmira e Y a Yumbo
Dirección_vía	Identificación de movimientos según la referencia RILSA
Tipo_vehículo	Categoría de vehículo: Autobús, Coche particular, Motocicleta, Camión
Fecha	Fecha del recuento de vehículos
Cuenta	Número de vehículos contabilizados
Contar_por_carril	Cuenta/Número_carril
Día	Típico o fin de semana
Hora	Hora del conteo

Fuente: Elaboración propia

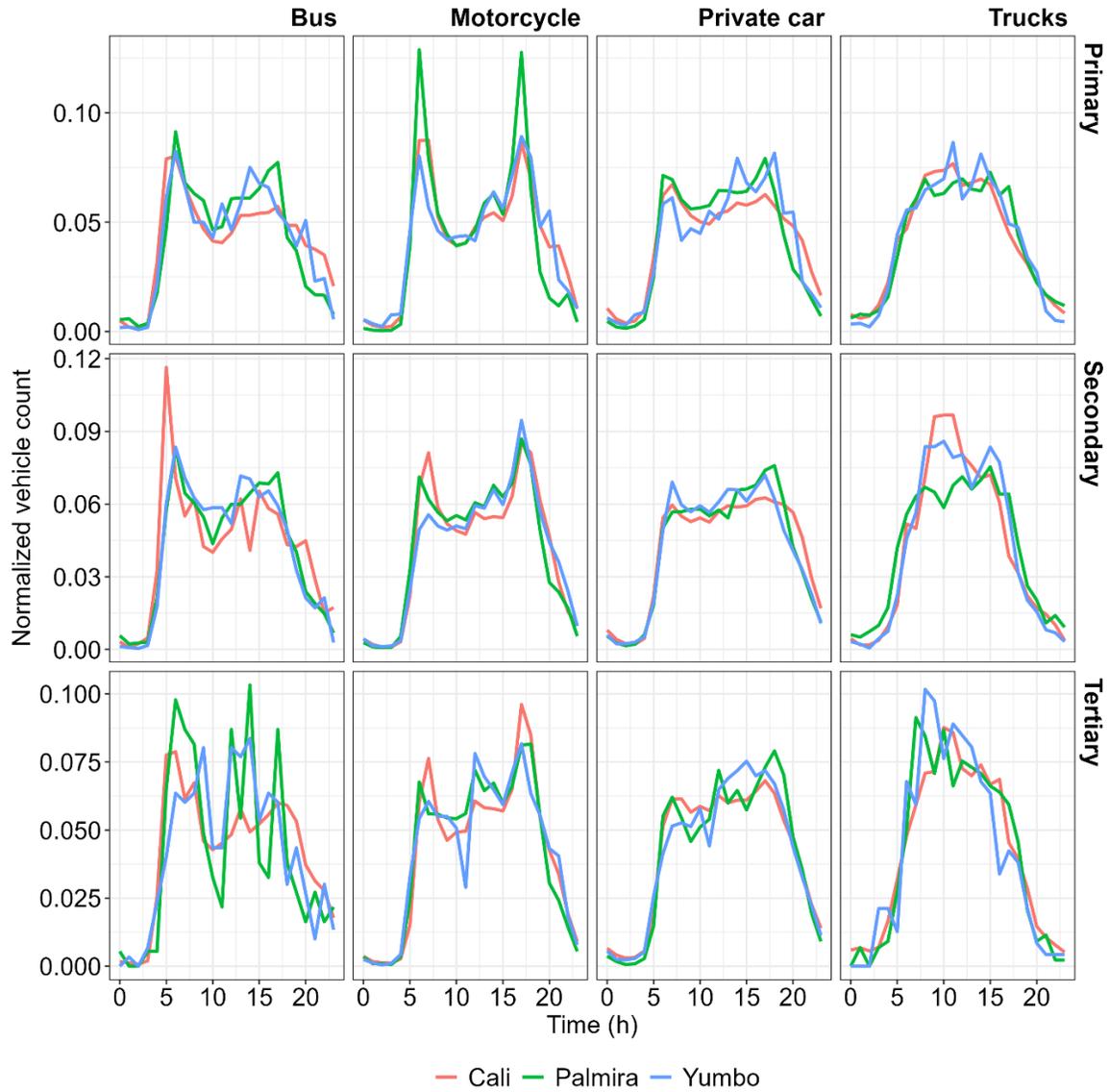
3.2 Perfiles de tráfico vehicular

La normalización de los datos permite comparar datos de diferentes lugares, periodos de tiempo o condiciones en una escala común. Además, proporciona una visión global de los patrones de tráfico. Proporciona datos para la modelización y previsión del tráfico. Las

proporciones de tráfico basadas en una escala común pueden utilizarse en futuros estudios con contextos similares. Con el fin de proporcionar una referencia teórica, se aplicaron las fórmulas de la **Tabla 3-3** para la normalización de los conteos vehiculares de Cali, Palmira y Yumbo. En ese sentido, se proponen los siguientes perfiles de tráfico para una ciudad urbana, una ciudad industrial y una ciudad agroindustrial en un valle interandino de un país en desarrollo.

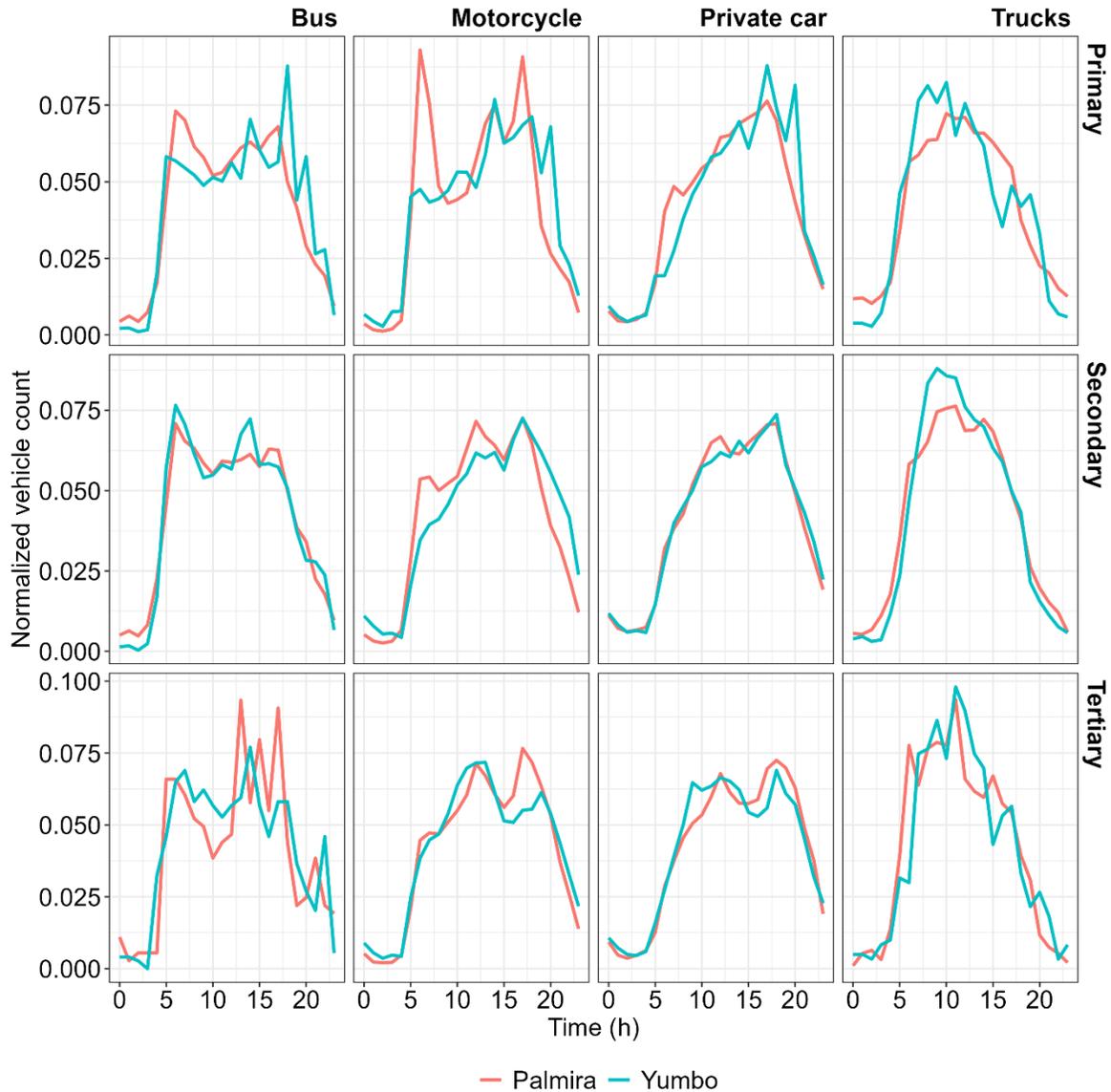
Las **Figura 3-3** y **Figura 3-4** muestran la normalización de los conteos por categoría vehicular durante una hora y vía específica. En relación con el conteo diario de cada categoría dentro del tipo de vía correspondiente, tanto para el día típico (**Figura 3-4**) como para el día atípico o fin de semana (**Figura 3-3**). En un día típico, observamos que las motocicletas y los vehículos particulares tienen un comportamiento similar en cada tipo de vía. Hay dos picos en torno a las 6 de la mañana y las 5 de la tarde. Sin embargo, observamos otro pico en las vías terciarias al mediodía. Por el contrario, los camiones presentan un comportamiento campaniforme en los tres tipos de vías, con una actividad vehicular constante entre las 8 de la mañana y las 4 de la tarde. Además, se observa que los camiones están presentes en mayor proporción en las vías secundarias de Cali y Yumbo. En cuanto a los buses, el paso de buses por vías primarias y secundarias en los tres municipios es similar. Aunque Cali es la única ciudad que cuenta con un sistema de transporte público de buses, Palmira y Yumbo no lo tienen. Sin embargo, transitan con frecuencia buses intermunicipales y rutas que transportan trabajadores en Yumbo. En las vías terciarias, el comportamiento de los buses es variable, y el pico observado puede estar asociado a los turnos de trabajo de 8 horas y a los buses intermunicipales que transitan por el interior de las ciudades. Todas las categorías se comportan de manera similar en un día atípico, con excepción de los vehículos particulares, que presentan un aumento en el pico de la tarde.

Figura 3-3: Perfil horario a categorías vehiculares por tipo de vía en Cali, Palmira y Yumbo, durante un día típico.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-4: Perfil horario a categorías vehiculares por tipo de vía en Cali, Palmira y Yumbo, durante un día atípico.

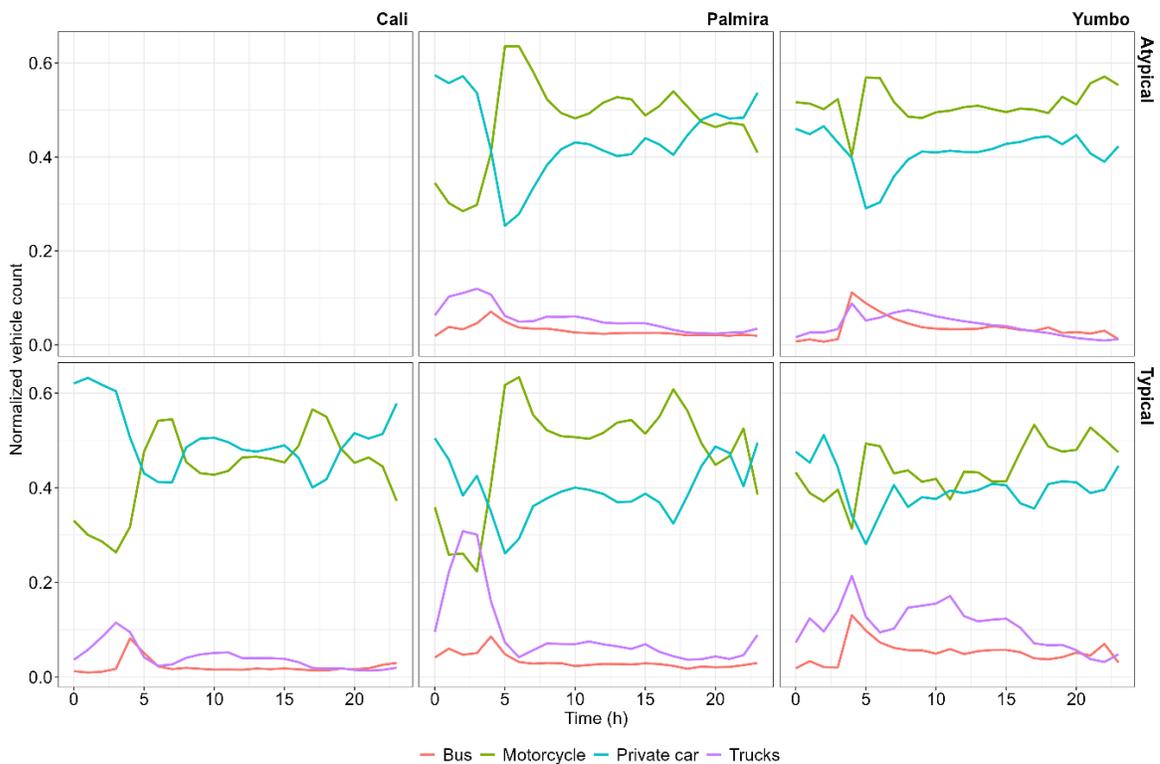


Fuente: Elaboración propia

La **Figura 3-5** muestra la normalización de los conteos por categoría vehicular durante una hora en relación con el recuento horario total para el día típico y el día atípico. Durante un día típico, en las tres ciudades, los vehículos particulares y las motocicletas representan alrededor del 90% del parque automotor en circulación cada hora. Es coincidente con la distribución de vehículos matriculados en cada ciudad. Sin embargo,

los autobuses y camiones tienen una participación inferior al 10% de forma regular y presentan un pico antes de las 5 de la mañana. Aunque el pico indica que más del 20% de los vehículos son camiones durante los días típicos en Palmira y Yumbo, lo que está relacionado con las actividades económicas en cada ciudad. En los días atípicos, los automóviles y las motocicletas tienen la mayor participación, mientras que la participación en las horas pico de los camiones disminuye del 20% al 10. Esto puede atribuirse a las restricciones a la circulación de vehículos durante los fines de semana para los vehículos pesados.

Figura 3-5: Conteo normalizado horario por ciudad y día típico en Cali, Palmira y Yumbo, y día atípico en Palmira y Yumbo.

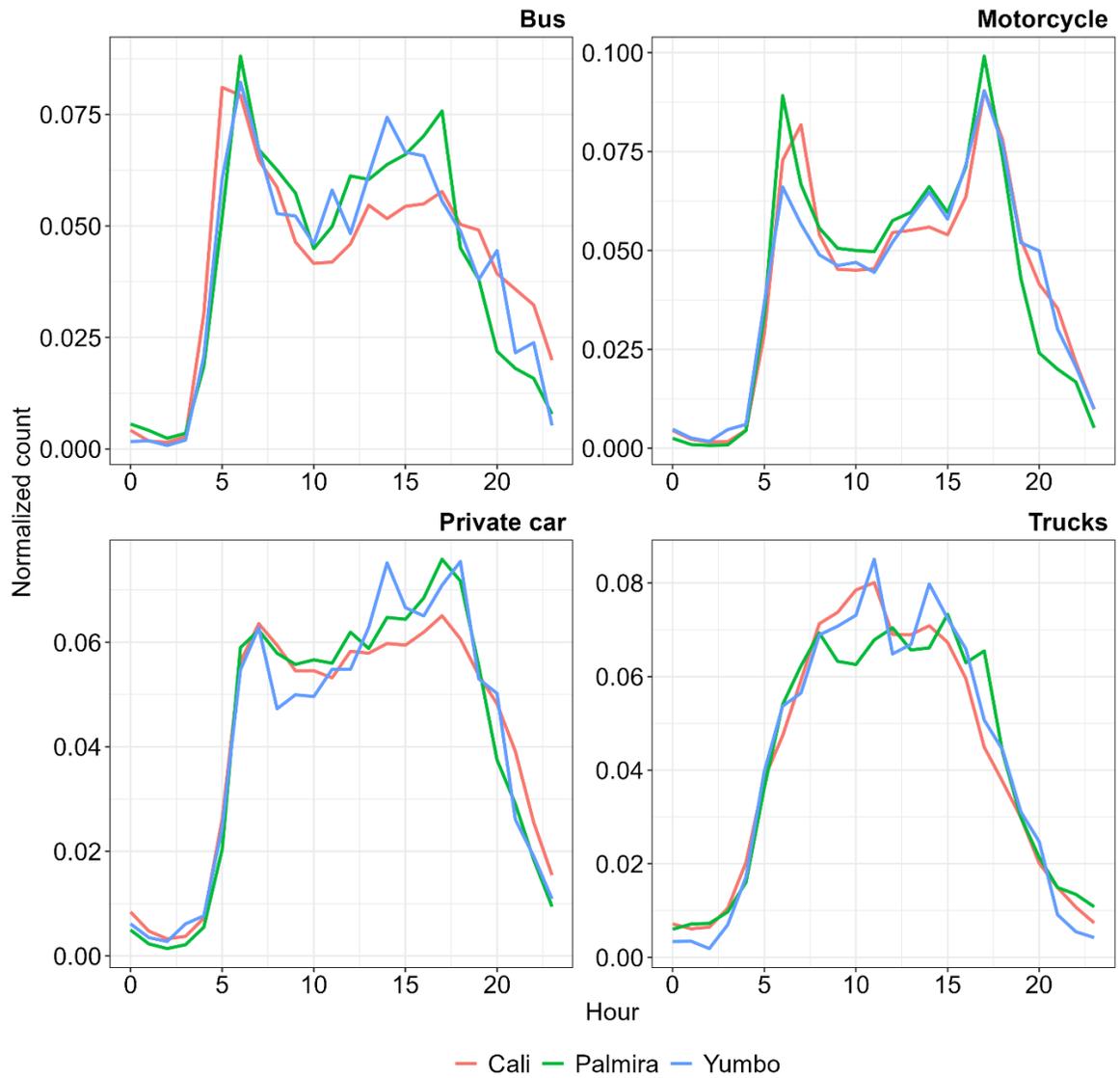


Fuente: Elaboración propia

La **Figura 3-6** muestra los volúmenes de tráfico normalizados para una duración de 24 horas. Los perfiles de tráfico normalizados se obtienen para cada tipo de vehículo. Durante los días normales, se observan distintas pautas en el perfil de tráfico

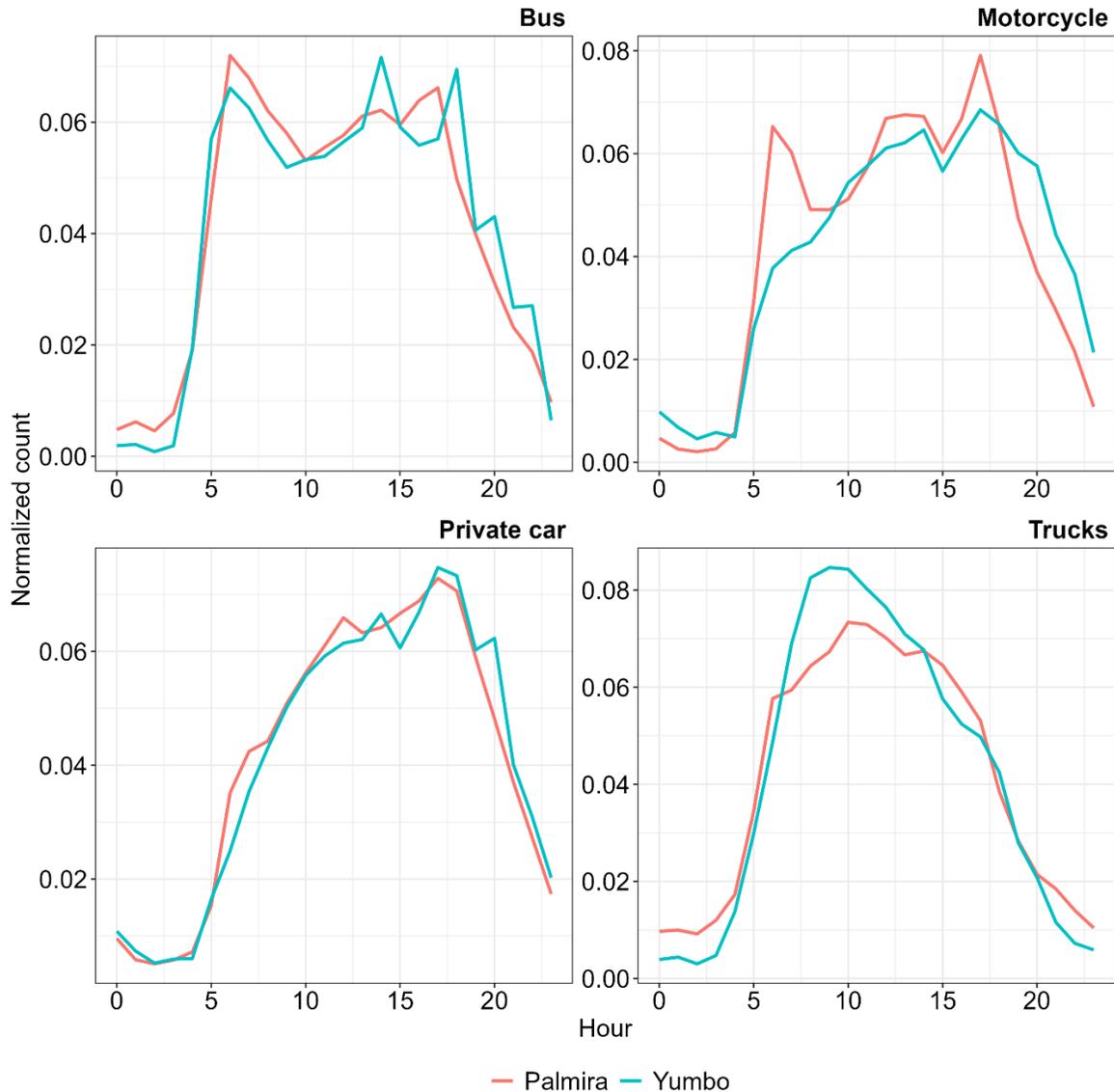
normalizado en función del tipo de vehículo. Por ejemplo, las series temporales muestran estacionalidad para el tráfico de autobuses, coches particulares y motocicletas, con un mayor flujo de tráfico durante las horas pico, entre las 6 y las 8 de la mañana y entre las 4 y las 6 de la tarde. Mientras que los camiones tienen una mayor actividad entre las 9 y las 11 de la mañana. Del mismo modo, para el día atípico, también se observan patrones distintos dentro de cada categoría (**Figura 3-7**). Los autobuses y las motocicletas siguen presentando una estacionalidad con horas pico en torno a las 6h, 14h y 17h. Además, los camiones y los vehículos privados presentan un contraste, ya que los camiones tienen un mayor flujo de vehículos entre las 8 y las 11 de la mañana y los vehículos privados tienen una mayor actividad vehicular entre las 5 y las 7 de la tarde.

Figura 3-6: Conteo normalizado diario por categoría de vehículo en las ciudades de Cali, Palmira y Yumbo, durante un día típico.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-7: Conteo normalizado diario por categoría de vehículo en las ciudades de Cali, Palmira y Yumbo, durante un día atípico.

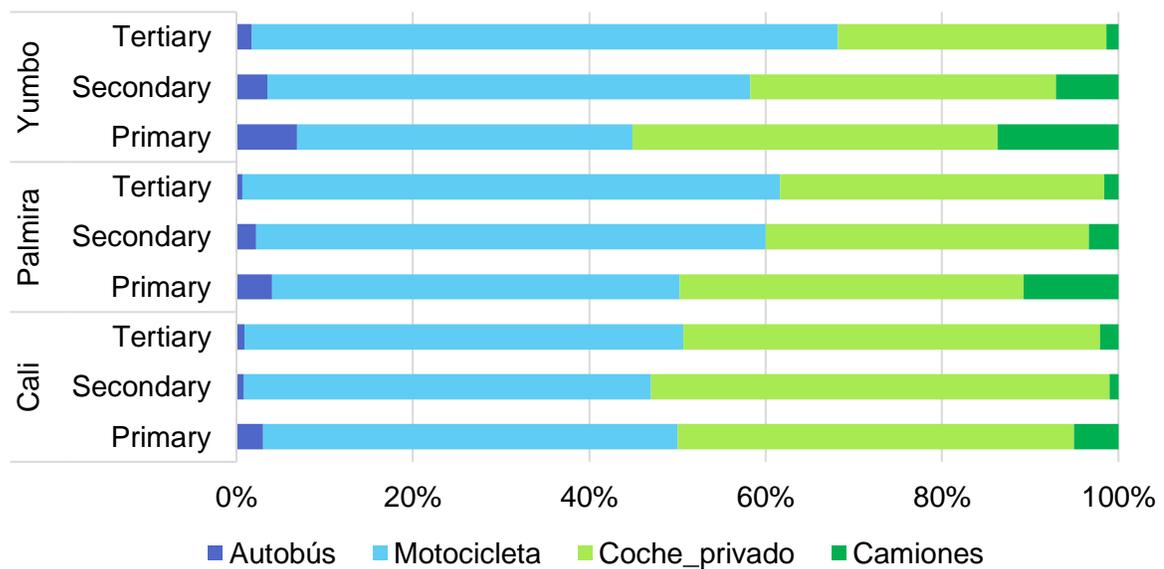


Fuente: Elaboración propia

La composición del parque automotor por tipo de vía durante los días típicos y atípicos se muestra en las **Figura 3-8** y **Figura 3-9**, respectivamente. Se observa que el flujo de automóviles y motocicletas prevalece para todos los tipos de vías, tanto en la ciudad urbana como en la ciudad industrial y agroindustrial. Probablemente se deba a que es el vehículo más utilizado para transportarse, y en las tres ciudades, el registro vehicular

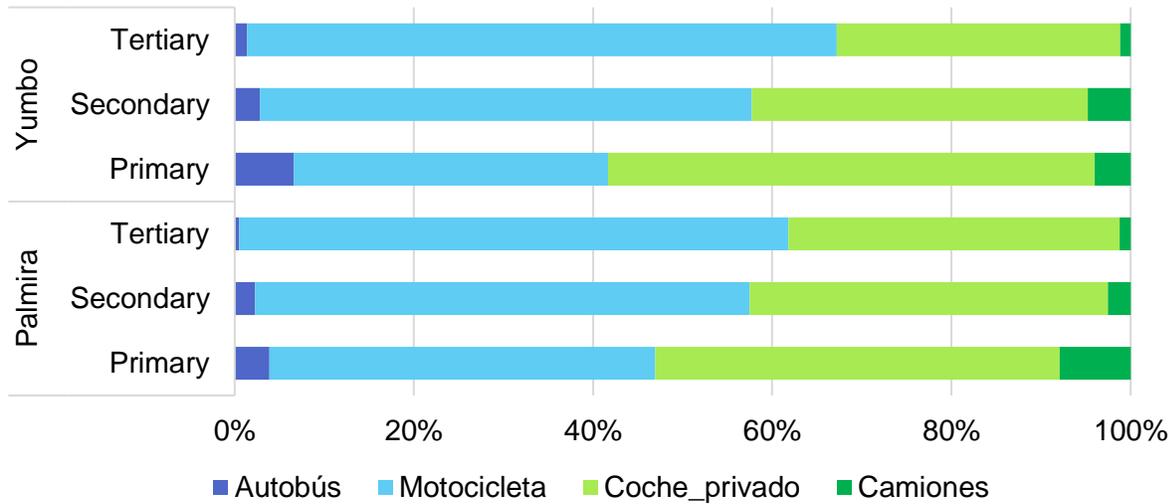
indica que se utiliza cerca del 95% de motocicletas y automóviles. Tanto para Cali como para Yumbo, los buses tienen una mayor participación en las vías primarias, seguidas de las secundarias y terciarias. Sin embargo, el porcentaje de buses en Yumbo es mayor que en Cali, probablemente debido a que en Cali hay un mayor número de motos y carros. Esto hace que la proporción de buses sea menor. En Palmira, los autobuses recorren con frecuencia las vías primarias y secundarias. Por el contrario, los camiones en una ciudad urbana tienden a viajar principalmente por las vías primarias, ya que conectan la ciudad. En una ciudad industrial como Yumbo, los camiones recorren sobre todo las vías secundarias y terciarias, siendo estas últimas principalmente vías industriales, donde se realiza habitualmente la carga y descarga de mercancías. Una ciudad agroindustrial como Palmira tiene una mayor presencia de camiones en las vías primarias y secundarias, lo que coincide con el transporte de productos agrícolas a otras ciudades.

Figura 3-8: Distribución de las categorías de vehículos por tipo de vía durante un día normal en cada ciudad.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-9: Distribución de categorías de vehículos por tipo de vía durante un día atípico en Palmira y Yumbo.



Fuente: Elaboración propia

El perfil diario de las tres ciudades revela que, a pesar de ser ciudades diferentes, la estacionalidad de algunas categorías como autobuses, motocicletas y autos es similar para los 3 tipos de ciudades. Sin embargo, al desagregar el perfil diario por tipo de vía, el flujo vehicular para cada tipo de vía es diferencial para las 3 ciudades, lo cual está relacionado con las actividades económicas de cada ciudad. Además, la composición del parque automotor circulante de vehículos en cada tipo de vía está directamente relacionada con el tipo de ciudad. Como era de esperar, en una ciudad urbana circulan principalmente vehículos particulares y motocicletas, y en menor medida camiones y autobuses, mientras que en una ciudad industrial la participación de los camiones en el parque circulante de vehículos es mayor, especialmente en las vías industriales.

4. Combinación de enfoques *Bottom-up* y *Top-down* para la estimación de emisiones vehiculares

El desarrollo del inventario de emisiones por fuentes móviles en el área de estudio incluyó la estimación y análisis de las emisiones asociadas al tubo de escape y por resuspensión por la actividad vehicular. De acuerdo con la información disponible, como se explicó gráficamente en la sección 2.8, se llevaron a cabo las siguientes estimaciones: i) La estimación *Bottom-up* en los municipios de Cali, Palmira y Yumbo, que incluye el análisis de la actividad vehicular en la malla vial a partir de aforos vehiculares y el uso de factores de emisión utilizando Copert 5.5; ii) la estimación *Bottom-up* en la malla vial nacional a través de los aforos vehiculares reportados por INVIAS y el uso de factores de emisión, estimados con Copert 5.5; iii) la estimación *Top-down* de las emisiones asociadas a la agricultura y cañicultura; y iv) la estimación *Top-down* de las emisiones en la malla vial local de los “otros municipios” del área de estudio, basados en las ventas de combustible reportadas por SICOM. Finalmente, se realiza un análisis comparativo y de conciliación de emisiones de CO₂ estimadas por diferentes enfoques metodológicos.

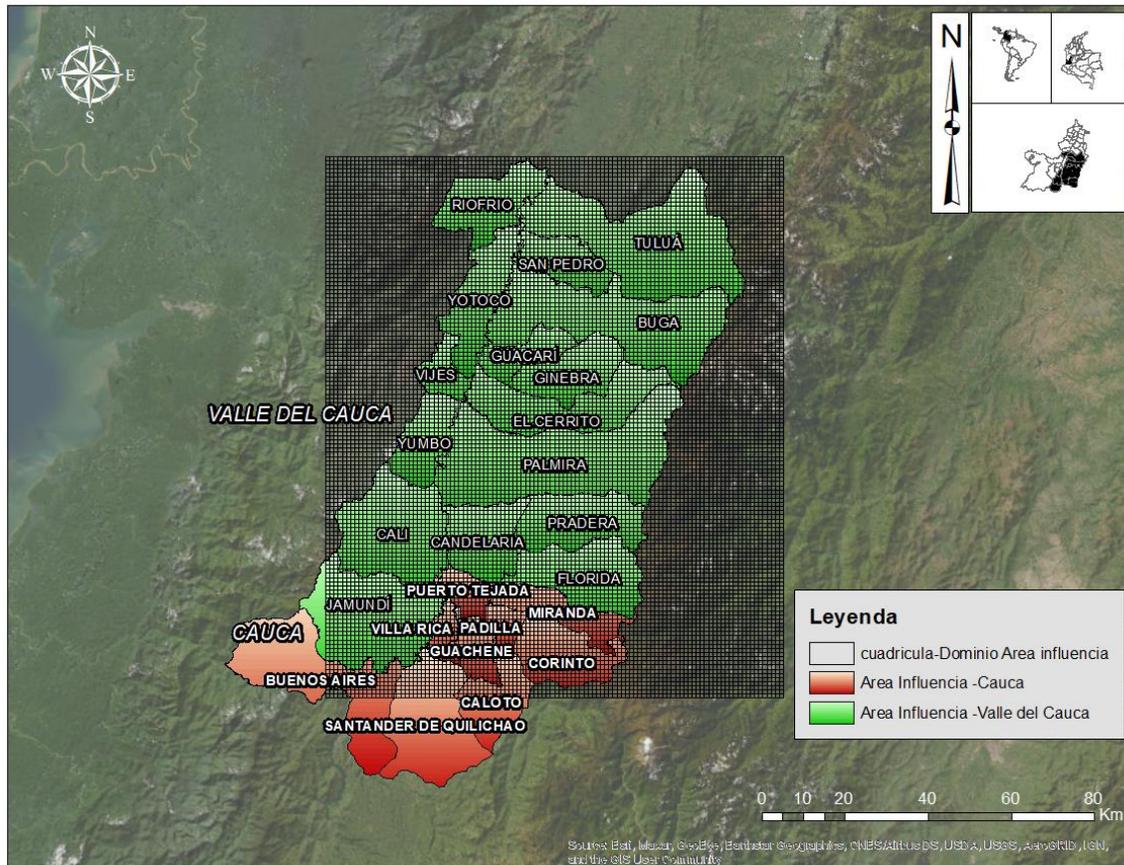
Para las emisiones de la malla vial local, estimadas bajo el enfoque *Top-down*, se empleó el programa de desagregación espacio-temporal de emisiones DROVE (Disgregation of on-ROad Vehicle Emissions), que permite distribuir las emisiones en una grilla definida, en este caso con cuadrículas de 1 km² (González et al., 2020) (**Figura 4-1**).

DROVE emplea 3 niveles de desagregación según la información disponible:

- Nivel 1: Longitud de malla vial.
- Nivel 2: Longitud de malla vial, categorías viales y flujo relativo de tráfico según el tipo de vía.
- Nivel 3: Longitud de malla vial y tráfico vehicular por segmento vial.

De acuerdo con la información disponible, para las emisiones en malla vial local de “otros municipios” del área de estudio se emplea el nivel 2.

Figura 4-1: Grilla para distribución de emisiones DROVE y municipios del área de influencia.



