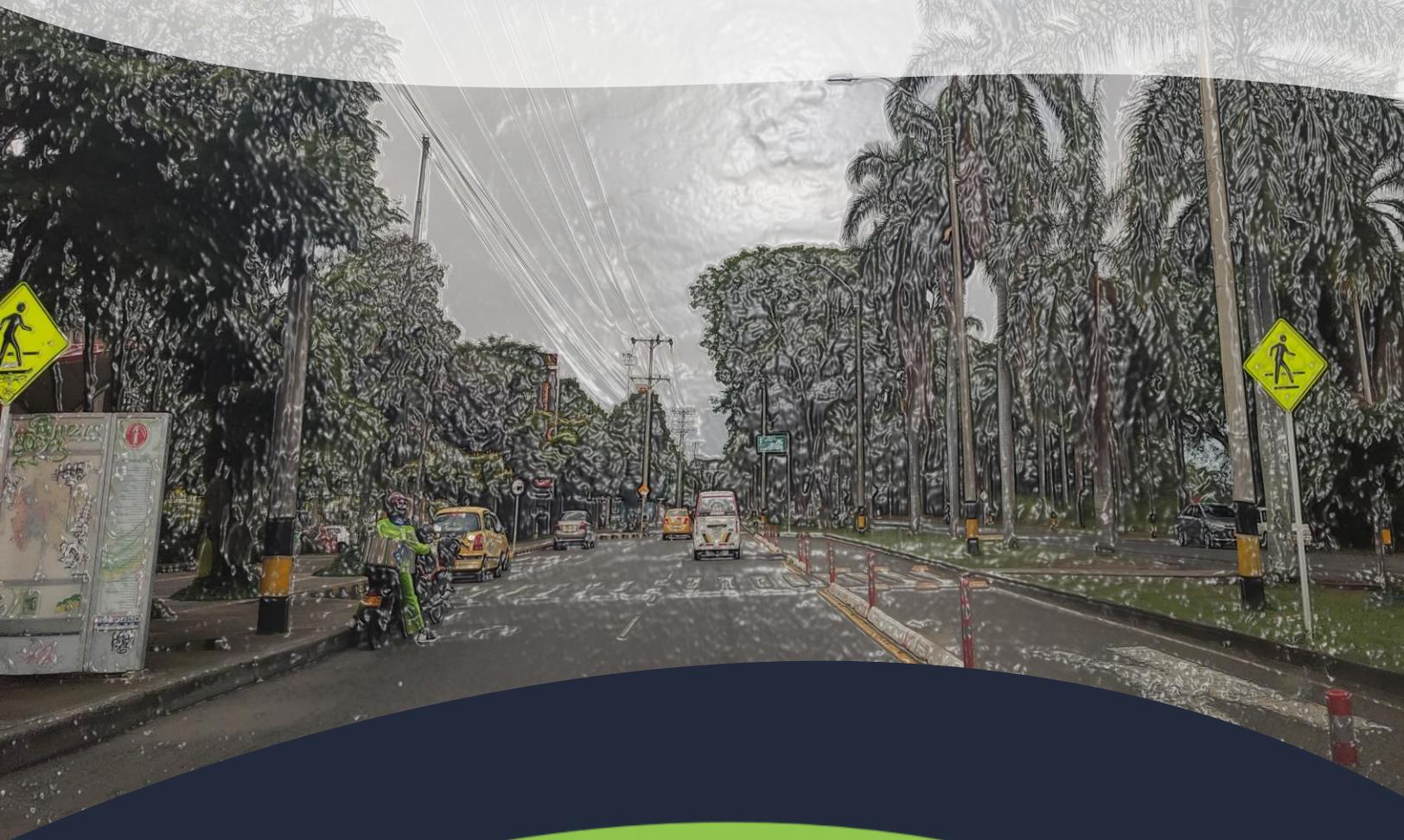




UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

INVENTARIO DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA POR FUENTES MÓVILES PARA EL MUNICIPIO DE PALMIRA - AÑO BASE 2021

CONVENIO INTERADMINISTRATIVO No. 036 DE 2021 CVC-UNAL



**INVENTARIO DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA POR
FUENTES MÓVILES PARA EL MUNICIPIO DE PALMIRA – AÑO
BASE 2021**

PROYECTO 4001 RESULTADO 1 ACTIVIDAD 16

**CONVENIO INTERADMINISTRATIVO CVC No. 036 DE 2021
CELEBRADO ENTRE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA
REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA -CVC- Y LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE PALMIRA-
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
DICIEMBRE DE 2021**

EQUIPO DE TRABAJO UNAL

Germán Rueda Saa
Director del Proyecto

Rodrigo Jiménez Pizarro
Director Científico

Néstor Yezid Rojas
Asesor Inventario de Emisiones

Sonia C. Mangones M
Asesora de movilidad y tráfico vehicular

Liseth González Delgado
Coordinadora General

PROFESIONALES

Andrés Ardila Ardila
Ingeniero Ambiental

Ángela C Vargas Burbano
Ingeniera ambiental

David Fernando García
Ingeniero Químico

Diego Andrés Arias Arana
Físico

Jennifer Marín Ospina
Ingeniera ambiental

Luis David López Buitrago
Ingeniero civil

Pablo Gutiérrez Espada
Ingeniero ambiental

EQUIPO DE TRABAJO CVC

COMITÉ TÉCNICO:

Nubia Madeleine Bastidas Bonilla
Supervisora

Marleni Marín Ocampo
DAR Suroccidente

Alexander Barona Serrano
Profesional DGA

Sigifredo Salgado Echeverri
Ingeniero Agrónomo
Profesional especializado, DGA

PROFESIONALES DE APOYO:

Carlos Fernando De Jesús Murillo
Profesional Contratista, DTA

Ever Alonso Ríos Sosa
Ingeniero Sanitario
Profesional Contratista, DAR Suroccidente

CONTENIDO

SIGLAS Y ABREVIATURAS	9
RESUMEN EJECUTIVO	10
INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVO GENERAL	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1. MARCO DE REFERENCIA	13
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	13
1.1.1 Municipio de Palmira - Valle del cauca	13
1.2 INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES MÓVILES.....	14
1.2.1 Estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta.....	14
1.2.2 Factor de emisión	15
1.2.3 Factor de actividad	15
1.2.4 Modelos de emisiones vehiculares	15
2. INVENTARIO DE FUENTES MÓVILES.....	17
2.1 ENFOQUE METODOLÓGICO.....	17
2.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE VENTAS Y CONSUMO ESTIMADO DE COMBUSTIBLE	18
2.2.1 Ventas de combustibles líquidos y gaseosos.....	19
2.2.2 Parque Automotor ($N_{VEH,J}$)	20
2.2.3 Factor de actividad vehicular	21
2.2.4 Agrupación por categoría vehicular	22
2.2.4.1 Construcción de bases de datos unificada	22
2.2.4.2 Depuración de datos atípicos	23
2.2.4.3 Test de hipótesis.....	25
2.2.5 Consumo de Combustibles (FA_i)	27
2.2.6 Comparación de ventas vs. consumo estimado de combustible	28
2.3 ESTIMACIÓN TOP-DOWN DE EMISIONES DE CO₂.....	29
2.4 ESTIMACIÓN BOTTOM-UP	31
2.4.1 Actividad vehicular.....	32
2.4.1.1 Velocidad promedio en la malla vial	32
2.4.1.2 Aforos vehiculares.....	34
2.4.1.3 Características del flujo vehicular.....	37

2.4.1.4	Caracterización de la malla vial (L_k)	40
2.4.1.1	Distribución del flujo vehicular (F_{jk}).....	43
2.4.1.2	Factor de actividad.....	46
2.4.2	Factores de emisión (FE_{ij})	47
2.4.2.1	Propiedades generales	48
2.4.2.2	Propiedades de los combustibles.....	49
2.4.2.3	Características del parque automotor.....	49
2.4.2.4	Estándar euro	49
2.4.2.5	Segmento	51
2.4.2.6	Kilometraje del parque automotor	53
2.4.2.7	Condiciones de manejo.....	54
2.4.2.8	Aire acondicionado.....	54
2.4.2.9	Factores de emisión del parque automotor	54
2.4.3	Emisiones vehiculares (E_i).....	57
3.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	65
4.	BIBLIOGRAFIA.....	67
5.	ANEXOS.....	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen del procesamiento de datos provenientes de los CDA de Palmira.	25
Tabla 2. Actividad vehicular diaria por cada categoría.	25
Tabla 3. Actividad vehicular por día en Palmira, Yumbo, Manizales y AMVA	26
Tabla 4. Consumo de combustible por tipo de combustible y categoría vehicular	27
Tabla 5. Factores de emisión para el inventario de emisiones por fuentes móviles del municipio de Palmira, de acuerdo con la UPME.	30
Tabla 6. Emisiones de CO₂ por tipo de combustible de acuerdo con el consumo estimado del parque automotor registrado en Palmira.	30
Tabla 7. Emisiones de CO₂ por tipo de combustible de acuerdo con el consumo reportado por el SICOM y SUI en Palmira.	31
Tabla 8. Velocidades promedio de la malla vial del municipio de Palmira en horas pico.	34
Tabla 9. Características de los puntos aforo vehicular Palmira	36
Tabla 10. Relación de vehículos particulares y taxis.	36
Tabla 11. Categorías viales del municipio de Palmira	41
Tabla 12. Agrupación de puntos de aforo para definición de polígonos de Thiessen	43
Tabla 13. Kilómetros recorridos por día y tipo de vehículos en los días evaluados	46
Tabla 14. Calendario de introducción de tecnologías a Colombia.	50
Tabla 15. Relación Peso bruto vehicular de los vehículos pesados según el cilindraje.	51
Tabla 16. Reglas para la asignación del segmento y categoría al parque automotor.	52
Tabla 17. Actividad acumulada por categoría vehicular, estándar Euro y tipo de combustible, según los datos de CDA.	53
Tabla 18. Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular	55
Tabla 19. Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular y combustible	56
Tabla 20. Emisiones diarias de contaminantes para los días evaluados	57
Tabla 21. Relación de expansión de emisiones para el mes de noviembre	61
Tabla 22. Emisiones atmosféricas totales por fuentes móviles en Palmira.	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del municipio de Palmira, Valle del Cauca.	14
Figura 2. Esquema metodológico de estimación de emisiones por enfoque Top-Down y Bottom-Up.	17
Figura 3. Flujoograma para la estimación de flujo vehicular en la malla vial usando polígonos de Thiessen	18
Figura 4. Serie temporal de ventas de combustible líquidos reportados por el SICOM para Palmira.	19
Figura 5. Distribución del parque automotor registrado en Palmira agrupado por categoría vehicular según datos reportados por el RUNT.	20
Figura 6. Distribución de uso de combustible por categoría vehicular para el municipio de Palmira, según datos reportados por el RUNT.	21
Figura 7. Histograma (a) y qq plot (b) para el CDA Llanogrande.	24
Figura 8. Actividad vehicular por día en Palmira, Yumbo, Manizales y AMVA	26
Figura 9. Comparativo entre la estimación de consumo y ventas según SICOM de a) gasolina y b) Diésel y c) GNV.	29
Figura 10. Tramos viales con velocidad promedio medida en el municipio de Palmira.	33
Figura 11. Ubicación de puntos de aforo vehicular 2021 municipio de Palmira	35
Figura 12. Perfiles de conteos vehiculares horarios para el punto de aforo P1 por categoría vial para los días de la semana.	37
Figura 13. Diagrama de barras para el conteo total de vehículos por punto de aforo y categoría vehicular para el día típico.	38
Figura 14. Diagrama de puntos y barras para el promedio y máximo del conteo por carril de vehículos por punto de aforo y categoría vehicular.	39
Figura 15. Diagramas de Pareto de la contribución a los VKT totales por día y punto de aforo	40
Figura 16. Ejemplo vía rural y urbana del municipio de Palmira con reducción de capacidad	42
Figura 17. Polígonos de Thiessen por categoría vial a) vías primarias, b) vías secundarias, c) vías terciarias.	45
Figura 18. Mapa de flujo vehicular día típico 24 horas	45
Figura 19. Kilómetros recorridos de todas las categorías vehiculares para el día típico por tramo vial	47
Figura 20. Esquema metodológico para la estimación de factores de emisión vehicular mediante el modelo COPERT 5.5.	48
Figura 21. Perfil horario de emisiones por contaminante para los días evaluados. ..	58
Figura 22. Emisiones de CO₂ en un día típico por tramo vial.	59
Figura 23. Emisiones vehiculares de CO₂ en la malla vial a las 18 Horas, hora pico. 60	
Figura 24. Emisiones vehiculares de CO₂ de los vehículos livianos en la malla vial a las 22 Horas, hora valle.	60
Figura 25. Relación porcentual de emisiones vehiculares por tipo de vehículo y contaminante.	63
Figura 26. Emisiones de contaminantes por tipo de combustible consumido.	64
Figura 27. Comparativo de estimación emisiones por enfoques empleados	64

SIGLAS Y ABREVIATURAS

CDA	Centro de diagnóstico automotriz
COPERT	Computer Program to calculate Emissions from Road Transport, desarrollado por European Topic Centre on Air and Climate Change
COV	Compuestos orgánicos volátiles
COVNM	Compuestos orgánicos volátiles no metánicos
CUP	Corredor urbano principal
DAR	Dirección ambiental regional
DTA	Dirección técnica ambiental
EDS	Estaciones de servicio
PM ₁₀	Material particulado menor a 10 micras
PM _{2.5}	Material particulado menor a 2.5 micras
RUA	Registro único ambiental
RUNT	Registro Único Nacional de Tránsito
RVB	Red vial básica
SICOM	Sistema de Información de Combustibles
TSP	Partículas suspendidas totales
VAP	Vías arterias principales
VAS	Vías arterias secundarias
VCM	Vía de conectividad municipal
VCP	Vía colectora principales
VCS	VCS: Vía colectora secundaria
VKT	Vehículos kilómetro recorridos en una red de transporte
VL	Vías locales
VNA	Vía Nacional

RESUMEN EJECUTIVO

La estimación del inventario de emisiones para el municipio de Palmira abordó el enfoque Top-Down como método de referencia, y el enfoque Bottom-Up como metodología principal.

El enfoque Top-Down permitió estimar las emisiones de CO₂ empleando dos parámetros distintos. Por un lado, los consumos de combustible reportados por el Sistema de Información de Combustibles (SICOM) y factores de emisión reportados por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), este proceso determinó que anualmente se generan 216,185 toneladas de CO₂. Por otro lado, se realizó la estimación de consumo a partir de la actividad vehicular promedio reportado en los CDA, con este método de se estimó una generación de 308,711 toneladas de CO₂ anuales.

La estimación de emisiones de contaminantes del enfoque Botton-Up, empleó aforos vehiculares de 24 horas durante 4 días (Día típico, viernes, sábado y domingo), en 11 puntos de aforo de diferentes tipos de vías del municipio de Palmira, con el fin de caracterizar la actividad vehicular, la cual fue distribuida al total de la malla vial empleando Polígonos de Thyssen segregados en tres categorías viales. Arrojando una actividad diaria promedio de todos los vehículos superior a los 7 millones de kilómetros recorridos.

Por otra parte, para la determinación de factores de emisión fue empleado el software *COPERT 5.5*, al cual le fueron ingresadas variables ambientales y de tráfico propias del Municipio. De esta forma se estimaron los factores de emisión (gramos del contaminante por kilómetro recorrido) para los contaminantes evaluados en las categorías vehiculares: (Particulares, Motos, Taxis, Buses y Camiones)

La estimación de las emisiones totales diarias se obtuvo a partir del producto de los kilómetros recorridos por tipología vehicular y el factor de emisión para cada contaminante evaluado (BC, CH₄, CO, CO₂, N₂O, NO₂, NO_x PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, COV y COVNM). Posteriormente se realizó la expansión mensual definiendo el número de días de cada tipo en el mes de noviembre, y finalmente se estimó la emisión anual a partir del factor de relación de ventas totales de combustibles de cada mes del año con respecto al mes de noviembre.

La estimación Botton-up permitió obtener para el municipio de Palmira, las emisiones vehiculares anuales de CO₂ (451,837 toneladas), PM₁₀ (181 toneladas) y NO_x (2975 toneladas).

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la contaminación del aire representa uno de los mayores riesgos para la salud humana y en el año 2017 de acuerdo con el informe “State of Global Air/2019” fue la quinta causa de mortalidad con 4,9 millones de muertes, siendo el material particulado fino (PM_{2.5}), el contaminante criterio que causó mayores pérdidas de vida con 2.9 millones. Los principales efectos negativos en la salud de las personas están relacionados con la disminución de la función pulmonar y afectación del sistema cardiovascular y los más afectados son los receptores sensibles (niños y adultos mayores) que han estado expuestos por periodos prolongados a concentraciones que exceden los límites máximos permisibles en el aire, con periodos prolongados de exposición (HEI – IHME, 2019).

La Organización Mundial de la Salud – OMS con el fin de reducir a nivel mundial los efectos en la salud humana por la exposición a respirar material particulado, estableció como directriz de calidad del aire el valor de 10 µg/m³ como el nivel máximo de PM_{2.5} con el cual se ha demostrado (95% de confianza) una gran disminución de la mortalidad total, específicamente el cáncer de pulmón y afectación cardiopulmonar (OMS, 2005), sin embargo, en el año 2017 a nivel mundial, el 95% de la población vive en ciudades con concentraciones de PM_{2.5} mayores a este nivel (HEI – IHME, 2019).

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*”, como 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 (ton/año) de acuerdo con el tipo de fuente.

En el Valle del Cauca, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC además de realizar el monitoreo de la calidad del aire en áreas priorizadas industriales y urbanas de algunos municipios a través de su Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), en su Plan de Acción de la CVC 2020-2023, priorizó la elaboración de inventarios detallados de las emisiones contaminantes al aire en el municipio de Palmira. El desarrollo de estos inventarios además de contribuir con la Gestión de la Calidad del Aire en el departamento, se constituyen en una herramienta técnica que permitirá la definición de estrategias de reducción de las emisiones contaminantes.

En este sentido, mediante Convenio Interadministrativo CVC-UNAL 036 de 2021, cuyo objeto contractual es “aunar esfuerzos técnicos, y recursos económicos para contribuir a la gestión y planificación del recurso aire en el Departamento del Valle del Cauca, orientado a la prevención, reducción y control de la contaminación del aire en centros poblados ubicados en el área de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC”, específicamente el Proyecto 4001 Resultado 1 Actividad 16 se orientará al

desarrollo de los Inventarios de emisiones a la atmósfera (fuentes fijas y móviles) en los municipios de Palmira y Yumbo.

Este documento presenta el “Inventario de Emisiones a la Atmósfera por Fuentes Móviles para el Municipio de Palmira – Año Base 2021” desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia. En el desarrollo del inventario de fuentes móviles se tuvieron en cuenta dos aproximaciones: i) la estimación Top-Down, basada en las ventas de combustible, el registro vehicular y las actividades vehiculares provenientes de los Centros de Diagnóstico Automotriz - CDA agregadas por tipo de vehículo, adicionalmente, incluye el análisis de la información disponible en el RUNT, SICOM y Secretarías de Tránsito; ii) y una aproximación Bottom-up que establece de manera detallada las emisiones de contaminantes atmosféricos basados en datos de tráfico vehicular, a partir de aforos vehiculares en sitios priorizados representativos de la malla vial del Municipio de Palmira y factores de emisión obtenidos a partir de COPERT 5.5. El desarrollo del proyecto se enmarca en los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL

Elaborar el inventario de emisiones a la atmósfera por fuentes móviles para el Municipio de Palmira – Año Base 2021, incluye contaminantes criterio y gases de efecto invernadero (GEI)

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la estimación Top-Down de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el Municipio de Palmira, incluye el análisis comparativo de las ventas de combustibles con el consumo de combustible del parque automotor basados en los factores de actividad obtenidos en los CDA
- Realizar la estimación Bottom-up de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles, 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.