Fuente: Elaboración propia

4.1 Estimación *Bottom-up* en Cali, Palmira y Yumbo

4.1.1 Enfoque metodológico

La estimación y análisis de las emisiones de exhosto asociadas a la actividad vehicular en los municipios de Cali, Palmira y Yumbo se realizó mediante el enfoque *Bottom-up*. Este enfoque incluye el análisis de la actividad vehicular en la red vial a partir del conteo de vehículos y aplicación de polígonos de Thiessen y la estimación de factores de emisión utilizando COPERT 5.5, como se explica en la siguiente ecuación:

$$E_{j,v} = \sum FE_{j,v} * VKT_{t,v} \quad (4-1)$$

Donde,

$FE_{j,v}$, es el factor de emisión del contaminante j, para la categoría de vehículos v ($g\ km^{-1}$) y $VKT_{t,v}$, son los kilómetros recorridos por vehículos de la categoría vehicular v ($km\ veh\acute{u}culo-d\acute{a}^{-1}$)

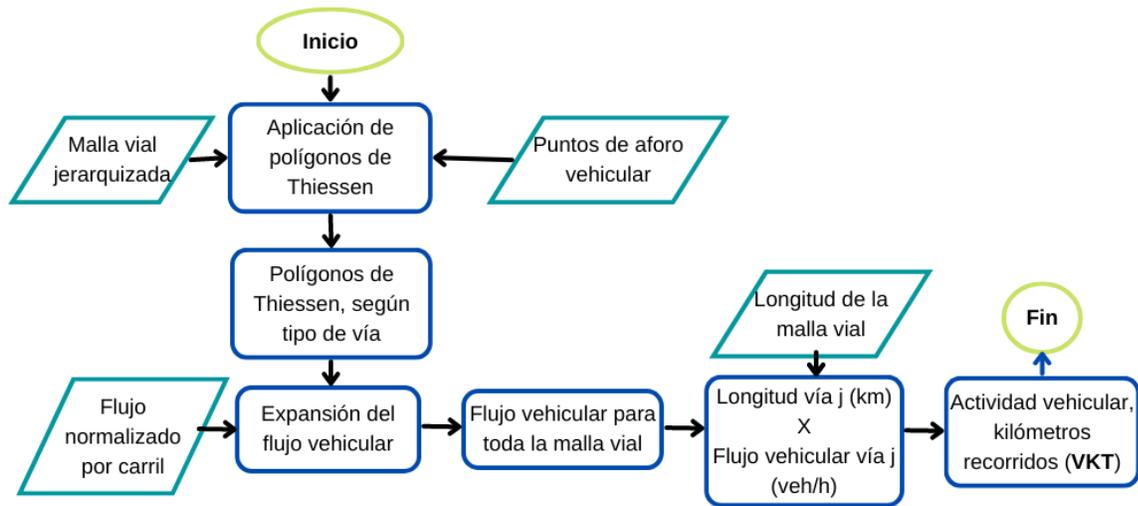
▪ Factor de actividad vehicular

El factor de actividad se estimó con base en aforos vehiculares de las categorías Automóviles de Pasajeros (PC), Vehículos de carga (HDV), Motos y Buses, realizados en noviembre de 2021 y 2022, con un total de 16, 11 y 9 puntos en los municipios de Cali, Palmira y Yumbo, respectivamente, y que fueron descritos en el capítulo 3. Adicionalmente, se utilizó información de 13 conteos vehiculares realizados en Cali durante el 2015, los cuales fueron proyectados al 2022 mediante el análisis de crecimiento poblacional en las comunas de Cali (**Anexo A**). Así mismo, para el municipio de Yumbo se utilizaron 4 aforos adicionales, realizados en 2018, los cuales fueron proyectados de acuerdo con el incremento del parque automotor del municipio.

Posteriormente, mediante los conteos de vehículos por carril, se estimaron volúmenes en la red vial completa, utilizando polígonos de Thiessen. Esta metodología permite establecer un área de influencia para la expansión del flujo vehicular en las demás calles de la red vial, de acuerdo con los puntos aforados, siguiendo el flujograma de la **Figura 4-2**. En este caso, Thiessen se utilizó por separado para cada categoría vial evaluada

(vías primarias, secundarias y terciarias) para garantizar la similitud en el tipo de vía que se proyecta (**Tabla 4-1**). Los polígonos resultantes de esta desagregación se muestran en **Anexo B**.

Figura 4-2: Flujograma para la estimación de flujo vehicular en la malla vial usando polígonos de Thiessen.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-1: Agrupación de puntos de aforo para definición de polígonos de Thiessen.

Puntos de aforo	Agrupación para Thiessen		
	Vías primarias	Vías secundarias	Vías terciarias
Cali	C1	C4	C5
	C2	C6	C6
	C3	C10	C7
	C4	C14	C8
	C5	C43	C9
	C47	C49	C11
	C81	C57	C12
	C83	C76	C13
	C103	C85	C15
	C125	C123	C16
		C129	
		C136	

Puntos de aforo	Agrupación para Thiessen		
	Vías primarias	Vías secundarias	Vías terciarias
Palmira	P7	P1	P4
	P9	P2	P5
	P10	P3	P6
		P8	
		P11	
Yumbo	Y10	Y1	Y3
	Y11	Y2	Y4
	Y12	Y5	Y5
	Y13	Y6	Y6
		Y7	
		Y8	
		Y9	

Fuente: Elaboración propia

Esta agrupación, siguiendo el proceso descrito en la **Figura 4-2**, permite la estimación de flujo vehicular por segmento vial según su clasificación a partir de la ecuación 4-2.

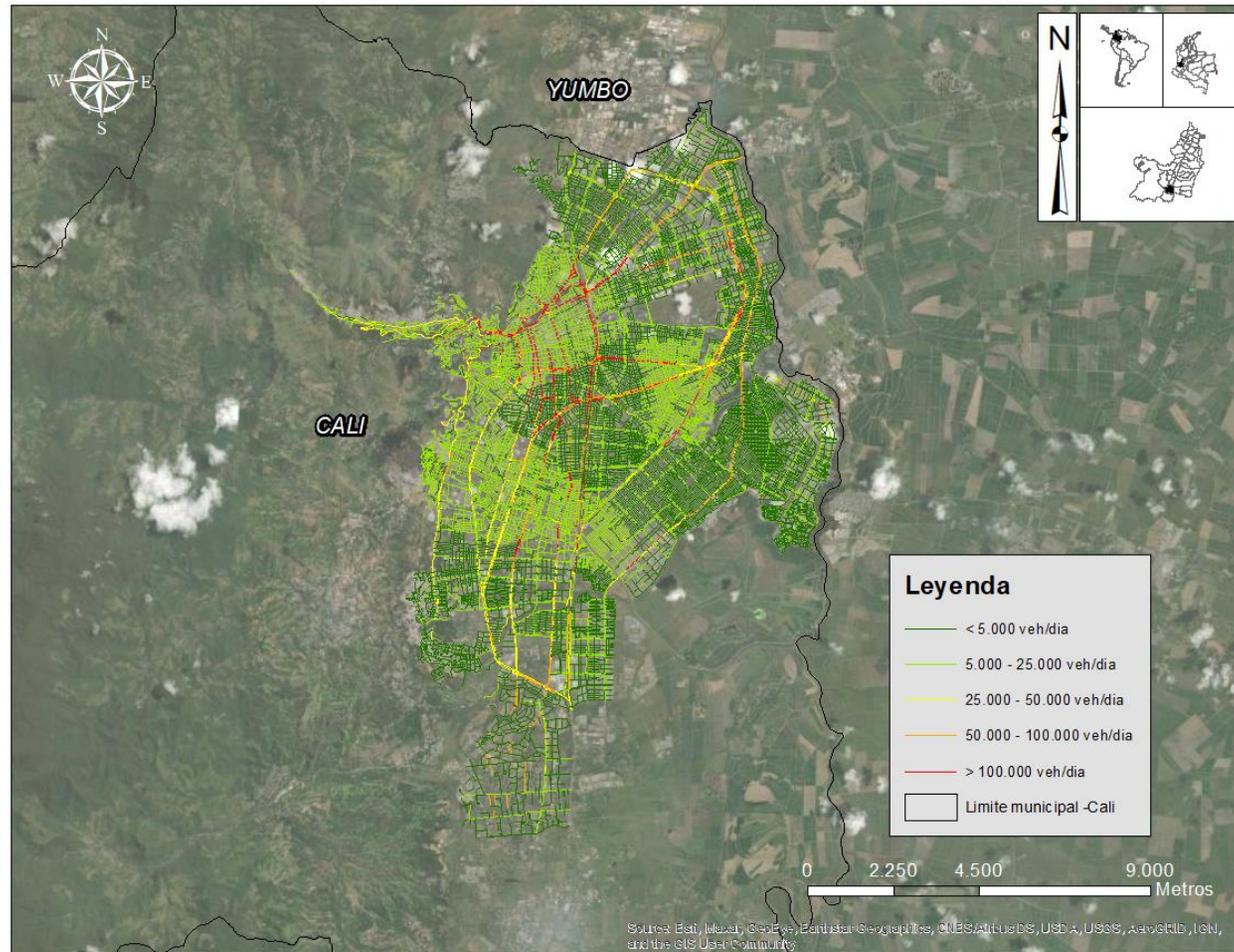
$$FV_{n,v,h,d,t} = FN_{v,t,h,d} * C_n \quad (4-2)$$

Donde:

$FV_{n,v,h,d,t}$ es el flujo vehicular en el segmento vial “n”, para la tipología vehicular “v”, en la hora “h” del día “d” en el polígono de Thiessen “t”. $FN_{v,t,h,d}$ es el flujo vehicular de la categoría “v” normalizado por carril del nodo “t”, para la hora “h” del día “d”. C_n es el número de carriles del segmento vial “n”

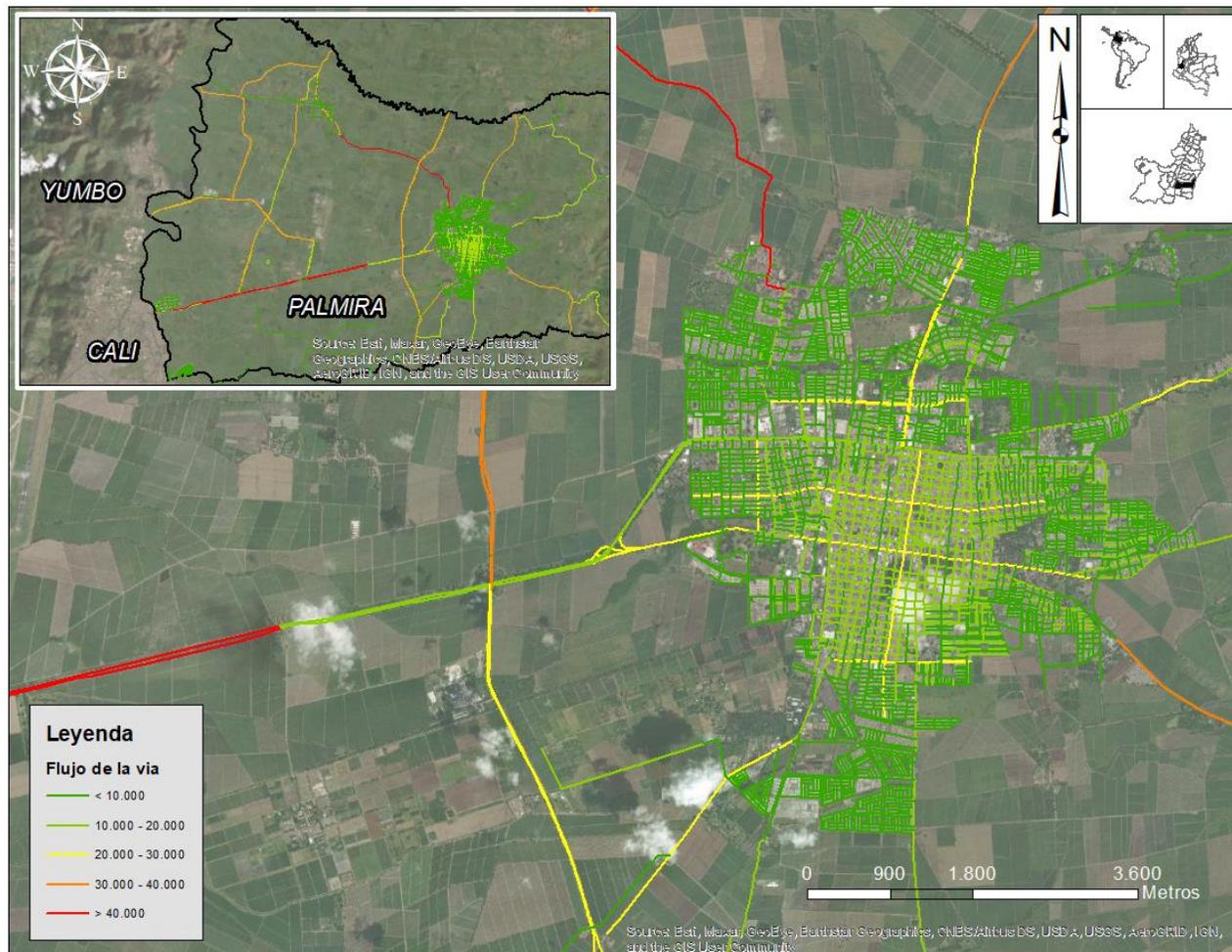
De esta manera, se obtuvo el flujo vehicular en los municipios de Cali, Palmira y Yumbo, como se muestra en la **Figura 4-3**, **Figura 4-4** y **Figura 4-5**.

Figura 4-3: Mapa de flujo vehicular durante un día típico de Cali.



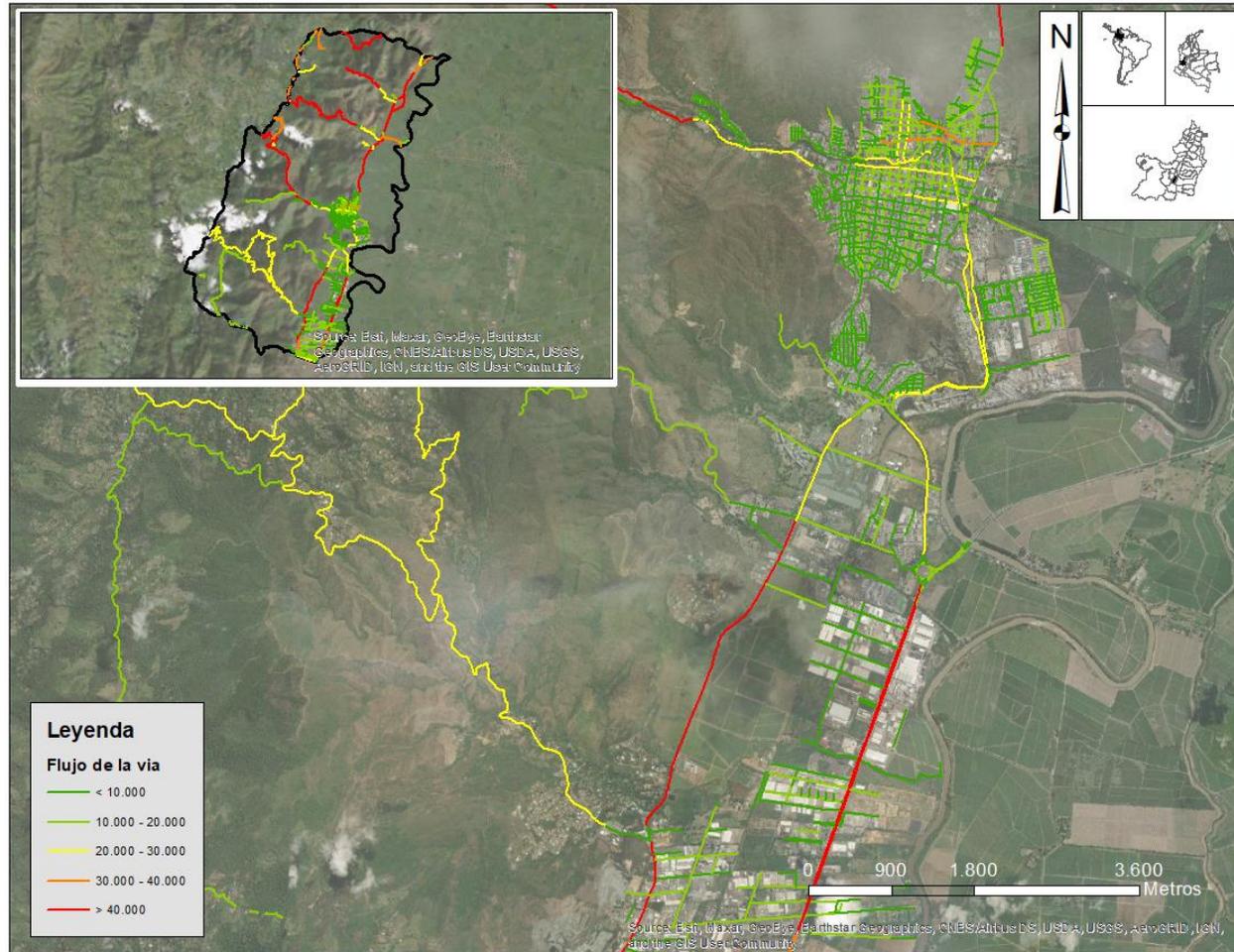
Fuente: Elaboración propia

Figura 4-4: Mapa de flujo vehicular durante un día típico de Palmira.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-5: Mapa de flujo vehicular durante un día típico de Yumbo.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado el flujo vehicular para cada vía de los municipios, se aplica la ecuación 4-3, donde a través del flujo vehicular de la categoría vehicular v en el tramo vial t ($F_{t,v}$) y la longitud de cada tramo de vía t (L_t). La actividad vehicular se obtiene en kilómetros recorridos por vehículo, para cada categoría de vehículos v en cada tramo vial t ($VKT_{t,v}$)

Tabla 4-4.

$$VKT_{t,v} = L_t * F_{t,v} \quad (4-3)$$

Dado que el análisis computarizado del conteo vehicular no permite diferenciar entre vehículos livianos tipo taxi y vehículos particulares, durante los 85 conteos manuales, se contabilizaron como una categoría individual los taxis y los vehículos particulares. De tal forma que, a través de la proporción de taxis con respecto a todos los vehículos livianos, se logró transformar la categoría de vehículos livianos en las categorías de particulares y taxis, para cada ciudad (**Tabla 4-2**). En este sentido se pudo observar que, en promedio, los taxis son alrededor del 18% de los vehículos livianos que circulan en las 3 ciudades. Sin embargo, en Cali la proporción es mayor con un 24.4%, mientras que en Palmira la proporción es la mitad que en Cali.

Tabla 4-2: Relación de vehículos particulares y taxis.

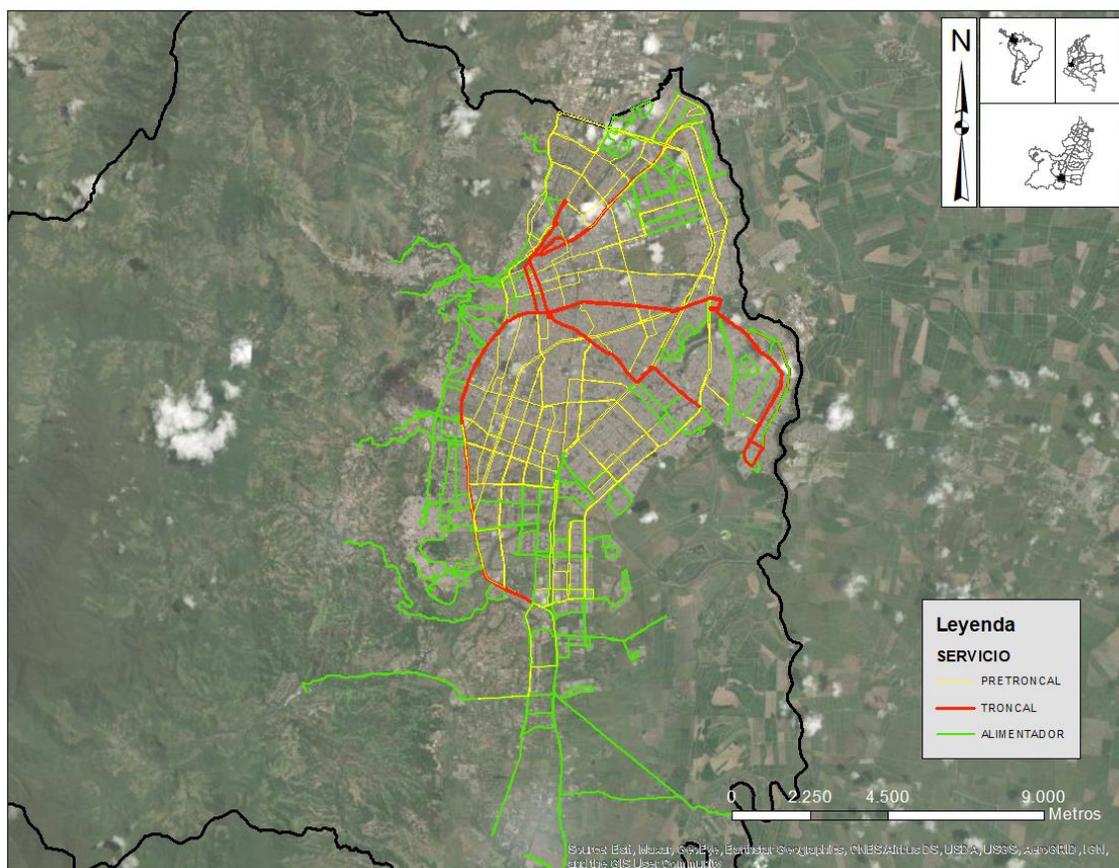
Ciudad	Tipo de vehículo	Número de vehículos aforados	Relación porcentual del aforo de vehículos livianos
Cali	Particulares (Automóvil, Camioneta, Campero)	3865	75.6%
	Taxis	1216	24.4%
Palmira	Particulares (Automóvil, Camioneta, Campero)	1,763	87.7%
	Taxis	247	12.3%
Yumbo	Particulares (Automóvil, Camioneta, Campero)	949	81.9%
	Taxis	210	18.1%

Fuente: Elaboración propia

Debido a que Cali es el único municipio que cuenta con un sistema de transporte público, el conteo de buses en la ciudad no se tuvo en cuenta, ya que se contaba con información del trazado y frecuencia de las rutas. Mientras que para Palmira y Yumbo si se tuvo en cuenta los conteos de la categoría buses y se asocian principalmente a los buses de transporte intermunicipal. Para la estimación de la actividad vehicular del servicio de transporte público colectivo de la ciudad de Cali, se utilizó información del trazado de las rutas e información secundaria que permite calcular la frecuencia de los buses que cubren dicha ruta, tanto para el “Sistema integrado de Transporte MIO”, como el Transporte Público Colectivo Tradicional (TPCT):

- Sistema integrado de transporte MIO

La estimación de los kilómetros recorridos en una red de transporte - VKT para el MIO se basó en las frecuencias reportadas para el diseño operacional del sistema, en sus diferentes componentes Troncal, Pretroncal y complementario, así como los recorridos de cada una de las rutas y el tipo de vehículo que las cubría (**Figura 4-6**), las cuales fueron cruzadas con las distancias recorridas por cada ruta.

Figura 4-6: Rutas de Sistema MIO según sus componentes.

Fuente: Elaboración propia a partir de Metrocali.

- Transporte Público Colectivo Tradicional - TPCT

En relación con el TPCT, debido a que no se contaba con un diseño de operación, se estimaron las frecuencias a partir de los tiempos de ciclo y flota vehicular disponible según, Cal y Mayor (2019), Castaño & Cardona (2022) (**Tabla 4-3**). Además, se usaron los trazados de las rutas según Univalle, 2015 (**Figura 4-7**), para estimar las distancias recorridas por cada una de las rutas.

Para esta estimación se asumió que:

- El número de buses de cada ruta es equivalente al total de buses de la empresa operadora dividido entre el número de rutas.

- El intervalo (tiempo que separa la salida de cada bus) corresponde al tiempo de ciclo dividido entre el número de buses.
- La frecuencia (veh/hora) permanece constante a lo largo de día.
- Se asume una operación de 18 horas entre las 5:00 am y 10:00 pm
- La frecuencia de operación de las rutas se mantiene a lo largo del día.

Una vez obtenidos los resultados de frecuencias y distancia, se estiman los VKT como el producto de las longitudes de las rutas y el número de buses que realizan el recorrido.

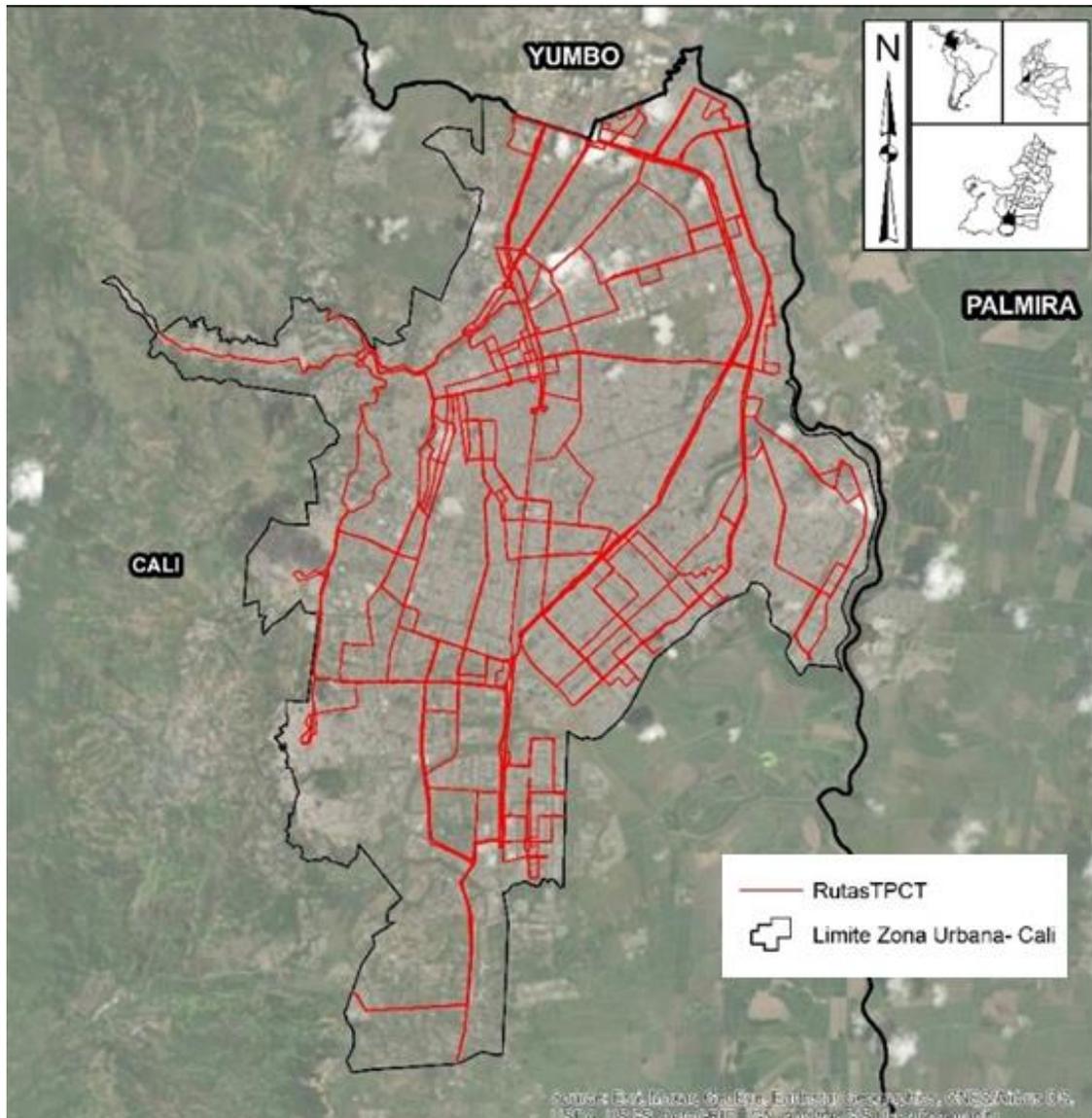
Tabla 4-3: Frecuencia de buses de TPCT en Cali.

EMPRESA	RUTA	SENTIDO	TIEMPO DE CICLO (min)	VEL. MEDIA (km h ⁻¹)	VEHÍCULOS ACTIVOS	INTERVALO (min)	FRECUENCIA (veh h ⁻¹)
ERMITA	1 Ida	N-S	119	15.68	14	16	3.8
	1 Regreso	S-N	96.67	17.6			
	2-3 ida	N-S	101	15.72	14	15	3.9
	2-3 Regreso	S-N	106.33	17.69			
	5-6 Ida	N-S	91.33	20.27	14	15	4.0
	5-6 Regreso	S-N	113.33	16.29			
	7 Ida	W-E	28	31.14	14	6	9.7
	7 Regreso	E-W	56.6	11.04			
	7C Ida	S-N	25	25	14	4	16.2
	7C Regreso	N-S	25.38	25.38			
	2C	S-N	68	15	14	5	12.0
	4C	N-S	71.75	19	14	5	11.4
RECREATIVOS	Montebello Ida	N-S	176.3	15	25.25	11	5.4
	Montebello Regreso	S-N	105.3	23			

EMPRESA	RUTA	SENTIDO	TIEMPO DE CICLO (min)	VEL. MEDIA (km h ⁻¹)	VEHÍCULOS ACTIVOS	INTERVALO (min)	FRECUENCIA (veh h ⁻¹)
	Norte Ida	N-S	148	20	25.25	12	4.9
	Norte Regreso	S-N	164	17.7			
	Sur. Ida	N-S	96	22.1	25.25	9	6.5
	Sur. Regreso	S-N	136	16.6			
	Vorágine ida	N-S	148	20	25.25	12	4.9
	Vorágine vuelta	S-N	164	17.7			
MOTEBELLO	1 Ida	N-S	120.3	15	17.5	13	4.5
	1 Regreso	S-N	113.7	19			
	3S Ida	S-N	112.5	21.32	17.5	14	4.2
	3S Regreso	N-S	135	16.17			
RIO CALI	2Ptar Ida	N-S	89	19.88	40	5	13.3
	2Ptar Regreso	S-N	91	21.18			
PAPAGAYO	1 Ida	S-N	69	20.92	15	10	5.7
	1 Regreso	N-S	88	11.02			
VILLANUEVA BELÉN	1 Ida	E-W	87.4	13	35	4	14.2
	1 Regreso	W-E	61	21.2			
DECEPAZ	3 Ida	W-E	53.55	16	9.5	15	4.1
	3 Regreso	E-W	84.37	13			
	4 Ida	N-S	50	23.1	9.5	10	6.0
	4 Regreso	S-N	44.33	25.54			
VERDE BRETAÑA	1 Ida	N-S	77	14.14	23	7	8.3
	1 Regreso	S-N	88.5	12.85			

Fuente: Elaboración propia a partir de Cal y Mayor, 2019, Castaño & Cardona, 2022.

Figura 4-7: Rutas de TPCT en Santiago de Cali.



Fuente: Elaboración propia a partir Univalle. 2015.

En la **Tabla 4-4** se resume la estimación de kilómetros recorridos por cada categoría vehicular durante los días aforados en las tres ciudades.

Tabla 4-4: Kilómetros recorridos por día y tipo de vehículos en los días evaluados.

Tipo Vehículo	Cali	Palmira				Yumbo			
	Kilómetros recorridos (km día ⁻¹)								
	Día típico	Día típico	Viernes	Sábado	Domingo	Día típico	Viernes	Sábado	Domingo
Particulares	12,128,873	2,353,171	2,516,196	2,723,067	2,262,940	899,995	909,570	924,772	833,293
Taxis	3,914,610	330,034	352,899	381,912	317,379	162,899	164,632	167,384	150,826
Motos	19,321,602	4,030,463	4,172,468	4,066,090	2,988,532	1,614,851	1,624,725	1,561,802	1,376,967
Buses, TPCT	116,428	146,731	158,104	145,863	118,970	118,562	116,241	78,530	68,373
Buses, Padrón	54,374	----	----	----	----	----	----	----	----
Buses, Articulado	12,066	----	----	----	----	----	----	----	----
Buses, Alimentador	21,821	----	----	----	----	----	----	----	----
Camión de 2 ejes	1,921,409	321,338	328,301	257,637	103,992	168,035	162,778	58,063	33,133
Camión de 3 y 4 ejes		37,521	34,938	33,831	19,728	66,415	60,572	21,147	18,599
Camión de 5 ejes		19,608	16,016	16,388	16,188	758	829	749	365
Camión de 6 ejes		70,109	76,925	56,188	37,402	2,091	2,176	1,764	575
Total	37,491,183	7,308,974	7,655,846	7,680,977	5,865,132	3,033,606	3,041,523	2,814,209	2,482,130

Fuente: Elaboración propia.

- **Factores de emisión exhosto**

En cuanto a los factores de emisión para las emisiones exhosto de cada categoría vehicular se utilizó el software COPERT 5.5, en el Tier 3. COPERT estima factores adaptados a las condiciones locales, como las características ambientales, de combustible, tráfico, entre otras. Para esto, se recolectó y procesó información de acuerdo con el esquema de entradas del modelo (**Figura 1-3**).

Con relación a las condiciones ambientales, se llevó a cabo una evaluación de las estaciones meteorológicas de ACOPI, en Yumbo, Universidad Nacional de Colombia, en Palmira, así como de las nueve estaciones meteorológicas del sistema de vigilancia de calidad del aire en Cali (Base Aérea, Compartir, Flora, Era, Pance, Univalle, Transitoria, Ermita y Cañaveralejo). En cuanto a las características del viaje, se asumió un viaje típico de 12.7, 18.05 y 20 km con una duración de 0.43, 0.51 y 0.66 horas, para Cali, Palmira y Yumbo, respectivamente. Esta información fue obtenida con los kilómetros diarios de acuerdo con los reportes de CDA (Sección 2.7) y la estimación de velocidad para cada punto de aforo (**Tabla 3-1**). En cuanto a las propiedades de los combustibles, se tomó la información reportada en el 2016 por la UPME, y para las variables que no tienen información se asumió los datos que trae COPERT por defecto.

Por otro lado, el parque automotor de cada ciudad, reportado en el Registro Nacional de Transporte (RUNT) para el año 2021, fue categorizado de acuerdo con la normatividad nacional emitida en Colombia a través de la **Tabla C-3**. Para la asignación del segmento fue necesario realizar una serie de adaptaciones y correcciones al parque automotor registrado.

En el caso del cilindraje y peso bruto vehicular (PBV), fue necesario corregir y asumir el cilindraje de algunos vehículos de la base de datos del RUNT, y asignar el PBV de vehículos pesados según la tabla de estandarización del PBV del Ministerio de Transporte, la caracterización vehicular del parque automotor de Manizales (Trejos, 2021) o la relación del PBV y el cilindraje (**Tabla C-1**). En cuanto a las motos, era necesario conocer el Stroke, para lo cual se asumió que los modelos superiores al 2009 son motocicletas 4 tiempos (Trejos, 2021), mientras que para las motocicletas con modelos iguales o inferiores a 2009 se asignó el tipo de motor de acuerdo con las fichas

técnicas. Para los buses, en Palmira y Yumbo, se asumió que todos los buses pertenecían al segmento “Urban Buses Midi <=15 t” ya que son los buses que regularmente circulan en las ciudades. Para luego asignar el segmento de acuerdo con la categorización y asignación de segmentos de COPERT 5.5, a través de la **Tabla C-2**.

En cuanto al kilometraje acumulado de la flota vehicular, se empleó la actividad promedio diaria según los datos de CDA. Donde se tomó el promedio por tecnología, combustible y categoría vehicular de la lectura del odómetro registrada (**Tabla 4-5**). Para las tecnologías vehiculares que no se encuentran reportadas en los CDA, correspondientes a vehículos que aún no requieren revisión técnico-mecánica, se realizó la estimación del kilometraje acumulado a partir del año medio de la introducción de la tecnología y el kilometraje medio anual según la tipología vehicular.

Tabla 4-5: Actividad acumulada por categoría vehicular, estándar Euro y tipo de combustible, según los datos de CDA.

Categoría	Estándar Euro	Combustible	Kilometraje acumulado promedio (km)		
			Cali	Palmira	Yumbo
AUTOS	Convencional	Diésel	220,509	264,280	399,935
	ECE 15/04	Gasolina	263,977	328,337	442,434
	Euro 1	Gasolina	149,266	168,780	259,536
	Euro 2	Diésel	169,352	159,303	220,442
	Euro 3	Gasolina	87,563	87,077	135,261
	Euro 4	Diésel	127,510	100,303	145,343
	Euro 4	GNV	238,326	337,966	393,147
	Euro 4	Gasolina	52,810		16,505
	Euro 4	GLP			16,505
	Euro 6	Híbrido	20,267	13,158	
	Euro 6	Diésel	20,267		
	TAXIS	Convencional	Diésel	360,929	
ECE 15/04		Gasolina	432,757	651,423	645,397
Euro 1		Gasolina	515,376	528,006	419,685
Euro 2		Diésel	297,850		250,032
Euro 3		Gasolina	256,171	242,765	252,132
Euro 4		GNV	524,865	535,380	494,520
Euro 4		Diésel	187,669		116,510

Categoría	Estándar Euro	Combustible	Kilometraje acumulado promedio (km)		
			Cali	Palmira	Yumbo
	Euro 4	Gasolina	160,988		41,672
	Euro 6	Híbrido	91,028		
MOTOS	Convencional	Gasolina	71,819	89,523	199,459
	Euro 1	Gasolina	71,819		199,458
	Euro 2	Gasolina	56,869	4,737	105,669
BUSES	Convencional	Diésel	611,527	389,542	760,421
	Euro 1	GNV		445,825	831,357
	Euro 2	Diésel	533,550	299,708	360,795
	Euro 3	GNV		162,118	433,751
	Euro 4	Diésel	412,962	242,411	314,931
	Euro 5	Diésel	250,680	81,059	36,146
PESADOS	Convencional	Diésel	401,123	409,368	955,675
	Convencional	Gasolina		341,663	1,248,820
	Euro 1	Gasolina		391,305	692,974
	Euro 2	Diésel	384,539	210,280	382,344
	Euro 3	Gasolina			254,148
	Euro 4	Diésel	302,547	162,602	268,274
	Euro 5	Diésel	115,466	20,414	35,883

Fuente: Elaboración propia

Con relación a las condiciones de manejo con relación a la carga promedio de vehículos pesados, se emplearon los valores predeterminados del 50%, definidos por Copert 5.5. Por otro lado, en cuanto al uso del aire acondicionado se usó la metodología IVE para dicha estimación. De acuerdo con la temperatura de las ciudades, que en promedio fue 23.9°C, 25.9°C y 28.8°C para Cali, Palmira y Yumbo, se estimó que el porcentaje de vehículos que usan el aire acondicionado fue 53%, 34% y 52% respectivamente.

Una vez ingresados los parámetros propios de cada ciudad al modelo, se obtuvieron factores de emisión para cada contaminante, de acuerdo con cada categoría vehicular, tecnología y combustible. Los cuales se agregaron por medio del promedio ponderado según el número de vehículos por tecnología, segmento y combustible de las categorías vehiculares estudiadas en los municipios de Cali, Palmira y Yumbo (**Tabla 4-6, Tabla 4-7 y Tabla 4-8**).

Tabla 4-6: Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular en g km⁻¹, para Cali.

Tipología vehicular	BC	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM ₂₅	SO ₂	COV	COVNM
Particulares	0.0037	0.0564	4.4161	194.7980	0.0140	0.0323	0.6898	0.0331	0.0196	0.0057	0.6430	0.5867
Taxis	0.0072	0.0392	2.2697	183.9036	0.0153	0.0272	0.4393	0.0392	0.0257	0.0044	0.3292	0.2902
Motos	0.0055	0.1527	8.7314	75.4028	0.0020	0.0082	0.2042	0.0549	0.0487	0.0023	2.4140	2.2612
C2P	0.1589	0.0765	2.4588	548.5966	0.0265	0.7583	6.8589	0.4186	0.3637	0.0033	1.0025	0.9260
C2G	0.2196	0.1212	3.1518	754.2340	0.0294	1.1278	10.2244	0.5421	0.4867	0.0044	1.3132	1.1921
C3	0.2352	0.1356	2.6520	1131.5118	0.0268	1.4206	12.5832	0.5735	0.5153	0.0067	0.7413	0.6058
C4	0.2352	0.1356	2.6520	1131.5118	0.0268	1.4206	12.5832	0.5735	0.5153	0.0067	0.7413	0.6058
C5	0.2184	0.1293	2.5832	1171.8295	0.0227	1.5009	13.5274	0.5200	0.4562	0.0069	0.7052	0.5759
MC5	0.4023	0.1701	4.1567	1716.4432	0.0294	2.4189	21.9505	0.9334	0.8668	0.0101	1.0884	0.9184
MIOA	0.2058	0.1236	3.1496	1146.5493	0.0158	1.4826	13.4624	0.4669	0.4088	0.0068	0.6938	0.5702
MIOC	0.3266	0.1625	4.0192	796.5878	0.0284	0.9735	8.7965	0.7543	0.6992	0.0047	2.3102	2.1477
MIOP	0.2641	0.1565	3.8154	990.6375	0.0250	1.4753	13.3950	0.6174	0.5621	0.0058	1.2315	1.0750
TPCT	0.3266	0.1625	4.0192	796.5878	0.0284	0.9735	8.7965	0.7543	0.6992	0.0047	2.3102	2.1477

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-7: Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular en g km⁻¹, para Palmira.

Tipología vehicular	BC	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	COV	COVNM
Particulares	0.003	0.058	6.676	208.294	0.008	0.047	1.008	0.018	0.030	0.006	0.945	0.887
Taxis	0.009	0.038	3.690	203.057	0.011	0.061	0.637	0.027	0.039	0.005	0.508	0.470
Motos	0.004	0.132	7.751	76.971	0.002	0.010	0.260	0.028	0.034	0.002	1.501	1.369
Buses	0.351	0.254	4.486	894.837	0.016	1.001	9.519	0.745	0.795	0.005	2.669	2.415
Camiones de 2 ejes	0.162	0.052	2.310	541.550	0.027	0.683	6.235	0.368	0.418	0.003	1.111	1.059
Camiones de 3 y 4 ejes	0.167	0.077	2.430	1054.028	0.026	1.175	10.696	0.370	0.423	0.006	0.582	0.505
Camiones de 5 ejes	0.243	0.105	2.854	1119.658	0.033	1.387	12.661	0.543	0.601	0.007	0.709	0.604
Camiones de 6 ejes	0.350	0.102	4.186	1713.108	0.033	2.115	19.225	0.753	0.814	0.010	0.946	0.844

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-8: Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular en g km⁻¹, para Yumbo.

Tipología vehicular	BC	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	VOC	VOCNM
Particulares	0.024	0.055	5.988	226.927	0.013	0.048	0.907	0.056	0.069	0.006	0.836	0.785
Taxis	0.035	0.025	1.767	231.331	0.010	0.069	0.532	0.073	0.086	0.004	0.247	0.223
Motos	0.007	0.163	14.433	93.404	0.002	0.008	0.204	0.068	0.074	0.003	4.124	3.961
Buses	0.366	0.353	4.816	923.158	0.017	1.056	9.915	0.773	0.826	0.005	2.854	2.501
Camiones de 2 ejes	0.172	0.057	2.353	547.396	0.024	0.677	6.078	0.387	0.440	0.003	1.207	1.150
Camiones de 3 y 4 ejes	0.224	0.094	2.716	1167.309	0.023	1.375	12.047	0.483	0.539	0.007	0.766	0.673
Camión de 5 ejes	0.246	0.109	2.816	1177.627	0.024	1.479	13.209	0.529	0.590	0.007	0.763	0.654
Camión de 6 ejes	0.371	0.104	4.289	1829.098	0.027	2.293	20.396	0.785	0.848	0.011	1.032	0.928

Fuente: Elaboración propia

- **Factores de emisión por resuspensión**

Para la estimación de las emisiones por resuspensión, se aplicó el mismo enfoque que para las emisiones de exhosto. La diferencia radica en la estimación del factor de emisión. Para la estimación del factor de emisión de PM₁₀ por resuspensión (FE_{PM}) (g VKT⁻¹), en vías pavimentadas se usó la metodología del AP-42 13.2.1, basada en el peso promedio de los vehículos (W), la carga de material particulado (SL) y un factor multiplicador de acuerdo con el tamaño del PM (k_{PM}) siguiendo la ecuación 4-4.

$$FE_{PM} = k_{PM} * SL^{0.67} * W^{0.85} \quad (4-4)$$

Los valores utilizados asociados a la carga de material particulado depositado sobre la carretera fueron asignados teniendo en cuenta las condiciones de la vía tales como las zonas verdes y el nivel de vegetación, en donde aquellas que presentaban mejores condiciones en estos aspectos se les asignó un valor de SL menor. De igual forma, los valores de peso promedio de los vehículos se calcularon teniendo en cuenta valores estándar recomendados por la EPA, (**Tabla 4-9**).

Para las vías sin pavimentar, se estimaron 2 factores de emisión, de acuerdo con el AP - 42, Sección 13.2.2, uno para las vías públicas sin pavimentar, ecuación 4-5 y otro para las vías industriales sin pavimentar, ecuación 4-6. Basadas en variables locales como el contenido de limo en el suelo (s), peso vehicular promedio (W) y unos factores multiplicadores empíricos (M).

$$FE = \left[1.5 * \left(\frac{s}{12} \right)^{0.9} * \left(\frac{W}{3} \right)^{0.45} \right] * 281.9 \quad (4-5)$$

$$FE = \left[\frac{1.5 * \left(\frac{s}{12} \right) * \left(\frac{W}{30} \right)^{0.5}}{\left(\frac{M}{0.5} \right)^{0.2}} - 0.00047 \right] * 281.9 \quad (4-6)$$

Tabla 4-9: Variables para la estimación de emisiones por resuspensión en vías pavimentadas y sin pavimentar.

sL (g/m²)	Primarias	0.001522
	Secundarias	0.005092
	Terciarias	0.007933
W (t)	Buses	8.6
	Camiones	12.7
	Livianos	1.79
	Motos	0.28
s(%)	0.32	
S(mph)	20	
M(%)	5	

Fuente: Elaboración propia

En Palmira y Yumbo las vías sin pavimentar se ubicaban en zonas industriales, por lo que para estos dos municipios se usó la ecuación 4-6. Mientras que, en Cali, las vías sin pavimentar son de uso público, por lo que se usó la ecuación 4-5. De tal manera que, para cada categoría vehicular se estimó un factor de emisión de acuerdo con el tipo de vía. En la **Tabla 4-10** se presentan los resultados de estimación de los factores de emisión para PM₁₀ resuspendido.

Tabla 4-10: Factores de emisión de PM₁₀ resuspendido, por categoría vehicular y tipo de vía.

Factor de emisión de PM₁₀ resuspendido (g VKT⁻¹)				
Tipo de vía	Bus	camión	Liviano	Moto
Vías pavimentadas				
- Primaria	0.0169	0.0236	0.0045	0.0009
- Secundaria	0.0380	0.0530	0.0100	0.0021
- Terciara	0.0512	0.0713	0.0135	0.0028
Vías sin pavimentar, industriales	5.6766	5.6766	5.6766	5.6766
Vías sin pavimentar, publicas	18.1124	21.5855	8.9379	3.8786

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Emisiones vehiculares en Cali, Palmira y Yumbo

▪ Emisiones exhosto

Una vez que se han obtenido los valores de actividad y los factores de emisión para cada categoría vehicular, se estimaron las emisiones exhosto asociadas a la actividad vehicular (Ecuación 4-1) en los municipios de Cali, Palmira y Yumbo. En la **Tabla 4-11**, se muestra las emisiones diarias de cada uno de los 12 contaminantes durante los días aforados. El contaminante con las mayores emisiones fue CO₂, seguido de CO > COV > COVNM > NO_x > CH₄ > NO₂ > PM₁₀ > PM_{2.5} > BC > N₂O > SO₂, en las tres ciudades durante los días típicos y de fin de semana.

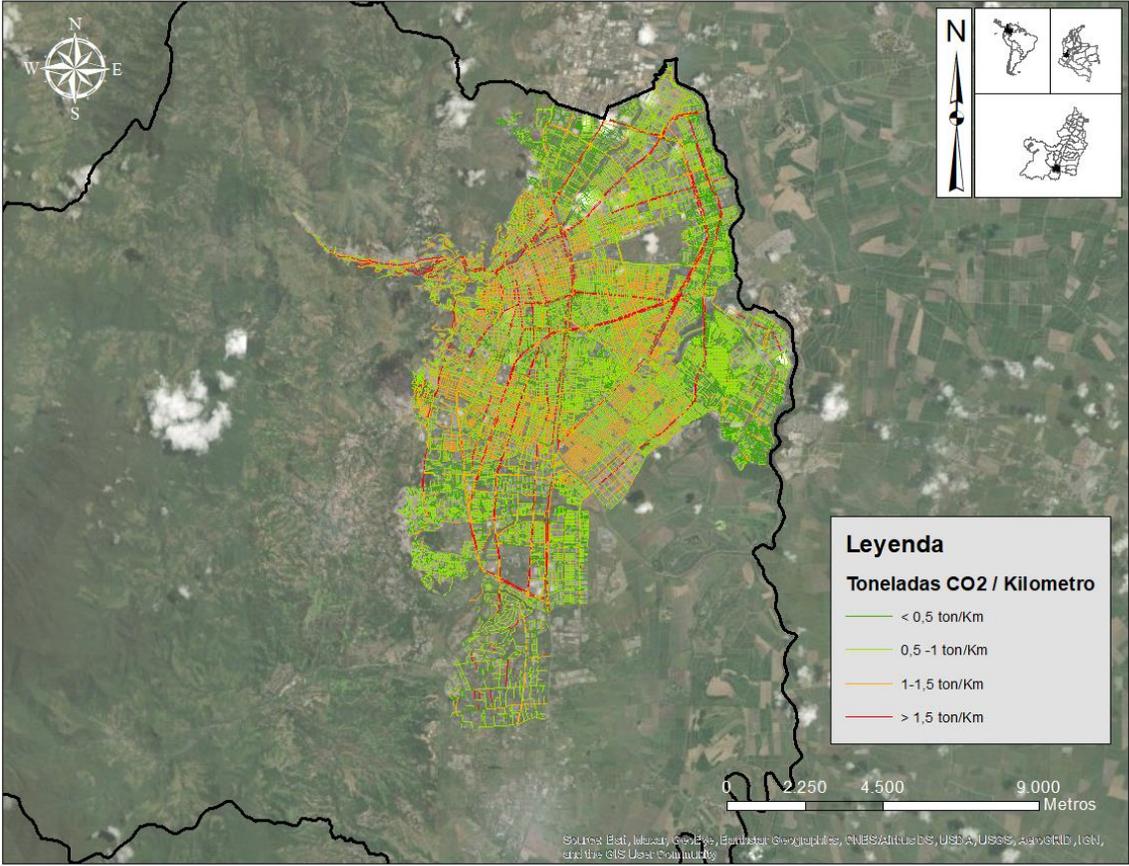
Con base en el perfil hora a hora de los aforos vehiculares realizados en cada ciudad (sección 3.2), se logró la desagregación temporal de las emisiones diarias de cada contaminante (**Anexo D**). Además, con el flujo vehicular en cada tramo vial se logró desagregar espacialmente las emisiones (**Figura 4-8**, **Figura 4-9** y **Figura 4-10**). En la **Figura 4-8**, se puede observar que, en Cali, la mayor densidad de emisiones de CO₂ (>1.5 t km⁻¹) se presenta en vías principales y algunas secundarias. Por otro lado, las emisiones de CO₂ entre 0.5 a 1.5 t km⁻¹ se concentran en el centro geográfico de la zona urbana de Cali. Mientras que las emisiones de CO₂ menores a 0.5 t km⁻¹ se asocian principalmente a las vías terciarias y zonas residenciales de la ciudad. En el municipio de Palmira la concentración de emisiones se da principalmente en centro geográfico del casco urbano de la ciudad y en las vías que conectan a la ciudad con otros municipios (1 a 10 t km⁻¹), **Figura 4-9**. Así mismo, las emisiones vehiculares en el municipio de Yumbo se concentran en las vías que conectan con Cali y algunas vías del centro del casco urbano de la ciudad (**Figura 4-10**).

Tabla 4-11: Emisiones diarias de contaminantes para los días evaluados

Contaminante	Cali	Palmira			Yumbo				
	Día Típico	Día Típico	Viernes	Sábado	Domingo	Domingo	Sábado	Viernes	Típico
	t día ⁻¹								
CO₂	6327.04	984.76	1353.03	1311.22	1286.68	464.76	536.08	676.74	684.76
BC	0.67	0.10	0.17	0.15	0.16	0.07	0.09	0.13	0.13
CH₄	4.36	0.54	0.72	0.72	0.69	0.30	0.34	0.38	0.38
CO	257.43	37.87	48.59	49.10	46.41	25.65	29.02	30.37	30.21
NO_x	34.45	5.96	9.11	8.37	8.69	2.25	2.70	4.19	4.30
N₂O	0.35	0.03	0.05	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02
NO₂	2.88	0.46	0.77	0.68	0.74	0.19	0.23	0.39	0.41
PM₁₀	2.95	0.35	0.56	0.51	0.53	0.26	0.30	0.40	0.41
PM_{2.5}	2.46	0.29	0.47	0.42	0.45	0.23	0.27	0.36	0.37
SO₂	0.15	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01
COV	65.74	6.81	9.02	8.97	8.63	6.67	7.58	8.09	8.06
COVNM	61.27	6.27	8.30	8.26	7.94	6.37	7.24	7.71	7.68

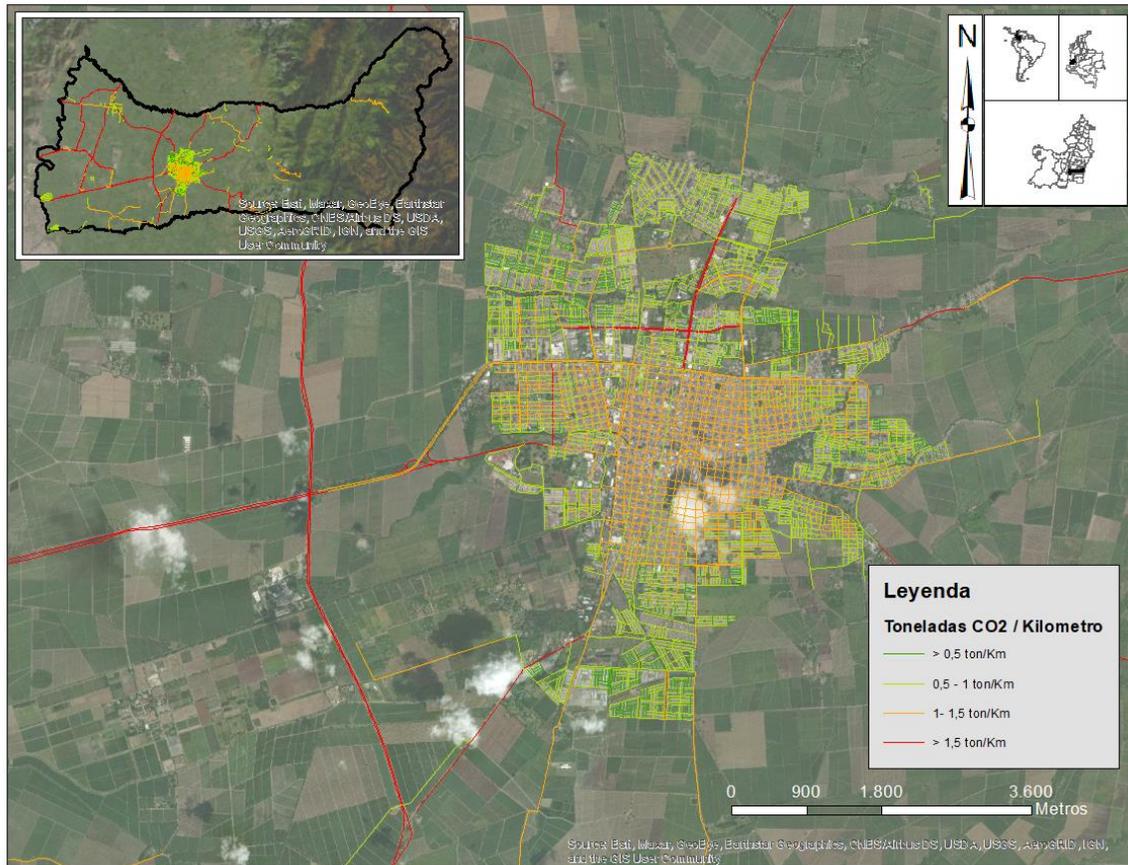
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-8: Emisiones de CO₂ en un día típico de Cali por tramo vial (t/km).

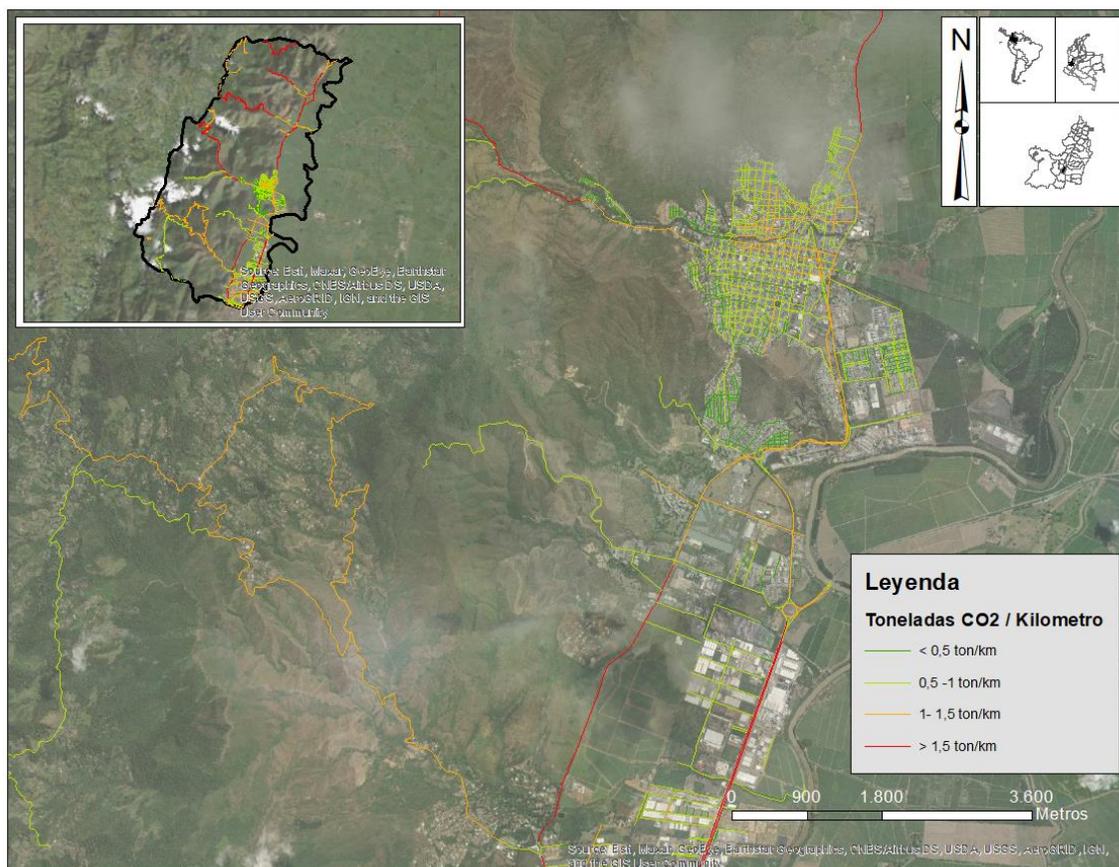


Fuente: Elaboración propia

Figura 4-9: Emisiones de CO₂ en un día típico de Palmira por tramo vial (g/km).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-10: Emisiones de CO₂ en un día típico de Yumbo por tramo vial (g/km).

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de las emisiones totales durante el año base, se realizó una expansión basada en las emisiones diarias. Para Cali, la expansión se basó en el día típico estimado, asumiendo un valor de equivalencia de 330 días típicos durante el año (Trejos, 2021). Es decir, las emisiones diarias de cada contaminante se multiplicaron por el factor de 330 días típicos. Mientras que para Palmira y Yumbo primero se realizó una expansión de los días aforados al mes de noviembre, teniendo en cuenta el número de días de cada tipo (**Tabla 4-12**). Después, el mes de noviembre se extrapola a todos los meses del año a partir de la variabilidad del consumo de combustible mes a mes con relación a noviembre (Ecuación 4-7).

Tabla 4-12: Relación de expansión de emisiones para el mes de noviembre.

Tipo de día	Representado por	Número de días en noviembre
Domingos y Festivos	Domingo	6
Lunes	Típico	16
Martes		
Miércoles		
Jueves		
Viernes	Viernes	4
Sábado	Sábado	4

Fuente: Elaboración propia

$$E_i = \sum_{m=1}^{12} E_{i,N} * \frac{C_m}{C_N} \quad (4-7)$$

Donde,

E_i , Emisión del contaminante i en el año 2021, $E_{i,N}$ Emisión del contaminante i en el mes de noviembre, C_m , Total del consumo de combustibles líquidos en el mes m del 2021, C_N , Total del consumo de combustibles líquidos en el mes de noviembre del 2021.

En la **Tabla 4-13** se muestran los resultados de las emisiones exhosto asociadas a la actividad vehicular en las ciudades de Cali, Palmira y Yumbo, durante el año base (2021), obtenidas a través de la metodología *Bottom-up*. Es posible identificar cómo las emisiones conservan las proporciones asociadas a los VKT (**Tabla 4-4**) y a la población de las ciudades, donde Cali es el principal centro poblado de la región y al mismo tiempo el mayor generador de emisiones, seguido de Palmira. En conjunto, las 3 ciudades emiten 2,754,174 t de CO₂, 313 t de BC y 1279 t de PM₁₀ anualmente.

Tabla 4-13: Emisiones atmosféricas totales por fuentes móviles en Cali, Palmira y Yumbo.

Contaminante	Cali	Palmira	Yumbo
	Emisiones (t año ⁻¹)		
BC	222	53	38
CH ₄	1,439	245	124
CO	84,950	16,546	10,086

Contaminante	Cali	Palmira	Yumbo
CO ₂	2,087,924	451,837	214,413
NO _x	11,368	2,975	1,267
N ₂ O	114	15	8
NO ₂	951	247	116
PM ₁₀	973	181	125
PM _{2.5}	812	153	112
SO ₂	48	10	4
COV	21,696	3,052	2,670
COVNM	20,218	2,807	2,548

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las emisiones por categoría vehicular, la **Figura 4-11** muestra el aporte relativo de cada contaminante. Se destacan los aportes significativos en BC, NO₂, NO_x, PM₁₀ y PM_{2.5} en las ciudades de Cali y Palmira por vehículos de carga (HDV), los cuales se han relacionado con emisiones de combustible diésel (Anenberg et al., 2017; Ban-Weiss et al., 2008; Holland et al., 2016; Lund et al., 2014). Con respecto a las motocicletas, se evidencian significativos aportes (entre 60 a 80%) en las emisiones de CH₄, CO, COV y COVNM en las tres ciudades. Por otro lado, los vehículos particulares contribuyen a la emisión de todos los contaminantes, especialmente en N₂O, SO₂ y CO₂. Los aportes considerables tanto de motos como de vehículos livianos probablemente se deben al uso de gasolina y a la gran cantidad de estos vehículos que se registran y circulan en las ciudades.

Con relación a la contribución por tipo de combustible, en la **Figura 4-12**, se puede apreciar que los vehículos que consumen diésel, principalmente buses y camiones, aportan significativamente a los contaminantes BC (~90-80%), NO_x (~65-70%), PM₁₀ (~47-64%), PM_{2.5} (~50-61%), NO₂ (~80-87%), CO₂ (~40-30%), menos del 30% para los demás contaminantes. En contraste, la combustión de la gasolina, usada principalmente por motos y vehículos livianos, aporta en mayor proporción CO (~96%), COV (~90-96%), COVNM (~90-96%), CH₄ (~85-95%), SO₂ (~85-91%), N₂O (~67-77%), CO₂ (~50-65%), PM₁₀ (~35-53%), PM_{2.5} (~35-50%), NO_x (~35-40%) y para el resto de los contaminantes menos del 30%. Lo cual concuerda con la participación de dichas categorías en la emisión de contaminantes.

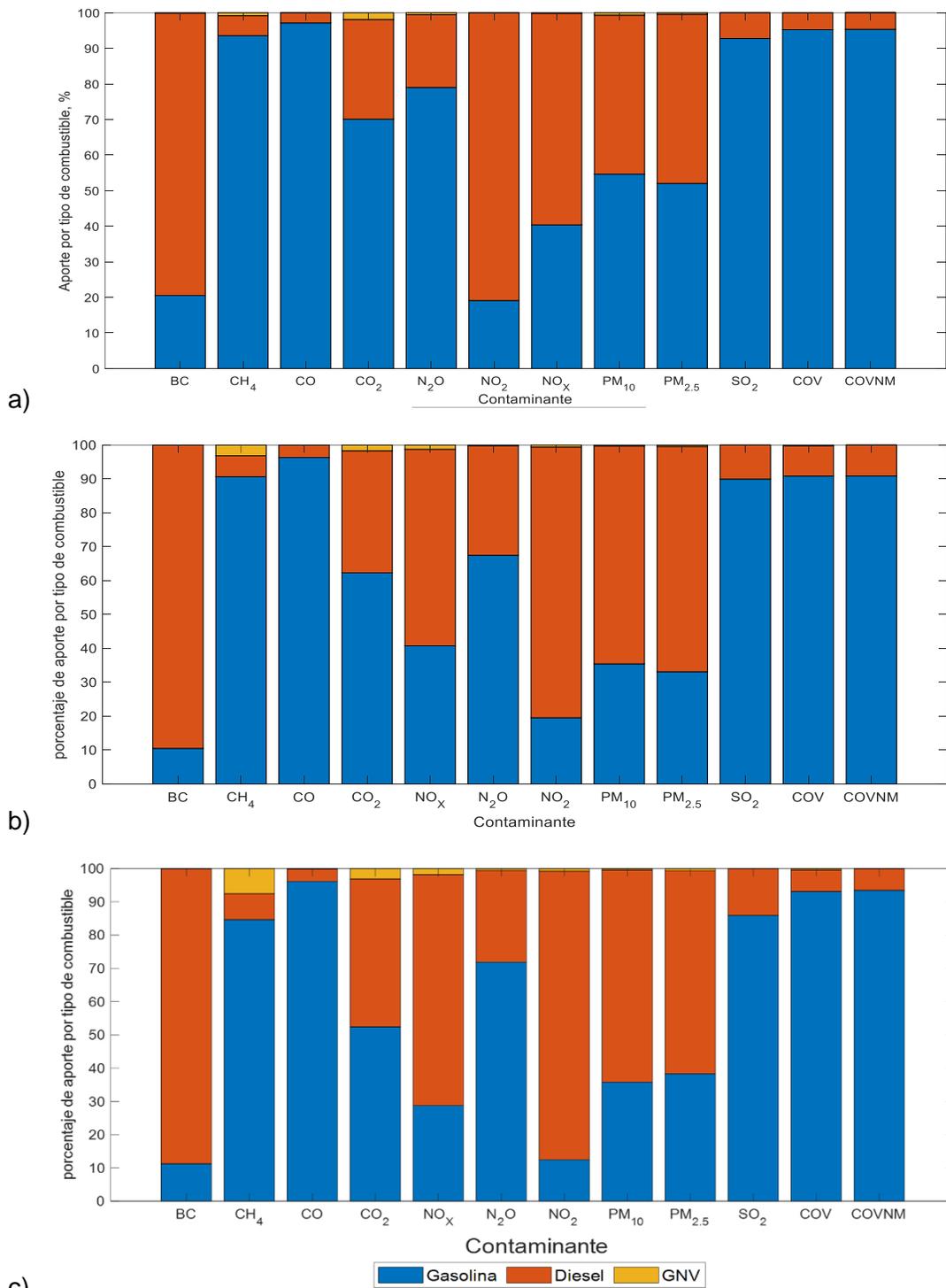
Figura 4-11: Proporción de emisiones vehiculares por categoría vehicular en a) Cali, b) Palmira, c) Yumbo.



c)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-12: Emisiones de contaminantes por tipo de combustible consumido.



Fuente: Elaboración propia.

▪ **Emisiones por resuspensión**

Las emisiones de PM₁₀ asociadas a la resuspensión por la actividad vehicular para Cali, Palmira y Yumbo se presentan en la **Tabla 4-14**. Se observa que las vías sin pavimentar en Palmira y Yumbo generan más del 95% de estas emisiones, debido a que en este tipo de vías la fricción entre el suelo y las llantas de los vehículos tiende a generar más material particulado. Además, tanto en Palmira como Yumbo, las vías sin pavimentar se encuentran en zonas industriales y el paso de vehículos pesados es frecuente. Por otro lado, aunque los camiones y buses por el peso vehicular presentan un factor de emisión mayor, comparado con las demás categorías vehiculares, no son los que mayores emisiones generan. Esto debido a que los vehículos livianos y motos, aunque tienen un factor de emisión menor, tienen más VKT acumulados.

Con respecto a las emisiones de PM₁₀ exhosto y por resuspensión, las emisiones por resuspensión en Palmira y Yumbo son un factor ~6 con relación a las emisiones exhosto, lo cual se debe en mayor medida a las emisiones en vías sin pavimentar. Mientras que en Cali las emisiones exhosto son ~15 veces las emisiones por resuspensión, ya que la mayoría de las vías son pavimentadas y de uso residencial. Por otro lado, si se compara las emisiones exhosto con las emisiones por resuspensión en vías pavimentadas, el PM₁₀ resuspendido sería cerca entre el 5 y el 10% de las emisiones de PM₁₀.

Tabla 4-14: Emisiones de PM₁₀ por resuspensión para Cali, Palmira y Yumbo.