1. MARCO DE REFERENCIA

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.1.1 Municipio de Palmira - Valle del cauca

El municipio de Palmira se encuentra localizado al Suroriente del Valle del Cauca a 1,001 msnm, con una extensión de 1,132 km² (**Figura 1**). Se estima que para el año 2020 la población fue de 354285 habitantes (CCpalmira, 2022; DANE, 2018). Regularmente presenta una temperatura de 23°C, radiación solar de 4.64 kWh/m² y una precipitación de 1,020 mm (Weatherbase, 2017). Teniendo en cuenta las extensiones de tierra que comprende Palmira y algunos de los municipios aledaños como Pradera, Florida y Candelaria. La actividad agropecuaria y agroindustrial de la zona tiene una fuerte dinámica en donde predomina el cultivo y producción de la caña de azúcar. Adicionalmente el café, el plátano y la caña de azúcar panelera también hacen parte del sector agropecuario en el municipio en menor medida.

En cuanto a las características viales del municipio, dentro del casco urbano se concentra cerca del 90% de la población, que se transporta a través de corredores urbanos principales tales como la carrera 28, calle 31 o la calle 42. Estas vías a su vez funcionan como salidas y entradas al casco urbano y conectan con la recta Cali-Palmira, una de las vías nacionales que atraviesa el municipio y lo conecta con la capital del Valle del Cauca. Adicional a la mencionada recta Cali-Palmira, el municipio cuenta con una posición y vías que lo conectan estratégicamente a nivel nacional, regional y departamental. De acuerdo con el registro de automotores del RUNT, por la malla vial del municipio circulan cerca de 160,000 vehículos. Siendo los vehículos tipo motocicleta los más abundantes (78%). No obstante, dada la cercanía con otros municipios como Cali, Yumbo, Pradera, Florida y Candelaria, es probable que el parque automotor circulante dentro del municipio sea mayor.

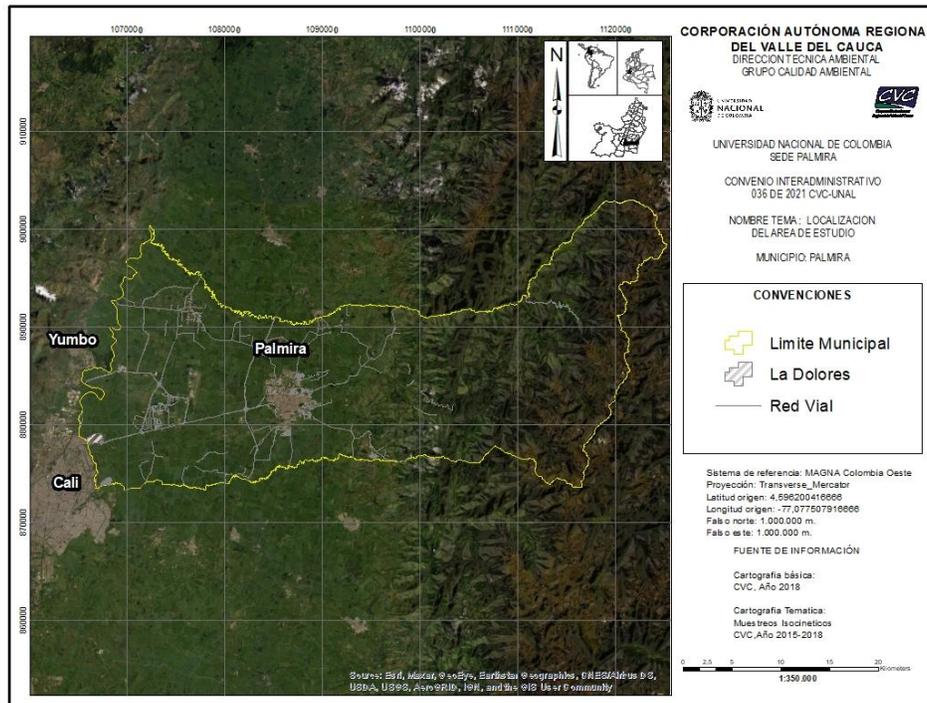


Figura 1. Localización del municipio de Palmira, Valle del Cauca.

Fuente: Elaboración propia.

1.2 INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES MÓVILES

Es una herramienta cuantitativa que representa las emisiones contaminantes producidas por la actividad vehicular en un área delimitada. Permite generar un conjunto de datos que caracterizan las emisiones de contaminantes atmosféricos, de acuerdo con el tipo de fuente y contaminantes emitidos. Son empleados durante el proceso de planeación y la gestión de la calidad del aire del lugar de estudio, dado que, proporciona una visión general de posibles causas de no cumplimiento con las normas de calidad del aire e información clave para los modelos de calidad de aire (Instituto Nacional de Ecología, 2005).

1.2.1 Estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta

La **Ecuación 1** muestra la fórmula general para la estimación de emisiones vehiculares en ruta.

$$E_{ij} = FE_{ij} \times FA_j \times N_{veh,j} \quad \text{Ecuación 1}$$

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 .

1.2.2 Factor de emisión

Es un valor representativo que relaciona la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión del contaminante que generalmente corresponde al consumo de combustible y/o kilómetros recorridos.

1.2.3 Factor de actividad

El factor de actividad se refiere al dato que contiene la información sobre la magnitud de la actividad generadora de la emisión y se relacionan al consumo de combustible y kilómetros recorridos, estos provienen de datos estadísticos locales y oficiales.

1.2.4 Modelos de emisiones vehiculares

Los modelos han sido desarrollados debido a la necesidad y la alta complejidad de estimación de este tipo de emisiones, ya que la estimación involucra diferentes tipos de emisiones y están en función de diversas características de los vehículos que transitan en cada zona de estudio (tipo de vehículo, año y modelo del vehículo, tecnología vehicular, combustible, kilometraje recorrido, ciclos de conducción, entre otros).

Existen diferentes modelos computacionales de emisiones vehiculares como MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator), IVE (International Vehicle Emissions Model) y COPERT (International Vehicle Emissions Model) que permiten la estimación de factores de emisión y en algunos casos emisiones. 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. A continuación, se describe el modelo COPERT que será utilizado en la estimación del inventario para el municipio de Palmira:

- **COPERT:** Es un modelo desarrollado en Microsoft Windows por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) y EMISIA, que presenta actualizaciones periódicas en los factores de emisión y disponibilidad en tecnologías vehiculares (última actualización año 2021). El modelo fue desarrollado inicialmente para condiciones de la Unión Europea, sin embargo, se presenta una versión diferente para uso en otros países.

Cabe destacar que el presente 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. Los factores de emisión están en función de la velocidad promedio vehicular. Otros parámetros para el ajuste a condiciones locales involucran las características del parque automotor, actividad vehicular, distribución horaria, características del combustible y condiciones meteorológicas. Incluye la estimación de contaminantes criterio, gases de efecto invernadero y COV, COVNM, BC, PM_{2.5} y metales pesados.

2. INVENTARIO DE FUENTES MÓVILES

2.1 ENFOQUE METODOLÓGICO

El desarrollo del “*Inventario de emisiones por fuentes móviles en el Municipio de Palmira*” incluyó la estimación y análisis de las emisiones asociadas a la actividad vehicular a partir de: i) la comparación de las ventas de combustibles con las estimaciones de consumo de combustible basados en el parque automotor y factores de actividad obtenidos a partir de la información de los CDA (enfoque Top Down) , ii) la estimación de las emisiones de CO₂ basados en las ventas y estimaciones del enfoque Top-Down iii) las estimaciones de las emisiones de contaminantes a partir del enfoque Bottom-up 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. Estos tres componentes se presentan en las secciones **2.2, 2.3 y 2.4** de este documento.

Las estimaciones de emisiones por fuentes móviles en ruta (emisiones asociadas al tubo de escape y evaporativas), para el municipio de Palmira, tal y como se mencionó anteriormente, se realizó a partir del enfoque Top-down y Bottom-up. En la **Figura 2** se presenta el esquema metodológico para la estimación de las emisiones para los dos enfoques. La estimación de emisiones a partir del enfoque Botton-up se realizará utilizando la ecuación 1 descrita en el ítem 1.2.1.

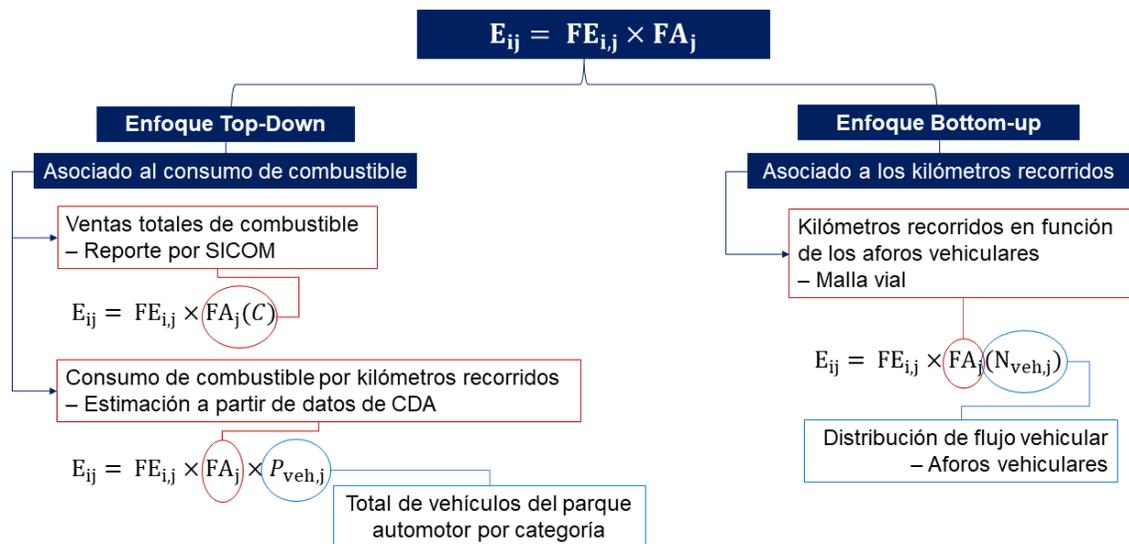


Figura 2. Esquema metodológico de estimación de emisiones por enfoque Top-Down y Bottom-Up.

Fuente: Elaboración Propia.

La estimación del factor de actividad en función de los aforos vehiculares, para el enfoque Bottom-Up, empleó distribución del flujo utilizando polígonos de Thiessen, los cuales permiten tener un área de influencia para una característica determinada, en este caso el flujo vehicular para la malla vial. En la **Figura 3**, se presenta la transformación de los aforos vehiculares en kilómetros recorridos a través de la malla vial por categoría vehicular. Se aclara que este proceso se realiza para cada hora en los días evaluados y para cada categoría vehicular.

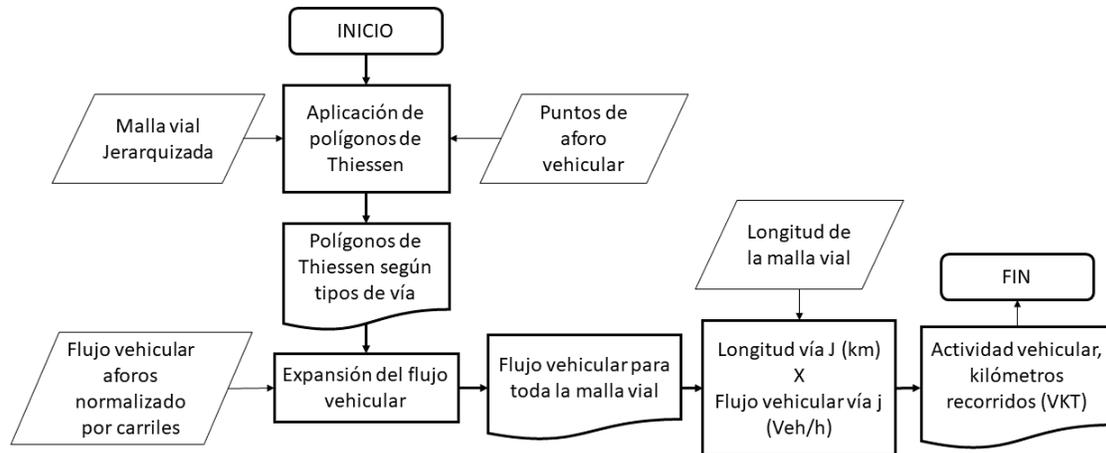


Figura 3. Flujograma para la estimación de flujo vehicular en la malla vial usando polígonos de Thiessen

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los factores de emisión del enfoque Bottom-Up, fueron obtenidos mediante el Software *COPERT 5.5*, el cual permite adaptar las características, ambientales, de combustibles, tráfico entre otras a las condiciones propias del municipio de Palmira y de esta forma tener una mejor aproximación a las condiciones reales de emisión. Este proceso se describe en la sección 2.4.2 del presente informe.

2.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE VENTAS Y CONSUMO ESTIMADO DE COMBUSTIBLE

La estimación del consumo de combustible usando parámetros agregados del parque automotor y de la actividad vehicular, y su comparación con las ventas de combustible en el municipio, sirve como punto de partida para entender las dinámicas de los sistemas de transporte y el mercado del combustible en el municipio, las cuales están relacionadas con las emisiones del área. Suponiendo que los vehículos registrados en Palmira operan y compran sus combustibles en el mismo municipio, se esperaría que el consumo estimado a partir del parque automotor y su actividad se acercara a las cifras de ventas de combustibles, sin embargo, existen dinámicas de escala metropolitana, regional y nacional que influyen de manera importante, tanto en las cifras de ventas de combustibles, como en consumo real. Por ejemplo, los vehículos que circulan en un municipio como Palmira, puede

no estar registrada en el mismo municipio, o los vehículos de carga, que van de paso por la región pueden comprar sus combustibles en estos municipios. Pese a lo anterior, el análisis comparativo de ventas y consumos estimados de gasolina y diésel fue realizado para la comprensión y referencia, y se utilizan para contrastar las emisiones estimadas por el método Bottom-up.

2.2.1 Ventas de combustibles líquidos y gaseosos

El informe de ventas de combustibles líquidos en el municipio de Palmira entre el 2013 y 2021, de acuerdo con los datos oficiales reportados por SICOM (**Figura 4**), indican que la comercialización del diésel mantiene un comportamiento relativamente constante con excepción de una ligera caída entre los años 2016-2017. Las ventas en gasolina corriente se incrementan en un rango de 450,000 a 500,000 galones adicionales por año; además la gasolina extra presenta un incremento en sus ventas entre los años 2013-2016, y para los años posteriores tiene un ligero descenso. Para el año 2021, las ventas de gasolina corriente y extra fueron de 16,910,000 galones en conjunto, mientras que las ventas de Diésel fueron de 6,060,000 galones. Es de resaltar que, las ventas de combustible para el año 2020 presentan una disminución drástica en todos los combustibles, producto de las medidas implementadas por el virus SARS-CoV2 (Covid 19).

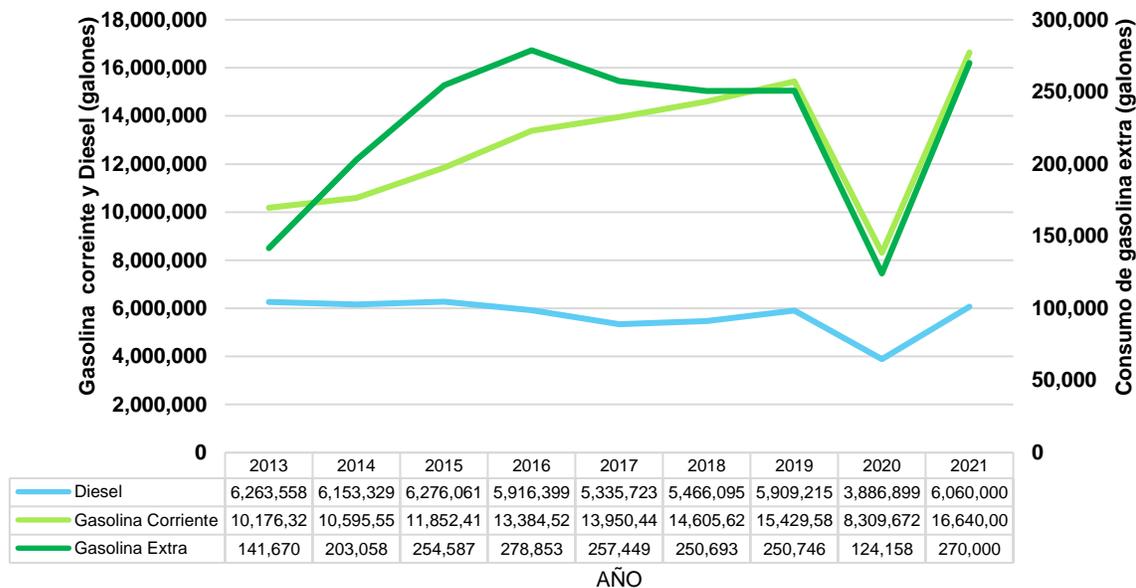


Figura 4. Serie temporal de ventas de combustible líquidos reportados por el SICOM para Palmira.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Parque Automotor ($N_{VEH,J}$)

El parque automotor de Palmira se analizó considerando los datos reportados por el Registro Único Nacional de Tránsito - RUNT para 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.

De acuerdo con la distribución porcentual del parque automotor reportado por el RUNT, en Palmira los vehículos de transporte particular y motocicletas predominan dentro del parque automotor del municipio pues estas categorías representan en conjunto el 97% de vehículos registrados, tal y como se observa en la **Figura 5**.

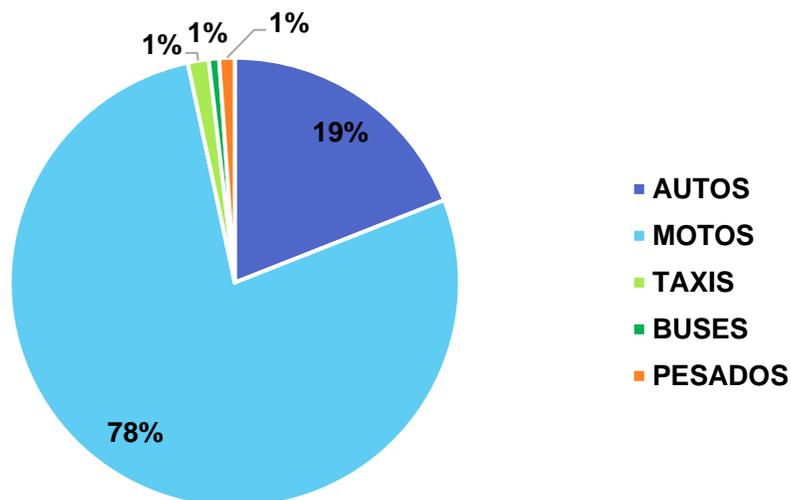


Figura 5. Distribución del parque automotor registrado en Palmira agrupado por categoría vehicular según datos reportados por el RUNT.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al combustible usado por los automotores, según los datos del RUNT, en general el parque automotor del municipio de Palmira, el 97.6% de los vehículos son operados a gasolina y solo el 2% operan a diésel. Los vehículos particulares y motos tienen la mayor participación de vehículos a gasolina, con 151463 vehículos. Por otro lado, el 42% de los vehículos clasificados como de carga, buses y maquinaria funcionan con combustible

diésel, y el 57.99% utilizan gasolina en el proceso de combustión. En contraste, el gas natural vehicular (GNV) es utilizado principalmente por los taxis y vehículos particulares, sin embargo, estos vehículos corresponden solo al 0.34% de toda la flota vehicular del municipio (**Figura 6**).