PM₁₀ resuspendido (t año⁻¹)					
Categoría	Bus	camión	Liviano	Moto	Total
Palmira	24.42	36.45	400.87	551.75	1013.49
-Vías pavimentadas	1.32	4.33	7.96	2.54	16.15
+Primaria	0.41	2.29	1.45	0.25	4.40
+Secundaria	0.67	1.22	2.70	0.79	5.38
+Terciara	0.24	0.82	3.81	1.50	6.37
-Vías sin pavimentar	23.10	32.12	392.91	549.21	997.34
Yumbo	12.80	11.72	207.45	455.53	687.49
-Vías pavimentadas	0.86	1.86	2.79	0.96	6.47
+Primaria	0.39	1.12	0.82	0.14	2.47
+Secundaria	0.16	0.42	0.41	0.12	1.11
+Terciara	0.31	0.32	1.57	0.70	2.90

PM ₁₀ resuspendido (t año ⁻¹)					
Categoría	Bus	camión	Liviano	Moto	Total
-Vías sin pavimentar	11.94	9.86	204.65	454.57	681.02
Cali	1.50	16.92	34.28	9.00	61.70
-Vías pavimentadas	1.50	16.92	34.28	9.00	61.70
+Primaria	0.86	13.62	16.99	5.00	36.47
+Secundaria	0.64	2.13	7.91	1.96	12.64
+Terciara	0.00	1.17	9.38	2.04	12.58
TOTAL	38.72	65.09	642.59	1016.28	1762.68

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Estimación *Bottom-up* de la malla vial Nacional

4.2.1 Enfoque metodológico

La estimación y análisis de las emisiones exhosto en la malla vial nacional se realizó bajo el enfoque *Bottom-up* (Ecuación 4 1). Esto teniendo en cuenta la información de aforos vehiculares en los peajes de la zona de estudio, disponible en línea a través del geovisor de INVIAS (sección 2.6), y la estimación de factores de emisión mediante Copert 5.5, asumiendo una flota vehicular similar a la del municipio de Palmira, debido a la similitud de la distribución de edades y tecnologías vehiculares del parque automotor registrado en la región, incluso en Colombia, y la distribución de Palmira (Alfonso, 2023) (**Anexo E**).

- **Factor de actividad vehicular**

En cuanto a los VKT diarios totales por categoría vehicular en la malla vial nacional, aplicando la ecuación 4-3 con los TPD reportados por el INVIAS y los kilómetros de cada tramo vial, se estimaron los valores reportados en la **Tabla 4-15**. Donde se observa que más del 80% se concentra en los municipios del Valle del Cauca y están asociados principalmente a la actividad de vehículos livianos y motos (~60%). Esta estimación no contempla la malla vial nacional de los municipios de Palmira y Yumbo, ya que para estos municipios se tenían aforos propios para este tipo de vías y los datos se reportaron en la sección anterior.

Tabla 4-15: VKT diarios totales por tipo de vehículo y departamento.

Tipo de vehículo	Valle del Cauca	Cauca
Livianos	1,784,353	378,470
Buses	162,766	50,537
Camiones de 2 ejes	575,704	68,766
Camiones de 3 y 4 ejes	128,679	14,420
Camiones de 5 ejes	64,458	4,262
Camiones 6 o más ejes	265,271	15,536
Motos	1,070,612	227,082

Fuente: Elaboración propia, con base en reportes de INVIAS

▪ Factores de emisión exhosto

Debido a la similitud entre la distribución de tecnologías vehiculares de los vehículos registrados en la región y la distribución de Palmira (**Anexo E**), se asumió que la flota de Palmira es representativa del área de estudio. Por lo que se estimaron factores de emisión para la malla vial nacional, con base en la estimación realizada para Palmira. Para lo cual, se ajustó los datos de un viaje típico en el software, de acuerdo con el promedio de velocidad en los tramos viales (65km h^{-1}) y la distancia promedio de los tramos (19km). Los factores de emisión obtenidos se reportan en la **Tabla 4-16**. Se puede observar que el cambio de velocidad afectó en promedio un $\pm 0.05\%$ los factores de emisión de todos los contaminantes. Siendo el CO_2 y el NO_2 los y la categoría de vehículos particulares los más afectados.

Tabla 4-16: Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular en g km⁻¹, para la malla vial nacional.

Tipología vehicular	BC	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	COV	COVNM
Particulares	0.0035	0.0576	6.6303	200.5384	0.0085	0.0469	1.0073	0.0181	0.0303	0.0059	0.9402	0.8828
Motos	0.0035	0.1320	7.7479	76.9519	0.0020	0.0104	0.2599	0.0280	0.0336	0.0023	1.5001	1.3681
Buses	0.3508	0.2537	4.4844	894.6443	0.0156	1.0006	9.5172	0.7451	0.7951	0.0048	2.6677	2.4140
Camiones de 2 ejes	0.1621	0.0521	2.3093	541.4263	0.0274	0.6826	6.2338	0.3683	0.4183	0.0032	1.1107	1.0587
Camiones de 3 y 4 ejes	0.1668	0.0768	2.4289	1053.8193	0.0256	1.1752	10.6944	0.3699	0.4225	0.0062	0.5815	0.5046
Camiones de 5 ejes	0.2433	0.1046	2.8535	1119.4394	0.0332	1.3866	12.6593	0.5431	0.6009	0.0066	0.7087	0.6041
Camiones de 6 ejes	0.3499	0.1020	4.1852	1712.8181	0.0325	2.1147	19.2224	0.7530	0.8135	0.0101	0.9458	0.8438

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que la actividad vehicular está agregada por día, para la desagregación temporal de las emisiones se usó los flujos horarios reportados para algunos peajes representativos de la región como: El Cerrito, Cencar, Paso la Torre, Mediacanoa y Villa Rica (**Anexo E**).

- **Factores de emisión por resuspensión**

Para la estimación de las emisiones por resuspensión, se aplicó el mismo enfoque que para las emisiones de exhosto. Donde la actividad vehicular corresponde a la estimada con base en los TPD. Mientras que el factor de emisión se estimó aplicando la metodología de la EPA para vías pavimentadas primarias, como se explicó en la sección 4.1.1. Ya que al ser vías de conexión intermunicipal e interregional suelen estar pavimentadas se usaron los factores de emisión por categoría vehicular de las vías primarias, reportados en la **Tabla 4-10**.

4.2.2 Emisiones vehiculares de la malla vial nacional

- **Emisiones exhosto**

En relación con las vías nacionales, la magnitud de las emisiones está directamente asociada al tráfico y la longitud de las vías nacionales en cada ciudad, por lo que no existe un orden asociado a una variable demográfica. Se estimó que en la malla vial nacional del área de estudio se emiten 650,449 toneladas de CO₂ al año (**Tabla 4-17**). A las cuales se suman las 22,545 y 43,250 toneladas de CO₂ de Palmira y Yumbo que se emiten en las vías nacionales de estos municipios.

En la **Figura 4-13** se puede observar la distribución espacial de las emisiones de CO₂ estimadas. Donde se logra observar que los tramos Tuluá-Buga y Jamundí-Cali presentan las mayores emisiones de CO₂ con alrededor de 12t por kilómetro de vía al día, cada uno. Mientras que el tramo vial Riofrío-Bolívar presenta las menores emisiones de CO₂ con cerca de 1.2 t por kilómetro de vía al día, en el departamento del Valle del Cauca y el tramo Santander de Quilichao-Paso elevado Timba con 956 kg por kilómetro

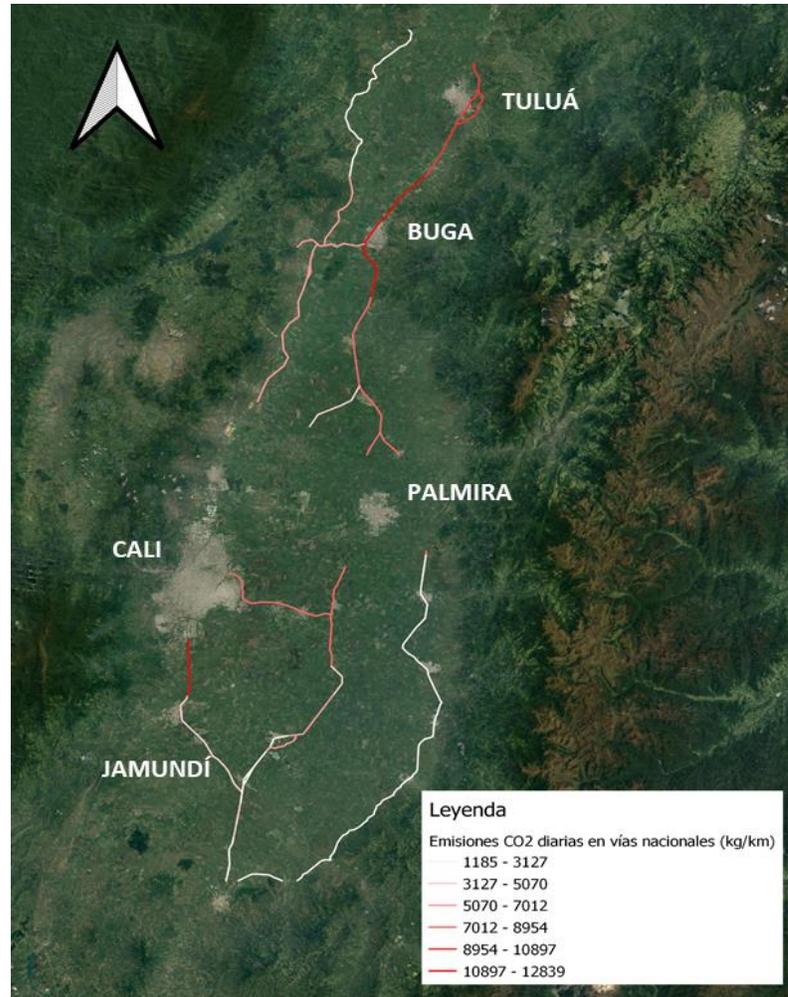
de vía al día en el departamento del Valle del Cauca. Esto probablemente debido a la cantidad de vehículos que transitan por estas vías y la longitud de los tramos.

Tabla 4-17: Emisiones anuales en vías nacionales según departamento.

Contaminante	Valle del Cauca (t año⁻¹)	Cauca (t año⁻¹)	Area de estudio (t año⁻¹)
BC	106	15	121
CH₄	131	26	157
CO	8,684	1,740	10424
CO₂	569,276	81,174	650450
N₂O	18	3	21
NO₂	530	63	593
NO_x	5,294	678	5972
PM_{2.5}	247	35	282
PM₁₀	281	40	321
SO₂	7	1	8
VOC	1,726	341	2067
VOCNM	1,595	315	1910

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-13: Distribución de emisiones *Bottom-up* en la malla vial nacional del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Con base en el mapa anterior, fue posible agrupar las emisiones para cada municipio. En donde se estableció que los municipios con mayores emisiones son Buga, Candelaria y Yotoco con 95,853, 89,475 y 84,668 toneladas de CO₂ al año, respectivamente (**Tabla 4-18**). Probablemente, estas emisiones estén asociadas al alto flujo vehicular en estas vías, debido al tránsito de vehículos livianos, buses interurbanos y el tránsito de vehículos pesados. Ya que las vías nacionales en estas ciudades conectan con la carretera del puerto de Buenaventura y el centro y sur del país.

Tabla 4-18: Emisiones exhosto anuales en las vías nacionales en el área de estudio (t año⁻¹).

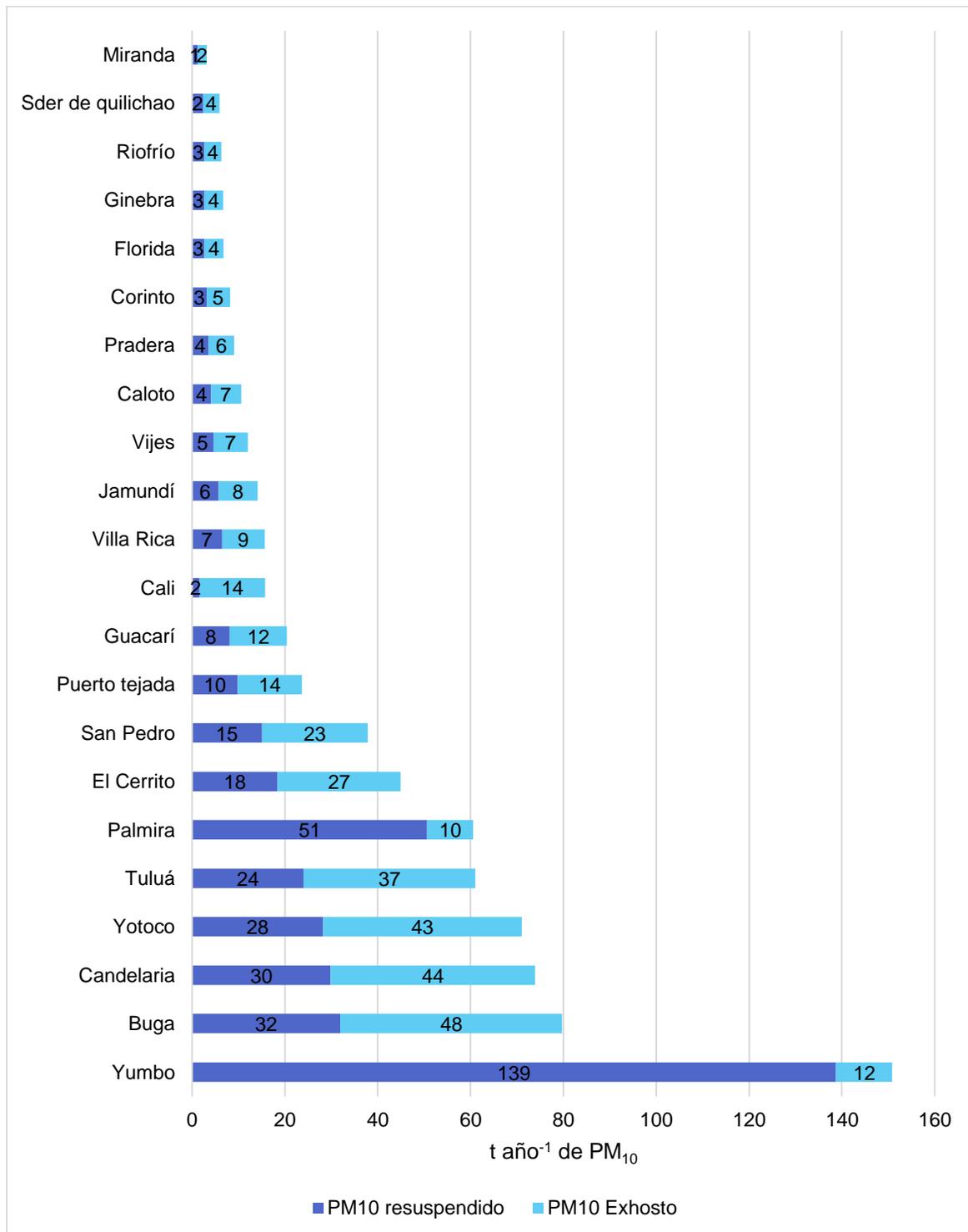
Municipio	CO ₂	BC	CH ₄	CO	N ₂ O	NO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	VOC	VOCNM
Cali	33,393	4	14	1020	1	18	218	11	13	1	183	169
Palmira	22,545	3	11	705	1	14	161	8	10	0	133	123
Yumbo	43,250	5	14	1320	1	9	187	11	12	1	189	151
Buga	95,853	18	21	1,363	3	92	910	42	48	1	274	253
Candelaria	89,475	17	21	1,395	3	83	829	39	44	1	277	256
Yotoco	84,668	17	11	660	2	94	888	38	43	1	143	131
Tuluá	72,119	14	13	841	2	74	714	33	37	1	176	163
El cerrito	55,230	10	16	1,066	2	46	478	23	27	1	207	191
San pedro	45,119	9	9	581	1	45	438	20	23	1	119	110
Puerto tejada	29,482	5	8	565	1	25	256	12	14	0	108	100
Guacarí	24,350	5	7	434	1	21	218	11	12	0	87	80
Villa rica	19,516	3	7	455	1	14	156	8	9	0	87	80
Jamundí	17,147	3	6	390	1	13	139	7	8	0	76	70
Vijes	13,929	3	2	115	0	15	146	7	7	0	26	24
Caloto	12,215	2	4	280	0	9	97	6	7	0	57	53
Pradera	10,593	2	4	245	0	8	84	5	6	0	50	46
Corinto	9,439	2	3	217	0	7	75	4	5	0	44	41
Ginebra	8,007	2	2	141	0	7	72	4	4	0	28	26
Riofrío	7,948	1	2	116	0	8	75	3	4	0	22	20
Florida	7,947	2	3	183	0	6	63	4	4	0	37	34
Santander de quilichao	7,155	1	2	137	0	6	62	3	4	0	27	25
Miranda	3,646	1	1	84	0	3	29	2	2	0	17	16
Area de estudio	815,432	140	221	15,493	25	658	6,886	331	378	11	2,894	2,626

Fuente: Elaboración propia.

- **Emisiones por resuspensión**

En cuanto a las emisiones de PM_{10} asociadas a la resuspensión por la actividad vehicular en la malla vial nacional de cada municipio (**Figura 4-14**). Se observa que las mayores emisiones asociadas a la resuspensión de material particulado se dan principalmente en Yumbo, Palmira, Buga, Candelaria, Yotoco y Tuluá. En conjunto, estos municipios emiten cerca del 77% de las emisiones por resuspensión en la malla vial nacional. Los cuales están asociados principalmente al paso de vehículos pesados.

Con respecto a las emisiones de PM_{10} exhosto y por resuspensión, las emisiones por resuspensión son similares a las emisiones exhosto. En conjunto, en la malla vial nacional se emiten 738 t de PM_{10} anualmente. De las cuales 53.6% están asociadas a resuspensión y 46.4% a emisiones exhosto.

Figura 4-14: Emisiones de PM₁₀ asociadas a exhosto y resuspensión en la malla vial nacional, desagregadas por municipio.

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Estimación *Top-down* de la cañicultura

4.3.1 Enfoque metodológico

La agricultura de la caña de azúcar “Cañicultura” es una actividad extensiva en la región donde se ubica el área de estudio de esta investigación. Debido a las extensas planicies, el clima, suelo, entre otros factores, el Valle del Cauca es el mayor productor de caña de azúcar por hectárea del mundo (Asocaña, 2020). Dicho cultivo requiere de actividades agrícolas como: Labranza, surcado, limpieza de malezas, cosecha, y otras actividades, que requieren del uso de maquinaria agrícola. El uso de maquinaria implica el uso de combustibles fósiles, que generan emisiones, además de las emisiones de material particulado por el paso de la maquinaria sobre el suelo. Adicionalmente, la cosecha de caña de azúcar debe ser transportada en trenes cañeros que usan diésel y se movilizan frecuentemente por los callejones internos de los cultivos hasta el ingenio. Siendo la agroindustria de la caña el sector que mayor volumen de carga agrícola moviliza en Colombia (Asocaña, 2020). Estas actividades en su mayoría ocurren fuera de la malla vial nacional o local, por lo que se consideran emisiones fuera de ruta.

La estimación de dichas emisiones se estimó bajo el enfoque *Top-down*, a través de la estimación de consumo de combustibles y el uso de factores de emisión. Con base en información secundaria sobre la producción de caña, capacidad de carga de los vehículos, reportes de cosecha y demás. Primero, se estimaron las emisiones de CO₂ ($E_{CO_2,k}$) a partir de la estimación de consumo de cada combustible k (FA_k), y utilizando los factores de emisión de CO₂ ($FE_{CO_2,k}$) para cada tipo de combustible k, según la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (Ecuación 4-8).

$$E_{CO_2,k} = FE_{CO_2,k} * FA_k \quad (4-8)$$

Después de estimar las emisiones de CO₂, se estimaron las emisiones de los demás contaminantes con base en la relación de la emisión del contaminante de interés ($E_{j,k Palmira}$) y la emisión de CO₂ estimada para los vehículos pesados Palmira ($E_{CO_2k Palmira}$) (Ecuación 4-9).

$$E_j = \sum \frac{E_{j,k Palmira}}{E_{CO_2k Palmira}} * E_{CO_2k} \quad (4-9)$$

▪ Actividad vehicular

La actividad vehicular fuera de ruta para este caso no se estimó en kilómetros recorridos, sino en consumo de combustibles, mediante la ecuación 4-10. Para la cual el consumo de combustibles por hectárea ($Rend_k$) se obtuvo a partir de información secundaria. Mientras que las hectáreas sembradas, $A_{caña}$, se obtuvieron a partir de la Secretaria de Agricultura del Valle del Cauca y Agronet, para los municipios del Cauca (**Anexo F**).

$$FA_k = Rend_k * A_{caña} \quad (4-10)$$

$$Rend_{diesel} = 86.7 \text{ gal ha}^{-1}$$

$$Rend_{gasolina} = 3.8 \text{ gal ha}^{-1}$$

En el caso del factor de actividad para la resuspensión por el transporte de trenes cañeros, era necesario conocer los kilómetros recorridos por los trenes cañeros. Estos se estimaron a partir de la ecuación 4-11, donde $\#trenes$ corresponde a la cantidad de trenes necesarios para transportar la cosecha de caña quemada y la caña en verde; km_{viaje} son los kilómetros promedio que recorre un tren desde el ingenio hasta el lote de caña y viceversa (65km) y se incorporó el factor de 0.51, ya que el 51% del transporte de caña de azúcar cosechada se realiza en los callejones internos de los cultivos (El Tiempo, 2018).

Para determinar el número de trenes que se necesitan para transportar la caña de azúcar de los municipios del área de estudio, se aplicó las ecuaciones 4-12 y 4-13. Una para para estimación de trenes correspondientes a la caña de azúcar quemada (4-12) y otra para estimar los trenes para la caña en verde (4-13). Donde $A_{cq,m}$ y $A_{cv,m}$ corresponden a las hectáreas de caña quemada y verde, respectivamente. Se asumió que el 36% de las hectáreas son quemadas, las cuales durante el proceso de quema pierden el 6% de masa (Cardozo-Valencia et al., 2019). Cada una de estas hectáreas se asume que presentan una productividad promedio, ($Prod_c = 119.61 \frac{ton}{ha}$, Asocaña, (2020)) y que son transportadas por trenes cañeros con capacidad de 120t por viaje, Cap_{tren} .

$$km = \#trenes * km_{viaje} * 0.51 \quad (4-11)$$

$$\# trenes_{cq} = \frac{A_{cq,m} * Prod_c * 94\%}{Cap_{tren}} \quad (4-12)$$

$$\# trenes_{cv} = \frac{A_{cv,m} * Prod_c}{Cap_{tren}} \quad (4-13)$$

▪ **Factores de emisión exhosto**

Para la estimación de emisiones exhosto de CO₂ por el uso de maquinaria agrícola y trenes cañeros en las actividades agrícolas del cultivo de caña de azúcar, se utilizaron los factores de emisión por tipo de combustible, reportados por la UPME (**Tabla 4-19**). Mientras que, para la estimación de los demás contaminantes, al no tener un factor de emisión propio, se estimaron factores de relación entre las emisiones de CO₂ de Palmira y las emisiones de cada uno de los contaminantes, ya que el CO₂ se considera como un contaminante de referencia de las emisiones exhosto ($\frac{E_{j,k Palmira}}{E_{CO_2 k Palmira}}$ en la ecuación 4-9). No obstante, esta estimación podría implicar una subestimación de los demás contaminantes, ya que las tecnologías vehiculares y la carga de vehículos como tractores, cosechadoras y demás, podrían variar las emisiones de dichos contaminantes.

Cabe aclarar que dentro del alcance investigativo y presupuestal no incluía la evaluación de dicha variabilidad, por lo que se podría realizar en futuras investigaciones.

Tabla 4-19: Factores de emisión de la UPME para cada tipo de combustible.

FE	Gasolina Corriente	Gasolina extra	ACPM / DIÉSEL	GNV
	kg CO ₂ /gal			kg CO ₂ /m ³ st
	8.809	8.809	10.149	2.179

Fuente: Elaborado a partir de la UPME, 2016.

▪ **Factores de emisión por resuspensión**

En cuanto a los factores de emisión por resuspensión en la cañicultura, se estimaron tanto para la resuspensión por el uso de maquinaria agrícola en las labores del cultivo, como para el transporte de la caña de azúcar hasta el ingenio.

Para las emisiones por resuspensión por maquinaria agrícola se usaron los reportados por Jimenez et al. (2022) para la actividad agrícola en los llanos orientales colombianos. Los cuales se basan en la estimación de emisiones según las actividades agrícolas de cada cultivo (Ecuación 4-14).

$$E_{PM_{10}C} = \sum_i^n SPSFE_c * AS_c + \sum_i^n CMFE_c * AC_c + \sum_i^n MFE_c * AS_c \quad (4-14)$$

Donde, $E_{PM_{10}C}$ son las emisiones de PM₁₀ por cultivo, $SPSFE_c$ es el factor de emisión por siembra y preparación del suelo para cada cultivo (c). AS_c , es el área sembrada por cultivo (c). $CMFE_c$, es el factor de emisión por cosecha y mantenimiento por cultivo (c). AC_c , representa el área cosechada por cultivo (c). MFE_c , es el factor de emisión de la

maquinaria utilizada en estas actividades por cultivo “(c)”. No obstante, para el cultivo de caña de azúcar no se tuvo en cuenta el último factor ($\sum_i^n MFE_c * AS_c$), ya que las emisiones exhosto de PM₁₀ se estiman con base en el consumo de combustible estimado. Por lo que el factor de emisión por resuspensión de maquinaria agrícola estimado para el cultivo de caña de azúcar fue 1789.6 g PM₁₀ ha⁻¹.

Por otro lado, para la resuspensión asociada al transporte de caña de azúcar, una vez estimados los kilómetros recorridos, se estimaron los factores de emisión siguiendo la metodología de la EPA, usando la ecuación 4-5, para vías sin pavimentar. No obstante, el peso vehicular de los trenes cañeros es mayor, y es diferente dado que el tren cañero debe realizar un viaje sin carga desde el ingenio hasta el lote y otro viaje desde el lote hasta el ingenio con la carga de la cosecha. Por lo que se estimó un factor de emisión para el viaje sin carga y otro para el viaje con carga (Ecuaciones 4-14 y 4-15).

$$FE_{vacio} = \left[1.5 * \left(\frac{0.32}{12} \right)^{0.9} * \left(\frac{9.5}{3} \right)^{0.45} \right] * 281.9 = 27.22 \frac{g}{VKT} \quad (4-15)$$

$$FE_{lleno} = \left[1.5 * \left(\frac{0.32}{12} \right)^{0.9} * \left(\frac{129.5}{3} \right)^{0.45} \right] * 281.9 = 88.18 \frac{g}{VKT} \quad (4-16)$$

4.3.2 Emisiones vehiculares asociadas a la cañicultura

- **Emisiones exhosto**

Con base en el consumo de combustible por hectárea y las hectáreas asociadas a los ingenios azucareros en la región de estudio, se estimó que el uso de maquinaria en la agricultura cañera consume 17.53 millones de galones de diésel y 0.77 millones de galones de gasolina al año. Los cuales generan 184,637.48t de CO₂ anualmente, y de otros contaminantes como se muestra en la **Tabla 4-20**. La mayor parte de dichas

emisiones están asociadas al consumo de diésel el cual está relacionado en gran parte al transporte de la caña por medio de los trenes cañeros.

Los valores de consumo estimados se asemejan a las ventas de combustible de gran consumidor reportadas por el SICOM, las cuales fueron 19.29 y 1.66 millones de galones de diésel y gasolina, respectivamente, para el año 2021. La diferencia puede deberse a que el área de estudio no contempla los municipios del norte del Valle del Cauca, ni los municipios de Risaralda y Caldas que también siembran caña de azúcar y probablemente algunos se abastezcan de las plantas de distribución de Yumbo y Buga. También se debe tener en cuenta que, en la región no solo se siembra caña de azúcar en grandes extensiones sino también cultivos de arroz, maíz y otros cultivos, los cuales también pueden ser grandes consumidores.

En cuanto a la distribución de las emisiones a nivel municipal, las emisiones de la **Tabla 4-20**, son proporcionales a las hectáreas sembradas de caña de azúcar (**Figura 2-6**). Es decir, el municipio con mayores emisiones exhosto asociadas a la cañicultura es Palmira, seguido de Candelaria, El cerrito y Guacarí, los cuales abarcan cerca del 44% de las emisiones en todos los contaminantes. Mientras que los municipios con menos emisiones son Buenos Aires y Vijes, con cerca del 5% de las emisiones en conjunto.

Tabla 4-20: Emisiones anuales de la agricultura de caña de azúcar en el área de estudio.

Contaminante	Emisión (t año⁻¹)
CO₂	184,637.48
BC	57.89
CH₄	158.33
CO	1,072.24
N₂O	6.10

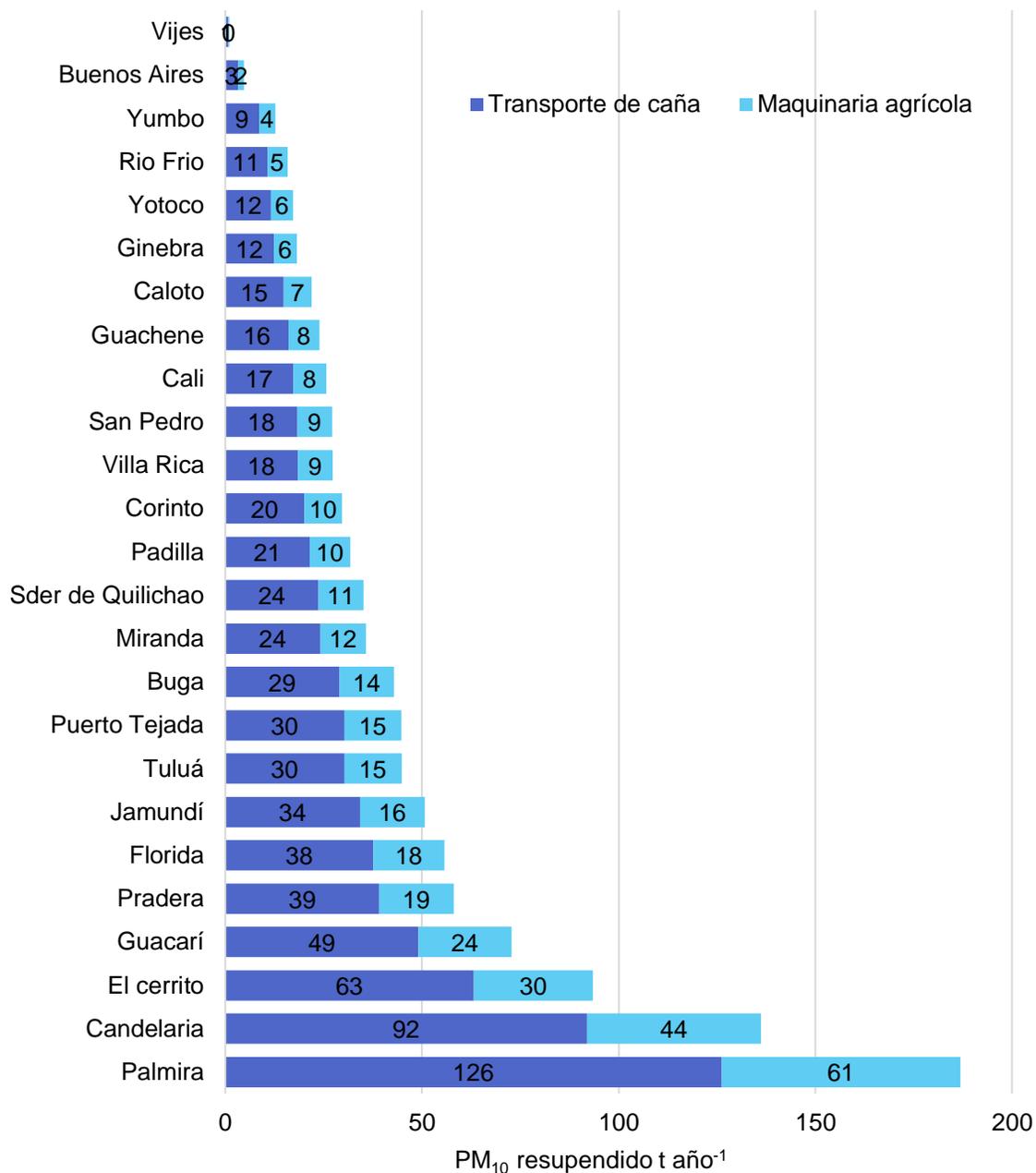
Contaminante	Emisión (t año⁻¹)
NO₂	214.54
NO_x	1,889.66
PM_{2.5}	116.06
PM₁₀	132.98
SO₂	1.23
VOC	396.90
NMVOC	373.51

Fuente: Elaboración propia

▪ **Emisiones por resuspensión**

Como resultado de la estimación de emisiones por resuspensión tanto por el uso de maquinaria como por el transporte de la caña de azúcar, en el área de estudio se emiten 1,114 t de PM₁₀. Las cuales están en gran parte asociadas al transporte de la cosecha (67%) (**Figura 4-15**). Al igual que las emisiones exhosto, las emisiones por resuspensión son proporcionales a las hectáreas sembradas, por lo que Palmira, Candelaria, El Cerrito y Guacarí son los municipios con mayores emisiones con 16.8%, 12.2%, 8.3%, y 6.6%, respectivamente.

En cuanto a las emisiones de PM₁₀ total asociado a la cañicultura, se emiten 1,247 t. Las cuales son emitidas principalmente por la resuspensión durante el transporte de la caña de azúcar (60.3%). Siendo esta actividad cerca de 6 veces más que las emisiones exhosto.

Figura 4-15: Distribución municipal de las emisiones de PM₁₀ resuspendido asociado a la cañicultura.

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Estimación *Top-down* de la agricultura de otros cultivos

4.4.1 Enfoque metodológico

Además de la caña de azúcar, en la región de estudio también se presentan otros cultivos como café, maíz, arroz, frutales, tubérculos, musáceas, entre otros. Los cuales son de manejo tecnificado en su gran mayoría. La estimación de emisiones exhosto asociadas al uso de maquinaria agrícola para las labores de estos cultivos se estimó mediante el enfoque *Top-down*, a través de la estimación de consumo de combustibles y el uso de factores de emisión. Al igual que para la cañicultura, primero se estimaron las emisiones de CO₂ ($E_{CO_2,k}$) a partir de la estimación de consumo de cada combustible k (FA_k), y los factores de emisión de CO₂ ($FE_{CO_2,k}$) para cada tipo de combustible k , reportados por la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (Ecuación 4-8). Para después estimar las emisiones exhosto de los demás contaminantes con base en los factores de relación (Ecuación 4-9). Así mismo, las emisiones de PM₁₀ resuspendido se estimaron bajo el enfoque *Top-down*, siguiendo la ecuación general de las emisiones, como el producto de la actividad por un factor de emisión.