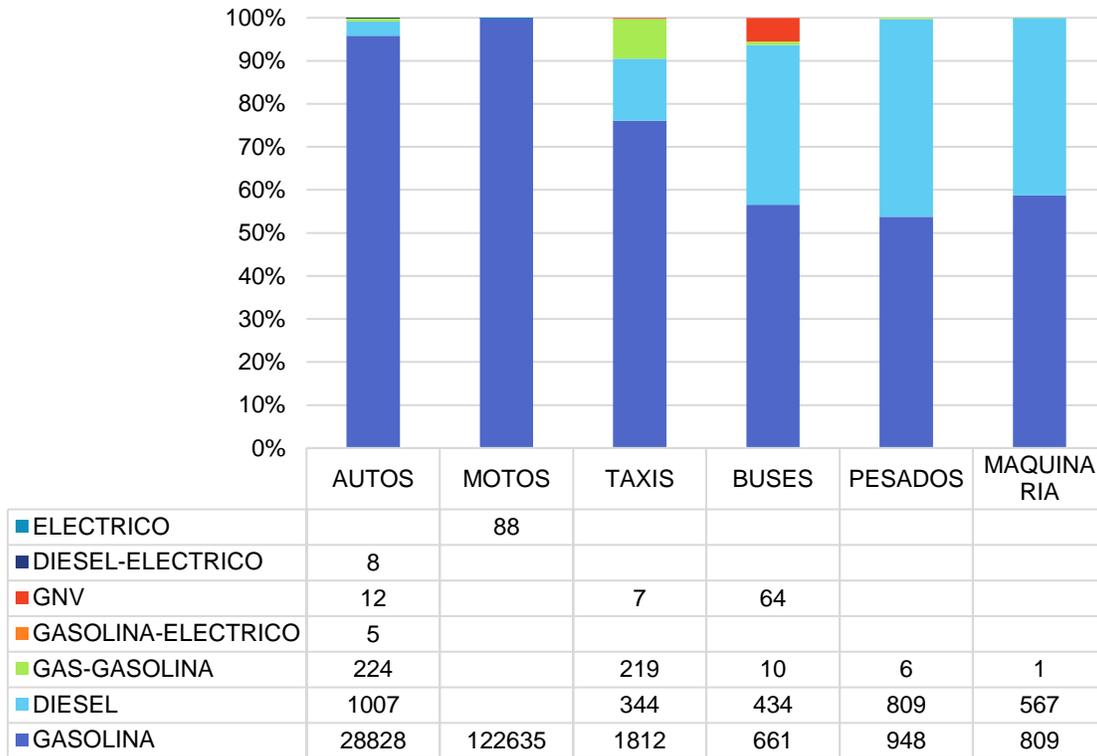


Figura 6. Distribución de uso de combustible por categoría vehicular para el municipio de Palmira, según datos reportados por el RUNT.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.3 Factor de actividad vehicular

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). Los vehículos de servicio particular sin incluir motocicletas deben efectuar la primera revisión a partir del sexto año contado desde la fecha de su matrícula; los vehículos de servicio público, motocicletas y similares deben realizar la primera revisión al cumplir dos años de su fecha de matrícula (Artículo 13 de la Ley 1383 de 2010).

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. La información disponible después de una depuración cuidadosa permitió estimar la actividad [km/día] de una muestra importante de automotores en el municipio de Palmira. A partir de esta muestra fue posible estimar valores estadísticamente representativos de la actividad vehicular promedio [km vehículo⁻¹ día⁻¹] para las diferentes categorías vehiculares.

Con el apoyo de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) se realizó la solicitud de información de registros en 8 CDA ubicados en el municipio de Palmira, de estos, 4 enviaron bases de datos de los registros con la siguiente información: fecha en la de revisión técnico-mecánica del automotor; placa; marca; 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 entre 2015 y 2019.

El procesamiento de los datos incluyó las siguientes etapas: 1) reagrupación de categorías vehiculares; 2) construcción de una base de datos unificada y 3) depuración de datos atípicos y 4) test de hipótesis. Este procesamiento se realizó usando el software estadístico *Rstudio* (R Core Team, 2020). A continuación, se describen las principales actividades y resultados obtenidos de la información de los CDA, para la caracterización de la actividad vehicular.

2.2.4 Agrupación por categoría vehicular

Las bases de datos de los CDA reportan las siguientes categorías de vehículos, según tipo y servicios: automóvil particular, campero, camioneta, automóvil público, moto, motocicleta, motocarro, microbús, buseta, bus, volqueta, tractocamión y camión. Estas categorías fueron reagrupadas según las 5 categorías estudiadas (vehículo particular, taxi, motocicleta, bus, vehículos de carga). A partir de la reagrupación se realizó la identificación de placas con más de un registro de odómetro y de datos anómalos.

2.2.4.1 Construcción de bases de datos unificada

De acuerdo con lo establecido en la Ley 1383 de 2010, a partir del sexto y segundo año dependiendo de la categoría vehicular, las revisiones técnico-mecánicas vehiculares deben realizarse cada año. Por lo tanto, en una base de datos multianual de múltiples CDA, es posible encontrar múltiples registros de un mismo vehículo identificado por su placa, es decir de diferentes años en uno o varios CDA. También debiera ser frecuente encontrar que, al realizarse una revisión, el automotor en primera instancia no obtenga el certificado de funcionamiento, pero una vez realizados los ajustes técnicos y mecánicos, poco tiempo después (horas o días), el automotor reingrese al CDA y obtenga el certificado. Esta nueva evaluación debería generar una segunda entrada en la base de datos.

En concordancia con el objetivo de este análisis, a los vehículos con múltiples reportes en un corto periodo de tiempo (horas o días), solo se tuvo en cuenta el primer reporte descartando los demás. De igual forma, al observar que los registros anuales presentaban algunas inconsistencias, como reportar el mismo kilometraje en diferentes años o menor kilometraje al reportado en años anteriores, se tomó como referencia el primer reporte para el vehículo.

Una vez realizada esa primera depuración, la actividad vehicular diaria se estimó mediante la relación entre el kilometraje reportado al momento de la revisión, la fecha del modelo del vehículo y la fecha de realización de la revisión (**Ecuación 2**).

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

2.2.4.2 Depuración de datos atípicos

Los datos atípicos son aquellos que se desvían del comportamiento esperado de un conjunto de datos, esta observación hace pensar que este fue generado por algún mecanismo diferente a los datos del conjunto. Estos datos tienen una gran influencia en la estadística del grupo, reduciendo capacidad de estimación del comportamiento estadístico de un grupo (ghorbani, 2019).

Los datos atípicos para cada categoría y CDA se identificaron a través de histogramas de frecuencias relativas y gráficos de cuantiles (qq plot en inglés) (Anexo A). Los histogramas nos permiten la concentración de los datos y el grado de dispersión de estos. Los qq plot nos permite visualizar las posibles diferencias del conjunto de datos con una función de distribución teórica, en este caso una función de distribución normal. Una vez identificados los valores que se alejan del comportamiento de la distribución normal, estos se eliminan considerando cuantiles e intervalos determinados en el diagrama de cuantiles. La actividad vehicular media [$km\ vehículo^{-1}\ día^{-1}$] se representa en una escala logarítmica base 10 (\log_{10}), esta transformación permite observar de manera más clara si los datos se comportan de acuerdo con la distribución normal.

La **Figura 7** muestra a modo de ejemplo el proceso realizado para uno de los CDA (CDA Llanogrande) con la categoría de motocicletas. El histograma de frecuencias relativas (**Figura 7a**) representa que los datos se concentran entre \log_{10}^1 y \log_{10}^2 , es decir, entre 10 y 100 kilómetros día. El diagrama de cuantiles (**Figura 7b**) indica que los datos se comportan como una función de distribución normal, siendo las equis (“x”) azules las observaciones reportadas por el CDA y la línea punteada roja la función de distribución normal, entre -1 y +2 sigma desviaciones estándar (σ). Como regla general dentro de una función de distribución normal un sigma equivale al 68% de los datos, 2 sigma al 95% y 3 sigma al 99.7 %.

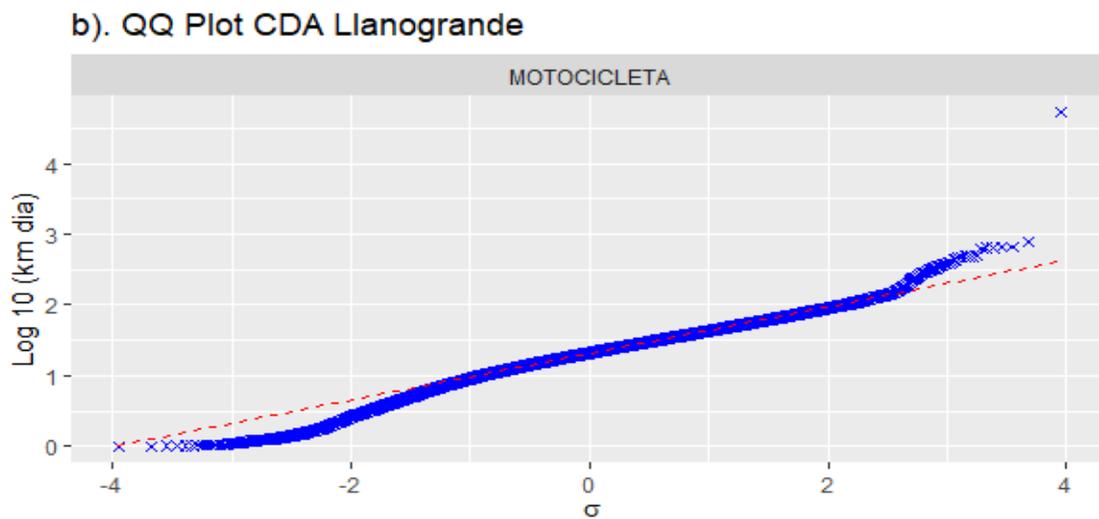
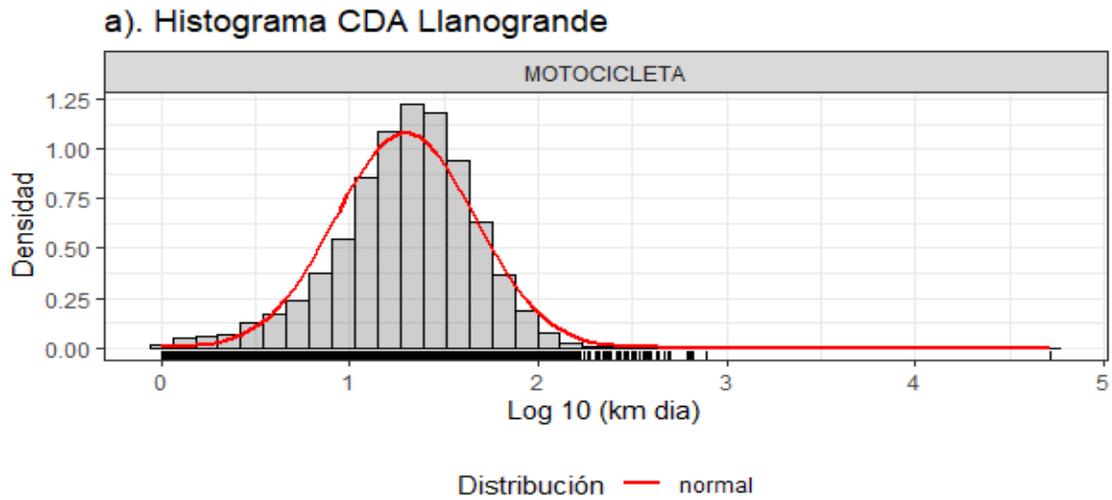


Figura 7. Histograma (a) y qq plot (b) para el CDA Llanogrande.
Fuente: Elaboración propia

De los CDA se recibieron alrededor de 81 mil registros (**Tabla 1**). Como resultado del proceso de depuración de datos se eliminaron alrededor del 59% de los datos, es decir, se obtuvieron aproximadamente 33 mil datos válidos, que se consideran una muestra suficiente, de la que se pueden extraer actividades promedio estadísticamente válidas. Particularmente, el CDA Servimotos no fue tenido en cuenta, dado que este CDA envió datos que presentaban inconsistencias en el kilometraje reportado.

Tabla 1. Resumen del procesamiento de datos provenientes de los CDA de Palmira.

Cantidad de datos registrados por CDA			
Llanogrande	Paraíso	Servimotos*	Servimotos19
19,246	27,326	18,132	16,294
Total = 80,998 datos registrados			
Cantidad de datos validos por CDA			
Llanogrande	Paraíso	Servimotos*	Servimotos19
10,381	14,397	0	8,342
Total = 33,120 datos validos			

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.4.3 Test de hipótesis

Una vez realizada la depuración de los datos, se aplicaron pruebas de hipótesis, para verificar si existen diferencias estadísticas entre las actividades vehiculares reportadas por los CDA en las diferentes categorías vehiculares, con la finalidad de hacer una estimación adecuada de la actividad vehicular diaria por categoría vehicular. Para esto se aplicó la prueba paramétrica t-student a cada categoría vehicular, la cual nos indica la diferencia significativa existente entre los datos y prueba la igualdad de medias. Se encontró que si hay diferencias significativas con valores de $p < 0.01$, y por tanto la actividad de cada categoría es independiente de las demás. El procesamiento de los datos registrados por los CDA indica que los automotores que más kilómetros recorren por día son en su respectivo orden taxis, vehículos de carga, buses, vehículos particulares y motocicletas con 172, 56, 55, 36 y 25 km/día, respectivamente (**Tabla 2**).

Tabla 2. Actividad vehicular diaria por cada categoría.

Categoría	Número de datos	Promedio km día ⁻¹	Desviación Estándar	Mediana	Máximo	Mínimo
Bus	305	56	59	52	354	15
Motocicleta	26,114	25	20	24	245	9
Taxi	446	172	72	171	452	65
Vehículo De Carga	770	56	47	59	184	15
Vehículo Particular	5,485	36	22	36	136	9
Total	33,120					

Fuente: Elaboración Propia.

Los datos obtenidos son comparables con los reportes de actividad registrados en otras regiones del país, tales como Yumbo, Manizales y el Área Metropolitana del Valle de Aburra – AMVA (AMVA & UPB, 2019; Universidad Nacional de Colombia & Corpocaldas, 2019) (**Tabla 3 y Figura 8**). En áreas urbanas con mayor población se podría esperar que la actividad vehicular diaria sea mayor, debido principalmente al tamaño de los municipios, donde las distancias que deben recorrer sus habitantes para llegar a sus destinos a diario

son generalmente mayores. Sin embargo, esta actividad obedece a patrones particulares de cada región.

Tabla 3. Actividad vehicular por día en Palmira, Yumbo, Manizales y AMVA

Categoría	Yumbo	Palmira	Manizales	AMVA
	km/día			
Bus	98	56	168	146
Motocicleta	35	25	23	56
Taxi	114	172	199	167
Vehículo De Carga	98	56	50	146
Vehículo Particular	45	36	25	40

Fuente: Elaboración Propia.

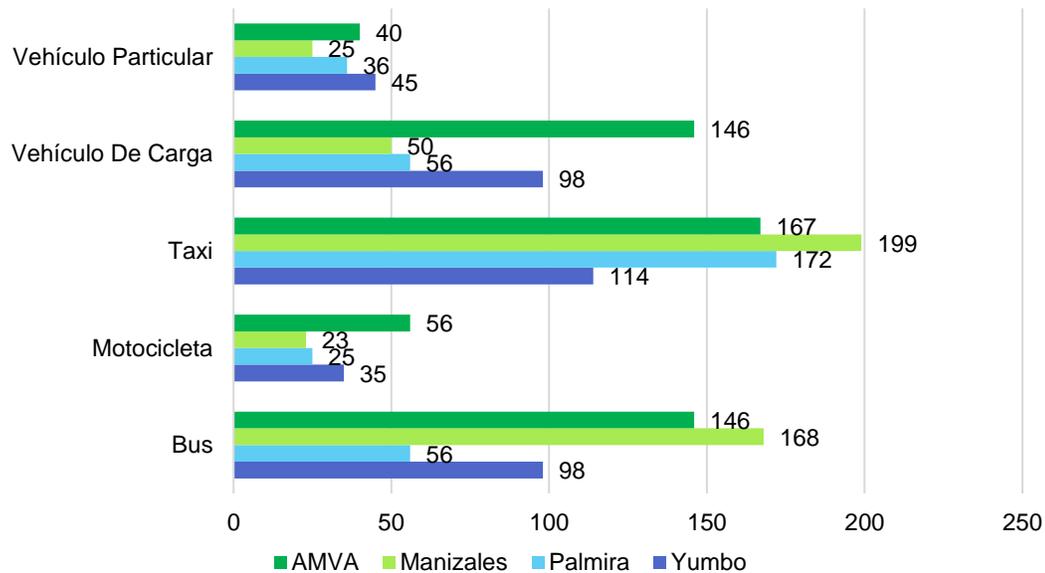


Figura 8. Actividad vehicular por día en Palmira, Yumbo, Manizales y AMVA

Fuente: Elaboración Propia.

El AMVA presenta 3.9 Millones de habitantes en comparación con los 450 mil habitantes de Manizales y conjuntamente de Palmira y Yumbo, en el 2018 (DANE, 2020). Por lo tanto, es el AMVA la región que presenta en general una mayor relación de kilómetros diarios, no obstante Palmira presenta actividades ligeramente mayores en cuanto a los taxis y semejante en vehículos particulares, a pesar de tener una población 8 veces menor el AMVA, esto se debe probablemente a los patrones de tránsito intermunicipal que existe en la región conurbada (Cali, Palmira, Yumbo, Jamundí, Candelaria). A partir de los datos de

actividad vehicular obtenidos para el municipio de Palmira, es posible estimar los consumos de combustible, y compararlos con los valores obtenidos del SICOM. Estos valores servirán de contraste en la estimación de actividad a partir de aforos vehiculares y factores de emisión COPERT, con los que finalmente se podrán estimar las emisiones debidas a fuentes móviles en el municipio de Palmira.

2.2.5 Consumo de Combustibles (FA_j)

La estimación del consumo de combustible se determinó por dos métodos, el primero a través de la **Ecuación 2** donde se requiere la determinación de la actividad vehicular diaria de cada categoría vehicular (AV_j) y el segundo a través de las observaciones del reporte de las ventas de combustibles líquidos en el SICOM. De tal forma que se obtuvo dos acercamientos Top-down para la estimación de emisiones de CO₂ (**sección 2.3**) que se usará como referencia de contraste de las estimaciones Bottom-up (**sección 2.4**).

En la **Tabla 4** se puede observar que el consumo de gasolina estimado fue de 28,079,009.59 galones y corresponde en gran medida a la actividad de los automóviles particulares y motos. Por otro lado, el consumo calculado de diésel fue 5,639,721.18 galones y se debe a los camiones y buses. Finalmente, el consumo de GNV obtenido fue de 1,900,048.70m³ y está relacionado con la actividad de algunos taxis, vehículos particulares y buses.