- **Actividad vehicular**

La actividad vehicular en la agricultura está relacionada principalmente con la cantidad de hectáreas cultivadas. Por lo que para las emisiones exhosto el factor de actividad es el consumo de combustible por hectárea de cultivo. Que se estimó a través del factor de emisión asociado a la maquinaria agrícola reportado por Jimenez et.al, (2022) (MFE_c) de la ecuación 4-14 y el factor de emisión para tractores reportado por Kean et al. (2000), como se muestra en la siguiente ecuación. De esta estimación de consumo de combustible se asume que 1.76 millones de galones son vendidos a grandes consumidores y el restante es vendido en las EDS.

$$FA_{Diesel} = \frac{MFE_c \left(\frac{gPM_{10}}{ha} \right)}{3.23 \left(\frac{gPM_{10}}{L_{Diesel}} \right)} * 0.264172 \left(\frac{gal}{L} \right) \quad (4-17)$$

Por otro lado, la actividad vehicular para la estimación de emisiones por resuspensión fue las hectáreas sembradas o cosechadas de cada cultivo en cada municipio (**Anexo F**). Ya que según Jimenez et.al (2022), para cada cultivo es necesario realizar ciertas labores agrícolas de preparación del suelo, mantenimiento y cosecha.

- **Factores de emisión**

Al igual que para la cañicultura, los factores de emisión utilizados para las emisiones exhosto, fueron los propuestos por la UMPME (2016) y los factores de relación (**Tabla 4-19**, ecuación 4-9). En cuanto a la estimación de emisiones por resuspensión de PM por el uso de maquinaria agrícola en los otros cultivos, fue estimada a partir de los factores de emisión reportados por Jimenez et.al, (2022) para cada cultivo, basada en la ecuación 4-14.

4.4.2 Emisiones vehiculares por el uso de maquinaria agrícola en otros cultivos

- **Emisiones exhosto**

Con base en el consumo de combustible por hectárea y las hectáreas asociadas a los cultivos en área de estudio, se estimó que el uso de maquinaria en la agricultura de otros cultivos diferentes a la caña de azúcar consume 4.47 millones de galones de diésel para el año base (2021). De los cuales 1.76 millones de galones se asocian a grandes consumidores y 2.71 millones de galones a ventas en las EDS del año 2021. Dicho consumo de combustible emitió en el año 2021 45,371t de CO₂, y de otros contaminantes, como se muestra en la **Tabla 4-20**. La mayor parte de dichas emisiones está asociado al uso de maquinaria durante la etapa de preparación del suelo. Es decir,

se dan principalmente durante las labores de labranza, subsolado, surcado y/o nivelación del suelo, entre otras actividades.

La distribución de las emisiones a nivel municipal de las emisiones de la **Tabla 4-21** se distribuyen a nivel municipal de acuerdo con las hectáreas sembradas y los cultivos. Por lo que se estimó que los municipios con mayores emisiones fueron nuevamente Palmira, Candelaria, Jamundí, Guacarí, El Cerrito y Santander de Quilichao con el 49.2% en conjunto. Lo cual es coherente con el desarrollo económico de estos municipios, que son agroindustriales y están rodeados de cultivos.

Tabla 4-21: Emisiones anuales de la agricultura de otros cultivos en el área de estudio.

Contaminante	Emisión (t año⁻¹)
CO ₂	45,371.48
BC	13.86
CH ₄	4.62
CO	175.80
N ₂ O	1.49
NO ₂	54.43
NO _x	474.58
PM _{2.5}	29.29
PM ₁₀	33.53
SO ₂	0.26
VOC	84.24
NMVOC	79.64

Fuente: Elaboración propia.

▪ Emisiones por resuspensión

Como resultado de la estimación de emisiones por resuspensión, se estima que en el área de estudio se emiten 426.t de PM₁₀ anualmente. Las cuales están en gran parte asociadas nuevamente a las labores de preparación del suelo (61.7%). Al igual que las emisiones exhosto, estas emisiones se dan principalmente en Palmira, Candelaria, El Cerrito y Guacarí que son los municipios con mayores hectáreas de cultivos.

En cuanto a las emisiones de PM₁₀ total asociado a la agricultura de cultivos diferentes a la caña de azúcar, se emiten ~457 t de PM₁₀. De las cuales el 93% se dan por la resuspensión, producto del paso de la maquinaria agrícola por los suelos agrícolas.

4.5 Estimación *Top-down* de vías locales de los otros municipios

4.5.1 Enfoque metodológico

Para las 22 ciudades distintas a Cali, Palmira y Yumbo designadas como “otros municipios”, que incluyen: Tuluá, San Pedro, Buga, Yotoco, Guacarí, Ginebra, Vijes, El Cerrito, Pradera, Candelaria, Florida, Jamundí y Río Frío en el departamento del Valle del Cauca y los municipios de Puerto Tejada, Miranda, Padilla, Villa Rica, Corinto, Caloto, Guachené y parcialmente Buenos Aires y Santander de Quilichao en el departamento del Cauca. Las emisiones se estimaron bajo el enfoque *Top-down*, al igual que las emisiones exhosto de la cañicultura, con base en las ventas de combustibles líquidos reportadas por SICOM y el GNV reportado por SUI para cada municipio (E_{EDS}), (**Tabla 2-1**). Suponiendo que las ventas reportadas por SICOM y SUI se consumen dentro del área de estudio y que los vehículos registrados operan dentro del área de estudio. Aunque se reconoce que existen dinámicas metropolitanas, regionales y nacionales que tienen una influencia importante en las emisiones y patrones de actividad vehicular en el área de estudio.

Para la estimación de emisiones exhosto, primero se estimaron las emisiones globales de CO₂ (E_{CO_2}) de las vías urbanas de las cabeceras municipales, a partir de la suma de las ventas ($\sum FA_{k,i}$) de cada combustible k, en los municipios i (**Tabla 2-1**); y utilizando los factores de emisión ($FE_{CO_2,k}$) para cada tipo de combustible k, (**Tabla 4-19**) de la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (Ecuación 4-18).

$$E_{CO_2} = FE_{CO_2,k} * \sum FA_{k,i} \quad (4-18)$$

Después de estimar las emisiones de CO₂ de las 22 ciudades, se estimaron las emisiones de los demás contaminantes ($E_{EDS,j}$), a partir de la relación de la emisión del contaminante de interés y la emisión de CO₂ estimada para el parque automotor de Palmira (Ecuación 4-9). Las emisiones generadas en el municipio de Palmira se utilizaron como base para estimar los factores de relación entre contaminantes, debido a que la distribución de tecnologías y combustibles en el parque automotor regional es similar a este municipio.

Finalmente, las emisiones asociadas a las vías locales de los otros municipios ($E_{Local,j}$), se estimaron balanceando las emisiones totales estimadas por venta de combustibles ($E_{EDS,j}$), con las emisiones exhosto asociadas a la agricultura de otros cultivos, asociadas a las ventas en EDS ($E_{Otros\ cultivos,j}$) y las vías nacionales ($E_{Vias\ nacionales,j}$), para cada contaminante j. De tal forma que las emisiones restantes se asocian a las vías locales de los 22 municipios (Ecuación 4-19). Para este balance no se tiene en cuenta las emisiones exhosto de la cañicultura y parte de las emisiones de la agricultura de otros cultivos (~40%), ya que se asume que éstas emisiones no provienen de las ventas en EDS sino de las ventas a grandes consumidores, reportadas por SICOM.

$$E_{Local,j} = E_{EDS,j} - E_{Vias\ nacionales,j} - E_{Otros\ cultivos,j}$$

Una vez obtenidas las emisiones exhosto de cada contaminante para los otros municipios, se realizó la distribución espacial de las emisiones mediante el algoritmo DROVE, en el nivel 2. En función de la densidad de la red vial secundaria y terciaria de estas ciudades, factores de distribución del tráfico asociados a este tipo de vías y factores de distribución temporal. Lo cual se estableció de acuerdo con la malla vial de cada municipio y el perfil horario por tipo de vía de Palmira (**Figura 3-3**).

En cuanto a las emisiones por resuspensión, se usó el enfoque *Top-down*, con base en las emisiones exhosto de CO₂ de cada municipio ($E_{CO_2,i}$) y un factor de relación entre las emisiones de CO₂ y PM₁₀ resuspendido de Palmira, como se observa en la ecuación 4-20. Puesto que la dinámica de este municipio es similar a la del resto del área de estudio, caso contrario de Yumbo o Cali, que tienen características industriales y urbanas que no comparten con ningún otro municipio. Cabe aclarar que la emisión de PM₁₀ resuspendido de Palmira es la suma de las vías pavimentadas y no pavimentadas, de tal forma que el factor de relación estimado tuviera en cuenta los dos tipos de vías.

$$E_{PM10\ resus,i} = E_{CO_2,i} * \frac{E_{PM10\ resus,Palmira}}{E_{CO_2,Palmira}} \quad (4-20)$$

4.5.2 Emisiones vehiculares de otros municipios

▪ Emisiones exhosto

De acuerdo con las ventas de combustible de los 22 municipios para el año 2021, y el balance entre las emisiones de ventas y las emisiones estimadas anteriormente, se estima que 458,514 t de CO₂, y de otros contaminantes, fueron emitidas a la atmósfera en el año base 2021 (**Tabla 4-22**). Las cuales en su mayoría se concentran en los municipios de Tuluá, Buga, Jamundí, Florida y Candelaria, con el 56% en conjunto (**Tabla 4-23**). Estos son los municipios con mayor población y desarrollo económico, de

los 22 municipios. Cuentan con 220,032; 129,639; 168,079; 58,273 y 94,736 habitantes, respectivamente.

Tabla 4-22: Emisiones anuales de los otros municipios del área de estudio.

Contaminantes	t año⁻¹
CO₂	458,514
BC	74
CH₄	299
CO	19,504
N₂O	17
NO₂	220
NO_x	2,545
PM_{2.5}	198
PM₁₀	240
SO₂	10
VOC	3,856
VOCNM	3,557

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-23: Emisiones exhosto en las vías locales de cada uno de los otros municipios en t año⁻¹.

Municipio	CO ₂	BC	CH ₄	CO	N ₂ O	NO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	VOC	VOCNM
Tuluá	88,516	14	58	3,765	3	42	491	38	46	2	744	687
Buga	57,529	9	38	2,447	2	28	319	25	30	1	484	446
Candelaria	25,655	4	17	1,091	1	12	142	11	13	1	216	199
Yotoco	1,159	0	1	49	0	1	6	0	1	0	10	9
Jamundí	49,364	8	32	2,100	2	24	274	21	26	1	415	383
El cerrito	10,011	2	7	426	0	5	56	4	5	0	84	78
San pedro	11,110	2	7	473	0	5	62	5	6	0	93	86
Puerto tejada	22,534	4	15	959	1	11	125	10	12	0	189	175
Florida	34,211	6	22	1,455	1	16	190	15	18	1	288	265
Pradera	22,222	4	14	945	1	11	123	10	12	0	187	172
Guacarí	5,732	1	4	244	0	3	32	2	3	0	48	44
Corinto	15,293	2	10	650	1	7	85	7	8	0	129	119
Ginebra	22,747	4	15	968	1	11	126	10	12	0	191	176
Vijes	9,232	1	6	393	0	4	51	4	5	0	78	72
Padilla	21,821	4	14	928	1	10	121	9	11	0	183	169
Caloto	10,008	2	7	426	0	5	56	4	5	0	84	78
Villa rica	2,076	0	1	88	0	1	12	1	1	0	17	16
Miranda	12,393	2	8	527	0	6	69	5	6	0	104	96
Buenos aires	14,731	2	10	627	1	7	82	6	8	0	124	114
Sder de Quilichao	1,656	0	1	70	0	1	9	1	1	0	14	13
Riofrío	14,068	2	9	598	1	7	78	6	7	0	118	109
Guachené	2,594	0	2	110	0	1	14	1	1	0	22	20
Total, otros municipios	454,660	74	297	19,340	17	218	2,523	196	237	10	3,823	3,527
Residual	3,854	1	3	164	0	2	21	2	2	0	32	30

- **Emisiones por resuspensión**

Como resultado de la estimación de emisiones por resuspensión, se estima que en los 22 municipios del área de estudio se emitieron 1,073 t de PM₁₀ en el año 2021. Las cuales están en gran parte asociadas nuevamente a los municipios de Tuluá, Buga, Jamundí, Florida y Candelaria, con 603t de PM₁₀ en conjunto (**Tabla 4-24**). Sumado a las emisiones exhosto, en los 22 municipios se generan 1312 toneladas de PM₁₀, que son principalmente asociadas a la resuspensión (82%).

Tabla 4-24: Desagregación municipal de las emisiones de PM₁₀ resuspendido.

Municipio	PM₁₀ Resuspendido (t año⁻¹)
Tuluá	209
Buga	136
Candelaria	61
Yotoco	3
Jamundí	117
El cerrito	24
San pedro	26
Puerto tejada	53
Florida	81
Pradera	52
Guacarí	14
Corinto	36
Ginebra	54
Vijes	22
Padilla	52
Caloto	24
Villa rica	5
Miranda	29
Buenos aires	35
Sder de Quilichao	4
Riofrío	33
Guachene	6
Total, otros municipios	1,073
Residual	9

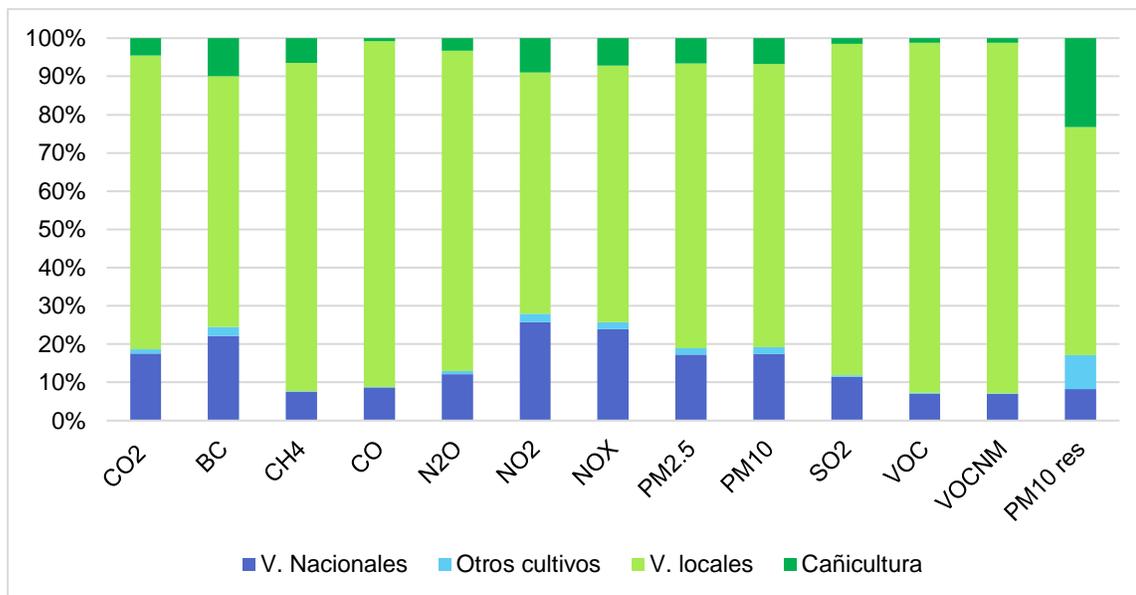
Fuente: Elaboración propia.

4.6 Emisiones vehiculares del área de estudio

El inventario agregado de fuentes móviles en los 25 municipios se resume en la **Figura 4-16**. Se puede observar que la actividad vehicular en las vías locales de los centros urbanos son la principal fuente de emisiones vehiculares en todos los contaminantes. La actividad vehicular en las vías nacionales es el segundo mayor aportante, seguido de la cañicultura y la agricultura de otros cultivos. Las emisiones en la malla vial local están principalmente asociadas a la actividad vehicular en Cali, donde se concentra gran parte del parque automotor registrado (~744mil vehículos). Por otro lado, las emisiones en la malla vial nacional están relacionadas con el flujo vehicular tanto de vehículos livianos como pesados por la cercanía al puerto de Buenaventura, que en 2019 movilizó el 32% de la carga nacional (Mintransporte, 2020). Así como también por la interconexión entre municipios, el transporte de materias primas y productos terminados que entran y salen del complejo industrial de Yumbo y el transporte de alimentos desde y hacia los municipios agrícolas y agroindustriales de la región.

En cuanto a la emisión por cada contaminante, el CO₂ es el contaminante que más se emite con 4,093,147 toneladas por año, seguido de CO (142,758 t) > VOC (33,821t) > VOCNM (31,493 t) > NO_x (26,490.46t) > CH₄ (2,427.52 t) > NO₂ (2,396.38t) > PM₁₀ (1,964.77 t) > PM_{2.5} (1,742.68t) > BC (579.26t) > N₂O (182.37t) > SO₂ (82.11t). Aunque las emisiones son generadas en su mayoría por la actividad vehicular en la malla vial local y su aporte es similar para todos los contaminantes, la cañicultura y agricultura de otros cultivos aumenta su aporte en contaminantes como: BC, NO₂, NO_x, CH₄, PM₁₀ y PM_{2.5}. Esto debido a que estas emisiones están asociadas principalmente a la combustión de diésel, el cual está relacionado con la emisión de estos contaminantes. Mientras que contaminantes como CO, COV, COVNM, N₂O y SO₂ presentan un aumento en su aporte en las emisiones de vías locales y nacionales, en las cuales la actividad vehicular de vehículos a gasolina como livianos y motos es mayor.

Figura 4-16: Emisiones del área de estudio por contaminante y fuente.



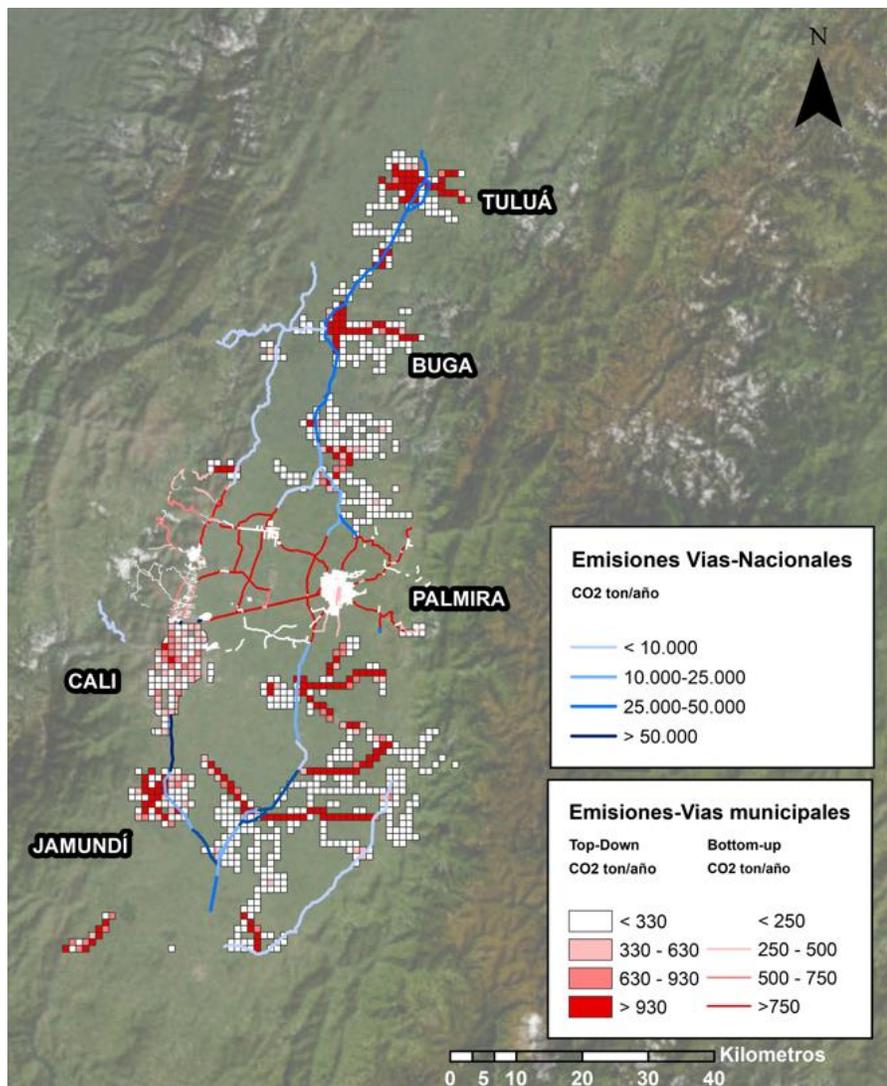
Contaminante t año ⁻¹	Vías Nacionales	Otros cultivos	Vías locales	Cañicultura	Área de estudio
CO₂	716,244.24	45,371.48	3,146,893.60	184,637.48	4,093,146.80
BC	128.23	13.86	379.28	57.89	579.26
CH₄	181.89	4.62	2,082.68	158.33	2,427.52
CO	12,448.39	175.80	129,061.31	1,072.24	142,757.74
N₂O	22.10	1.49	152.67	6.10	182.37
NO₂	616.65	54.43	1,510.75	214.54	2,396.38
NO_x	6,320.02	474.58	17,806.19	1,889.66	26,490.46
PM_{2.5}	301.33	29.29	1,295.99	116.06	1,742.68
PM₁₀	342.59	33.53	1,455.67	132.98	1,964.77
SO₂	9.41	0.26	71.21	1.23	82.11
VOC	2,389.44	84.24	30,950.70	396.90	33,821.28
VOCNM	2,183.49	79.64	28,856.05	373.51	31,492.69
PM₁₀ resuspendido	395.53	426.10	2,845.17	1,114.05	4,780.84

Fuente: Elaboración propia.

El aporte de cada municipio a las emisiones de la región se resume en el **Anexo G**, y se puede observar la desagregación espacial de las emisiones de CO₂ asociadas a la malla vial nacional y local en la **Figura 4-17**. Se eligió representar gráficamente el CO₂, ya que

es un trazador de las emisiones vehiculares, de tal manera que se puede representar el impacto de la actividad vehicular. Por otro lado, se aclara que la desagregación espacial de las emisiones agrícolas y de cañicultura no es posible representarla gráficamente ya que se desconoce la ubicación de los cultivos en cada municipio.

Figura 4-17: Desagregación espacial de las emisiones anuales de CO₂ (t año⁻¹) en las vías locales y nacionales del área de estudio.

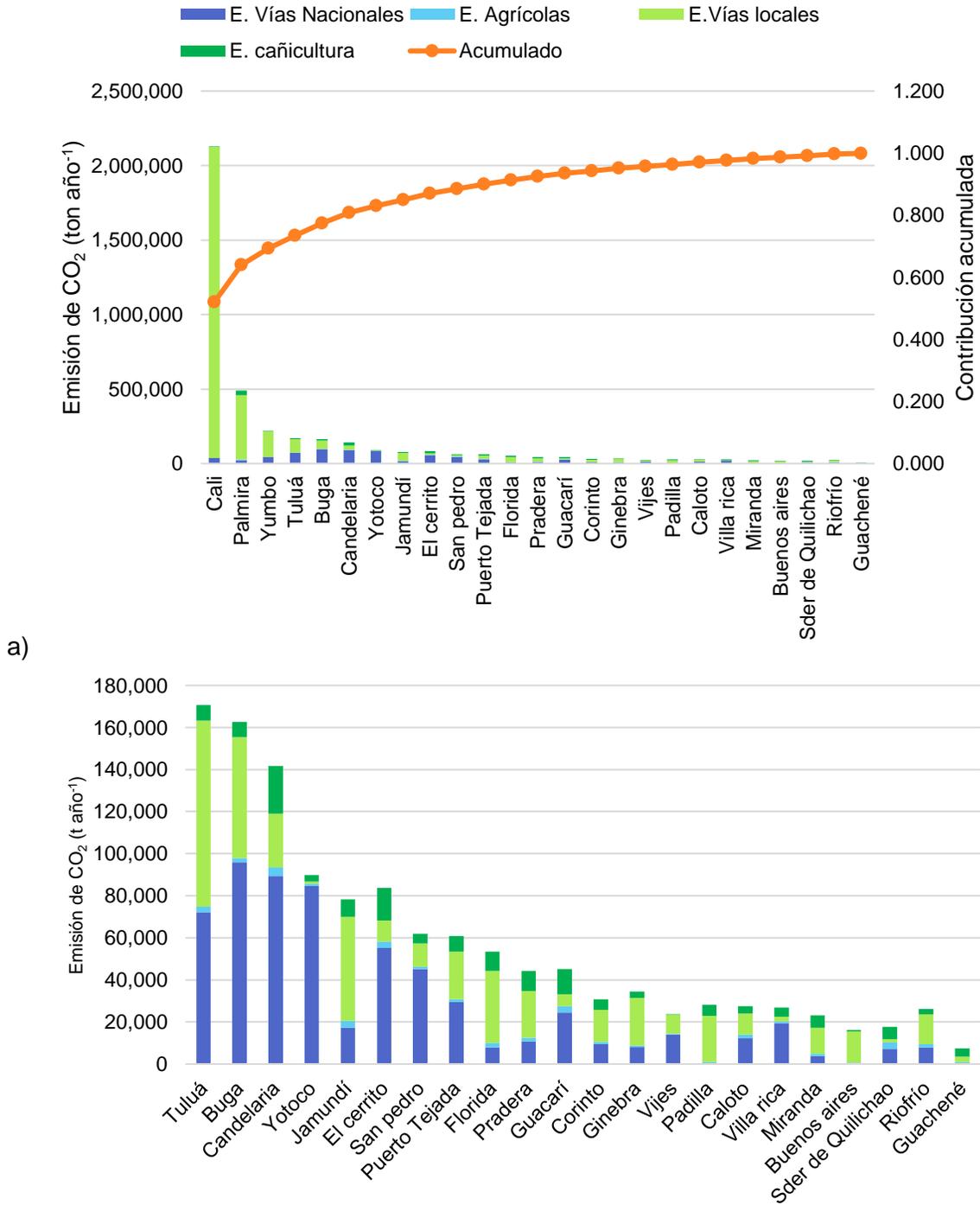


Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al aporte de cada municipio a la generación de emisiones, Cali, al ser el centro urbano más grande, concentra el mayor aporte de emisiones de la región con cerca del 52% de las emisiones de todos los contaminantes. Seguido de Palmira, Yumbo, Tuluá, Buga y Candelaria con alrededor del 11%, 6%, 4%, 4% y 3% de las emisiones de los contaminantes, respectivamente (**Figura 4-18-Anexo G**). Es decir, 6 de los 25 municipios emiten alrededor del 80% de las emisiones del área de estudio. Las emisiones de Cali, Palmira, Yumbo, Tuluá, Jamundí, Florida, Ginebra, Padilla, Buenos Aires y Riofrío están principalmente asociadas a las emisiones generadas en la malla vial local. Mientras que, en Buga, Candelaria, Yotoco, El Cerrito, San Pedro, Guacarí y Villarrica, están relacionadas a las emisiones de la malla vial nacional.

En contraste, en la cañicultura y agricultura de otros cultivos, se observa que en los “otros municipios” el aporte de esta fuente de emisión aumenta, comparado con Cali y Yumbo. Debido a que en las ciudades como Cali no se cuenta con muchas hectáreas sembradas, como en los demás municipios. Palmira, Candelaria, El Cerrito, Guacarí y Jamundí son los municipios con mayores emisiones asociadas a la agricultura, con cerca del 47% de las emisiones en conjunto. No obstante, en el área de influencia, en promedio la fuente que más emite CO₂ son las vías locales (77%), seguida de la malla vial nacional (17.5%), cañicultura (4.5%) y agricultura de otros cultivos (1%).

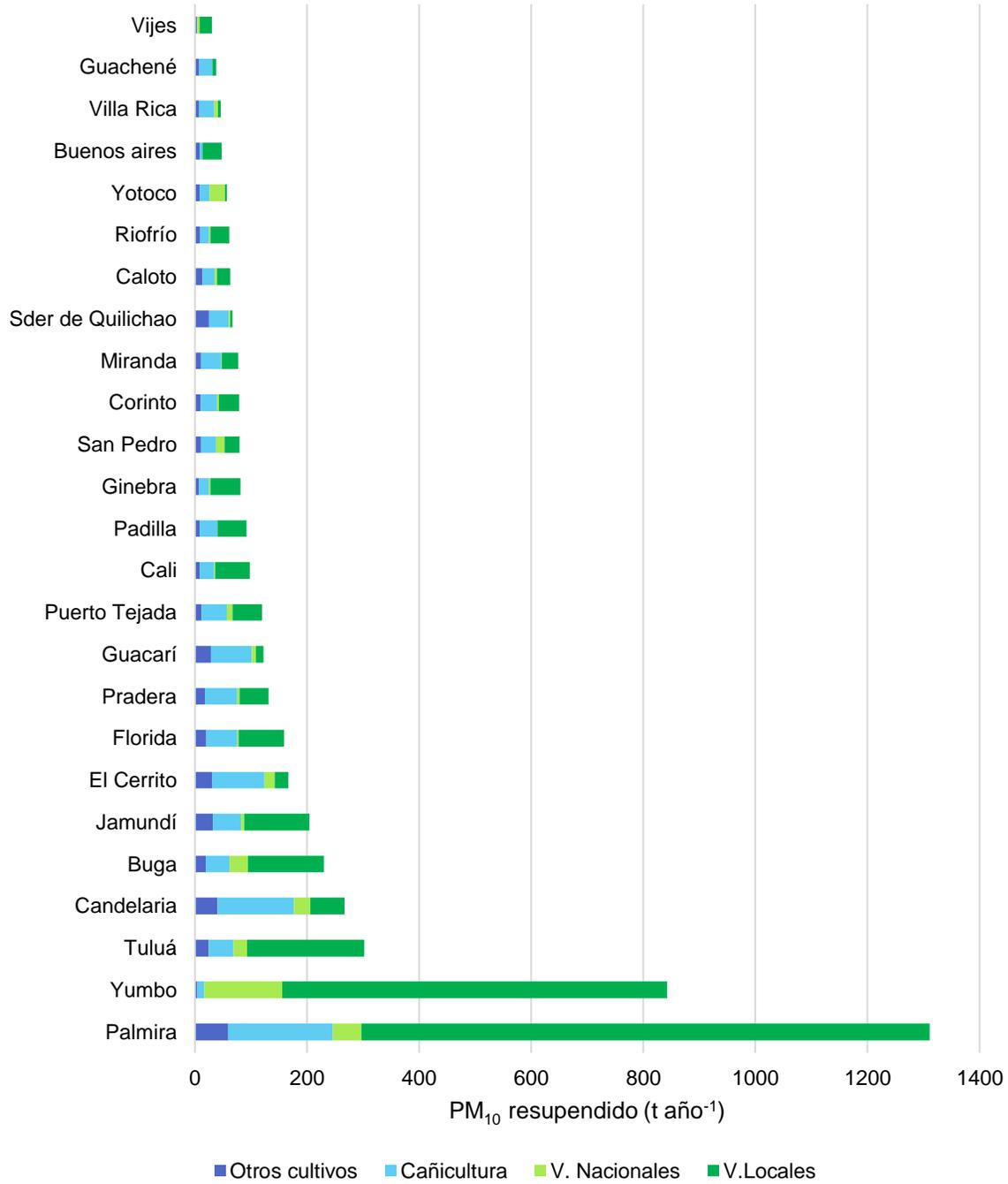
Figura 4-18: Aporte por municipio a las emisiones de CO₂, según la fuente vehicular estimada en el área de estudio, a) Todos los municipios, b) “Otros municipios”.



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se estima que en el área de estudio se emiten 4,780.8 t de PM_{10} por resuspensión. Las cuales se dan principalmente en Palmira, Yumbo, Tuluá, Candelaria y Buga, 62% en conjunto, y están asociadas a la actividad vehicular en las vías locales en Palmira, Yumbo, Tuluá y Buga. En los cuales, las vías locales sin pavimentar son las mayores contribuyentes a la emisión de PM_{10} . Mientras que, para Candelaria, las emisiones están asociadas a la cañicultura. Así mismo, en El Cerrito, Pradera, Guacarí, Santander de Quilichao, Villarica, y Guachené las emisiones por resuspensión se dan principalmente por la cañicultura (>50%). Por otro lado, las vías nacionales aportan en promedio el 8% del PM_{10} resuspendido, solo en Yotoco aportan la mayoría de las emisiones (50%). Mientras que la resuspensión de PM_{10} debido a las actividades agrícolas de otros cultivos aportan en promedio el 14%, siendo Santander de Quilichao el municipio donde más aportan (38%) (**Figura 4-19**).

Figura 4-19: Aporte por municipio a las emisiones de PM₁₀ por resuspensión, según la fuente vehicular estimada en el área de estudio.

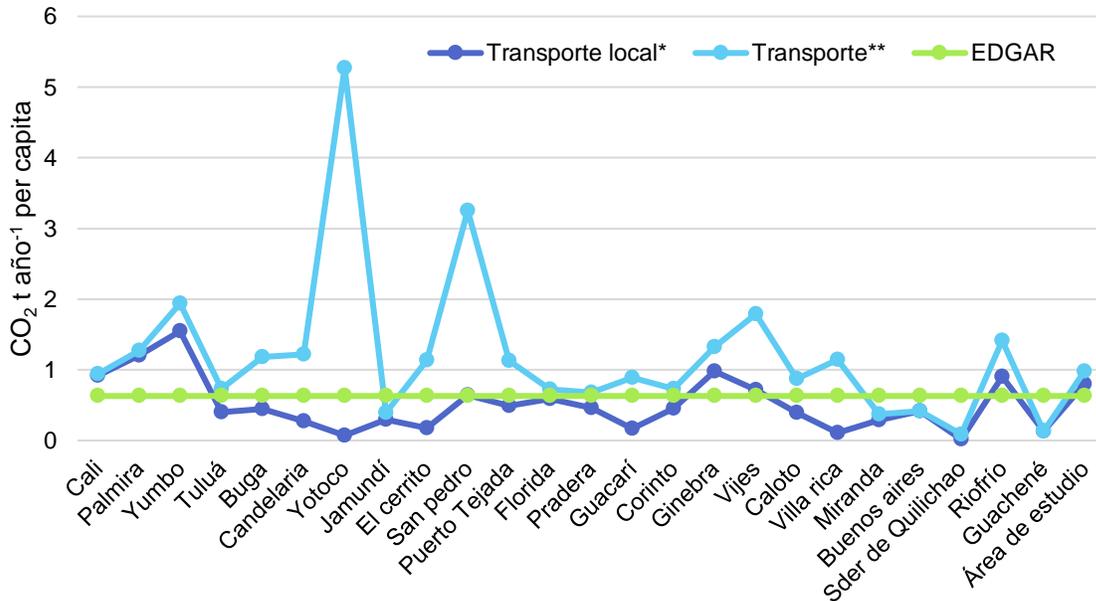


Fuente: Elaboración propia.