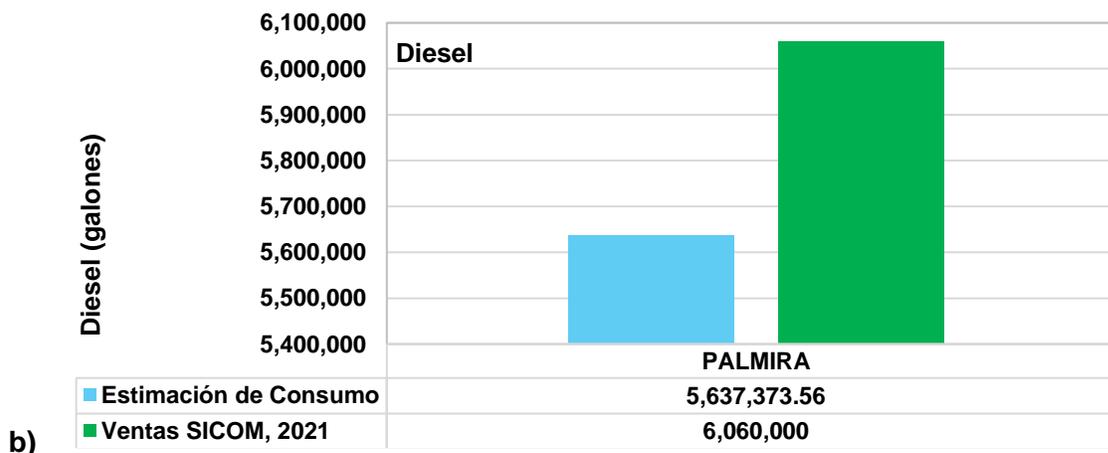
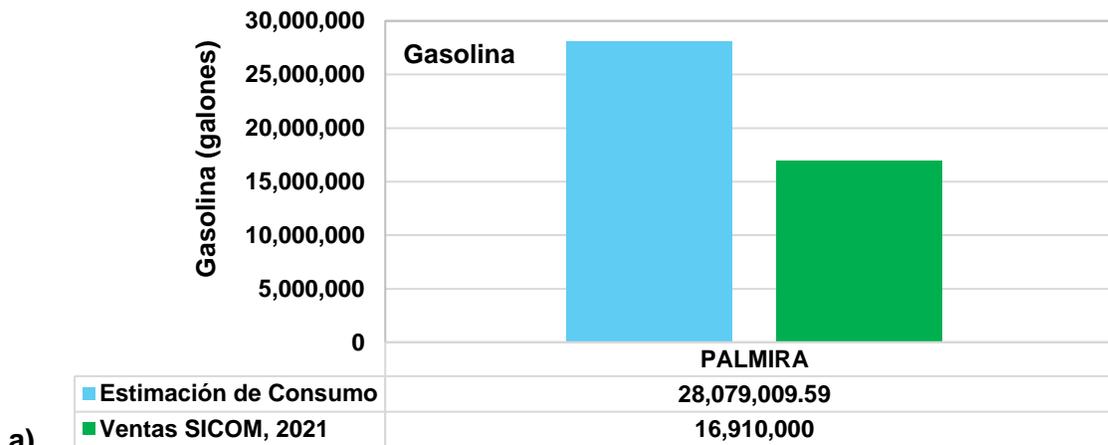
Tabla 4. Consumo de combustible por tipo de combustible y categoría vehicular

Categoría vehicular	Combustible	Flota vehicular	Rendimiento (km/gal)	Actividad vehicular (km/(día veh))	Gasolina (galones)	Diésel (galones)	GNV (m3)
Autos	Diésel	1007	29	36		413,096	
	Gasolina	28828	22	36	15,588,741		
	GNV	236	12	36			233,965
Taxi	Diésel	344	65	172		300,828	
	Gasolina	1812	50	172	2,059,972		
	GNV	226	13	172			988,185
Motos	Gasolina	122635	97	25	10,430,296		
Buses	Diésel	1095	12	56		1,671,846	
	Gasolina		8	56	0		
	GNV	74	2	56			677,899
Camión	Diésel	1763	10	56		3,253,951	
	Gasolina		11	56	0		
	GNV		4	56			0
TOTAL CONSUMO DE COMBUSTIBLE					28079009.59	5639721.177	1900048.7

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.6 Comparación de ventas vs. consumo estimado de combustible

De acuerdo con la estimación de consumo de combustibles y las ventas reportadas, **Figura 9**, es apreciable la diferencia entre las ventas de gasolina y la estimación de consumo de gasolina asociado al parque automotor. En el municipio de Palmira, las ventas reportadas por SICOM, son cerca de 2 veces menos a la estimación del consumo de acuerdo con la actividad del parque automotor. En contraste, para el combustible diesel y GNV se observa que Palmira tiene unas ventas mayores que el consumo estimado para el parque automotor matriculado, en cerca de un 10% y 42.7% más. Esto sugiere que existe una actividad vehicular o industrial que demanda diésel y GNV que se vende o consume en el municipio, pero los vehículos no están registrados en Palmira. Para el caso de la gasolina, es posible que los vehículos compren el combustible en otros municipios del área conurbada. El diesel puede estar siendo utilizado por vehículos de carga registrados en otros municipios y para uso agroindustrial. El GNV es usado principalmente por vehículos de servicio público municipal e intermunicipal.



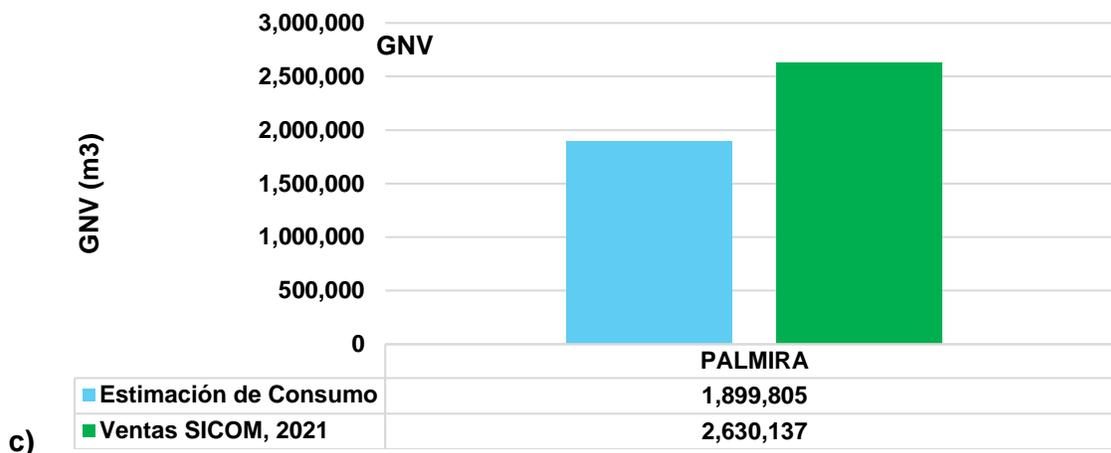


Figura 9. Comparativo entre la estimación de consumo y ventas según SICOM de a) gasolina y b) Diésel y c) GNV.

Fuente: Elaboración Propia.

2.3 ESTIMACIÓN TOP-DOWN DE EMISIONES DE CO₂

La estimación de emisiones vehiculares a través del enfoque Top-Down utiliza información global del municipio, parque automotor, actividad vehicular, y factores de emisión agregado por tipología de vehículos. Esta estimación busca tener una cifra de las emisiones de CO₂, y determinar la coherencia de las emisiones obtenidas por el enfoque Bottom-up. Para esto, se ha estimado las emisiones de CO₂ por el enfoque Top-Down, las cuales serán la referencia para el contraste del inventario por enfoque Bottom-up.

La estimación de emisiones de CO₂ se determinó a partir de la **Ecuación 3**

$$E_{CO_2j} = \sum_k FE_{CO_2k} * FA_{jk} * N_{vehjk} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

E_{CO_2j} , sumatoria de emisiones de CO₂ por cada combustible k y cada categoría j (t año⁻¹)

FE_{CO_2k} , factor de emisión del contaminante CO₂ por cada tipo de combustible k (g km⁻¹ veh⁻¹)

FA_{jk} , factor de actividad (consumo de combustible) de cada combustible k por cada vehículo j (galones vehiculo⁻¹)

N_{vehjk} , número de vehículos existentes en la categoría j que consumen el combustible k

Para el cálculo del Factor de actividad (FA_{jk}) se aplicó la siguiente ecuación:

$$FA_{jk} = (AV_j * 330) * \frac{1}{Rend_{kj}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde,

FA_{jk} , consumo del combustible k por cada vehículo de la categoría j (galones vehiculo⁻¹)

AV_j , actividad vehicular diaria de cada categoría j (km vehiculo⁻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

Por otra parte, se utilizó el factor de emisión CO₂ de cada combustible, reportados por la UPME (**Tabla 5**)

Tabla 5. Factores de emisión para el inventario de emisiones por fuentes móviles del municipio de Palmira, de acuerdo con la UPME.

FE [kg CO ₂ /gal]	Gasolina Corriente	Gasolina Extra	ACPM / DIESEL (BIODIESEL)
		8.809	8.809

Fuente: UPME, 2016

Aplicando la **Ecuación 1**, se calcularon las emisiones de CO₂ tanto para el consumo de combustibles estimado (

Tabla 6), como para las ventas reportadas por el SICOM (**Tabla 7**).

Tabla 6. Emisiones de CO₂ por tipo de combustible de acuerdo con el consumo estimado del parque automotor registrado en Palmira.

Variable	Gasolina (gal)	Diésel (gal)	Gas natural (m ³)
Consumo	28,079,009.592	5,639,721.177	1900048.700
Factor de Emisión (kg CO ₂ /gal, líquidos) y (kgCO ₂ /m ³ st, GNV)	8.809	10.149	2.179
TOTAL CO ₂ (kg)	247,333,955.989	57,237,530.224	4,140,016.112
TOTAL CO ₂ (Ton año ⁻¹)	308,711.502		

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 7. Emisiones de CO₂ por tipo de combustible de acuerdo con el consumo reportado por el SICOM y SUI en Palmira.

Variable	Gasolina (gal)	Diésel (gal)	Gas natural (m ³)
Consumo	16,910,000.000	6,060,000.000	2,630,137.000
Factor de Emisión [kg CO₂/gal, líquidos] y [kgCO₂/ m³ st, GNV]	8.809	10.149	2.179
TOTAL CO₂ [kg]	148,951,735.000	61,502,940.000	5,730,805.509
TOTAL CO₂ [Ton año⁻¹]	216,185.481		

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con la estimación Top-Down de las emisiones de CO₂ tanto por el consumo estimado de combustibles, como por las ventas de combustibles reportadas por SICOM, la combustión de la gasolina es el mayor emisor de CO₂, seguido del Diesel y el GNV. No obstante, ambas aproximaciones presentan una diferencia en las toneladas de CO₂ emitidas a la atmosfera, ya que la aproximación por la estimación de consumo de combustible es cerca de 30% más alta, que la aproximación por las ventas.

2.4 ESTIMACIÓN BOTTOM-UP

La estimación de emisiones por el enfoque Bottom-Up, permite un análisis detallado de las emisiones vehiculares a partir de datos locales de alta resolución o con mayor nivel de detalle de: los factores de emisión, flujos vehiculares, longitud de la malla vial y/o perfiles de tráfico. Para este inventario se estimaron emisiones por contaminante y categoría vehicular aplicando la ecuación

$$E_i = FE_{ij} * F_{jk} * L_k \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde,

E_i , es la emisión del contaminante (i)

FE_{ij} , es el factor de emisión del contaminante (i) para la categoría vehicular (j)

F_{jk} , es el flujo vehicular de la categoría vehicular (j) en la vía tipo (k)

L_k , es la longitud de la vía tipo k

2.4.1 Actividad vehicular

2.4.1.1 Velocidad promedio en la malla vial

Uno de los parámetros de entrada (Input) requeridos por el software COPERT 5.5 es la velocidad relacionada a distintos tramos y aspectos de la malla vial. Esta velocidad puede ser solicitada de manera general, por tipología de vía o por hora pico y valle.

Los tramos que fueron seleccionados para la captura de información de velocidades a través de la API Google Maps, son aquellos que pasan por los puntos en donde se realizaron los aforos CVC-UNAL 2021 (**Figura 10**). Puesto que en la definición de estos fueron tenidas en cuenta características como la tipología vial, lo que garantiza representatividad de la malla vial del municipio de Palmira.

Estas velocidades se capturaron con una frecuencia de 30 minutos en un rango horario comprendido entre las 6:00am y las 12:00pm de los días sábado, domingo, lunes y martes. Dicha franja incluye variaciones en el flujo vehicular abarcando así las mencionadas horas pico y horas valle, por otro lado, la captura de información en diferentes días permite obtener datos que incluyan las variaciones en las velocidades generadas por la dinámica semanal del municipio.

Posterior a la recolección de información, se analizaron los datos de manera que se obtuvo el promedio por tramo vial, por punto y por tipología de vía tanto para las horas valle como para las horas pico, tal y como se muestra en la **Tabla 8**

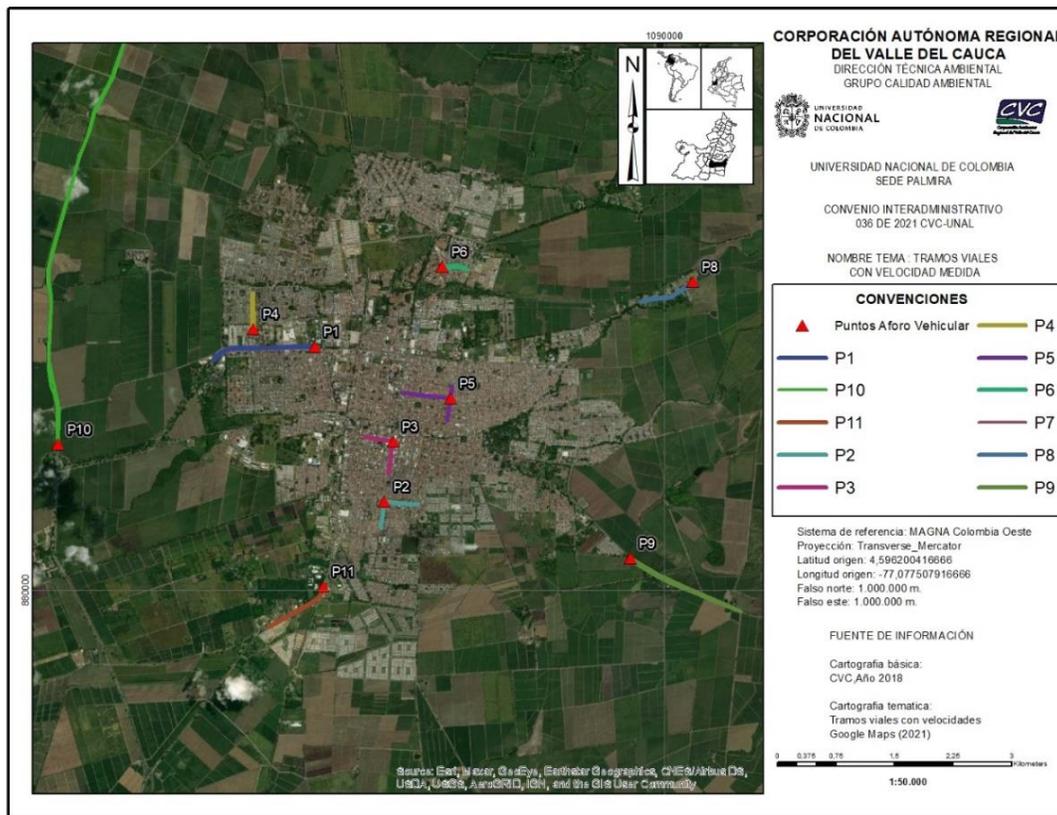


Figura 10. Tramos viales con velocidad promedio medida en el municipio de Palmira.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 8. Velocidades promedio de la malla vial del municipio de Palmira en horas pico.

Vías urbanas velocidad promedio hora (km/h)				
Punto de aforo	Tramo	Velocidad (km/h)	Velocidad promedio punto (km/h)	Velocidad promedio por tipo vía (km/h)
P1	Calle 42 Occi-Ori (Entrada Palmira)	20	21	22
P1	Calle 42 Ori-Occi (Salida Palmira)	22		
P2	Carrera 28 (Norte-Sur)	10	18	
P2	Calle 23(Occi-Ori)	26		
P3	Carrera 28 (Norte-Sur)	12	17	
P3	Calle 31 Ori-Occi	22		
P4	Carrera 43 Norte-Sur	28	28	
P4	Carrera 43 Sur-Norte	28		
P5	Calle 37 Ori-Occi	19	23	
P5	Carrera 21 Sur-Norte	27		
P6	Calle 57 Ori-Occi	18	19	
P6	Calle 57 Occi-Ori	20		
P11	vía Palmira-Candelaria (UNAL)	26	26	
P11	vía Candelaria-Palmira (UNAL)	26		
Highway velocidad promedio hora pico (km/h)				
Punto de aforo	Tramo	Velocidad (km/h)	Velocidad promedio punto (km/h)	Velocidad promedio por tipo vía (km/h)
P7	Recta Cali-Palmira	90	90	72
P7	Recta Palmira-Cali	90		
P9	vía Palmira-Pradera	49	51	
P9	vía Pradera-Palmira	53		
P10	Cerrito-Palmira	80	76	
P10	Palmira-Cerrito	72		
Vías rurales velocidad promedio hora pico (km/h)				
Punto de aforo	Tramo	Velocidad (km/h)	Velocidad promedio punto (km/h)	Velocidad promedio por tipo vía (km/h)
P8	Vía Palmira-Tablones	30	29	29
P8	vía Tablones-Palmira	29		

Fuente: Elaboración Propia.

2.4.1.2 Aforos vehiculares

Los conteos vehiculares realizados para este estudio, ubicados conforme a la **Figura 11**, permitieron realizar la medición del tráfico del municipio de Palmira durante las 24 horas de 4 días (jueves, viernes, sábado y domingo) para un total de 96 horas de grabación por punto de aforo.