Para efectos comparativos, se usaron los datos reportados en EDGAR, Emissions Database for Global Atmospheric Research. EDGAR es una base de datos integral que se centra en recopilar y proporcionar información detallada sobre emisiones globales. Desarrollada por la Comisión Europea, esta base de datos se ha convertido en una herramienta para investigadores y responsables de políticas ambientales. EDGAR ofrece estimaciones detalladas de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos de múltiples fuentes, facilitando el análisis y monitoreo de las contribuciones humanas a los cambios climáticos y la calidad del aire a escala mundial. No obstante, al usar estadísticas globales como las de la agencia internacional de energía (IEA, por sus siglas en Inglés), las metodologías y enfoques para la estimación de emisiones de cada sector, pueden encontrarse diferencias entre el reporte de EDGAR, los inventarios Nacionales oficiales y esta investigación (Crippa et.al, 2023).

De acuerdo con el reporte de emisiones de CO₂ por país de EDGAR, la región de estudio emite el 12% de las emisiones de transporte del país. Se estima que para el 2021, Colombia emitió 31,895,747 toneladas de CO₂ asociadas al transporte (Crippa et.al, 2023). Es decir, para el 2021 cada habitante de Colombia emitió 0.63 t CO₂ en el sector transporte. Mientras que en la región de estudio se estima que cada persona emitió 0.98 t CO₂ asociadas al sector transporte, excluyendo cañicultura y agricultura de otros cultivos (**Figura 4-20**). No obstante, dicha emisión está asociada en gran medida a las emisiones vehiculares en la malla vial nacional. Es decir, no están directamente relacionadas con las emisiones generadas por los habitantes de los municipios, sino que son generadas por procesos externos como el transporte de carga y pasajeros desde y hacia otros municipios. Mientras que las emisiones per cápita de transporte en vías locales del área de estudio es 0.80t CO₂ y la mayoría de los municipios presenta valores cercanos o por debajo del promedio nacional.

Figura 4-20: Emisiones anuales de CO₂ per cápita, asociadas al transporte en cada municipio del área de estudio.



*Transporte local se refiere a las emisiones en vías locales de cada municipio.

**Transporte incluye tanto las emisiones de vías locales como las vías nacionales.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, las emisiones de CO₂ generadas en el área de estudio representan cerca de la mitad de las emisiones obtenidas bajo el enfoque Bottom-up y factores de emisión de Copert V, para Bogotá en el 2019 (Jaime, 2022). Esta discrepancia es coherente considerando la diferencia en la población de la región (~3.9 millones de habitantes, DANE, 2018) en comparación con la de Bogotá (~ 8 millones de habitantes, DANE, 2018). Además, ambas estimaciones se basan en factores de emisión de Copert V. Así mismo, Palmira con cerca de 350mil habitantes y Manizales con ~430mil habitantes, presentan estimaciones de emisiones similares (Valencia, 2019). A pesar de la aplicación de metodologías distintas en ambas ciudades, IVE en Manizales y Copert V en Palmira y que tienen características diferentes. Palmira es suburbana y agroindustrial en una zona plana, mientras que Manizales es una ciudad urbana en los andes colombianos, con pendientes considerables en la malla vial.

Aunque, los resultados obtenidos a partir de los factores de emisión de IVE en Manizales y Copert V en Palmira son comparables, esto no se refleja de la misma manera en todos los casos. Los 9 municipios del Cauca estimados en este estudio comprenden una población similar a la de Palmira; sin embargo, las emisiones conjuntas son cerca del 49% de las emisiones de Manizales (Valencia, 2019). Esto podría estar relacionado con las características específicas de cada municipio, ya que los municipios del Cauca son menos urbanizados y por ende podrían presentar una actividad vehicular menor.

4.7 Conciliación de emisiones de CO₂

La estimación de emisiones vehiculares puede ser abordada mediante diferentes enfoques, como el enfoque *Top-down* y el enfoque *Bottom-up*. Estos enfoques difieren en la forma en que se recopilan y procesan los datos, lo que puede dar lugar a estimaciones divergentes. Por lo tanto, es esencial conciliar estas estimaciones para identificar las discrepancias entre los resultados y buscar soluciones para lograr una armonización de los datos. Y establecer un marco que permita comparar y combinar los resultados obtenidos.

Para efectos de comparación entre estimaciones, se eligió el contaminante CO₂ como referencia. Además, se estimó las emisiones de CO₂ para todos los municipios del área de estudio, a partir de la actividad vehicular diaria estimada con datos de CDA (Sección 2.7, **Tabla 2-5**), el parque automotor registrado y rendimiento del combustible por categoría vehicular (UPME, 2019; RUNT, 2021). Se asume que los 22 municipios diferentes a Cali, Palmira y Yumbo tienen una actividad diaria igual a Palmira. Dado que, por las características del parque automotor, y desarrollo de los municipios Palmira es representativa de los demás municipios. Así mismo, se asume para todo el parque automotor, los valores de rendimiento por categoría reportados para Cali en el Primer Balance de Energía útil para Colombia del año 2019 de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2019).

Una vez definida la actividad vehicular diaria y el parque automotor registrado en cada municipio, se aplicó la siguiente ecuación para estimar el consumo de combustible, como se ve en la **Tabla 4-25**.

$$FA_{jk} = (N_{veh,j,k} * AV_j * 330) * \frac{1}{Rend_{kj}} \quad (4-21)$$

Donde,

FA_{jk} , consumo del combustible k por cada categoría vehicular j (galones). $N_{veh,j,k}$, Número de vehículos de la categoría j que consumen el combustible k . AV_j , actividad vehicular diaria de cada categoría j (km vehículo⁻¹ día⁻¹). $Rend_{kj}$, rendimiento del combustible k para cada categoría j (km gal⁻¹). **330**, es el factor de expansión anual de la actividad vehicular

Posteriormente, con base en la estimación de consumo de combustible se calcularon las emisiones de CO₂ aplicando la ecuación 4-8, para cada municipio. En la **Tabla 4-25** se reporta la estimación de consumo para Cali, Yumbo y Palmira y otros municipios, como resumen de la estimación que se realizó. En la **Tabla 4-26**, se reporta las emisiones de CO₂, estimadas para la flota vehicular del área de estudio.

Tabla 4-25: Estimación de consumo de combustible a partir de datos de CDA y RUNT.

	Categoría vehicular	Flota vehicular	Rendimiento (km/gal) o (km/m3)	Actividad vehicular km/(día veh)	Gasolina (gal)	Diésel (gal)	GNV (m3)	
Cali	Autos	Diésel	15,835	29	27.8			
		Gasolina	451,498	22	27.8	188,003,767		
		GNV	3,966	12	27.8		3,027,644	
	Taxi	Diésel	1,641	65	124.7		1,038,904	
		Gasolina	18,070	50	124.7	14,871,971		
		GNV	3,430	13	124.7			10,857,533
	Motos	Gasolina	229,770	97	19.6	15,321,158		
	Buses	Diésel	4,863	12	103.1		13,783,809	
		Gasolina	4,525	8	103.1	19,238,660		
		GNV	149	2	103.1			2,533,976
	Camión	Diésel	4,109	10	61.0		8,270,061	
		Gasolina	5,502	11	61.0	10,067,009		
GNV		140	4	61.0			704,435	
Yumbo	Autos	Diésel	932	29	45.22		479,581	
		Gasolina	4,219	22	45.22	2,861,748		
		GNV	181	12	45.22		225,083	
	Taxi	Diésel	489	65	114.17		283,440	
		Gasolina	624	50	114.17	470,198		
		GNV	205	13	114.17			594,123
	Motos	Gasolina	14,215	97	34.56	1,671,332		
	Buses	Diésel	744	12	99.0		2,026,154	
		Gasolina		8	55.5	0		
		GNV	29	2	99.0			473,859
	Camión	Diésel	1,241	10	98.3		4,026,089	
		Gasolina		11	55.9	0		
GNV			4	55.9			0	
Palmira y otros municipios	Autos	Diésel	5,261	29	36.05		2,158,189	
		Gasolina	93,189	22	36.05	50,391,952		
		GNV	1,497	12	36.05		1,484,088	
	Taxi	Diésel	4,707	65	172.25		4,166,272	
		Gasolina	7,032	50	172.25	7,994,3297		
		GNV	1,463	13	172.25			6,396,968
	Motos	Gasolina	876,467	97	25	74,544,874		
	Buses	Diésel	6,603	12	55.5		10,081,460	
		Gasolina	1,334	8	55.5	3,055,127		
		GNV	166	2	55.5			1,520,693
	Camión	Diésel	16,273	10	55.9		30,034,913	
		Gasolina	2,021	11	55.9	3,391,036		
GNV		97	4	55.9			447,580	
Total consumo área de estudio					391,883,161	81,300,986	28,265,981	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-26: Estimación de emisiones de CO₂ en el área de estudio, a partir del *Top-down* con datos de CDA.

Combustible	Gasolina (gal)	Diésel (gal)	Gas natural (m ³)
Consumo	391,883,161	81,300,986	28,265,981
FE (Kg CO₂/gal, líquidos) y (KgCO₂/m³ st, GNV)	8.8085	10.149	2.1789
TOTAL CO₂ (Kg)	3,451,902,825	825,123,710	61,588,745
TOTAL CO₂ (t año⁻¹)	4,338,615		

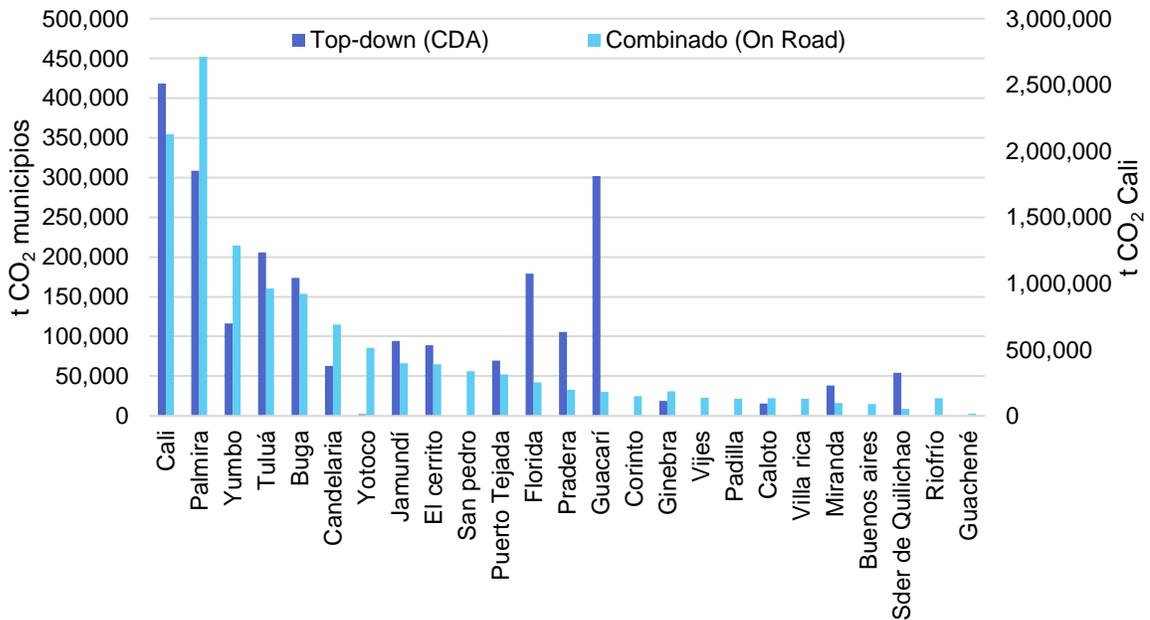
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta las emisiones estimadas para la malla vial nacional y local de los 25 municipios, las cuales se presume están asociadas a la actividad vehicular on road de los vehículos registrados en la región. La discrepancia entre la combinación de enfoques *Bottom-up* y *Top-down* (**Figura 4-16**) y la estimación de emisiones a partir de datos de CDA (**Tabla 4-26**) es del 12.3%. La estimación *Top-down* con datos de CDA estima 475,477t de CO₂ más que la combinación de enfoques. Lo cual se considera aceptable, teniendo en cuenta que el parque automotor circulante difiere del parque automotor registrado, más aún en una región que conecta un puerto, un hub industrial y parte del sector agrícola con el resto del país.

En cuanto a la discrepancia entre ambos enfoques, combinado y CDA, omitiendo los municipios sin flota vehicular, a los que no es posible estimar emisiones utilizando datos de CDA, se destacan Villa Rica y Yotoco, que exhiben la mayor diferencia. Esto se debe a que gran parte de sus emisiones se generan en la malla vial nacional. Seguidamente, Yumbo, Candelaria, Ginebra, Palmira y Caloto, en promedio presentan una diferencia del 38%, siendo las emisiones de este estudio mayores a las estimadas por CDA. Mientras que, municipios como: Guacarí, Santander de Quilichao, Florida, Pradera, Miranda presenta emisiones de CDA hasta 9 veces más que las emisiones estimadas por el enfoque combinado. Jamundí, El Cerrito, Puerto Tejada, Tuluá, Cali y Buga en promedio tienen una diferencia de 25% menos que las emisiones de CDA (**Figura 4-21**). Los resultados obtenidos individualmente, dan cuenta de la importancia de estimar las emisiones en conjunto en esta zona del país, ya que es probable que las diferencias se

deban en parte a la variabilidad entre el parque automotor registrado y el circulante. Lo cual, está relacionado con la interconexión que existe entre municipios.

Figura 4-21: Discrepancia entre la combinación de enfoques y el enfoque Top-down a parir de CDA.



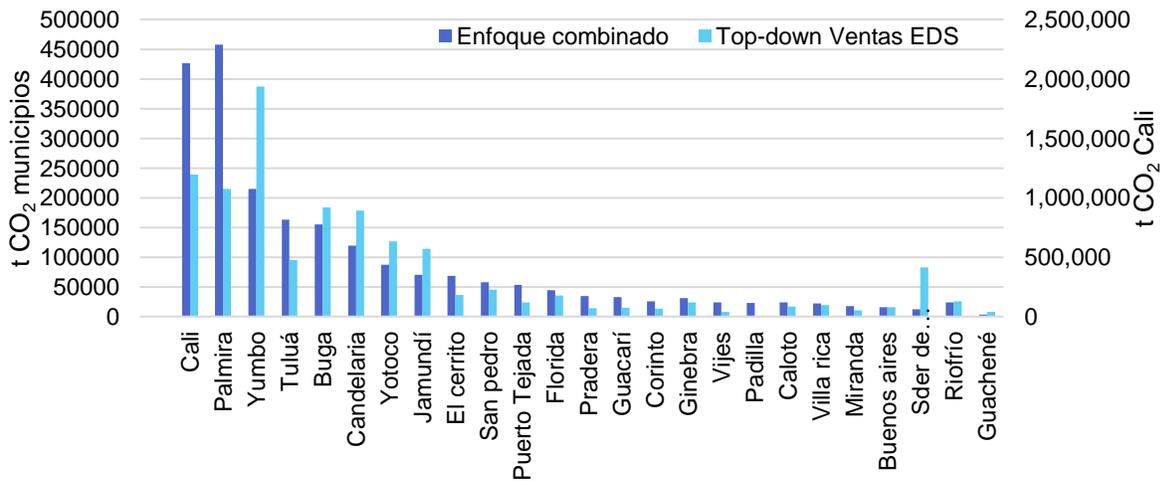
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, teniendo en cuenta las emisiones estimadas para la malla vial nacional y local, y las emisiones de otros cultivos, que se presume están asociadas a las ventas en las EDS de los 25 municipios. La diferencia entre dichas emisiones y las emisiones estimadas para cada municipio de acuerdo con las ventas de combustible es del -35%. Donde las emisiones de este estudio emiten 1,007,526 t CO₂ más que las estimadas por ventas. Lo cual podría estar relacionado al flujo vehicular en las vías nacionales, ya que algunos vehículos podrían estar usando combustible que no se haya comprado en la región. Por ejemplo: vehículos de carga que se despachen desde Buenaventura. No obstante, la diferencia entre la estimación Bottom-up y Top-down por ventas en Cali, Palmira y Yumbo es de -49%. Es decir, las emisiones Bottom-up estima 1,004,677 t de

CO2 que las ventas de combustible reportadas. Mientras que los otros municipios en promedio tienen una discrepancia del -35%.

Con respecto a la discrepancia entre los dos enfoques, en cada municipio, Santander de Quilichao y Guachené presentan las mayores diferencias, donde las emisiones de ventas son ~7 y 1.5 veces mayores a las estimadas en esta investigación. Lo cual podría deberse en el caso de Santander a que la grilla utilizada para la desagregación de emisiones no contempla todo el municipio. Mientras que en Guachené podría relacionarse con ventas que no son consumidas en el municipio, sino en la malla vial nacional o municipios cercanos. Así mismo, en Yumbo, Jamundí, Candelaria, Yotoco, Buga y Buenos Aires, la estimación *Top-down* a partir de ventas es mayor a la estimación que combina ambos enfoques. Mientras que para el resto de los municipios la combinación de enfoques estima, en promedio un 40%, más emisiones que las estimadas por el enfoque *Top-down* a partir de ventas de combustible (**Figura 4-22**). Dichos resultados, nuevamente nos indica que se debería estimar las emisiones en conjunto, ya que se presume que las discrepancias podrían estar asociadas a las dinámicas metropolitanas y regionales, donde las personas se trasladan desde otros municipios hasta sus lugares de trabajo o residencia.

Figura 4-22: Discrepancia entre la combinación de enfoques y el enfoque *Top-down* a partir de ventas de combustible.



Fuente: Elaboración propia.

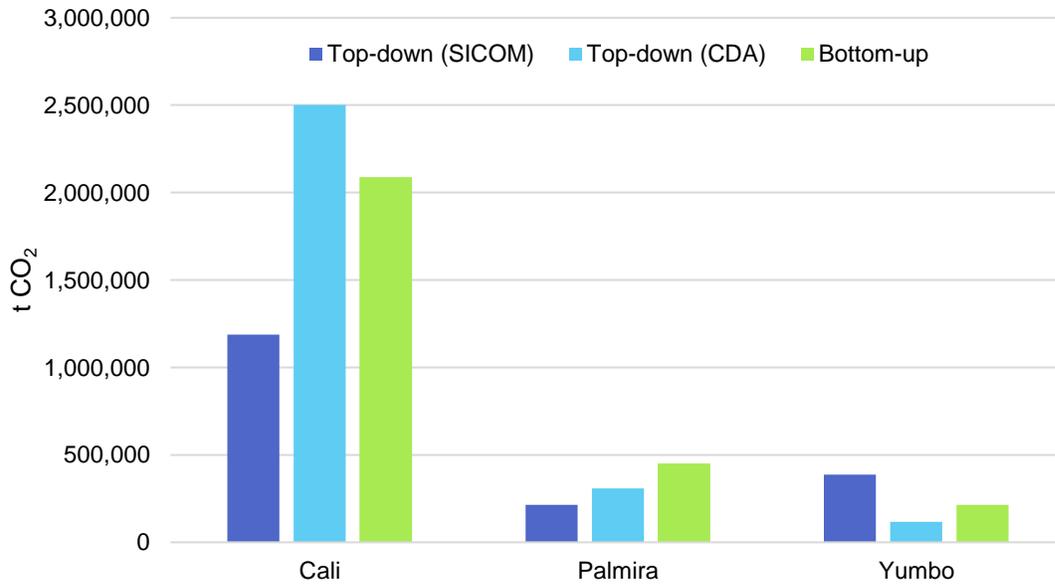
En la misma línea de análisis, para las vías locales y nacionales de Cali, Palmira y Yumbo se cuenta con 3 enfoques de estimación, *Bottom-up* a partir de aforos vehiculares, *Top-down* a partir de ventas de combustible y *Top-down* a partir de datos de CDA. Asumiendo que *Bottom-up* es la mejor aproximación obtenida, en la **Tabla 4-27**, se presentan las discrepancias entre enfoques. Teniendo en cuenta esto, se presume que probablemente el inventario de emisiones de los otros municipios tenga una incertidumbre aproximada del 52% ya que fue estimado a partir de ventas de combustible, y son municipios similares a Palmira.

Tabla 4-27: Discrepancia entre los enfoques de estimación de emisiones de CO₂ de Cali, Palmira y Yumbo.

Enfoque de estimación	t año ⁻¹ de CO ₂		
	Cali	Palmira	Yumbo
<i>Bottom-up</i>	2,124,537	451,837	214,413
<i>Top-down CDA</i>	2,502,572	308,712	116,057
<i>Top-down Ventas</i>	1,188,419	215,068	386,995
% diferencia <i>Bottom-up / Top-down CDA</i>	-17.8%	31.7%	45.9%
% diferencia <i>Bottom-up / Top-down ventas</i>	44.1%	52.4%	-80.5%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-23: Comparativo de emisiones de CO₂ estimadas por enfoque *Bottom-up*, *Top-down* (SICOM), *Top-down* (CDA), EN Cali, Palmira y Yumbo.



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Ante el interrogante de cómo estimar las emisiones de un territorio con información y presupuesto escaso, la combinación de enfoques metodológicos se convierte en una alternativa idónea para tener un proxy de las emisiones vehiculares. Para lo cual, es esencial elaborar una ruta metodológica de acuerdo con la información disponible. Variables como el tamaño de la flota vehicular, sus características tecnológicas, ventas de combustible, características de la malla vial, actividad promedio diaria o anual, son fundamentales para determinar la actividad vehicular en carretera. Asimismo, las variables relacionadas con las hectáreas sembradas por cultivo, el consumo de combustible por hectárea o labor agrícola permiten estimar la actividad vehicular fuera de carretera. Estas variables, junto con factores de emisión propios, de áreas con características similares o agrupadas por tipo de combustibles o cultivo, permiten la estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles en el territorio.

Se implementó una estrategia metodológica para la estimación de las emisiones vehiculares exhosto y por resuspensión, generadas tanto por el transporte en carretera como fuera de carretera, en 25 municipios del VGRC. Esto permitió establecer que se generan 4,093,147 t CO₂, seguido de CO (142,758 t) > VOC (33,821t) > VOCNM (31,493 t) > NO_x (26,490.46t) > PM₁₀ resuspendido (4,780.84 t) > CH₄ (2,427.52 t) > NO₂ (2,396.38t) > PM₁₀ (1,964.77 t) > PM_{2.5} (1,742.68t) > BC (579.26t) > N₂O (182.37t) > SO₂ (82.11t) de emisiones. Estas emisiones se generan principalmente en las vías locales de los 25 municipios, seguido de las emisiones en vías nacionales, cañicultura y agricultura de otros cultivos. Se estimó que 4772 t de PM₁₀ se generaron por resuspensión, de las

cuales el 59% se emiten en vías locales, 23% en las labores y transporte de caña de azúcar, 9% en las labores agrícolas de otros cultivos y 8% en vías nacionales.

Cada categoría vehicular contribuye en diferente proporción a la emisión de cada contaminante, ya que esto depende de las tecnologías vehiculares, el tipo de combustible, entre otras características. Por consiguiente, los vehículos de carga se asocian con contaminantes como: BC, NO₂, NO_x, PM₁₀ y PM_{2.5}, por el uso de diésel. Los vehículos livianos y motocicletas se asocian con la emisión de CO, COV, COVNM, CH₄, SO₂, N₂O, CO₂. En general, los inventarios realizados para Cali, Palmira y Yumbo evidencian que las categorías vehiculares que más aportan emisiones fueron los vehículos livianos y motocicletas, principalmente, debido a su alta actividad vehicular estimada. Esto debido a que la gasolina es el combustible más usado en estas categorías vehiculares y fue el más consumido en la región, sumado a la gran cantidad de estos vehículos que se registran y circulan en las ciudades. Por otro lado, en las vías nacionales los vehículos que más emisiones generan son los camiones, debido a los altos factores de emisión estimados y los kilómetros recorridos en estas vías.

Cali al ser el centro urbano principal de la región es el municipio que mayores emisiones de exhosto genera, seguido de Palmira, Yumbo, Tuluá, Buga y Candelaria. En conjunto, aportan el 80% de las emisiones del área de estudio. A su vez, estos 6 municipios concentran el 83% de los habitantes de la región de estudio, los cuales en promedio se estima que emiten 1.3 t de CO₂ por persona. Por otro lado, Palmira es el municipio que más PM₁₀ resuspendido genera, seguido de Yumbo, Tuluá, Candelaria, Buga y Jamundí, El Cerrito, Florida, Pradera, Guacarí y Puerto Tejada. En conjunto los 11 municipios emiten el 80% del material resuspendido.

De acuerdo con las características de Población y las emisiones estimadas en este inventario (vías locales, vías nacionales, cañicultura, agricultura de otros cultivos y totales), y omitiendo a Cali, Palmira y Yumbo, en la región existen 4 clúster de municipios. Es decir, los municipios de cada clúster cuentan con características similares

y, por tanto, podrían ser estudiados con mayor detalle en conjunto. De tal forma, que se pueden aunar esfuerzos para la gestión de la calidad del aire en dichos municipios. El primer clúster está conformado por Vijes, Buenos aires, Villa Rica, Guachené, Caloto, Riofrío, Corinto, Miranda, Ginebra y Padilla. El segundo clúster estaría conformado por Yotoco, Florida, Pradera, San Pedro y Puerto Tejada. Mientras que el tercer clúster serían Buga y Tuluá y el cuarto clúster lo conformaría Candalaria, Jamundí, Santander de Quilichao, El Cerrito y Guacarí.

Los aforos vehiculares realizados para Cali, Palmira y Yumbo permitieron obtener perfiles de flujo vehicular para tres tipos de ciudades, una ciudad densamente poblada, una ciudad agroindustrial y una ciudad industrial. Lo cual puede ser usado en futuras investigaciones de transporte y estimación de emisiones de Colombia y países en desarrollo con ciudades de características similares a Cali, Palmira y Yumbo. El perfil diario de las tres ciudades revela que, a pesar de ser ciudades diferentes, la estacionalidad de algunas categorías como autobuses, motocicletas y autos es similar para los 3 tipos de ciudades. Sin embargo, al desagregar el perfil diario por tipo de vía, el flujo vehicular para cada tipo de vía es diferencial para las 3 ciudades, lo cual está relacionado con las actividades económicas de cada ciudad. Además, la composición del parque automotor circulante en cada tipo de vía está directamente relacionada con el tipo de ciudad. Como era de esperarse, en una ciudad urbana circulan principalmente vehículos particulares y motocicletas, y en menor medida camiones y autobuses, mientras que en una ciudad industrial la participación de los camiones en el parque automotor circulante es mayor, especialmente en las carreteras industriales.

Cada uno de los métodos de estimación de emisiones tiene sus ventajas y desventajas, con relación al propósito de conocer con algún grado de certeza las emisiones por fuentes móviles en el área de estudio. Por un lado, las emisiones estimadas a partir de la actividad vehicular obtenida del procesamiento de datos de los CDA, asume que la muestra de vehículos que hacen la revisión técnico-mecánica en los CDA del municipio es representativa de la flota vehicular que circula. Esto no es completamente cierto, ya que 1) La evasión de la revisión técnico - mecánica en motocicletas es alta, 2) es exigida

a partir de los 6 o más años de los vehículos particulares, 3) se asume una actividad vehicular similar a la de Palmira para los otros municipios, 4) se asume que la flota que circula en el municipio es aquella que está registrada en la autoridad de tránsito del municipio. Por otro lado, la estimación a partir de ventas de combustible asume que el combustible vendido en cada municipio se consume en el municipio. Lo cual no es del todo cierto, ya que, debido a las dinámicas metropolitanas, regionales y del transporte de carga, el combustible puede ser consumido en las vías externas al municipio y región de estudio. Además, se usan factores de emisión agregados por tipo de combustible. Así mismo, el enfoque *Bottom-up* también asume los vehículos registrados como flota vehicular circulante, para la estimación de factores de emisión, en los que también se asume una velocidad promedio para todos los corredores viales, lo cual omite las condiciones reales de congestión en las vías de las ciudades.

No obstante, se considera que el enfoque *Bottom-up* brinda mayor certeza en la estimación de la actividad vehicular, a partir de aforos vehiculares en lugares estratégicos de las ciudades. Además, pese a que los factores de emisión se obtuvieron con la herramienta COPERT V, que fue desarrollada para países europeos, permite personalizar gran parte de los parámetros y se logró obtener 153, 90 y 125 factores de emisión de cada contaminante, para Cali, Palmira y Yumbo, ya que las categorías vehiculares fueron desagregadas de acuerdo con el segmento europeo. Lo cual hace robusto los factores de emisión estimados para cada categoría vehicular. En ese sentido, el enfoque *Bottom-up* es el que mayor certidumbre genera para la estimación de emisiones vehiculares.

El inventario de emisiones vehiculares en 25 municipios del VGRC se constituye en una herramienta de gestión de la calidad del aire para las autoridades ambientales del territorio. Ya que permite priorizar municipios para la realización de estudios más detallados y permite tener una referencia para estudios futuros. Además, los resultados de este estudio pueden usarse para desarrollar políticas y regulaciones más efectivas para reducir las emisiones vehiculares y mejorar la calidad del aire en el VGRC.

5.2 Recomendaciones

De acuerdo con los clústeres identificados, en un futuro se podrían realizar estudios de calidad de aire e inventarios de emisiones en conjunto, de tal forma que se puedan aunar recursos humanos y monetarios de las autoridades ambientales.

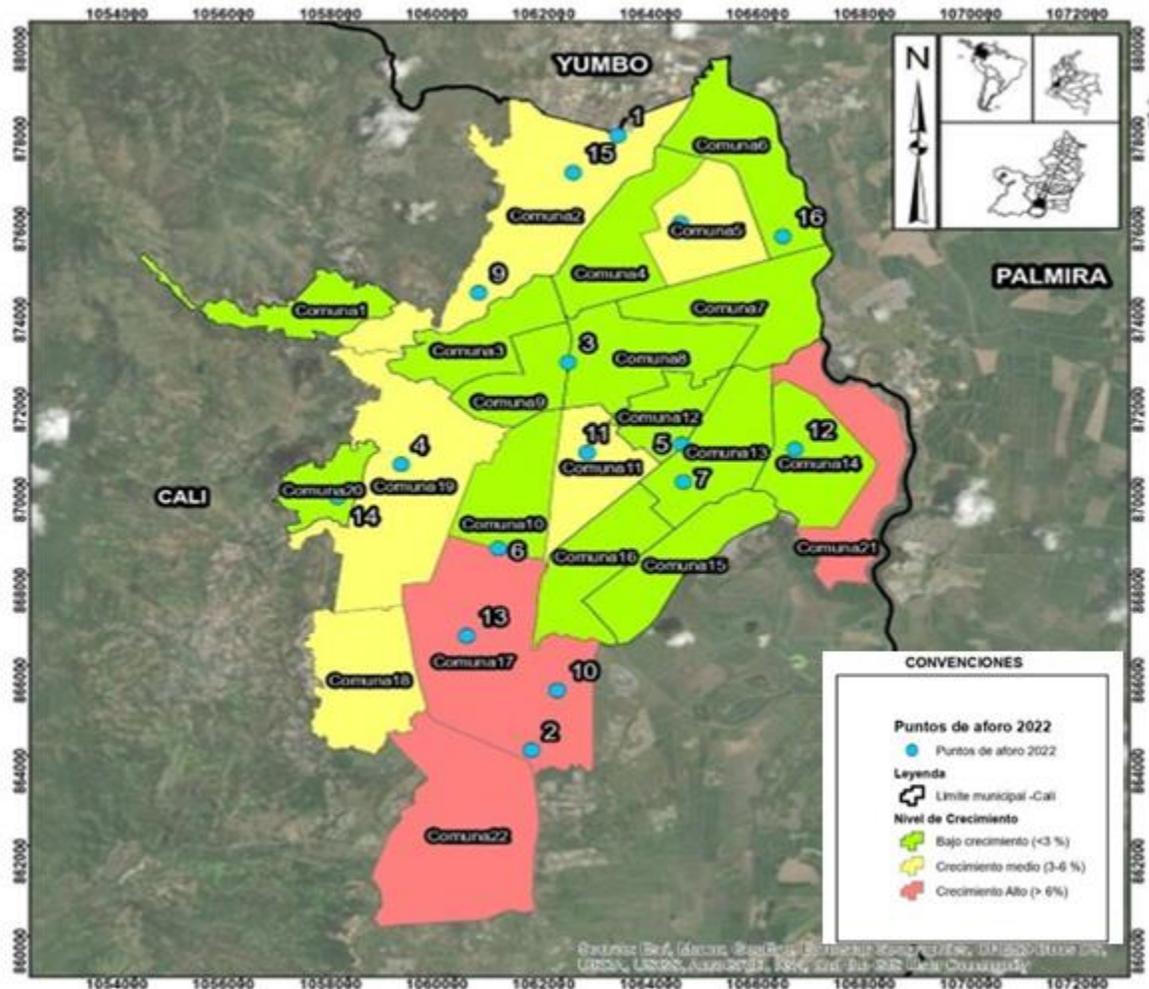
A futuro, los perfiles vehiculares permitirán la desagregación de conteos vehiculares y/o estudios relacionados con el transporte en ciudades urbanas, industriales o agroindustriales de un país en vías de desarrollo, con características como Cali, Palmira y Yumbo. Sin embargo, reconocemos que los conteos vehiculares se deben realizar en días atípicos o fines de semana en Cali, como se hizo para Palmira y Yumbo. Además, se deben estudiar periodos de tiempo más largos, para saber si hay estacionalidad entre días de la semana o meses. Adicionalmente, se considera que los conteos vehiculares deben realizarse considerando el crecimiento demográfico de las zonas de una ciudad, ya que hemos identificado que es un aspecto diferenciador en el uso de las vías.

Es necesario, realizar investigaciones para mejorar la precisión de la estimación de las emisiones vehiculares, particularmente para tipos de vehículos y patrones de conducción específicos. Además, debe centrarse en la estimación de la incertidumbre y la implementación de políticas y estrategias efectivas para obtener más datos disponibles.

A. Anexo: Extrapolación de aforos vehiculares de Cali, 2015

Para el proceso de proyección de los aforos de Cali del 2015 al 2022, se realizó una comparación de la dinámica vehicular en 5 puntos en donde se levantó información tanto para el año 2015 como para el 2022. Estos resultados indicaron que el crecimiento de la actividad vehicular variaba dependiendo de las zonas de la ciudad. Por lo que fue necesario realizar un análisis de variables asociadas al flujo vehicular como es el caso del crecimiento poblacional por comuna, permitiendo así zonificar el área de estudio en 3 sectores de crecimiento poblacional: bajo crecimiento (< 3%), crecimiento medio (3-6%) y crecimiento alto (>6 %) (**Figura A 1**).

Figura A 1: Zonificación de la ciudad por crecimiento poblacional.



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente con la información de los conteos vehiculares en los 5 puntos mencionados, se estimaron los valores que representan el crecimiento porcentual de cada categoría vehicular asociado a cada sector de crecimiento poblacional, siendo estos, los factores de proyección que fueron utilizados para actualizar los datos del 2015 al año 2022. (Tabla A 1).