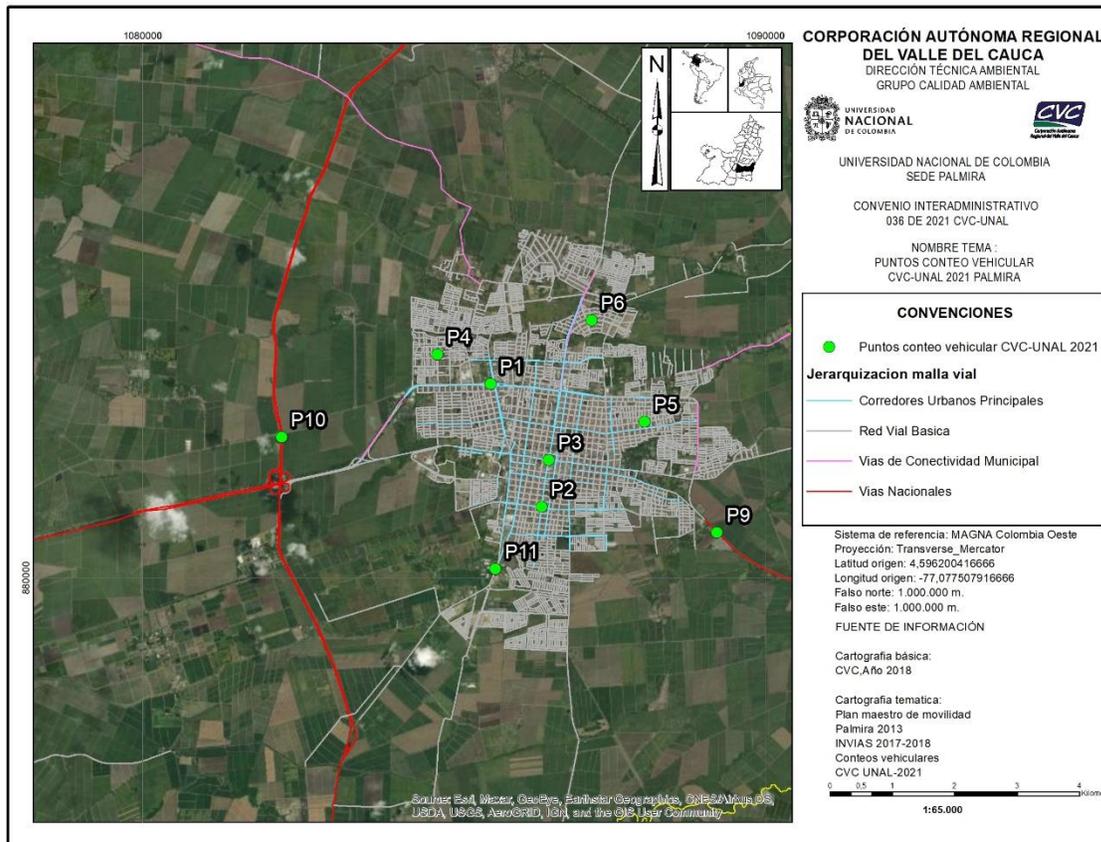


Figura 11. Ubicación de puntos de aforo vehicular 2021 municipio de Palmira

Fuente: Elaboración propia.

Las características asociadas a los puntos de aforo, movimientos registrados, número de carriles de las vías aforadas y clasificación de estas vías según la jerarquía vial se presentan en la **Tabla 9**. Estas características se definen en la sección 2.4.1.4 son empleadas posteriormente en la distribución del flujo vehicular.

La recolección de información se realizó por medio de registro fílmico con cámaras de video. Dichos videos fueron analizados posteriormente de forma computarizada con Deodata. Estos conteos vehiculares se realizaron para las siguientes categorías vehiculares.

- Livianos
- Motos
- Buses
- Camiones de 2 ejes
- Camiones de 3 y 4 ejes
- Camiones de 5 ejes
- Camiones de 6 ejes

Tabla 9. Características de los puntos aforo vehicular Palmira

Punto	Nombre de la vía	Movimiento	Tipo de vía	Número de carriles
P1	Calle 42	4	VCM	2
P1	Calle 42	3	VCM	2
P2	Carrera 28	1	CUP	2
P3	Carrera 28	1	CUP	2
P3	Calle 31	4	CUP	1
P4	Carrera 43	1	RVB	2
P4	Carrera 43	2	RVB	2
P5	Carrera 21	2	RVB	1
P5	Calle 37	4	RVB	2
P6	Calle 57	3	RVB	2
P6	Calle 57	4	RVB	2
P7	Recta Cali-Palmira	3	VNA	3
P7	Recta Cali-Palmira	4	VNA	3
P8	Vía Tablones	3	VCM	1
P8	Vía Tablones	4	VCM	1
P9	Vía Pradera	3	VNA	1
P9	Vía Pradera	4	VNA	1
P10	Variante Buga	1	VNA	2
P10	Variante Buga	2	VNA	2
P11	Carrera 32	1	CUP	1
P11	Carrera 32	2	CUP	1

Fuente: Elaboración propia.

Debido a las características del análisis computarizado, se realizó un conteo unificado de taxis y particulares en la categoría livianos, no obstante, mediante aforos manuales realizados entre las 7:00 y 18:00 en los mismos puntos de aforo computarizado, se logró transformar la categoría de livianos en particulares y taxis. Esta transformación se obtiene por medio de una relación porcentual de vehículos tipo taxi y vehículos particulares tipo automóvil, campero y camioneta, el cual se presenta en la **Tabla 10**, donde se puede concluir que el 87.7% de los vehículos livianos de los aforos corresponde a vehículos particulares, y el restante 12.3% corresponde a vehículos tipo Taxi.

Tabla 10. Relación de vehículos particulares y taxis.

Tipo de vehículo	Número de vehículos aforados	Relación porcentual del aforo de vehículos livianos
Particulares (Automóvil, Camioneta, Campero)	1,763	87.7%
Taxis	247	12.3%

Fuente: Elaboración propia

2.4.1.3 Características del flujo vehicular

A partir de los datos de conteos quinceminutales realizados por medio de la metodología de conteo automático (aforos vehiculares) se obtuvieron los perfiles horarios para cada categoría vehicular en los 11 puntos de aforos ubicados en la ciudad de Palmira. La **Figura 12** es un ejemplo del perfil horario por día para el punto de aforo P1 ubicado en la Calle 42, este análisis se realizó para todos los puntos de aforo (Ver Anexo B). Para algunas categorías vehiculares tales como los Livianos y Buses es posible identificar un comportamiento estacional en la magnitud de los conteos, sin embargo, podemos ver categorías vehiculares tales como motos y camión de 2 ejes donde el comportamiento del domingo se desvía del comportamiento de los demás días de la semana. Adicionalmente, los perfiles horarios de categorías vehiculares que no presentan un flujo continuo durante el día se caracterizan por tener un comportamiento intermitente, como es posible ver en el perfil horario correspondiente a la categoría de Camión de 5 ejes.

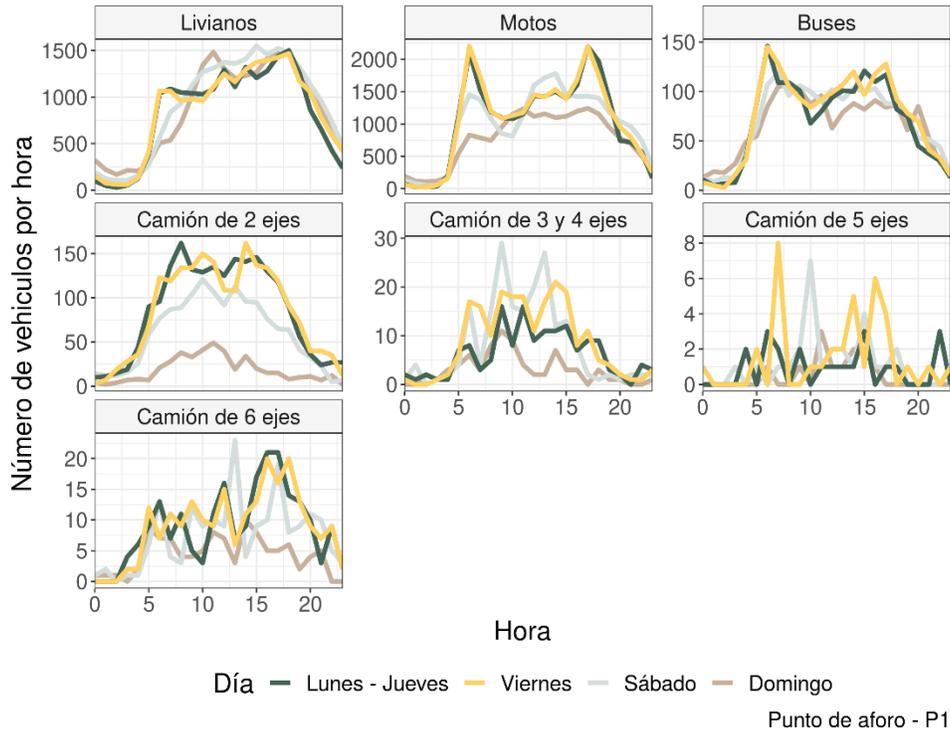


Figura 12. Perfiles de conteos vehiculares horarios para el punto de aforo P1 por categoría vial para los días de la semana.

Fuente: Elaboración Propia.

La **Figura 13** presenta el conteo total de vehículos por punto de aforo y categoría vehicular para el día típico (lunes a jueves). El punto de aforo P7 ubicado en la Recta Cali – Palmira presentó el mayor conteo total de vehículos con 50,372, seguido por P1 en la Calle 42 con 48,537 y P3 en la intersección de la Carrera 28 con Calle 31 con 28,103 vehículos. En P7

el 49.7% de los vehículos son motos, el 37.9% son livianos, el 12.4% restante corresponde a las categorías de buses y camiones. En el caso de P1 se pueden encontrar que las proporciones por categoría vehicular se aproximan a las encontradas en P7. En general, para todos los puntos de aforo las categorías vehiculares que gobiernan el volumen de vehículos son las motos y los livianos.

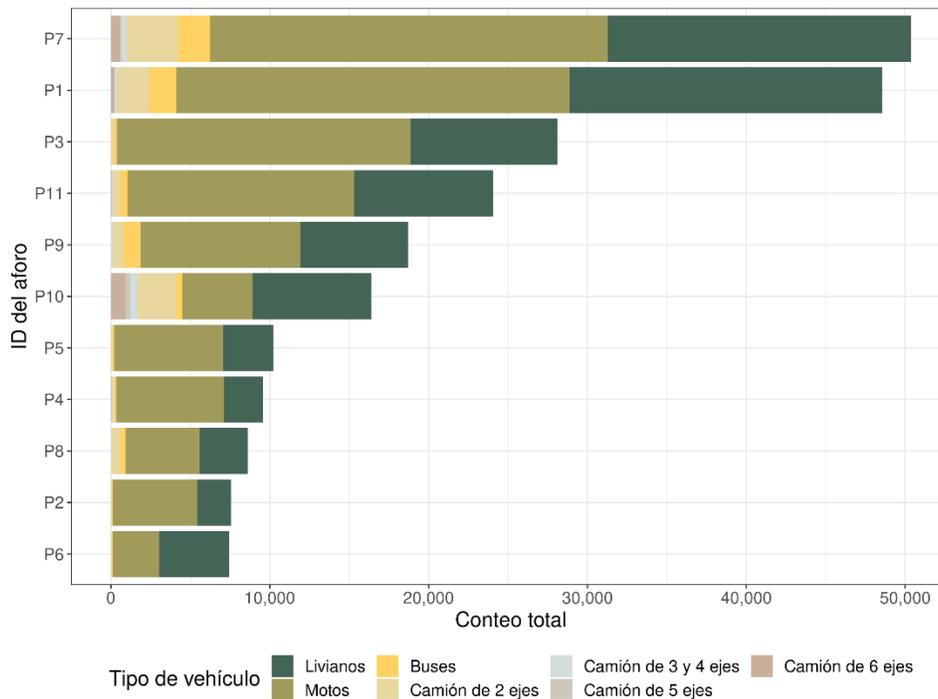


Figura 13. Diagrama de barras para el conteo total de vehículos por punto de aforo y categoría vehicular para el día típico.

Fuente: Elaboración Propia.

La **Figura 14** presenta el diagrama de puntos y barras para el conteo por carril en cada punto de aforo, el punto representa el valor promedio y el extremo de la barra el valor máximo obtenido. Los valores promedio y máximo más altos, fueron registrados en el conteo por carril para la categoría de motos en el punto de aforo P11 ubicado en la Carrera 32, con un valor de 292 y 674 motos por carril, respectivamente; este comportamiento es asociado a la tipología de esta vía (CUP) y la gran cantidad de motocicletas reportadas en el parque automotor. También es notable que para el punto de aforo P10 ubicado en la Variante Buga se obtuvieron los promedios y máximos de conteos por carril más altos para las categorías de Camiones, excepto para la categoría de Camión de 2 ejes donde el mayor promedio se obtuvo en el aforo P7 correspondiente a la Recta Cali – Palmira. El comportamiento de los camiones en las vías nacionales era de esperarse, ya que este tipo de vías funcionan como corredores interdepartamentales y conectan a Palmira con el resto del país y por tanto puede haber un mayor flujo de vehículos de carga. Así mismo, la categoría de livianos obtuvo el conteo promedio más alto en el punto P1 ubicado sobre la Calle 42, lo

cual es coherente con el tipo de vía (CUP), ya que la calle 42 es una de las entradas y salidas del municipio por lo tanto recibe en gran medida los vehículos que se desplazan de Cali-a Palmira y de Palmira-a Cali. Mientras que, los buses obtuvieron los valores más altos en el punto P9, sobre la vía Palmira - Pradera, una vía nacional por la cual transitan buses, en su mayoría intermunicipales, que conectan municipios como Pradera y Florida con Palmira.

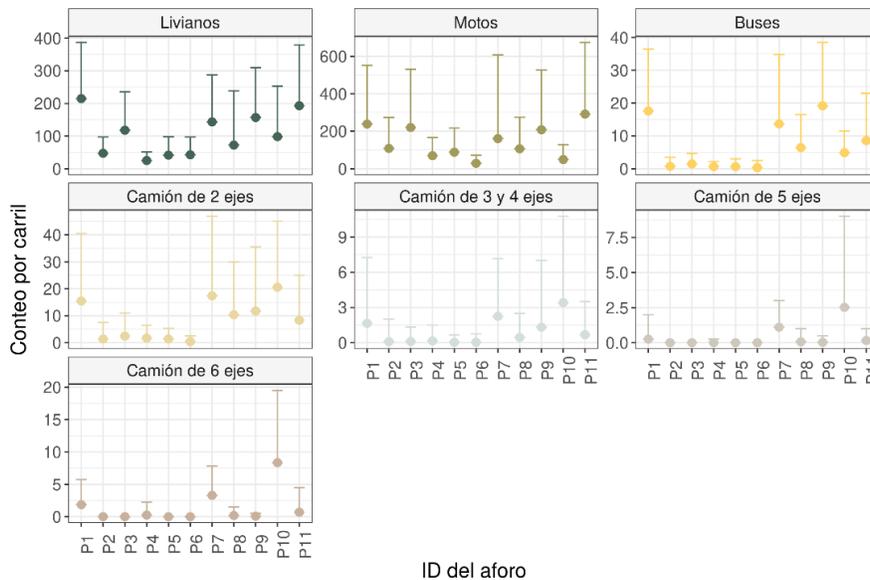


Figura 14. Diagrama de puntos y barras para el promedio y máximo del conteo por carril de vehículos por punto de aforo y categoría vehicular.

Fuente: Elaboración Propia.

Con relación a lo anterior se puede apreciar que la ubicación de los aforos permite analizar la dinámica del tráfico para cada categoría vehicular en específico. Los promedios y máximos de conteos por carril más altos para cada categoría vehicular no se hayan en un solo punto de aforo, sino que se encuentra distribuidos entre los puntos P1, P7, P9, P10 y P11. Esto probablemente se debe a las características de las vías y la interacción del tráfico que confluye por las mismas.

Los VKT totales por día es un indicador importante para evaluar las características en una red de transporte. La **Figura 15** presenta los diagramas de Pareto de la contribución relativa a los VKT totales por cada punto de aforo para cada día de la semana. Se observa que los puntos de aforos P1 (vía secundaria), P4, P5 (vías terciarias), P7 y P10 (vías primarias) contribuyen aproximadamente al 80 % del total de VKT por día. La contribución significativa al indicador de VKT por día, puede estar relacionado con el número y la longitud de las vías que encierra el polígono de Thiessen relacionado a ese punto de aforo, es decir, esos puntos de aforo contienen más vías y posiblemente segmentos de vía de mayor longitud con respecto a los demás.

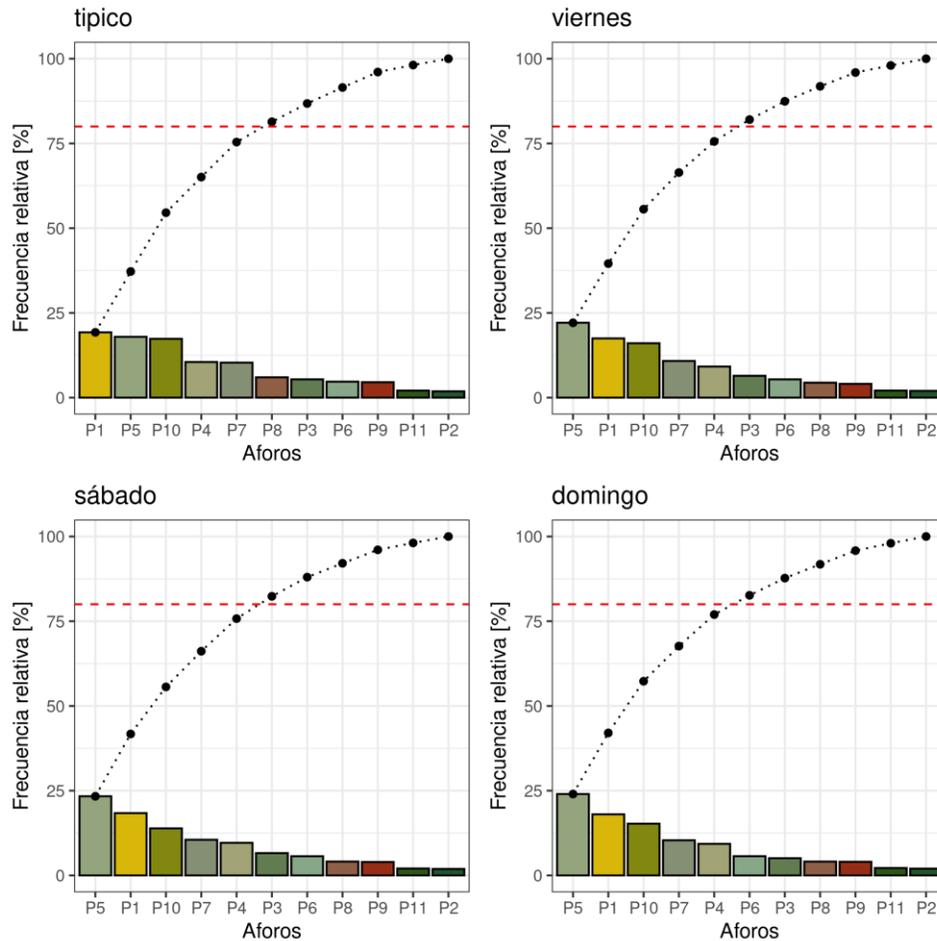


Figura 15. Diagramas de Pareto de la contribución a los VKT totales por día y punto de aforo

Fuente: Elaboración propia.

2.4.1.4 Caracterización de la malla vial (L_k)

La información base de jerarquización vial obedece a la dispuesta por el Plan Maestro de Movilidad 2013 del municipio de Palmira, en cual se divide la malla vial en 4 tipos de vías, a las cuales se le asignó una clasificación adicional asociada al comportamiento de flujo y su importancia dentro de la red vial, como se muestra en la **Tabla 11**, con el fin realizar el proceso de estimación del tráfico mediante polígonos de Thiessen

Tabla 11. Categorías viales del municipio de Palmira

Categoría	Acrónimo	Clasificación para Thiessen
Vías Nacionales	VNA	Primaria
Vías de Conectividad Municipal	VCM	Secundaria
Corredores Urbanos Principales	CUP	Secundaria
Red Vial básica	RVB	Terciaria

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el proceso de estimación del flujo vehicular tiene como insumo de cálculo la malla vial y sus características de tipo de vía, longitud y número de carriles por sentido y número de sentidos de flujo. Se realizó una revisión de estas, ajustando las propiedades de cada objeto espacial, principalmente en aquellas vías que se encuentran representadas en dos calzadas y que de esta manera no existiera duplicidad geográfica. Adicionalmente las vías que presentaban cambio de sección fueron divididas y ajustadas, de forma 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 de acuerdo con las características físicas de las vías, principalmente en vías rurales sin pavimentar y en vías urbanas con poco ancho efectivo y que adicionalmente tienen una función de acceso a predios (**Figura 16**), que, si bien es funcional 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 16. Ejemplo vía rural y urbana del municipio de Palmira con reducción de capacidad

Fuente: Google Maps

Para finalizar este proceso se realizaron dos etapas de depuración, en la primera se realizó la eliminación de la malla vial en predios privados, ya que estas no presentan el comportamiento de la malla vial general. En segundo lugar, se realizó la verificación y eliminación de las vías duplicadas para evitar sobre estimaciones.