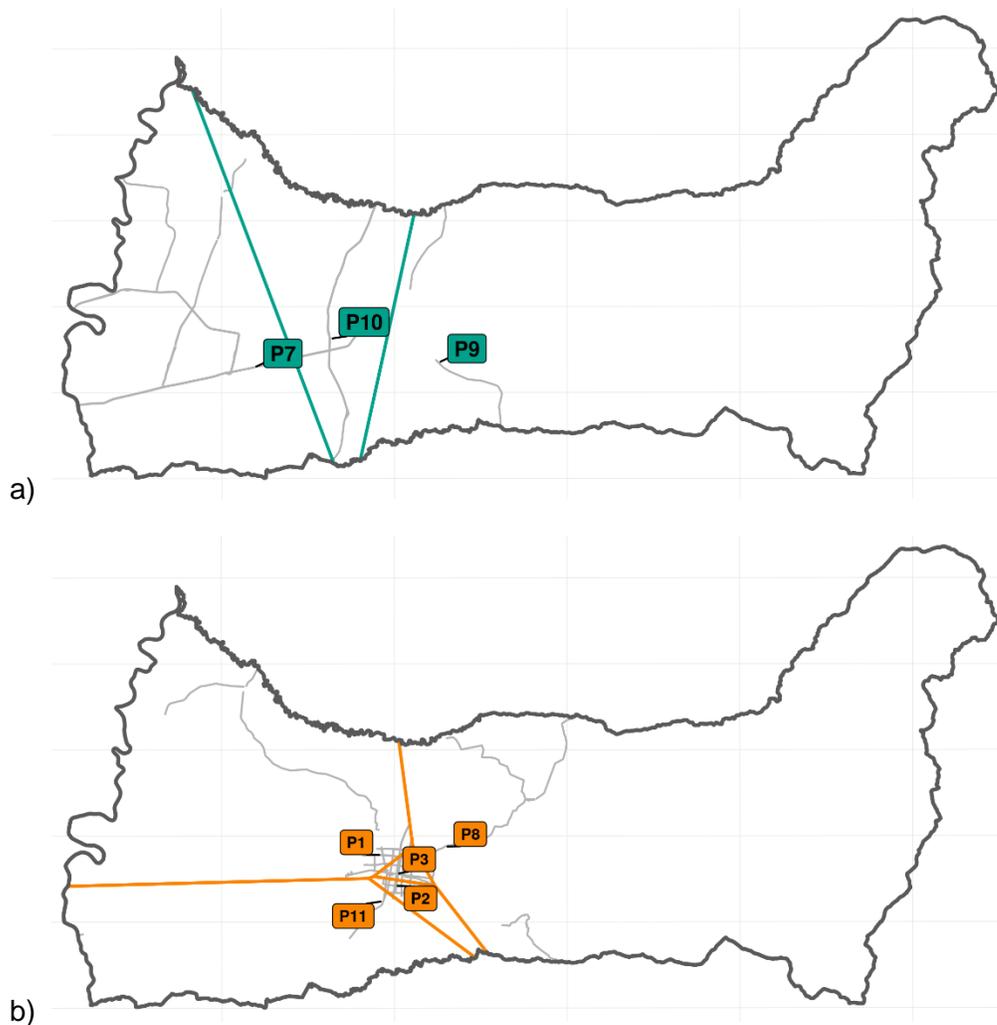
Tabla A 1: Factores de proyección de aforos 2015.

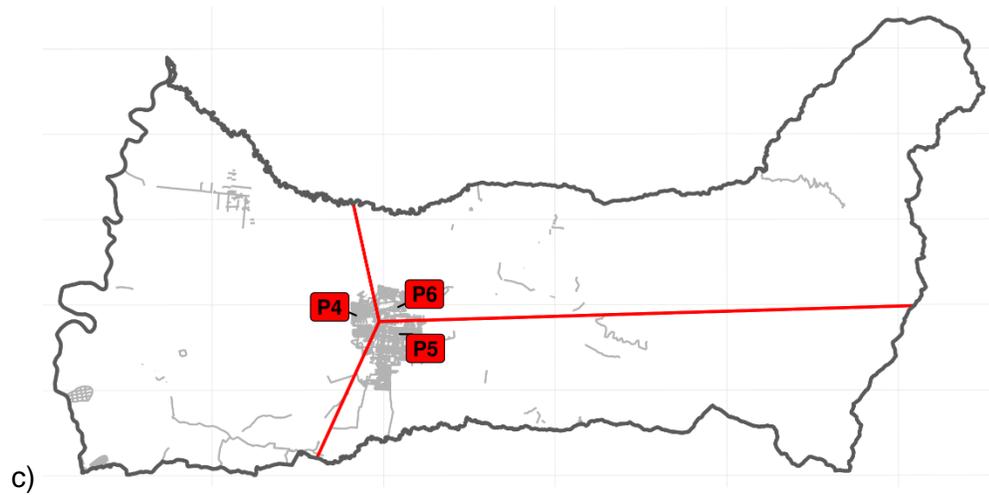
ZONA CRECIMIENTO	FACTOR DE PROYECCIÓN (LIVIANOS)	FACTOR DE PROYECCIÓN (MOTOS)	FACTOR DE PROYECCIÓN (PESADOS)
BAJO	0.08	0.14	0.49
MEDIO	0.13	0.42	0.54
ALTO	1.7	1.15	0.54

Fuente: Elaboración propia.

B. Anexo: Polígonos de Thiessen por categoría vial en Yumbo, Cali y Palmira

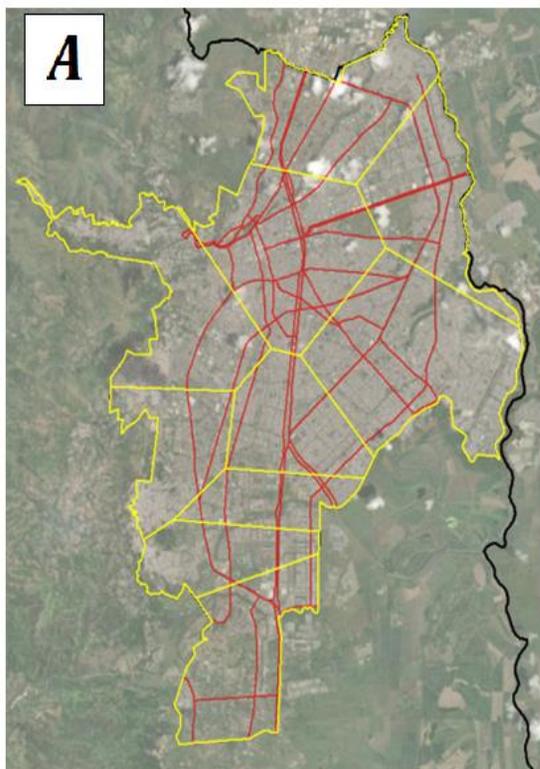
Figura B-1. Polígonos de Thiessen por categoría vial a) vías primarias, b) vías secundarias, c) vías terciarias en el municipio de Yumbo



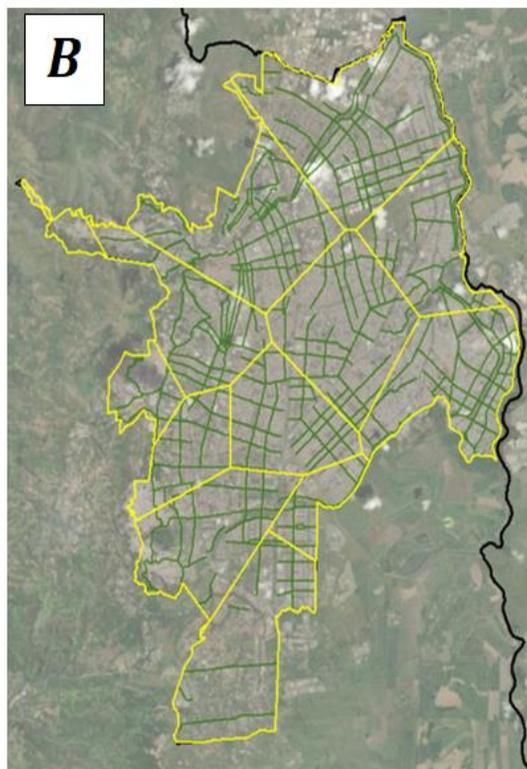


Fuente: Elaboración propia.

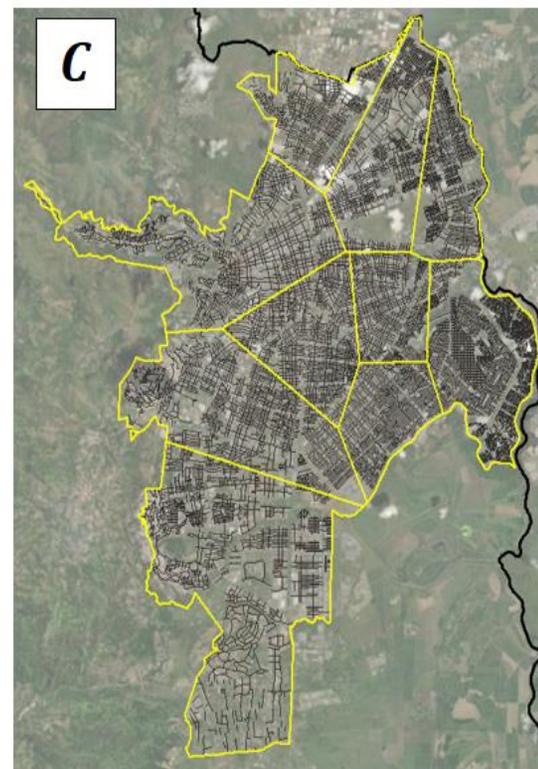
Figura B-2. Polígonos de Thiessen por categoría vial a) vías primarias, b) vías secundarias, c) vías terciarias de Cali.



THIESEN VIAS PRIMARIAS



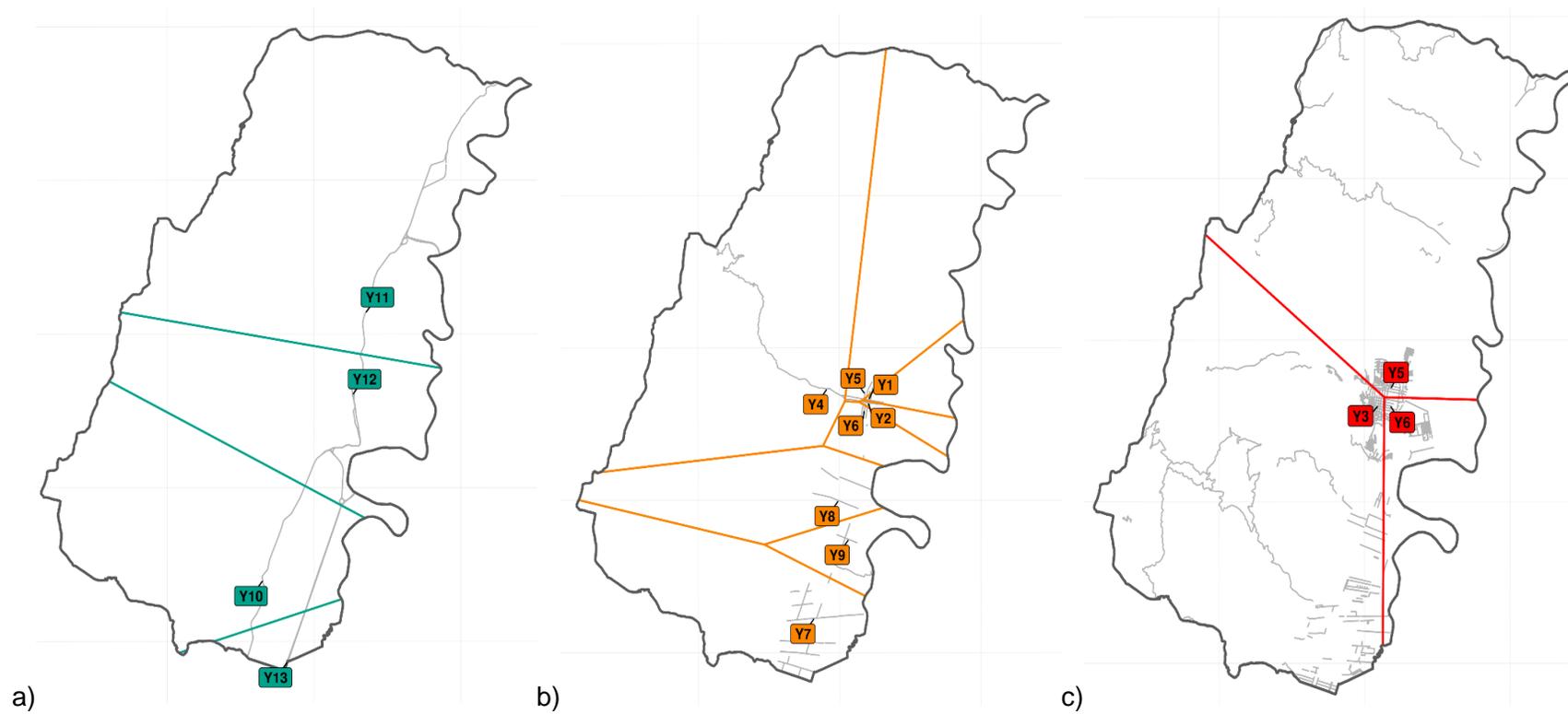
THIESEN VIAS SECUNDARIAS



THIESEN VIAS TERCIARIAS

Fuente: Elaboración propia.

Figura B-3. Polígonos de Thiessen por categoría vial a) vías primarias, b) vías secundarias, c) vías terciarias de Palmira.



Fuente: Elaboración propia

C. Anexo: Reglas para la asignación del estándar Euro, segmento y categoría al parque automotor.

Tabla C-1: Relación Peso bruto vehicular de los vehículos pesados según el cilindraje.

PBV	CC min	CC max
<=7500	2200	4900
<=12000	4901	6500
<=14000	6501	7500
<=20000	7501	8500
<=28000	8501	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla C-2: Reglas para la asignación del segmento y categoría al parque automotor.

CATEGORY	SEGMENT	COPERT	COLOMBIA RUNT
Passenger Cars	Mini	<=1200 cm ³	Car, Pickup, Camper. Public car such as Taxis
	Small	<=1600 cm ³	
	Medium	<= 2000 cm ³	
	Large-SUV-Executive	>2000 cm ³	
Light Commercial Vehicles	N1-III	1760 kg - 3500 kg	Trucks
Heavy Duty Vehicles	Rigid <=7,5 t	N2 - Rigid (3.5 - 7.5 t)	Trucks and dump trucks
	Rigid 7,5 - 12 t	N2 - Rigid (7.5 - 12 t)	Trucks and dump trucks
	Rigid 12 - 14 t	N3 - Rigid (12 - 14 t)	Trucks and dump trucks
	Rigid 14 - 20 t	N3 - Rigid (14 - 20 t)	Trucks and dump trucks
	Rigid 20 - 26 t	N3 - Rigid (20 - 26 t)	Trucks and dump trucks
	Rigid 26 - 28 t	N3 - Rigid (26 - 28 t)	Trucks and dump trucks

	Articulated 28 - 34 t	N3 - Articulated (28 - 34 t)	Road tractor
	Articulated 50 - 60 t	N3 - Articulated (> 50 t)	Road tractor
L-Category	Mopeds 2-stroke <50 cm ³	L1 y L2 (<= 50 cm ³ & 2T)	Motorcycle
	Mopeds 4-stroke <50 cm ³	L1 y L2 (<= 50 cm ³ & 4T)	Motorcycle
	Motorcycles 2-stroke >50 cm ³	L3, L4 y L5 (>50 cm ³ & 2T)	Motorcycle
	Motorcycles 4-stroke <250 cm ³	L3, L4 y L5 (50 cm ³ - 250 cm ³ & 4T)	Motorcycle
	Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm ³	L3, L4 y L5 (250 cm ³ - 750 cm ³ & 4T)	Motorcycle
	Motorcycles 4-stroke >750 cm ³	L3, L4 y L5 (> 750 cm ³ & 4T)	Motorcycle
	Quad & ATVs		Quads
Buses	Urban Buses Midi <=15 t	M2 Y M3 (<- 15t)	Bus and minibuses
	Urban Buses Standard 15 - 18 t	M2 Y M3 (15t - 18t)	Bus
	Urban Buses Articulated >18 t	M2 Y M3 (>18t)	Bus

Adaptado de: Ntziachristos & Samaras, 2021

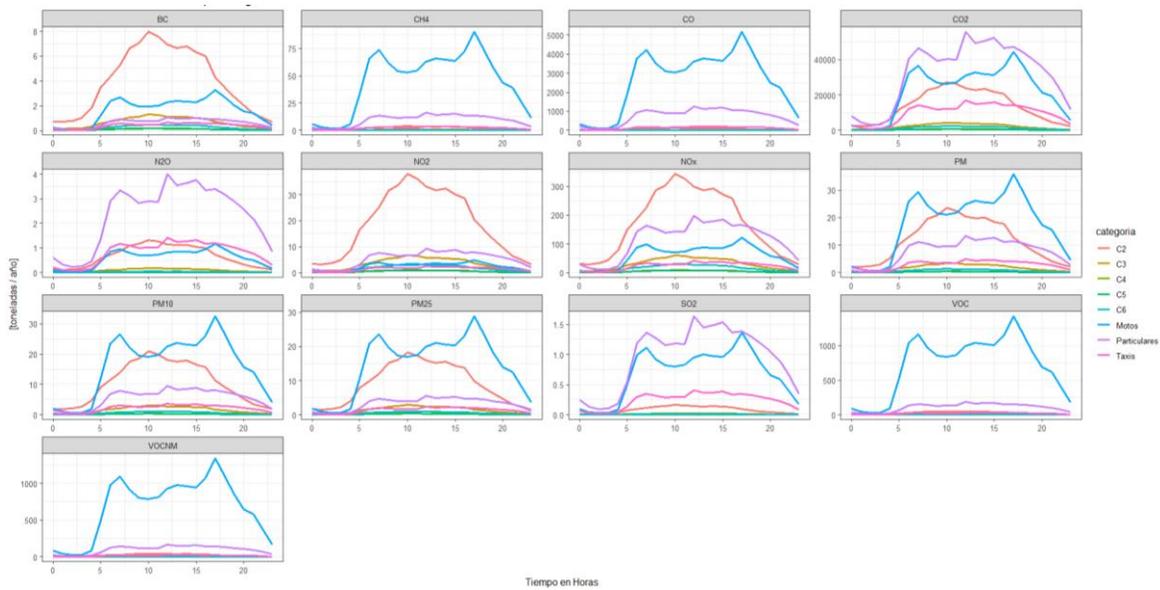
Tabla C3: Calendario de introducción de tecnologías vehiculares a Colombia.

Category	Fuel	Before	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
		PC	Diesel	CONVENTIONAL															EURO 2			EURO 4											
Gasoline	ECE 15/04					EURO 1										EURO 3			EURO 4														
CNG - GLP	EURO 4																																
Gasoline - Electric	EURO 6																																
HDV	Diesel	CONVENTIONAL										EURO 2			EURO 4			EURO 5															
	Gasoline	CONVENTIONAL			EURO 1										EURO 3																		
	CNG Diesel	CONVENTIONAL					EURO 3			EURO 4		EURO 5			EURO 6																		
Buses	Diesel	CONVENTIONAL										EURO 2			EURO 4			EURO 5															
	Gasoline	CONVENTIONAL				EURO 1										EURO 2	EURO 3																
	CNG - private	CONVENTIONAL										EURO 2			EURO 4																		
	CNG - public	CONVENTIONAL										EURO 4																					
Motorcycle	Gasoline	CONVENTIONAL															EURO 2																

Adaptado de: Trejos, 2021

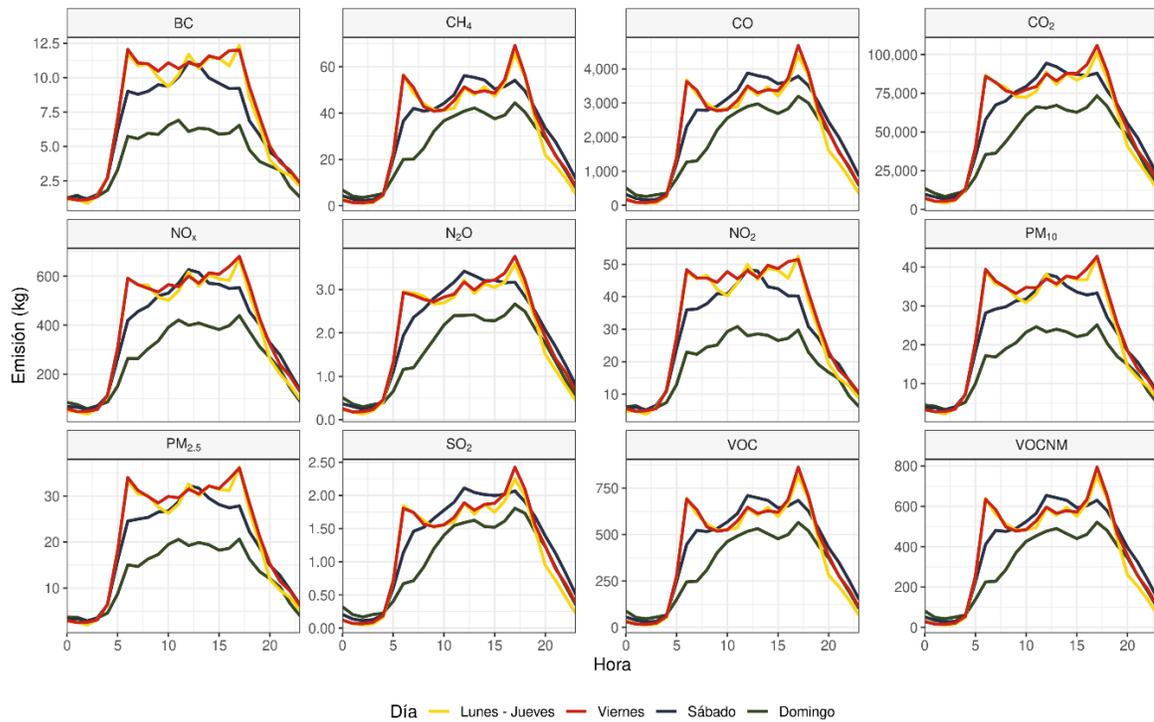
D. Anexo: Perfiles horarios de emisiones para cada contaminante, en Cali, Palmira y Yumbo

Figura D-1: Perfil horario de emisiones en vías locales de Cali, por contaminante

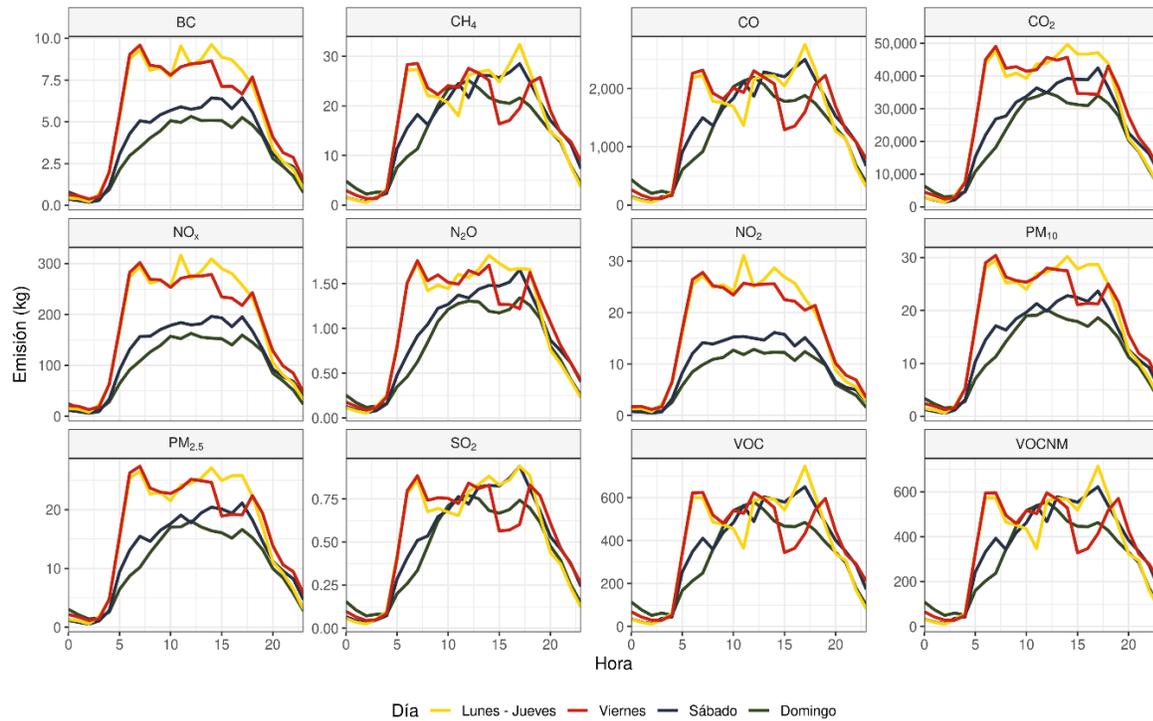


Fuente: UNAL & DAGMA, 2023

Figura D-2: Perfil horario de emisiones en vías locales de Palmira, por contaminante



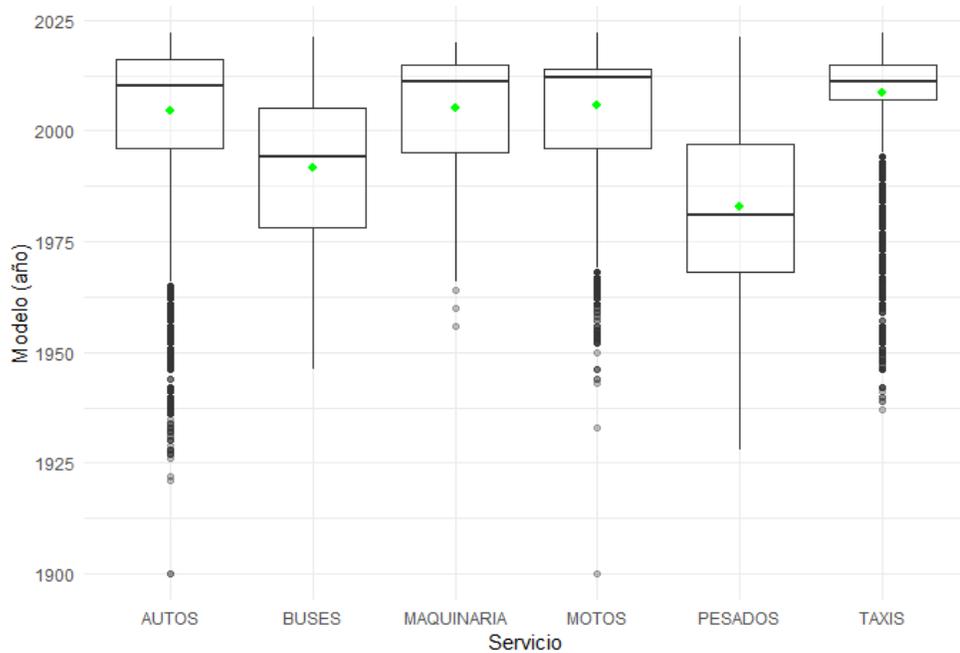
Fuente: UNAL & CVC, 2023

Figura D-3: Perfil horario de emisiones en vías locales de Yumbo, por contaminante

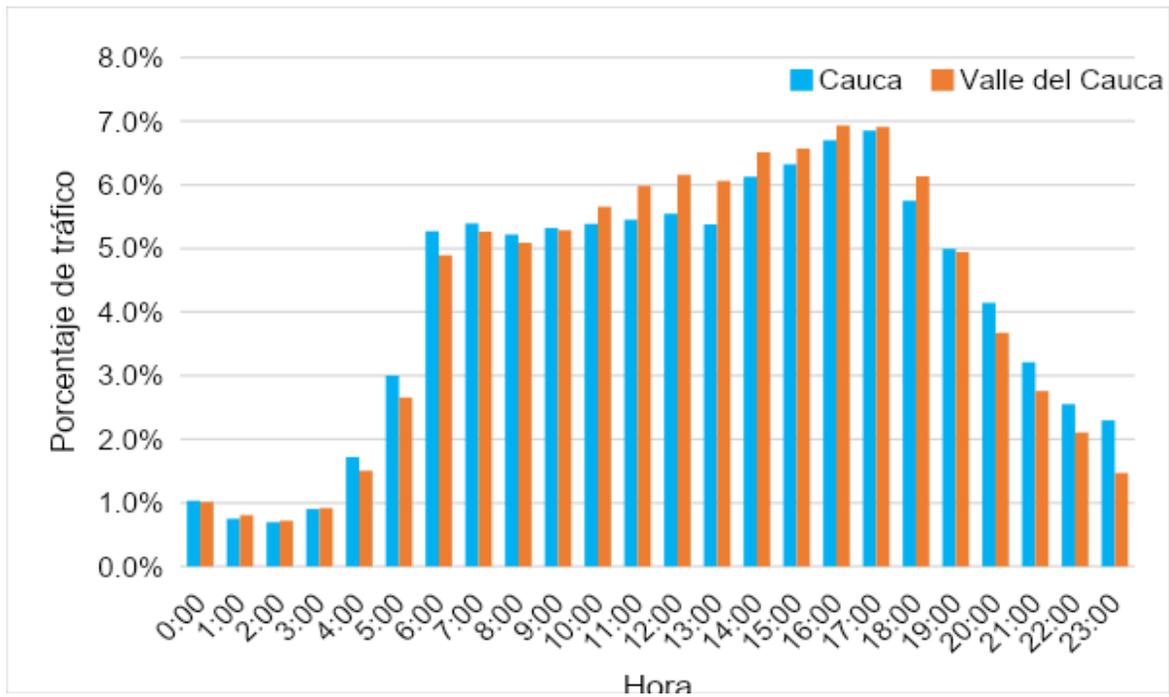
Fuente: UNAL & CVC, 2023

E. Anexo: Edad del parque automotor del área de estudio y perfil de flujo relativo para vías nacionales.

Figura E-1: Boxplot edades del parque automotor por categoría vehicular.



Fuente: Elaboración propia.

Figura E-2: Perfil de flujo relativo para vías nacionales según departamento.

Fuente: Elaboración propia.

F. Anexo: Hectáreas sembradas por cultivo en cada municipio.

Tabla F-1: Hectáreas sembradas por cultivo en cada municipio del Valle del Cauca.

Cultivo	Cali	Buga	Candelaria	El Cerrito	Florida	Ginebra	Guacarí	Jamundí	Palmira	Pradera	Riofrío	San Pedro	Tuluá	Vijes	Yotoco	Yumbo
Cacao	0.0	5.0	3.7	0.0	16.0	0.0	5.0	263.5	7.5	2.0	103.0	0.0	37.0	0.0	2.0	1.0
Café	666.5	515.0	0.0	191.0	1528.0	876.0	309.8	1518.0	423.0	536.4	2932.6	508.9	4110.0	640.0	901.2	303.1
Caña de azúcar	24650.0	7786.0	24700.0	16965.0	10110.0	3300.0	13197.0	9207.0	33900.0	10525.0	2865.0	4920.0	8130.0	190.0	3124.0	2298.0
Caña panelera	0.0	21.0	1272.0	0.0	0.0	39.0	57.0	53.0	178.0	0.0	121.0	530.0	35.0	0.0	34.0	8.4
Plátano	33.0	22.0	7.5	0.0	270.0	54.0	158.0	56.0	118.0	10.0	3573.0	0.0	475.0	167.0	1262.0	11.7
Arracacha	0.0	5.0	0.0	0.0	2.0	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	9.0	6.0	1.5	6.9
Cebolla Bulbo	0.0	0.0	0.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	44.0	0.0	0.0	0.0	10.0	14.0	0.0	4.0
Papa	0.0	18.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	200.0	0.0	0.0	0.0
Yuca	38.0	3.0	0.0	0.0	27.0	0.0	3.7	3.0	17.0	0.0	10.0	32.0	9.0	26.0	8.0	9.5
Zanahoria	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	115.0	0.0	0.0	0.0
Arroz	0.0	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3150.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Frijol	27.0	17.0	0.0	46.0	85.0	5.0	48.0	1.0	92.2	27.0	28.0	58.0	75.0	33.0	16.0	21.9
Maíz Tecnificado	0.0	1200.0	102.0	495.0	86.0	50.0	1053.0	0.0	400.0	0.0	27.0	140.0	850.0	88.0	350.0	14.0
Maíz Trad	72.0	22.0	0.0	0.0	85.0	6.0	50.0	8.0	200.0	65.0	18.0	85.0	140.0	65.0	30.0	29.1

Cultivo	Cali	Buga	Candelaria	El Cerrito	Florida	Ginebra	Guacarí	Jamundí	Palmira	Pradera	Riofrío	San Pedro	Tuluá	Vijes	Yotoco	Yumbo
Sorgo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Soya	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Aguate	5.0	4.0	0.0	44.0	10.0	0.0	56.0	5.5	152.0	4.0	61.0	27.0	37.0	33.0	42.0	23.0
Banano	0.0	110.0	0.0	18.0	137.0	165.0	246.0	5.5	107.0	30.0	549.0	71.0	535.0	37.0	0.0	14.2
Cítricos	28.0	9.0	28.0	27.0	111.0	0.0	71.0	440.0	75.0	25.0	37.0	110.0	51.0	46.0	39.6	67.0
Granadilla	0.0	9.0	0.0	0.0	20.0	14.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	26.0	13.0	0.0	0.0	2.5
Guanábana	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	27.0	4.0	0.0	30.0	5.0	23.0	7.0	0.0	0.0	6.0
Lulo	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	45.0	6.0	27.5	4.0	63.0	26.5	107.0	0.0	4.0	0.0
Mango	0.0	1.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	23.0	0.0	0.0	9.0	8.0	5.0	15.0	20.0	35.0
Maracuyá	0.0	2.0	13.3	4.0	7.0	5.0	87.0	15.5	13.8	0.0	10.0	45.0	10.0	35.0	10.0	2.1
Mora	10.0	11.0	0.0	4.0	52.0	92.0	42.0	4.5	3.1	25.0	10.0	31.0	104.5	0.0	0.0	1.8
Papaya	0.0	2.0	0.0	0.0	11.0	8.0	461.0	3.0	0.0	0.0	0.0	50.0	30.0	42.0	11.0	22.6
Piña	0.0	120.0	0.0	0.0	92.0	0.0	0.0	34.0	0.0	60.0	12.0	0.0	0.0	370.0	31.0	10.6
Pitaya	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.0
Tomate árbol	6.0	5.0	0.0	5.5	6.0	0.0	40.0	5.0	2.4	5.0	0.0	28.5	41.0	0.0	0.0	0.0
Vid	0.0	2.0	0.0	283.0	0.0	126.0	220.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	6.0	0.0	20.5	166.0
Arveja	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cebolla Rama	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cilantro	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Guayaba	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pepino	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pimentón	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tomate	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Secretaría de agricultura del Valle del Cauca, 2021.

Tabla F-2: Hectáreas sembradas por cultivo en cada municipio del Cauca.