2.4.1.1 Distribución del flujo vehicular (F_{jk})

El método para la estimación del flujo vehicular fue basado en polígonos de Thiessen, el cual permite estimar un área de influencia donde se asumen características propias del punto de medición que lo genera. La metodología de generación de los polígonos de Thiessen traza los límites de los polígonos de forma tal que la distancia euclidiana desde cualquier lado de los polígonos sea igual a cualquiera de los puntos más cercanos, esto garantiza que cualquier ubicación dentro de un polígono tiene una distancia menor al punto de medición que lo genera que a cualquier otro punto del sistema analizado.

La metodología de polígonos de Thiessen se ha empleado en la hidrología, con el fin de determinar la distribución de propiedades hidrológicas de una zona de estudio, en materia Transporte se han empleado para determinar áreas de influencia de aeropuerto e incluso se han empleado en la determinación de cobertura de centros médicos (Cuza et al., 2020).

En este estudio se emplea esta metodología con el fin de estimar el flujo vehicular, el cual se expandió como una característica de las vías dentro del área de influencia de cada polígono. Los cuales fueron estimados a partir de los puntos de aforo vehicular y divididos en tres categorías viales, Primarias, Secundarias y Terciarias, como se muestran en la **Tabla 12**. Los polígonos resultantes de esta segregación se muestran en la **Figura 17** y un ejemplo de los resultados obtenidos en la **Figura 18**.

Se aclara que al hacer el análisis de los puntos de aforo se consideró que la Recta Cali-Palmira presenta unos volúmenes vehiculares propios de esa vía, los cuales son fueron aplicados únicamente a esta, para las demás vías al interior del polígono generado por P7 se emplearon los aforos de P10 para la estimación de su flujo vehicular.

Tabla 12. Agrupación de puntos de aforo para definición de polígonos de Thiessen

Nombre punto de aforo	Tipo de vía	Clasificación para Thiessen
P1	VCM	Secundaria
P2	CUP	Secundaria
P3	CUP	Secundaria
P4	RVB	Terciaria
P5	RVB	Terciaria
P6	RVB	Terciaria
P7	VNA	Primaria
P8	VCM	Secundaria
P9	VNA	Primaria
P10	VNA	Primaria
P11	CUP	Secundaria

Fuente: Elaboración propia

Esta agrupación, siguiendo el proceso descrito en la **Figura 3**, permite la estimación de flujo vehicular por segmento vial según su clasificación a partir de la **Ecuación 6**:

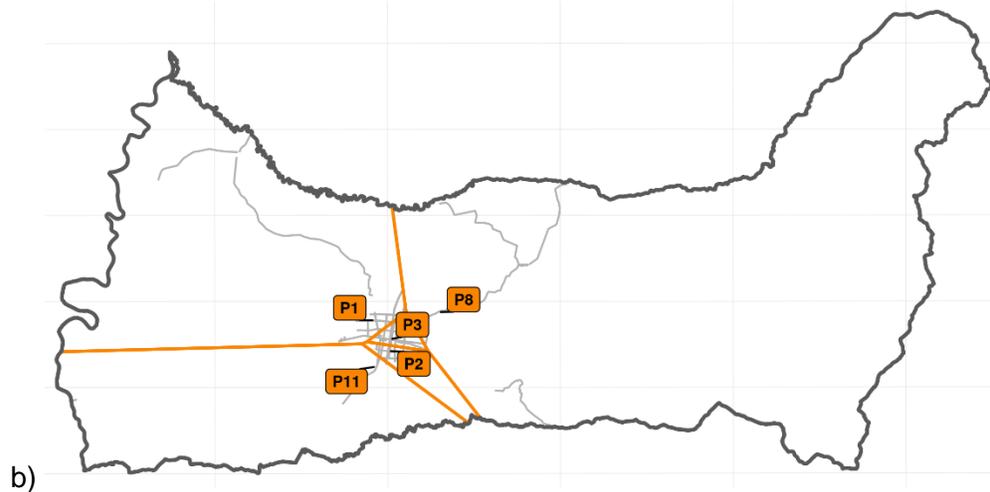
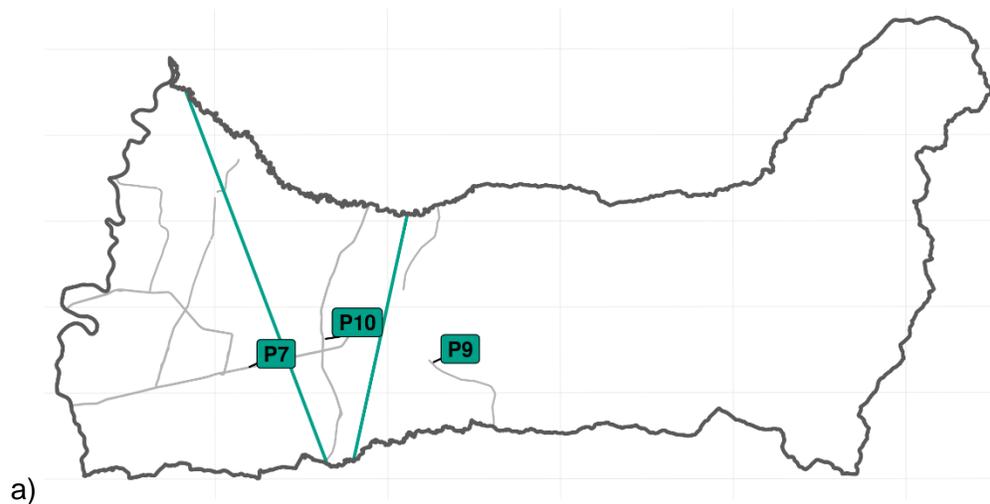
$$FV_{n,c,h,d,t} = FN_{t,h,d} * C_n \quad \text{Ecuación 6}$$

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"



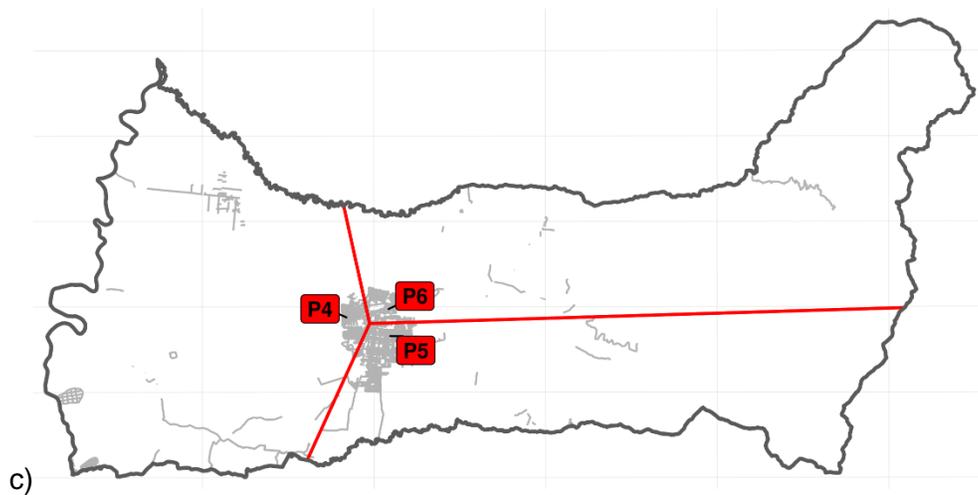


Figura 17. Polígonos de Thiessen por categoría vial a) vías primarias, b) vías secundarias, c) vías terciarias.

Fuente: Elaboración propia.

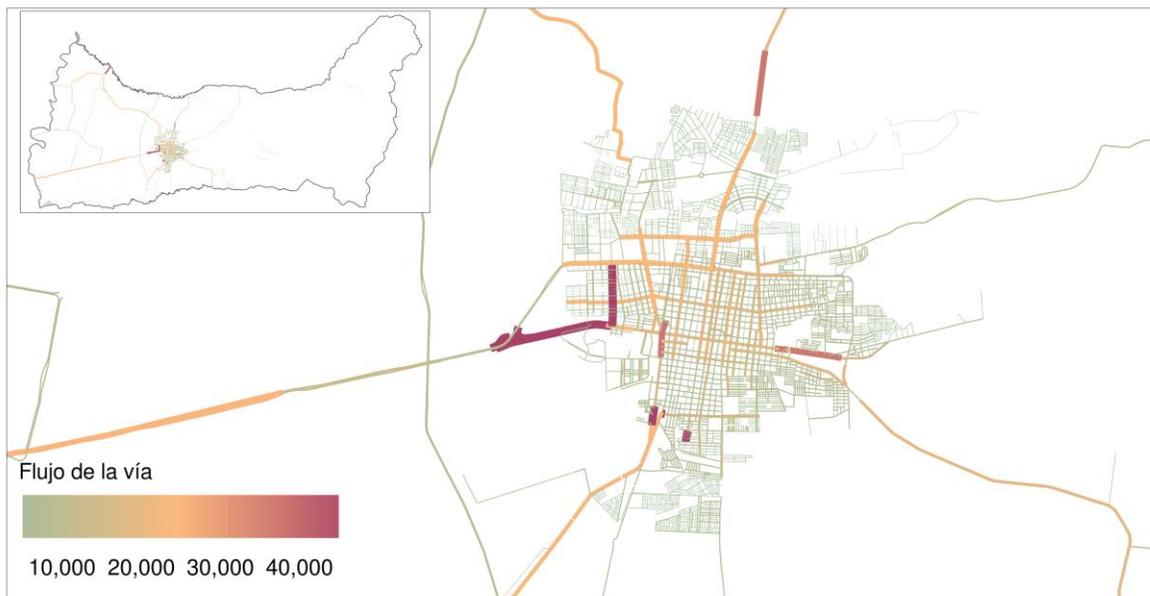


Figura 18. Mapa de flujo vehicular día típico 24 horas

Fuente: Elaboración propia.

2.4.1.2 Factor de actividad

Una vez se realiza la distribución del flujo vehicular, y con el fin de obtener el factor de actividad vehicular definitivo, se estiman los kilómetros recorridos por cada tipología vehicular por medio de la **Ecuación 7**:

$$KR_{m,h,d} = \sum FV_{n,c,h,d,t} * L_n \text{ Ecuación 7}$$

$KR_{m,h,d}$ Kilómetros recorridos de la tipología vehicular “m”, en la hora “h” del día “d”

L_n Longitud en kilómetros del segmento vial “n”

En la **Tabla 13** se presenta el resumen de los kilómetros recorridos diarios por cada tipología vehicular, y en la **Figura 19** se presenta la distribución geográfica de los kilómetros recorridos para todos los vehículos agrupados para el día típico, la desagregación horaria y por tipo de vía podrá ser consultada en el Anexo C.

Tabla 13. Kilómetros recorridos por día y tipo de vehículos en los días evaluados

Tipo Vehículo	Domingo		Sábado		Viernes		Día típico		Total
	Kilómetros recorridos	Porcentaje	Kilómetros recorridos						
Particulares	2,262,940	39%	2,723,067	35%	2,516,196	33%	2,353,171	32%	9,855,373
Taxis	317,379	5%	381,912	5%	352,899	5%	330,034	5%	1,382,225
Motos	2,988,532	51%	4,066,090	53%	4,172,468	55%	4,030,463	55%	15,257,554
Buses	118,970	2%	145,863	2%	158,104	2%	146,731	2%	569,669
Camión de 2 ejes	103,992	2%	257,637	3%	328,301	4%	321,338	4%	1,011,267
Camión de 3 y 4 ejes	19,728	0%	33,831	0%	34,938	0%	37,521	1%	126,018
Camión de 5 ejes	16,188	0%	16,388	0%	16,016	0%	19,608	0%	68,200
Camión de 6 ejes	37,402	1%	56,188	1%	76,925	1%	70,109	1%	240,625
Total	5,865,132	100%	7,680,977	100%	7,655,846	100%	7,308,974	100%	2,510,930

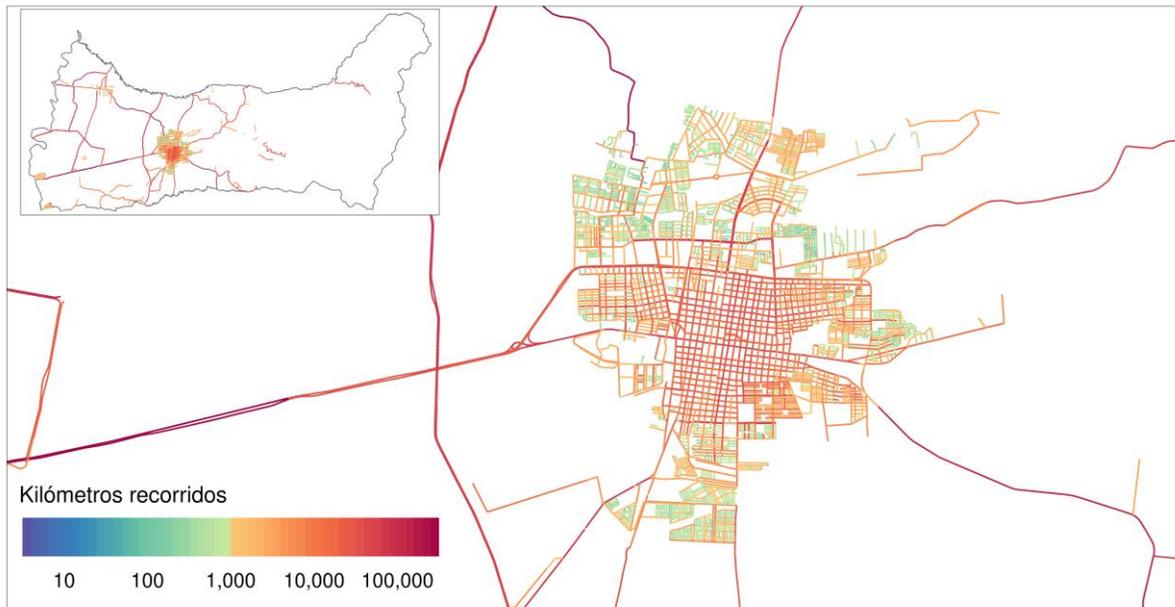


Figura 19. Kilómetros recorridos de todas las categorías vehiculares para el día típico por tramo vial

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2 Factores de emisión (FE_{ij})

Para este estudio se determinaron factores de emisión para las fuentes móviles en ruta a partir del modelo COPERT, que es un modelo desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente, para el cálculo de emisiones vehiculares en carretera a nivel local y nacional. Estima emisiones y factores de emisión de los contaminantes criterio, GEI, COV, COVM y metales (Emisia SA, 2021).

El modelo COPERT puede ser aplicado a través del software libre que dispone (<https://www.emisia.com/utilities/copert/download/>). En este inventario se utilizó la última versión disponible, COPERT 5.5. Además, el software permite estimar los factores y las emisiones de acuerdo con la disponibilidad de información en nivel 2 o nivel 3. Para Palmira se utilizó el nivel 3, el cual es el nivel más detallado tanto en datos de entrada como en el cálculo interno del software de los factores de emisión y las emisiones. Los datos de entrada que requiere el software se pueden observar en la **Figura 20**.

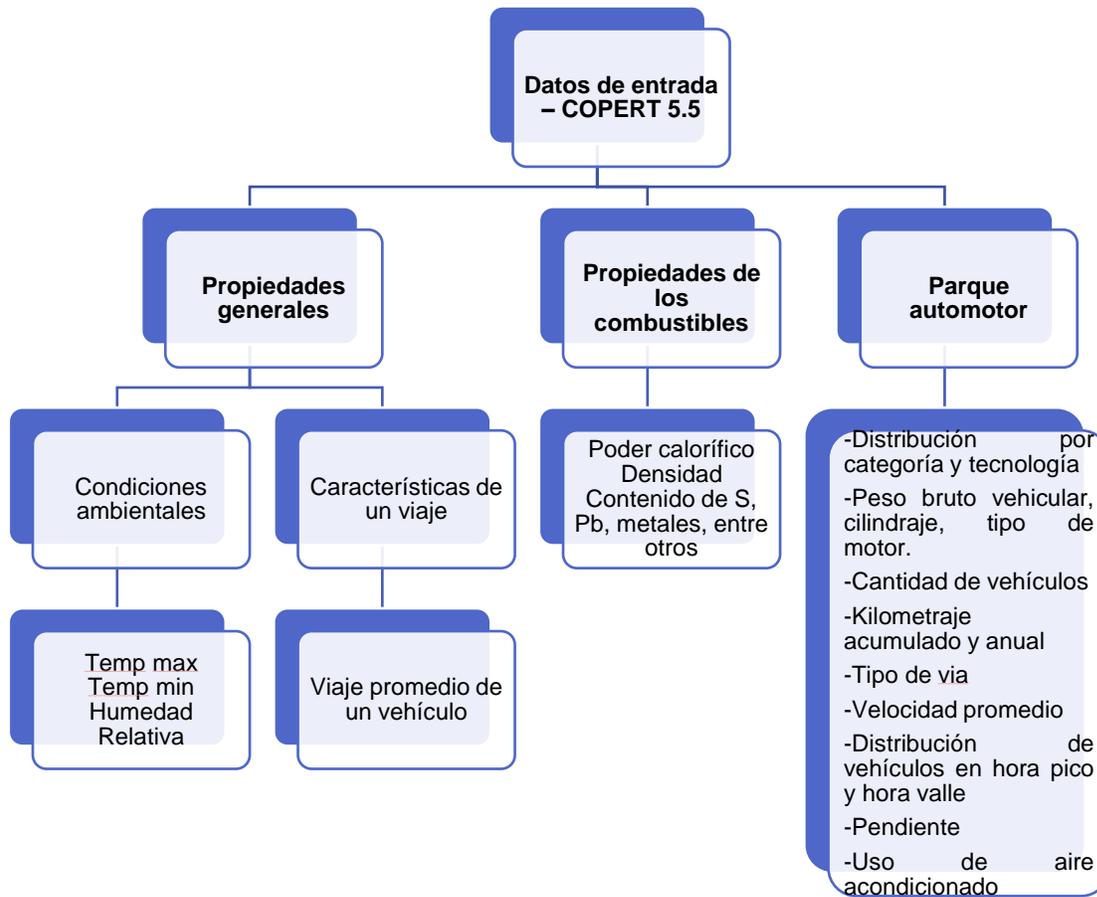


Figura 20. Esquema metodológico para la estimación de factores de emisión vehicular mediante el modelo COPERT 5.5.

2.4.2.1 Propiedades generales

Las propiedades generales de entrada para el modelo COPERT corresponden a información ambiental de las temperaturas máximas y mínimas y la humedad relativa de cada mes del año del estudio, y 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 se demora la flota en recorrer ese trayecto.

Para Palmira se tomó información meteorológica de la estación meteorológica Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira (UNP). Y se asumió un viaje típico de 18.05 km con una duración de 0.51 hora, de acuerdo con la información de la velocidad promedio de la ciudad (sección 2.2.1.3) y los kilómetros diarios recorridos según la actividad reportada por CDA (sección 2.1.2) (ver Anexo D y Anexo E).

2.4.2.2 Propiedades de los combustibles

Las características de los combustibles consumidos durante el periodo del inventario que requiere el modelo COPERT son determinantes para estimación y composición de las emisiones. Para este estudio 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 (ver Anexo D y Anexo E).

2.4.2.3 Características del parque automotor

La caracterización y distribución del parque automotor es importante para la determinación de los factores de emisión, ya que estos dependen de la tecnología de cada vehículo, el combustible que usa, la actividad vehicular, entre otras. Para determinar las características de la flota vehicular se utilizó información disponible y se asumieron algunas variables, como se describe a continuación.

2.4.2.4 Estándar euro

El estándar EURO indica el nivel de las tecnologías que puede tener un vehículo, en términos de control de emisiones. Para cada vehículo del parque automotor de Palmira se definió a partir del calendario de introducción de las tecnologías vehiculares al país, como se muestra en la **Tabla 14**.

Tabla 14. Calendario de introducción de tecnologías a Colombia.

CATEGORIA	COMBUSTIBLE	1990 y antes	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
		AUTOMOVILES Y TAXIS	DIESEL - PRIVADO	CONVENTIONAL																		EURO 2		EURO 4									
DIESEL - PUBLICO	CONVENTIONAL																		EURO 2		EURO 4												
GASOLINA	ECE 15/04						EURO 1												EURO 3		EURO 4												
GN - GLP - PRIVADO	EURO 4																																
GN - GLP - PUBLICO	EURO 4																																
GASOLINA - ELECTRICO	EURO 6																																
CAMIONES	DIESEL - PRIVADO	CONVENTIONAL																		EURO 2		EURO 4		EURO 5									
	DIESEL - PUBLICO	CONVENTIONAL																		EURO 2		EURO 4		EURO 5									
	GASOLINA	CONVENTIONAL						EURO 1												EURO 3													
	GAS - DIESEL (DUAL)	CONVENTIONAL						EURO 3			EURO 4			EURO 5			EURO 6																
	GN - GLP - PRIVADO	NO HAY EQUIVALENCIA EN MODELO COPERT																															
	GN - GLP - PUBLICO	NO HAY EQUIVALENCIA EN MODELO COPERT																															
AUTOBUSES	DIESEL - PRIVADO	CONVENTIONAL																		EURO 2		EURO 4		EURO 5									
	DIESEL - PUBLICO	CONVENTIONAL																		EURO 2		EURO 4		EURO 5									
	GASOLINA	CONVENTIONAL						EURO 1												EURO 2	EURO 3												
	GN - GLP - PRIVADO	CONVENTIONAL																		EURO 2			EURO 4										
	GN - GLP - PUBLICO	CONVENTIONAL																		EURO 4													
MOTOS	GASOLINA	CONVENTIONAL																		EURO 2													

Adaptado de: Trejos, 2021

2.4.2.5 Segmento

Una vez definido el estándar EURO para cada vehículo, se determinó el segmento y la categoría a la cual pertenecía cada vehículo de acuerdo con las reglas de clasificación de la guía de COPERT. En la **Tabla 16** se puede observar las categorías, segmentos, reglas de clasificación que se utilizaron y la base de datos de RUNT utilizada.

Para la asignación del segmento fue necesario conocer el cilindraje en los autos particulares y taxis, peso vehicular (PBV) en vehículos pasados y buses, y el tipo de motor y cilindraje de las motos.

El cilindraje del parque automotor se obtuvo de la base de datos del RUNT, y aquellos vehículos que no tenían esta información o tenían datos errados como 0 o cilindrajes muy bajos se les asignó un cilindraje de 1201 cc, de tal forma que el segmento asignado fuese “Small” y se pudiera asociar a un standard Euro más apropiado.

El PBV de los vehículos pesados fue asignado de acuerdo con la tabla de estandarización de PBV del Ministerio de Transporte¹ y de la base de datos de la caracterización vehicular del parque automotor de Manizales (Trejos, 2021), este proceso permitió asignar el PBV al 21% de los vehículos pesados registrados en el municipio posteriormente, para realizar la asignación de los faltantes, se estableció una relación entre el cilindraje (reportados en el RUNT) y el PBV y de esta manera establecer una relación, ver **Tabla 15**, que permitiera clasificar los vehículos faltantes.

Tabla 15. 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.

Por otro lado, el tipo de motor de las motocicletas fue asignado asumiendo que todas las motocicletas con modelos superiores a 2009 son motocicletas de 4 tiempos, Manizales (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 la asignación del segmento de los buses se asumió el segmento “Urban Buses Midi <=15 t” para todos los buses, ya que el parque automotor únicamente cuenta con buses de menos de 15 toneladas de acuerdo con las línea y modelo existentes en Palmira.

De acuerdo con las características asignadas a toda la flota vehicular, se seleccionó en la interfaz de “Stock Configuration” del software las casillas que hacían referencia a la tipología del parque automotor del municipio (ver Anexo D y Anexo E).

¹ Ministerio de Transporte Colombia, <https://www.mintransporte.gov.co/documentos/3/documentos-del-ministerio/genPag=7&genPagDocs=5> (consultada el 29 de noviembre de 2021).

Tabla 16. Reglas para la asignación del segmento y categoría al parque automotor.

CATEGORIA	SEGMENTO	DESCRIPCIÓN	CLASIFICACIÓN	BASE DEL RUNT
Passenger Cars	Mini	Vehículos utilizados para el transporte de pasajeros y que comprendan no más de 8 sillar además del asiento del conductor.	$\leq 1200 \text{ cm}^3$	Autos, Camioneta, Campero. Vehículos de servicio público se tomaron como Taxis
	Small		$\leq 1600 \text{ cm}^3$	
	Medium		$\leq 2000 \text{ cm}^3$	
	Large-SUV-Executive		$> 2000 \text{ cm}^3$	
Light Commercial Vehicles	N1-III	Vehículos utilizados para el transporte mercancías cuyo peso máximo no exceda de 3.5 toneladas.	1760 kg - 3500 kg	Camiones
Heavy Duty Vehicles	Rigid $\leq 7,5 \text{ t}$	Vehículos utilizados para el transporte mercancías y con un peso máximo superior a 3.5 toneladas, pero sin exceder las 12 toneladas.	N2 - Rigid (3.5 - 7.5 t)	Camiones - Volquetas
	Rigid 7,5 - 12 t		N2 - Rigid (7.5 - 12 t)	Camiones - Volquetas
	Rigid 12 - 14 t	Vehículos utilizados para el transporte mercancías y con un peso máximo superior a 12 toneladas.	N3 - Rigid (12 - 14 t)	Camiones - Volquetas
	Rigid 14 - 20 t		N3 - Rigid (14 - 20 t)	Camiones - Volquetas
	Rigid 20 - 26 t		N3 - Rigid (20 - 26 t)	Camiones - Volquetas
	Rigid 26 - 28 t		N3 - Rigid (26 - 28 t)	Camiones - Volquetas
	Articulated 28 - 34 t	Vehículos articulados utilizados para el transporte mercancías y con un peso máximo superior a 12 toneladas.	N3 - Articulated (28 - 34 t)	Tractocamión
	Articulated 50 - 60 t		N3 - Articulated ($> 50 \text{ t}$)	Tractocamión
L-Category	Mopeds 2-stroke $< 50 \text{ cm}^3$	Vehículos de dos ruedas de motor térmico.	L1 y L2 ($\leq 50 \text{ cm}^3$ & 2T)	Motos
	Mopeds 4-stroke $< 50 \text{ cm}^3$		L1 y L2 ($\leq 50 \text{ cm}^3$ & 4T)	Motos
	Motorcycles 2-stroke $> 50 \text{ cm}^3$		L3, L4 y L5 ($> 50 \text{ cm}^3$ & 2T)	Motos
	Motorcycles 4-stroke $< 250 \text{ cm}^3$		L3, L4 y L5 ($50 \text{ cm}^3 - 250 \text{ cm}^3$ & 4T)	Motos
	Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm^3		L3, L4 y L5 ($250 \text{ cm}^3 - 750 \text{ cm}^3$ & 4T)	Motos
	Motorcycles 4-stroke $> 750 \text{ cm}^3$		L3, L4 y L5 ($> 750 \text{ cm}^3$ & 4T)	Motos
	Quad & ATVs			Cuatrimotos
Buses	Urban Buses Midi $\leq 15 \text{ t}$	Categorías M2 y M3	M2 Y M3 ($< 15 \text{ t}$)	Bus, Buseta y Microbús

Adaptado de: Ntziachristos & Samaras, 2021.

2.4.2.6 Kilometraje del parque automotor

El kilometraje acumulado de cada tecnología vehicular se estimó a partir de la información obtenida de los CDA. Donde se tomó el promedio por tecnología, combustible y categoría vehicular de la lectura del odómetro registrada (**Tabla 17**). 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 17. Actividad acumulada por categoría vehicular, estándar Euro y tipo de combustible, según los datos de CDA.

Categoría	Estándar Euro	Combustible	Kilometraje acumulado promedio (km)
AUTOS	Convencional	Diesel	264,280
	ECE 15/04	Gasolina	328,337
	Euro 1	Gasolina	168,780
	Euro 2	Diesel	159,303
	Euro 3	Gasolina	87,077
	Euro 4	Diesel	100,303
	Euro 4	GNV	337,966
	Euro 6	Hibrido	13,158
TAXIS	ECE 15/04	Gasolina	651,423
	Euro 1	Gasolina	528,006
	Euro 3	Gasolina	242,765
	Euro 4	GNV	535,380
MOTOS	Convencional	Gasolina	89,523
	Euro 2	Gasolina	4,737
BUSES	Convencional	Diesel	389,542
	Euro 1	GNV	445,825
	Euro 2	Diesel	299,708
	Euro 3	GNV	162,118
	Euro 4	Diesel	242,411
	Euro 5	Diesel	81,059
PESADOS	Convencional	Diesel	409,368
	Convencional	Gasolina	341,663
	Euro 1	Gasolina	391,305
	Euro 2	Diesel	210,280
	Euro 4	Diesel	162,602
	Euro 5	Diesel	20,414

Fuente: Elaboración propia.

La actividad media anual para cada tipología vehicular se asignó de acuerdo con la actividad media anual estimada en la **sección 1.2.3**, para cada categoría vehicular. Y el número de vehículos (stock) para cada tipo de vehículo se determinó a partir de la base de datos del RUNT (ver Anexo D y Anexo E)

2.4.2.7 Condiciones de manejo

Las condiciones de manejo o “Driving Conditions” obedecen al porcentaje de carga promedio, con respecto a la capacidad, de cada categoría vehicular, de vehículos de carga y buses. Para este parámetro se emplearon los valores predeterminados del software COPERT 5.5, que corresponde a una constante equivalente al 50% (ver Anexo D).

2.4.2.8 Aire acondicionado

El uso del aire acondicionado al momento de la circulación de un vehículo es un factor que contribuye a un mayor consumo de combustible y por ende mayores emisiones, en este sentido y entendiendo que la temperatura media esta sobre los 25 °C se realiza la estimación del porcentaje de vehículos que teniendo aire acondicionado los usan, bajo la suposición que a 15°C ningún vehículo emplea el aire acondicionado y a 32°C el 100% de los vehículos con aire acondicionado lo emplean. Haciendo la relación y teniendo en cuenta que la temperatura media anual de 2018 es 25.94°C, se estimó que el 34% de vehículos emplean el aire acondicionado (ver Anexo D y Anexo E).

La definición del porcentaje de vehículos que tienen aire acondicionada fue establecida por defecto, basados en datos asociados a la tecnología vehicular dispuestos por *COPERT 5.5*.

2.4.2.9 Factores de emisión del parque automotor

Una vez ingresados los parámetros propios del municipio de Palmira al software *COPERT 5.5*, se corre el modelo de cálculo y se obtienen los factores de emisión para cada categoría y tecnología vehicular según el combustible de cada contaminante. Los factores desagregados se encuentran disponibles en el Anexo F.

Para el proceso de análisis se estimaron los factores de emisión de cada categoría vehicular, realizando un promedio ponderación según el número de vehículos, por tecnología, segmento y combustible de las categorías vehiculares evaluadas

Tabla 18.

Por otro parte, para realizar la estimación de emisión de contaminantes por tipo de combustible, apoyados en los resultados del Anexo F, y realizando proceso se ponderación de los factores de emisión por tipo de combustible y el número de vehículos de parque automotor, se definieron los porcentajes de aporte de cada categoría vial según el tipo de combustible. **Tabla 19.**

Tabla 18. Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular

Tipología vehicular	Factores de emisión por contaminante (g/km)											
	BC	CH4	CO	CO2	N2O	NO2	NOx	PM2.5	PM10	SO2	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 19. Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular y combustible

Tipo de vehículo	Combustible	BC	CH4	CO	CO2	N2O	NO2	NOx	PM 2.5	PM 10	SO2	COV	COVNM
Particulares	Gasolina	0.001	0.060	6.951	207.467	0.008	0.041	1.026	0.014	0.027	0.006	0.983	0.923
	Diesel	0.067	0.008	0.390	234.684	0.005	0.233	0.723	0.122	0.134	0.001	0.091	0.085
	GNV	0.001	0.046	0.204	195.792	0.002	0.002	0.068	0.015	0.027	0.000	0.055	0.009
Taxis	Gasolina	0.001	0.043	4.765	195.988	0.013	0.027	0.693	0.014	0.027	0.006	0.648	0.605
	Diesel	0.057	0.006	0.320	244.259	0.005	0.274	0.716	0.103	0.115	0.001	0.072	0.067
	GNV	0.001	0.046	0.203	197.022	0.002	0.002	0.068	0.015	0.027	0.000	0.054	0.009
Motos	Gasolina	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	Diesel	0.375	0.125	4.652	867.398	0.017	1.040	9.418	0.793	0.843	0.005	2.705	2.580
	GNV	0.003	2.101	2.100	1288.987	0.000	0.439	10.966	0.054	0.104	0.000	2.147	0.047
Camiones	Diesel	0.173	0.056	2.412	619.660	0.028	0.775	7.074	0.390	0.441	0.004	1.084	1.028

Fuente: Elaboración propia.

2.4.3 Emisiones vehiculares (E_i)

Conforme a lo establecido en la **Ecuación 5**, se estimó las emisiones vehiculares de los contaminantes criterio y GEI para los días en los que fueron realizados aforos vehiculares: jueves (día típico), viernes, sábado y domingo (**Tabla 20**).

Tabla 20. Emisiones diarias de contaminantes para los días evaluados

Contaminante	Día Típico (t)	Viernes (t)	Sábado (t)	Domingo (t)
BC	0.10	0.17	0.15	0.16
CH ₄	0.54	0.72	0.72	0.69
CO	37.87	48.59	49.10	46.41
CO ₂	984.76	1353.03	1311.22	1286.68
NO _x	5.96	9.11	8.37	8.69
N ₂ O	0.03	0.05	0.04	0.04
NO ₂	0.46	0.77	0.68	0.74
PM ₁₀	0.35	0.56	0.51	0.53
PM _{2.5}	0.29	0.47	0.42	0.45
SO ₂	0.02	0.03	0.03	0.03
COV	6.81	9.02	8.97	8.63
COVNM	6.27	8.30	8.26	7.94

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, realizando una segregación por hora de la estimación de emisiones de contaminante, se presenta los perfiles de emisión diaria para cada contaminante evaluado. (**Figura 21**), en el cual se puede observar el comportamiento a la largo del día de cada contaminante, evidenciando inicialmente mayores picos de emisión el día típico y el viernes, y una menor emisión el día domingo.

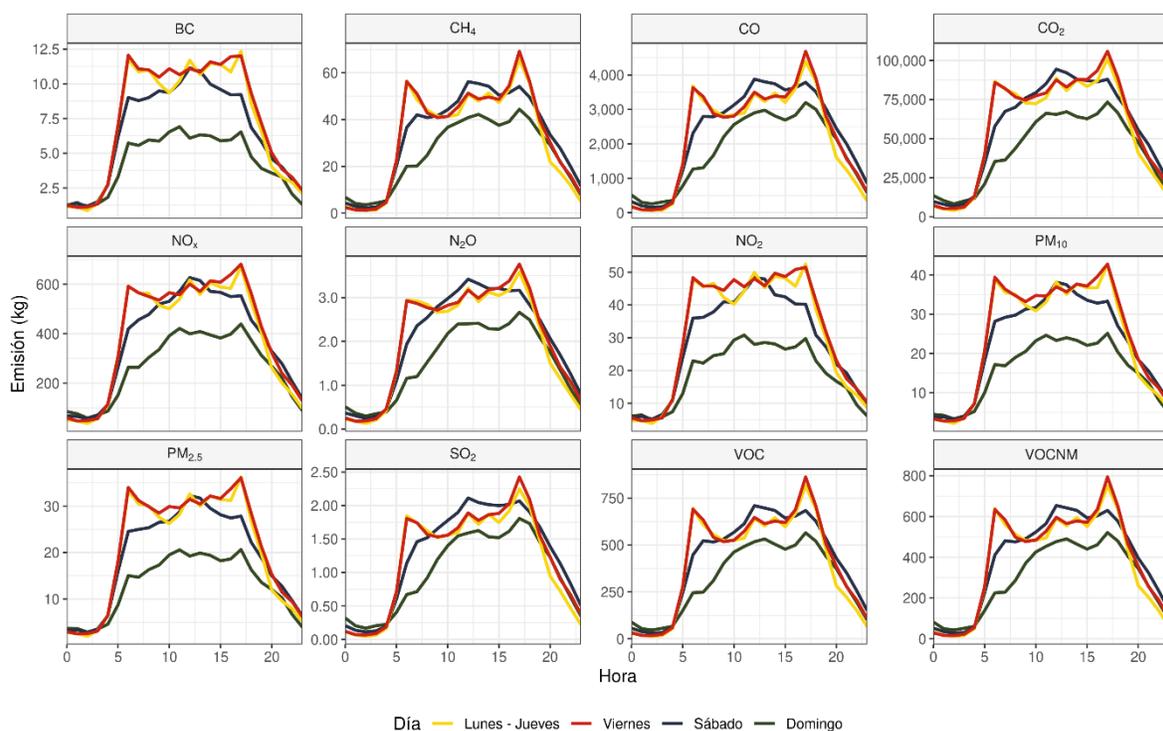


Figura 21. Perfil horario de emisiones por contaminante para los días evaluados.

Fuente: Elaboración propia

Adicional a los perfiles diarios se extrajeron los mapas de emisión, relacionando los resultados con cada tramo vial del municipio. Se presentan las emisiones diarias de CO₂ en la **Figura 22**, en el cual se puede evidenciar una mayor densidad de vías con emisiones cercanas a los 5.000 kg/km hacia el centro geográfico del casco urbano de Palmira.