Cultivo	Caloto	Padilla	Sder de quilichao	Guachené	Corinto	Miranda	Villa rica	Puerto Tejada	Buenos aires
Cacao	120.0	74.0	0.0	155.0	0.0	95.0	71.0	48.0	0.0
Café	1972.6	0.0	3637.7	0.0	1959.8	627.7	0.0	0.0	1825.5
Caña de azúcar	3984.2	5766.0	6377.7	4331.3	5390.1	6489.9	4949.3	8125.6	863.7
Caña panelera	0.0	0.0	327.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	657.0
Plátano	39.0	63.0	387.0	0.0	150.0	150.0	33.0	60.0	129.0
Arracacha	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cebolla Bulbo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Papa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Yuca	50.0	10.0	530.0	0.0	17.0	10.0	1.0	1.0	1567.0
Zanahoria	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arroz	1318.1	58.4	2286.3	301.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Frijol	30.0	0.0	52.0	0.0	5.0	21.0	3.0	0.0	30.0
Maíz Tecnificado	55.0	19.0	67.0	0.0	12.0	83.0	27.0	10.0	10.0
Maíz Tradicional	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sorgo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Soya	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Aguacate	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Banano	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.0	3.0	0.0	0.0
Cítricos	79.0	33.0	0.0	0.0	13.0	28.0	43.0	53.0	151.0
Granadilla	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Guanábana	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lulo	44.0	0.0	0.0	0.0	27.0	4.0	0.0	0.0	0.0

Cultivo	Caloto	Padilla	Sder de quilichao	Guachené	Corinto	Miranda	Villa rica	Puerto Tejada	Buenos aires
Mango	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0
Maracuyá	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mora	0.0	0.0	0.0	0.0	38.0	3.0	0.0	0.0	0.0
Papaya	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Piña	321.0	0.0	953.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pitaya	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tomate árbol	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0
Vid	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arveja	8.0	0.0	0.0	0.0	4.0	10.0	0.0	0.0	0.0
Cebolla Rama	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	0.0	0.0	0.0
Cilantro	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	1.0
Guayaba	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0
Pepino	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0
Pimentón	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0
Tomate	0.0	0.0	0.0	3.0	11.0	15.0	2.0	0.0	3.0

Fuente: Agronet, 2021.

G. Anexo: Emisiones desagregadas por municipio y fuente estimada.

Tabla G-1: Emisiones anuales por contaminante y fuente de cada municipio del área de estudio en t año⁻¹.

	Fuente	CO ₂	BC	CH ₄	CO	N ₂ O	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	VOC	VOCNM	PM ₁₀ Res
Cali	Total	2,129,645	228	1,459	86,134	115	977	11,663	827	991	49	21,912	20,418	98
	V. Nacionales	36,613	4	15	1,156	1	20	243	12	14	1	206	190	2
	Otros cultivos	861	0	0	3	0	1	9	1	1	0	2	2	9
	V. locales	2,087,924	222	1,439	84,950	114	951	11,368	812	973	48	21,696	20,218	62
	Cañicultura	4,247	1	4	25	0	5	43	3	3	0	9	9	26
Palmira	Total	488,686	65	272	16,749	16	290	3,353	204	180	10	3,129	2,880	1,311
	V. Nacionales	22,545	3	11	705	1	14	161	8	10	0	133	123	51
	Otros cultivos	5,885	2	1	23	0	7	62	4	4	0	11	10	60
	V. locales	429,292	50	234	15,841	14	233	2,814	173	143	10	2,919	2,684	1,013
	Cañicultura	30,964	10	27	180	1	36	317	19	22	0	67	63	187
Yumbo	Total	216,986	39	126	10,100	8	119	1,293	127	114	4	2,675	2,553	843
	V. Nacionales	43,250	5	14	1,320	1	9	187	11	12	1	189	151	139
	Otros cultivos	474	0	0	2	0	1	5	0	0	0	1	1	4
	V. locales	171,163	33	110	8,766	7	107	1,080	114	100	3	2,481	2,397	687

	Fuente	CO ₂	BC	CH ₄	CO	N ₂ O	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	VOC	VOCNM	PM ₁₀ Res
	Cañicultura	2,099	1	2	12	0	2	21	1	2	0	5	4	13
Tuluá	Total	170,664	32	78	4,660	6	128	1,308	77	91	3	941	869	302
	V. Nacionales	72,119	14	13	841	2	74	714	33	37	1	176	163	24
	Otros cultivos	2,603	1	0	10	0	3	27	2	2	0	5	5	24
	V. locales	88,516	14	58	3,765	3	42	491	38	46	2	744	687	209
	Cañicultura	7,426	2	6	43	0	9	76	5	5	0	16	15	45
Buga	Total	162,519	30	64	3,860	6	130	1,324	73	84	2	777	717	230
	V. Nacionales	95,853	18	21	1,363	3	92	910	42	48	1	274	253	32
	Otros cultivos	2,024	1	0	8	0	2	21	1	1	0	4	4	19
	V. locales	57,529	9	38	2,447	2	28	319	25	30	1	484	446	136
	Cañicultura	7,112	2	6	41	0	8	73	4	5	0	15	14	43
Candelaria	Total	141,645	29	57	2,633	5	126	1,244	67	77	2	548	508	267
	V. Nacionales	89,475	17	21	1,395	3	83	829	39	44	1	277	256	30
	Otros cultivos	3,955	1	0	15	0	5	41	3	3	0	7	7	40
	V. locales	25,655	4	17	1,091	1	12	142	11	13	1	216	199	61
	Cañicultura	22,561	7	19	131	1	26	231	14	16	0	48	46	136
Yotoco	Total	89,715	18	15	730	3	99	935	41	46	1	161	148	57
	V. Nacionales	84,668	17	11	660	2	94	888	38	43	1	143	131	28
	Otros cultivos	1,034	0	0	4	0	1	11	1	1	0	2	2	8
	V. locales	1,159	0	1	49	0	1	6	0	1	0	10	9	3
	Cañicultura	2,853	1	2	17	0	3	29	2	2	0	6	6	17
Jamundí	Total	78,323	15	45	2,551	3	50	535	36	43	1	515	476	205
	V. Nacionales	17,147	3	6	390	1	13	139	7	8	0	76	70	6
	Otros cultivos	3,402	1	0	13	0	4	36	2	3	0	6	6	32
	V. locales	49,364	8	32	2,100	2	24	274	21	26	1	415	383	117
	Cañicultura	8,410	3	7	49	0	10	86	5	6	0	18	17	51
E - d	Total	83,740	17	36	1,593	3	72	723	39	45	1	330	305	166

	Fuente	CO ₂	BC	CH ₄	CO	N ₂ O	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	VOC	VOCNM	PM ₁₀ Res
	V. Nacionales	55,230	10	16	1,066	2	46	478	23	27	1	207	191	18
	Otros cultivos	3,004	1	0	12	0	4	31	2	2	0	6	5	31
	V. locales	10,011	2	7	426	0	5	56	4	5	0	84	78	24
	Cañicultura	15,496	5	13	90	1	18	159	10	11	0	33	31	93
San pedro	Total	61,854	12	20	1,084	2	57	557	29	33	1	224	207	79
	V. Nacionales	45,119	9	9	581	1	45	438	20	23	1	119	110	15
	Otros cultivos	1,132	0	0	4	0	1	12	1	1	0	2	2	11
	V. locales	11,110	2	7	473	0	5	62	5	6	0	93	86	26
	Cañicultura	4,494	1	4	26	0	5	46	3	3	0	10	9	27
Puerto tejada	Total	60,742	11	29	1,571	2	46	470	27	32	1	316	292	120
	V. Nacionales	29,482	5	8	565	1	25	256	12	14	0	108	100	10
	Otros cultivos	1,304	0	0	5	0	2	14	1	1	0	2	2	12
	V. locales	22,534	4	15	959	1	11	125	10	12	0	189	175	53
	Cañicultura	7,422	2	6	43	0	9	76	5	5	0	16	15	45
Florida	Total	53,389	11	33	1,699	2	35	369	25	30	1	348	322	159
	V. Nacionales	7,947	2	3	183	0	6	63	4	4	0	37	34	3
	Otros cultivos	1,998	1	0	8	0	2	21	1	1	0	4	4	20
	V. locales	34,211	6	22	1,455	1	16	190	15	18	1	288	265	81
	Cañicultura	9,234	3	8	54	0	11	95	6	7	0	20	19	56
Pradera	Total	44,213	9	27	1,253	2	32	325	22	25	1	261	241	132
	V. Nacionales	10,593	2	4	245	0	8	84	5	6	0	50	46	4
	Otros cultivos	1,784	1	0	7	0	2	19	1	1	0	3	3	18
	V. locales	22,222	4	14	945	1	11	123	10	12	0	187	172	52
	Cañicultura	9,613	3	8	56	0	11	98	6	7	0	21	19	58
Guacarí	Total	45,169	10	21	760	2	42	404	23	26	1	166	154	123
	V. Nacionales	24,350	5	7	434	1	21	218	11	12	0	87	80	8
	Otros cultivos	3,033	1	0	12	0	4	32	2	2	0	6	5	28
	V. locales	5,732	1	4	244	0	3	32	2	3	0	48	44	14

	Fuente	CO ₂	BC	CH ₄	CO	N ₂ O	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	VOC	VOCNM	PM ₁₀ Res
Corinto	Cañicultura	12,054	4	10	70	0	14	123	8	9	0	26	24	73
	Total	30,652	6	18	900	1	21	221	15	17	1	185	171	79
	V. Nacionales	9,439	2	3	217	0	7	75	4	5	0	44	41	3
	Otros cultivos	997	0	0	4	0	1	10	1	1	0	2	2	10
	V. locales	15,293	2	10	650	1	7	85	7	8	0	129	119	36
Ginebra	Cañicultura	4,923	2	4	29	0	6	50	3	4	0	11	10	30
	Total	34,426	6	20	1,129	1	22	236	16	19	1	227	210	81
	V. Nacionales	8,007	2	2	141	0	7	72	4	4	0	28	26	3
	Otros cultivos	658	0	0	3	0	1	7	0	0	0	1	1	7
	V. locales	22,747	4	15	968	1	11	126	10	12	0	191	176	54
Vijes	Cañicultura	3,014	1	3	18	0	4	31	2	2	0	6	6	18
	Total	23,760	5	8	510	1	21	203	11	13	0	105	97	31
	V. Nacionales	13,929	3	2	115	0	15	146	7	7	0	26	24	5
	Otros cultivos	425	0	0	2	0	1	4	0	0	0	1	1	3
	V. locales	9,232	1	6	393	0	4	51	4	5	0	78	72	22
Padilla	Cañicultura	174	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1
	Total	28,067	5	19	963	1	18	185	13	16	1	197	182	92
	V. Nacionales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Otros cultivos	979	0	0	4	0	1	10	1	1	0	2	2	9
	V. locales	21,821	4	14	928	1	10	121	9	11	0	183	169	52
Caloto	Cañicultura	5,267	2	5	31	0	6	54	3	4	0	11	11	32
	Total	27,538	6	14	734	1	20	208	13	16	0	153	141	63
	V. Nacionales	12,215	2	4	280	0	9	97	6	7	0	57	53	4
	Otros cultivos	1,676	1	0	6	0	2	18	1	1	0	3	3	13
	V. locales	10,008	2	7	426	0	5	56	4	5	0	84	78	24
V - - Total	3,639	1	3	21	0	4	37	2	3	0	8	7	22	
V - - Total	26,934	5	12	573	1	22	222	12	14	0	115	107	46	

	Fuente	CO ₂	BC	CH ₄	CO	N ₂ O	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	VOC	VOCNM	PM ₁₀ Res
	V. Nacionales	19,516	3	7	455	1	14	156	8	9	0	87	80	7
	Otros cultivos	822	0	0	3	0	1	9	1	1	0	2	1	7
	V. locales	2,076	0	1	88	0	1	12	1	1	0	17	16	5
	Cañicultura	4,521	1	4	26	0	5	46	3	3	0	10	9	27
Miranda	Total	23,179	5	15	650	1	17	171	12	14	0	136	126	77
	V. Nacionales	3,646	1	1	84	0	3	29	2	2	0	17	16	1
	Otros cultivos	1,213	0	0	5	0	1	13	1	1	0	2	2	11
	V. locales	12,393	2	8	527	0	6	69	5	6	0	104	96	29
	Cañicultura	5,928	2	5	34	0	7	61	4	4	0	13	12	36
Buenos aires	Total	16,238	3	10	634	1	9	97	7	9	0	127	117	48
	V. Nacionales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Otros cultivos	718	0	0	3	0	1	8	0	1	0	1	1	9
	V. locales	14,731	2	10	627	1	7	82	6	8	0	124	114	35
	Cañicultura	789	0	1	5	0	1	8	0	1	0	2	2	5
Santander de quilichao	Total	17,659	4	8	253	1	17	162	9	11	0	59	55	67
	V. Nacionales	7,155	1	2	137	0	6	62	3	4	0	27	25	2
	Otros cultivos	3,023	1	0	12	0	4	32	2	2	0	6	5	25
	V. locales	1,656	0	1	70	0	1	9	1	1	0	14	13	4
	Cañicultura	5,825	2	5	34	0	7	60	4	4	0	13	12	35
Riofrío	Total	26,127	5	13	735	1	19	195	12	14	0	149	137	61
	V. Nacionales	7,948	1	2	116	0	8	75	3	4	0	22	20	3
	Otros cultivos	1,494	0	0	6	0	2	16	1	1	0	3	3	10
	V. locales	14,068	2	9	598	1	7	78	6	7	0	118	109	33
	Cañicultura	2,617	1	2	15	0	3	27	2	2	0	6	5	16
Guachen e	Total	7,424	2	5	137	0	7	64	4	5	0	32	30	37
	V. Nacionales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Otros cultivos	873	0	0	3	0	1	9	1	1	0	2	2	7
	V. locales	2,594	0	2	110	0	1	14	1	1	0	22	20	6

	Fuente	CO₂	BC	CH₄	CO	N₂O	CO₂	NO_x	PM_{2.5}	PM₁₀	SO₂	VOC	VOCNM	PM₁₀ Res
	Cañicultura	3,956	1	3	23	0	5	40	2	3	0	9	8	24
	Residual V. locales	3,854	1	3	164	0	2	21	2	2	0	32	30	9
	Área de estudio	4,093,147	579	2,428	142,758	182	2,396	26,490	1,743	1,965	82	33,821	31,493	4,781

Fuente: Elaboración propia.

Bibliografía

- ACELA. (n.d.). Combustibles y Emisiones. Retrieved May 29, 2023, from <https://www.aceia.org/es/fuel-basics/fuels-and-emissions-101/>
- Agronet. (2021). Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo. <https://agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Alcaldia de Cali. (n.d.). Geovisor IDESC. Retrieved October 26, 2022, from <https://idesc.cali.gov.co/geovisor.php>
- Álvarez Aldegunde, J. A., Álvarez Narváez, V., Quiñones Bolaños, E., Saba, M., & Herrera Atencio, C. (2019). Estimation of the vehicle emission factor in different areas of Cartagena de Indias. *Revista de Ciencias*, 23(2). <https://doi.org/10.25100/RC.V23I2.8949>
- Amadoz, S. (2022, March 17). ¿Cuántos coches hay en el mundo en circulación? <https://motor.elpais.com/actualidad/cuantos-coches-hay-en-el-mundo-en-circulacion/>
- Amato, F., Pandolfi, M., Escrig, A., Querol, X., Alastuey, A., Pey, J., Perez, N., & Hopke, P. K. (2009). Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF2. *Atmospheric Environment*, 43(17), 2770–2780. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2009.02.039>
- AMVA, & UPB. (2019). Actualización inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá - Año 2018.
- Anenberg, S. C., Miller, J., Minjares, R., Du, L., Henze, D. K., Lacey, F., Malley, C. S., Emberson, L., Franco, V., Klimont, Z., & Heyes, C. (2017). Impacts and mitigation of excess diesel-related NO_x emissions in 11 major vehicle markets. *Nature*, 545(7655), 467–471. <https://doi.org/10.1038/nature22086>
- Anenberg, S., Miller, J., Henze, D., & Minjares, R. (2019). A global snapshot of the air

pollution-related health impacts of transportation sector emissions in 2010 and 2015. www.theicct.org

Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A. J., Ezzati, M., & Pope, C. A. (2018). Ambient PM_{2.5} Reduces Global and Regional Life Expectancy. *Environmental Science and Technology Letters*, 5(9), 546–551. https://doi.org/10.1021/ACS.ESTLETT.8B00360/SUPPL_FILE/EZ8B00360_SI_002.XLSX

Arroyave, E. A. (2022). Estimación del inventario de emisiones atmosféricas a partir de fuentes móviles en el municipio de Caldas, Antioquia. [Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/50386>

Asocaña. (2020). Somos azúcar y mucho más - Informe Anual 2019 - 2020.

ASOCAÑA. (2022). Un dulce sabor que se transforma, informe anual 2021 - 2022. <https://asocana.org/documentos/672022-B663EF18-00FF00,000A000,878787,C3C3C3,0F0F0F,B4B4B4,FF00FF,FFFFFF,2D2D2D,A3C4B5.pdf>

Ban-Weiss, G. A., McLaughlin, J. P., Harley, R. A., Lunden, M. M., Kirchstetter, T. W., Kean, A. J., Strawa, A. W., Stevenson, E. D., & Kendall, G. R. (2008). Long-term changes in emissions of nitrogen oxides and particulate matter from on-road gasoline and diesel vehicles. *Atmospheric Environment*, 42(2), 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.049>

Basshuysen, R., & Schafer, F. (2016). *Internal Combustion Engine Handbook*, 2nd English Edition (2nd ed.). SAE International. <https://www.sae.org/publications/books/content/r-434/>

Bhandarkar, S. (2013). Vehicular Pollution, Their Effect on Human Health and Mitigation Measures. *Vehicle Engineering*, 1(2). www.seipub.org/ve

Cal y Mayor. (2019). Estructuración integral de un(os) modelo(s) de servicio complementario de transporte intermodal de pasajeros intramunicipal y supramunicipal para Santiago de Cali.

Cardozo-Valencia, A., Rueda-Saa, G., Hernandez, A. J., Restrepo-Lopez, G., & Jimenez, R. (2019). Distribución espaciotemporal y estimación de emisiones por quema

- precosecha de caña de azúcar en el Valle del Cauca. Conference Proceedings - Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Publica, CASAP 2019, August. <https://doi.org/10.1109/CASAP.2019.8916696>
- Castaño Lopez, J., & Cardona Vargas, L. A. (2022). Identificación del impacto territorial que puede tener la incorporación del TPCT remanente en el BRT para la ciudad de Cali, desde una perspectiva de accesibilidad en condiciones de equidad [Universidad del Valle]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/23830/3740C346.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cifuentes, F., González, C. M., Trejos, E. M., López, L. D., Sandoval, F. J., Cuellar, O. A., Mangones, S. C., Rojas, N. Y., & Aristizábal, B. H. (2021). Comparison of top-down and bottom-up road transport emissions through high-resolution air quality modeling in a city of complex orography. *Atmosphere*, 12(11), 1372. <https://doi.org/10.3390/ATMOS12111372/S1>
- CONAMA. (2009). Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes. http://www.declaracionemision.cl/docs/GUIA_CONAMA.pdf
- Conceição, M. A., Monteiro, M. M., Kasraian, D., van den Berg, P., Haustein, S., Alves, I., Azevedo, C. L., & Miranda, B. (2022). The effect of transport infrastructure, congestion and reliability on mental wellbeing: a systematic review of empirical studies. <https://doi.org/10.1080/01441647.2022.2100943>, 43(2), 264–302. <https://doi.org/10.1080/01441647.2022.2100943>
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, & Fulecol. (2018). Informe Final Actualización del Inventario de Emisiones de Santiago de Cali.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, & K2. (2018a). Emisiones a la atmósfera y los mapas de ruido de los municipios de inventario emisiones atmosféricas municipio Buga 2018.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, & K2. (2018b). Emisiones a la atmósfera y los mapas de ruido de los municipios de inventario emisiones atmosféricas municipio Cartago 2018.

- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, & K2. (2018c). Emisiones a la atmósfera y los mapas de ruido de los municipios de inventario emisiones atmosféricas municipio Jamundí 2018.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, & K2. (2018d). Emisiones a la atmósfera y los mapas de ruido de los municipios de inventario emisiones atmosféricas municipio Tuluá 2018.
- Crippa, M., Guizzardi, D., Banja, M., Solazzo, E., Muntean, M., Schaaf, E., Pagani, F., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Grassi, G., Rossi, S., Jacome Felix Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., & Vignati, E. (2022). CO₂ emissions of all world countries. <https://doi.org/10.2760/730164>
- Cuéllar-Álvarez, Y., Guevara-Luna, M. A., Belalcázar-Cerón, L. C., & Clappier, A. (2023). Well-to-Wheels emission inventory for the passenger vehicles of Bogotá, Colombia. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1–14. <https://doi.org/10.1007/S13762-023-04805-Z/TABLES/5>
- Cuellar Cepeda, O. A. (2016). Actualización y Calibración del Modelo de Asignación de Tráfico de Hora Pico para Vehículo Particular y Estudio del Modelo a través del Análisis de Resultados y Sensibilidad. Aplicación al Caso de Bogotá [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/59026/1026260223.2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Currie, J., & Walker, R. (2011). Traffic Congestion and Infant Health: Evidence from E-ZPass. *American Economic Journal: Applied Economics*, 3(1), 65–90. <https://doi.org/10.1257/APP.3.1.65>
- Cuza-Sorolla, A., Hernandez-Aguilar, M. L., & Barrera-Rojas, M. Á. (2021). Aplicación de polígonos de Thiessen para definición y análisis de zonas de influencia del sistema de salud en ciudades costeras del estado de Quintana Roo. *Revista de Estudios Territoriales*, 23, 49–71. https://www.redalyc.org/journal/401/40167332003/html/#redalyc_40167332003_ref1
- DANE. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda 2018.

- <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>
- Davis, N., Lents, J., Osses, M., Nikkila, N., & Barth, M. (2005). Development and Application of an International Vehicle Emissions Model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1(1939), 157–165. <https://doi.org/10.1177/0361198105193900118>
- Dey, S., Caulfield, B., & Ghosh, B. (2019). Modelling uncertainty of vehicular emissions inventory: A case study of Ireland. *Journal of Cleaner Production*, 213, 1115–1126. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.12.125>
- El Tiempo. (2018, June 13). Azucareros planean la construcción de más vías internas. <https://www.eltiempo.com/colombia/california/azucareros-planea-la-construccion-de-mas-vias-internas-229788>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2016). Description and History of the Mobile Highway Vehicle Emission Factor Model.
- EPA. (2020). Motor Vehicle Emission Simulator: MOVES3. Office of Transportation and Air Quality. US Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/moves/latest-version-motor-vehicle-emission-simulator-moves>
- European Environment Agency (EEA). (2019). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- Freire Lascano, M. Á. (2021). Análisis comparativo entre COPERT (Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport) e IVE (International Vehicle Emissions Model) sobre la producción de emisiones automovilísticas emitidas en el Ecuador durante el periodo 2012-2017 [E.T.S.I. Industriales (UPM)]. <https://oa.upm.es/69716/>
- Gago, G. (2017). Revisión del Estado Actual de los Motores de Combustión Interna Alternativos de Inyección Directa [Universidad de Sevilla]. https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/69947/TFG_Gonzalo_Gago_Gonzalo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- González, C. M., Gómez, C. D., & Aristizábal, B. H. (2020). Drove: An algorithm for

spatial and temporal disaggregation of on-road vehicle emission inventories. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(12), 2765–2779.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.04.0184>

Gordian, M. E., Stewart, A. W., & Morris, S. S. (2010). Evaporative Gasoline Emissions and Asthma Symptoms. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2010, Vol. 7, Pages 3051-3062, 7(8), 3051–3062.
<https://doi.org/10.3390/IJERPH7083051>

Grassi, Y. S., Brignole, N. B., & Díaz, M. F. (2021). Vehicular fleet characterisation and assessment of the on-road mobile source emission inventory of a Latin American intermediate city. *Science of The Total Environment*, 792, 148255.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.148255>

Hao, G., Zuo, L., Xiong, P., Chen, L., Liang, X., & Jing, C. (2022). Associations of PM_{2.5} and road traffic noise with mental health: Evidence from UK Biobank. *Environmental Research*, 207, 112221. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2021.112221>

Health Effects Institute. (2020). State of Global Air 2020. Special report. In Boston, MA:Health Effects Institute. Health Effects Institute.
<https://www.stateofglobalair.org/resources>

HEI, & IHME. (2019). STATE OF GLOBAL AIR/ 2019 A SPECIAL REPORT ON GLOBAL EXPOSURE TO AIR POLLUTION AND ITS DISEASE BURDEN.

Holland, S. P., Mansur, E. T., Muller, N. Z., & Yates, A. J. (2016). Damages and Expected Deaths Due to Excess NO_x Emissions from 2009 to 2015 Volkswagen Diesel Vehicles. *Environmental Science and Technology*, 50(3), 1111–1117.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05190>

IDEAM. (2021). Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos.
<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, & FMAM. (2016). Inventario nacional y departamental de Gases de Efecto Invernadero - Colombia.
www.cambioclimatico.gov.co;

INVIAS. (2022a). Geovisor INVIAS. TPD Valle Del Cauca.
<https://invias.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=bfe806d185ce42>

a8a79e65a76e10f907

INVIAS. (2022b). Sistema de Información Vial.
https://hermes2.invias.gov.co/Sistema_de_Informacion_Vial/

Jaime, D. F. (2022). Inventario de emisiones de fuentes móviles bajo metodología Bottom - Up para Bogotá, Colombia y análisis de escenarios de oferta para su reducción [Universidad Nacional de Colombia].
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/81579>

Jimenez, R., Ardila, A. V., Vargas-Burbano, A. C., Hernandez, A. J., & Leon-Velasquez, E. (2022). Biomass burning-agriculture coupling in the Orinoco savannas— Particulate matter emission scenarios. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 2429.
<https://doi.org/10.3389/FENV.S.2022.689844/BIBTEX>

Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151(2), 362–367. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2007.06.012>

Knittel, C. R., Miller, D. L., & Sanders, N. J. (2016). Caution, drivers! children present: traffic, pollution, and infant health. *THE REVIEW OF ECONOMICS AND STATISTICS*, 98(May), 350–366. <https://doi.org/10.1162/REST>

Ladino, A. F. (2019). REVISION BIBLIOGRAFICA: HCCI “EL FUTURO DE LOS MOTORES A COMBUSTIÓN INTERNA” [Fundación universitaria Los Libertadores].
https://repository.libertadores.edu.co/bitstream/handle/11371/2998/Ladino_Andres_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Liu, H., Man, H., Tschantz, M., Wu, Y., He, K., & Hao, J. (2015). VOC from Vehicular Evaporation Emissions: Status and Control Strategy. *Environmental Science & Technology*, 49(24), 14424–14431. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.5B04064>

Lund, M. T., Berntsen, T. K., Heyes, C., Klimont, Z., & Samset, B. H. (2014). Global and regional climate impacts of black carbon and co-emitted species from the on-road diesel sector. *Atmospheric Environment*, 98, 50–58.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.033>

Luo, Z., Wang, Y., Lv, Z., He, T., Zhao, J., Wang, Y., Gao, F., Zhang, Z., & Liu, H. (2022). Impacts of vehicle emission on air quality and human health in China. *Science of The Total Environment*, 813, 152655.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.152655>

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 Bogotá, Colombia. *Environmental Pollution*, 253, 552–559. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2019.07.008>

Mathissen, M., Scheer, V., Kirchner, U., Vogt, R., & Benter, T. (2012). Non-exhaust PM emission measurements of a light duty vehicle with a mobile trailer. *Atmospheric Environment*, 59, 232–242. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2012.05.020>

Méndez, Á. (2018). Estimación de las emisiones contaminantes por fuentes móviles a nivel local en el Distrito de Barranquilla [Universidad del Norte]. <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/9934/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Miller, M. R., & Newby, D. E. (2020). Air pollution and cardiovascular disease: car sick. *Cardiovascular Research*, 116(2), 279–294. <https://doi.org/10.1093/CVR/CVZ228>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2017). Guía para la elaboración de Inventarios de emisiones atmosféricas. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/gestion-del-aire/emisiones-contaminantes>

Ministerio de Transporte. (2020, July 21). Competitividad en el puerto de Buenaventura. <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/8761/competitividad-en-el-puerto-de-buenaventura/>

Mollenhauer, K., & Tschoeke, H. (2010). *Handbook of Diesel Engines*. Springer.

Nault, B. A., Jo, D. S., McDonald, B. C., Campuzano-Jost, P., Day, D. A., Hu, W., Schroder, J. C., Allan, J., Blake, D. R., Canagaratna, M. R., Coe, H., Coggon, M. M., Decarlo, P. F., Diskin, G. S., Dunmore, R., Flocke, F., Fried, A., Gilman, J. B., Gkatzelis, G., ... Jimenez, J. L. (2021). Secondary organic aerosols from anthropogenic volatile organic compounds contribute substantially to air pollution mortality. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(14), 11201–11224. <https://doi.org/10.5194/ACP-21-11201-2021>

Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2021). EMEP/EEA air pollutant emission inventory

- guidebook 2019. In European Environment Agency.
- OMS. (2021). Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- OpenStreetMap. (n.d.). Retrieved July 26, 2023, from <https://www.openstreetmap.org/#map=4/4.66/-59.50>
- Osorio Silva, J., & Rodríguez Gómez, L. F. (2022). Diferencias entre factores de emisión medidos y modelados para vehículos pesados en una megaciudad a gran altitud sobre el nivel del mar [Universidad de Antioquia]. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/32207/1/OsorioJhaniel_RodríguezLuisa_2022_ModelosEmisiónVehículos.pdf
- Özener, O., Yüsek, L., Ergenç, A. T., & Özkan, M. (2014). Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. *Fuel*, 115, 875–883. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2012.10.081>
- Parlamento Europeo. (2019, March 22). Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras (infografía) | Noticias | Parlamento Europeo. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>
- PNUMA. (2020, October 26). Nuevo informe de la ONU destaca los impactos ambientales de la exportación de vehículos usados al mundo en desarrollo. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/nuevo-informe-de-la-onu-destaca-los-impactos-ambientales>
- PNUMA. (2021). Air Pollution Note – Data you need to know. https://www.unep.org/interactive/air-pollution-note/?gclid=CjwKCAiAxvGfBhB-EiwAMPakqkQiAZxjnsd9ceG5O8FpzvfaV8p5_NJPnRzLuVkOg3_sOEYiXoFSbRoCebkQAvD_BwE
- Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT). (2021). Registro Nacional de automotores. <https://www.runt.gov.co/registros-runt/rna>
- Santana Rodriguez, L. M., & Vásquez Sanchez, J. (2002). Características geográficas del Departamento del Valle del Cauca. *Entorno Geográfico*, 1.

<https://doi.org/10.25100/eg.v0i1.3556>

SDA. (2018). Inventario de Emisiones de Bogotá, Contaminantes Atmosféricos.

Secretaria de ambiente agricultura y pesca. (2018). Cultivos permanentes en cada municipio. <https://www.valledelcauca.gov.co/documentos/10005/permanentes/>

SICOM. (2021). Boletín estadístico, Estaciones de servicio automotriz y fluvial. <https://www.sicom.gov.co/index.php/boletin-estadistico>

SMARN, INE, & WGA. (2009). Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas (Primera ed).

Song, C., Liu, Y., Sun, L., Zhang, Q., & Mao, H. (2020). Emissions of volatile organic compounds (VOCs) from gasoline- and liquified natural gas (LNG)-fueled vehicles in tunnel studies. *Atmospheric Environment*, 234. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2020.117626>

Soni, V., Singh, P., Shree, V., & Goel, V. (2018). Effects of VOCs on Human Health. *Energy, Environment, and Sustainability*, 119–142. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7185-0_8

Srivastava, D., Vu, T. V., Tong, S., Shi, Z., & Harrison, R. M. (2022). Formation of secondary organic aerosols from anthropogenic precursors in laboratory studies. *Npj Climate and Atmospheric Science* 2022 5:1, 5(1), 1–30. <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00238-6>

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 susceptible de resuspensión con información local (Manizales - año base 2017) (Issue July). Universidad Nacional de Colombia.

Universidad del Valle, & Alcaldía de Santiago de Cali. (2015). Análisis integral de la red de infraestructura vial para la movilidad motorizada en el municipio de Santiago de Cali.

Universidad Nacional de Colombia (UNAL), & Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2023a). Inventario de Emisiones a la Atmósfera - Fuentes Móviles Palmira 2021. <https://calidadaire.cvc.gov.co/inventario-de-emisiones-la->

atmósfera-fuentes-moviles-palmira-2021

Universidad Nacional de Colombia (UNAL), & Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2023b). Inventario de Emisiones a la Atmósfera - Fuentes Móviles Yumbo 2021. <https://calidadaire.cvc.gov.co/inventario-de-emisiones-la-atmosfera-fuentes-moviles-yumbo-2021>

Universidad Nacional de Colombia (UNAL), & Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2023c). Modelación de material particulado identificando la contribución de las fuentes – Énfasis en municipios de Palmira y Yumbo. <https://calidadaire.cvc.gov.co/modelacion-de-material-particulado-identificando-la-contribucion-de-las-fuentes-enfasis-en>

UPME. (2016). Factores de emisión de los combustibles colombianos FECOC. http://www.upme.gov.co/Calculadora_Emisiones/aplicacion/Informe_Final_FECOC_Correcciones_UPME_FunNatura.pdf

UPME, IREES, TEP, & CORPOEMA. (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. In Unidad de Planeación Minero-Energética (Vol. 1). https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance_energia_util/BEU-Transporte.pdf

US EPA. (2004). Technical Guidance on the Use of MOBILE6 . 2 for Emission Inventory Preparation (Issue August). <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P10003TJ.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>

US EPA. (2011). Section 13.2.1 Paved Roads. In Emission Factors & AP 42, Compilation of Air Pollution Emission Factors (Fifth Edit). <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-13-miscellaneous-0>

US EPA. (2016, August 6). Air Pollution Emissions Overview. <https://www3.epa.gov/airquality/emissns.html>

- Valencia, M. C. (2019). ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES POR FUENTES MÓVILES Y ESTIMACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS POR RESUSPENSIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE COMBUSTIBLE EN LA CIUDAD DE MANIZALES [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/76472/1053827658.2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vallamsundar, S., & Lin, J. (2011). Overview of U.S EPA New Generation Emission Model: MOVES. *ACEE International Journal on Transportation and Urban Development*, 1(1), 39–43. <https://doi.org/01.IJTUD.01.01.34>
- Vasques, T. V., & Hoinaski, L. (2021). Brazilian vehicular emission inventory software – BRAVES. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 100, 103041. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.103041>
- Viteri, R., Borge, R., Paredes, M., & Pérez, M. A. (2023). A high resolution vehicular emissions inventory for Ecuador using the IVE modelling system. *Chemosphere*, 315, 137634. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.137634>
- Zhou, X., Zhou, X., Wang, C., & Zhou, H. (2023). Environmental and human health impacts of volatile organic compounds: A perspective review. *Chemosphere*, 313, 137489. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.137489>