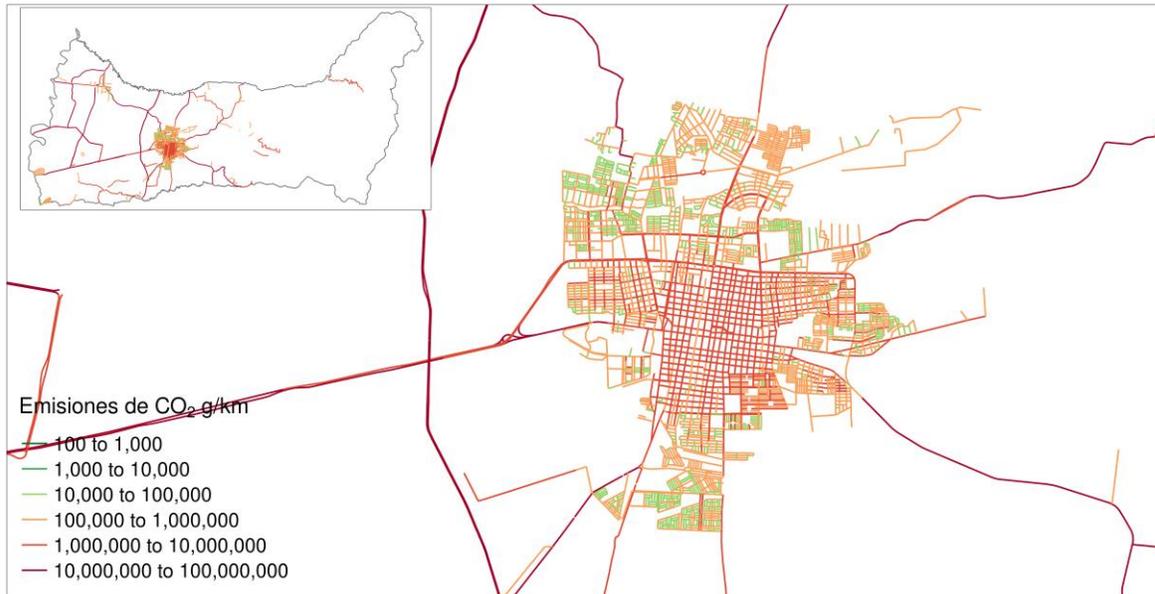


Figura 22. Emisiones de CO₂ en un día típico por tramo vial.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al análisis de emisiones horario, de acuerdo con la **Figura 23** se observa que las emisiones de los contaminantes obedecen a la concentración del tráfico en una zona, donde se puede evidenciar que hacia el centro del casco urbano se presenta una mayor densidad de vías con emisiones superiores a 300000 g CO₂ por kilómetro de vía.

Es importante aclarar que gráficamente en las vías de mayor tráfico vehicular, Recta Cali-Palmira y la Calle 42 no representan su emisión real, debido a que estas vías están distribuidas en dos calzadas, las cuales se sobreponen, es decir que su representación equivale únicamente a la mitad de su emisión real. Esta condición no afecta la estimación de emisiones y es un efecto netamente gráfico.

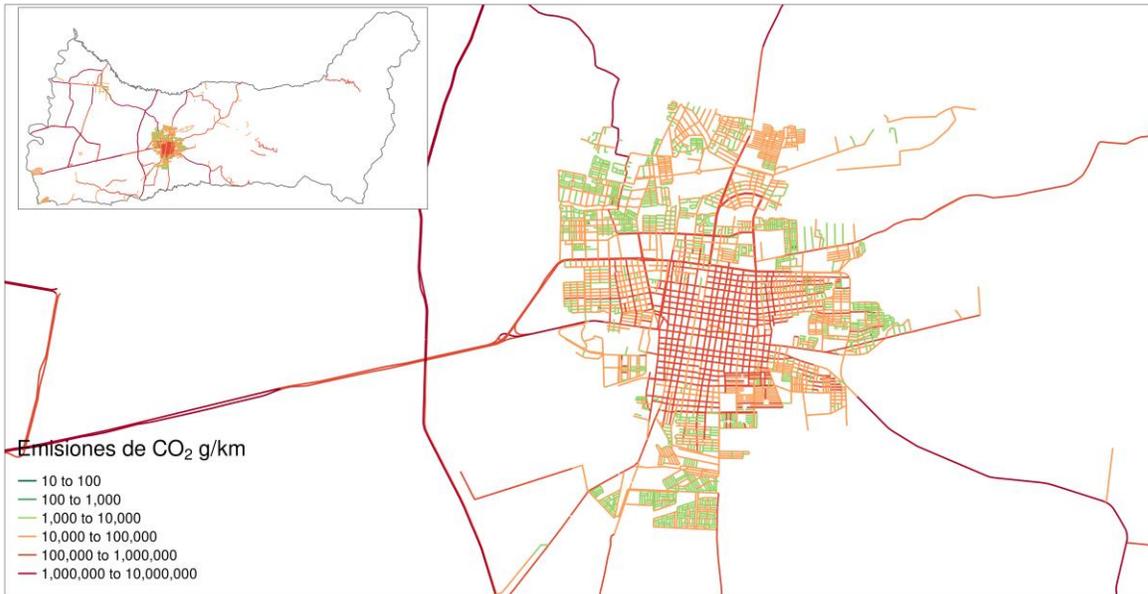


Figura 23. Emisiones vehiculares de CO₂ en la malla vial a las 18 Horas, hora pico.

Fuente: Elaboración propia.

Según la **Figura 24**, se observa que las emisiones de los contaminantes al igual que en la **Figura 23** obedecen a la concentración del tráfico en una zona, donde se puede evidenciar que, pese a la disminución de las emisiones, seguramente debido al bajo flujo vehicular en las horas valle, se continúa observando una mayor densidad en el centro del casco urbano.

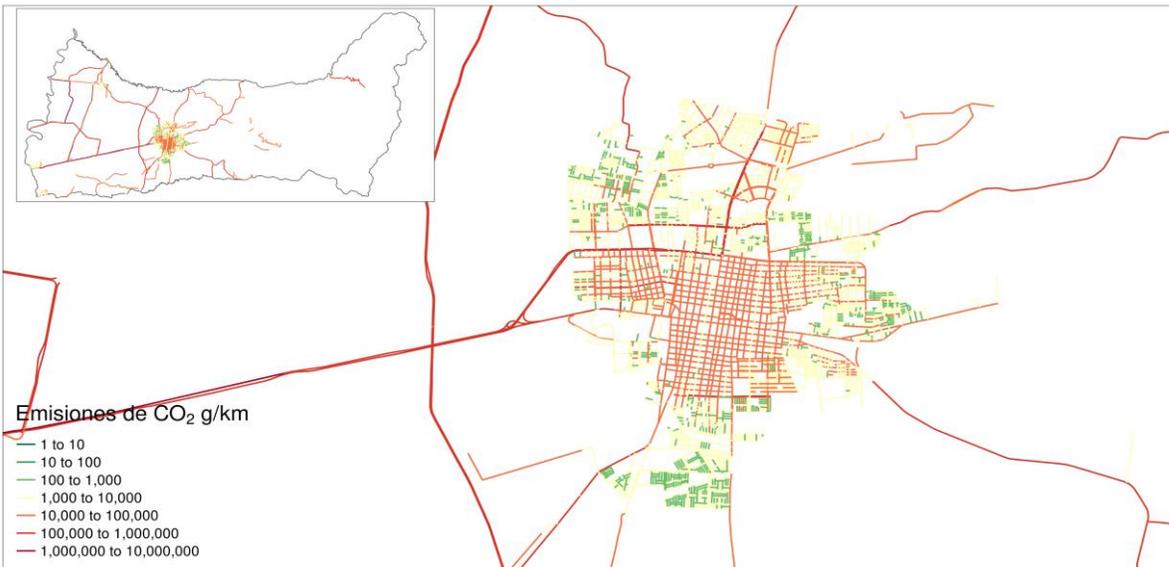


Figura 24. Emisiones vehiculares de CO₂ de los vehículos livianos en la malla vial a las 22 Horas, hora valle.

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de las emisiones totales durante el año base 2021, se realizó una expansión de los días aforados al mes de noviembre, conforme a la cantidad de días de cada tipo según la **Tabla 21**.

Tabla 21. 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

Finalmente, a partir de la variabilidad del consumo de combustible mes a mes con relación al noviembre, se determinó el factor de expansión de los demás meses del año, y se realizó la estimación de emisiones totales de la **Tabla 22** de acuerdo con la **Ecuación 8**:

$$E_i = \sum_{m=1}^{12} E_{i,N} * \frac{C_m}{C_N} \quad \text{Ecuación 8}$$

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 2018

C_N Total del consumo de combustibles líquidos en el mes de noviembre del 2018

Tabla 22. Emisiones atmosféricas totales por fuentes móviles en Palmira.

Contaminante	Emisiones (ton/año)
BC	53
CH ₄	245
CO	16546
CO ₂	451837
NO _x	2975
N ₂ O	15
NO ₂	247
PM ₁₀	181
PM _{2.5}	153
SO ₂	10
COV	3052
COVNM	2807

Fuente: Elaboración propia.

Emisiones vehiculares por tipo de vehículo

En la **Figura 25** es posible apreciar la contribución que tienen las motocicletas en las emisiones de contaminantes como el CH₄, CO y COV, en donde este tipo de vehículos aportan entre el 63-69% de las emisiones de los contaminantes mencionados, es probable que esto se deba al alto número de motocicletas que hacen parte del parque automotor del municipio. Por otro lado, los vehículos particulares (automóviles, camionetas y camperos) tienen participación en la gran mayoría de los contaminantes especialmente en N₂O, SO₂ y CO₂ puesto que este tipo de vehículos que, junto con las motocicletas, presentan un mayor número de kilómetros recorridos totales al día comparado con otro tipo de vehículos. Las emisiones de contaminantes como el BC son asociadas en un 51% a los camiones en general, en donde los de 2 ejes aportan la mayoría de las emisiones (29%), seguidos de los de 6 ejes (15%), los de 3-4 ejes (4%) y los de 5 ejes (3%). Esta misma distribución se puede observar en las emisiones de NO₂, debido a que los camiones de 2 y 6 ejes son los de mayor presencia en las vías del municipio. Por otra parte, los buses tienen una participación considerable en emisiones de contaminantes como PM₁₀ con alrededor 22%, PM_{2.5} con un 25% así como también BC con un 33%. Los resultados desagregados de emisiones se encuentran disponibles en el anexo G.

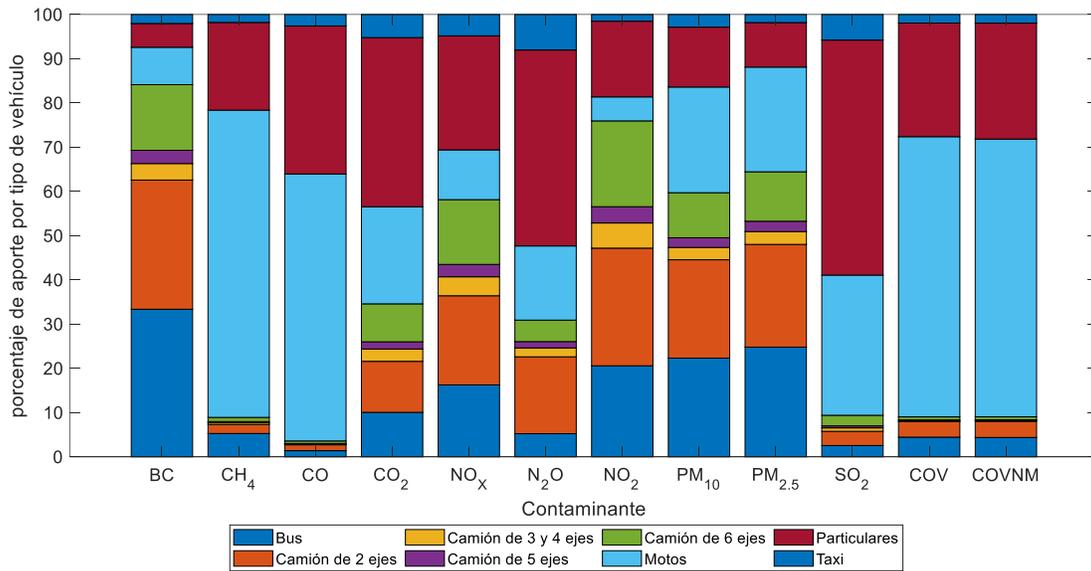


Figura 25. Relación porcentual de emisiones vehiculares por tipo de vehículo y contaminante.

Fuente: Elaboración propia.

Emisiones por tipo de combustible

La **Figura 26** muestra la contribución porcentual del uso de cada tipo de combustible a las emisiones totales de cada contaminante. Se puede apreciar que los vehículos que consumen Diesel, en su mayoría buses y vehículos pesados, tienen un aporte relevante de BC (89%) > NO₂ (80%) > PM_{2.5} (66%) > PM₁₀ (64%) > NO_x (58%) > CO₂ (36%) > N₂O (32%) y menos del 10% para el resto de los contaminantes. En contraste, la combustión de la gasolina aporta en mayor proporción CO (96%) > COV(91%), COVNM(91%), CH₄ (91%) > SO₂(90%) > N₂O (67%) > CO₂ (62%) > NO_x (41%), para el resto de los contaminantes (<40%). Respecto al GNV sus aportes porcentuales a la emisión de cada contaminante son inferiores al 4%, siendo el metano el contaminante que más emite (3.2%).

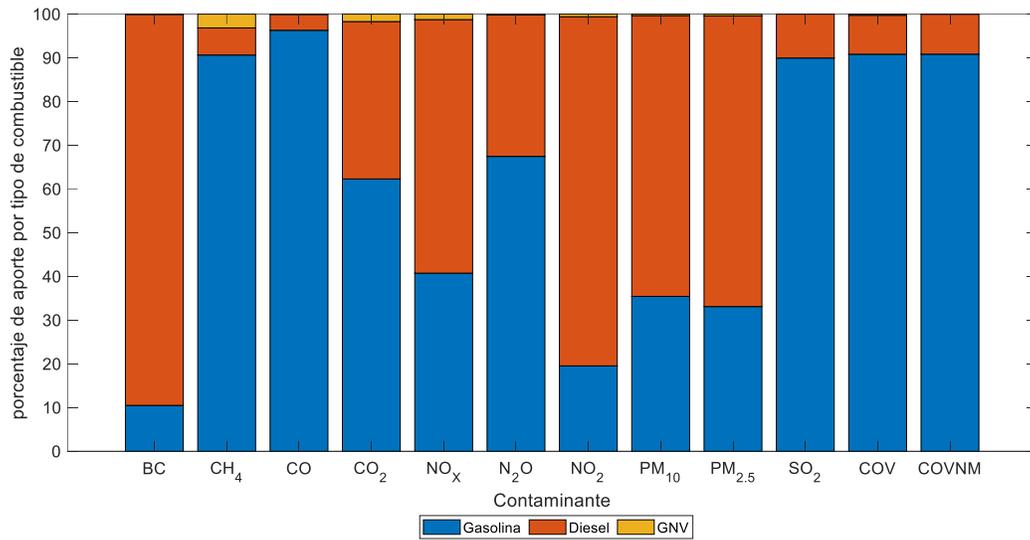


Figura 26. Emisiones de contaminantes por tipo de combustible consumido.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos los resultados de estimación de las emisiones anuales de CO₂ por los diferentes métodos de cálculo (**Figura 27**) se pudo observar que las emisiones por Top-Down presentan estimación menor comparadas con los resultados de la metodología Bottom-Up, siendo la estimación Top-Down por actividad vehicular de CDA el 68% y la estimación Top-Down por consumo de combustible (SICOM) el 48% de las emisiones por Bottom-Up.

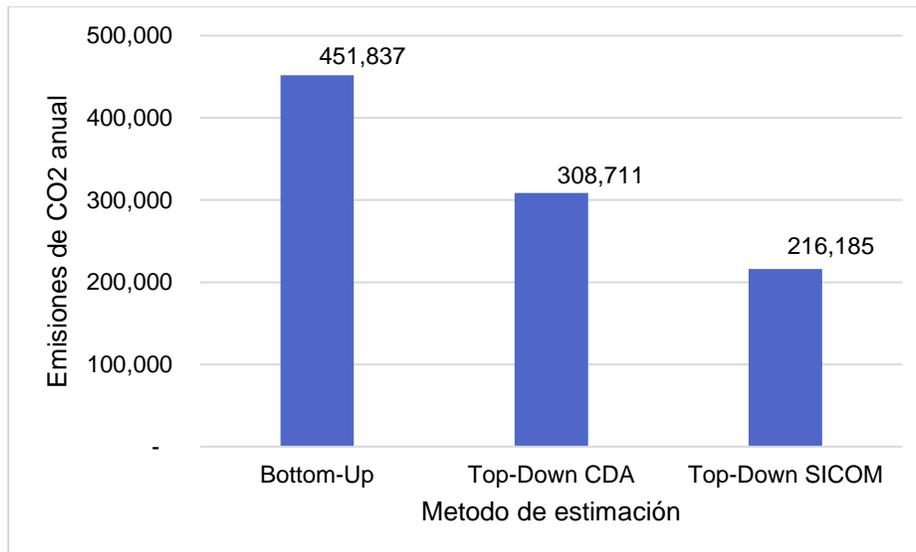


Figura 27. Comparativo de estimación emisiones por enfoques empleados

Fuente: Elaboración propia

3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este estudio abordó la estimación de emisiones por fuentes móviles para el municipio de Palmira a partir de una aproximación Top-Down, basada en la actividad vehicular agregada por tipología vehicular, obtenida a partir de los datos de los CDA y utilizando factores de rendimiento y emisiones agregados de la UPME; así mismo, se utilizó una aproximación Bottom-Up que estima la actividad vehicular a partir de la distribución en la malla vial de los aforos del flujo vehicular, y factores de emisión obtenidos para las condiciones locales del municipio, usando el modelo COPERT. La aproximación Bottom-Up nos permitió obtener las emisiones de 12 contaminantes incluidas las de CO₂ que son las estimadas con la aproximación Top-Down.

Cada método de estimación de emisiones tiene sus ventajas y desventajas, frente al propósito de conocer con algún grado de certeza las emisiones por fuentes móviles en el municipio. Por un lado, las emisiones estimadas a partir de la actividad vehicular obtenida del procesamiento de la base de datos 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 existe un alto grado de evasión en la revisión técnico-mecánica en motocicletas, y además esto se les exige únicamente a los vehículos particulares que tienen 6 años o más. De igual forma, la estimación Top-Down asume que la flota que circula en el municipio, es aquella que está registrada en la autoridad de tránsito del municipio. Este supuesto es común en la aproximación Top-Down (usado en la estimación de la actividad vehicular total) y Bottom-Up (para la estimación de los factores de emisión). Sin embargo, reconocemos que, por dinámicas metropolitanas y regionales, es muy común encontrar en Palmira, vehículos registrados en Cali u otros municipios de la región. Es por esto que, la actividad vehicular total de los vehículos en la aproximación Top-Down, que considera únicamente la flota vehicular registrada puede resultar en una subestimación de las emisiones. En este sentido, la actividad vehicular estimada a partir de los aforos del flujo vehicular es una aproximación más certera.

En la misma línea de análisis, también tenemos incertidumbre en la obtención de los factores de emisión utilizando la herramienta COPERT, que ha sido desarrollada para los países europeos, que, aunque permite la personalización de la mayoría de los parámetros usados, puede en ocasiones no reflejar condiciones de conducción, mantenimiento de flota vehicular e infraestructura propia de ciudades latinoamericanas. No obstante, el modelo COPERT ha sido utilizado de manera extensa en esta región.

Ahora bien, frente a las estimaciones reportamos que la estimación de emisiones de CO₂ a partir del enfoque Bottom-Up fue cerca de 2 veces más alta que las estimaciones a partir del enfoque Top-Down según las ventas de combustibles y 1.5 veces más alta que las estimaciones a partir del enfoque Top-Down por CDAs. Esta última está relacionado con la diferencia en la actividad vehicular obtenida a partir de los aforos, vs. la obtenida a partir de los reportes de kilómetros recorridos por CDA. La estimación de kilómetros recorridos para la tipología vehicular “particulares” arroja que este tipo de vehículos en Palmira recorre en promedio 78 km en un día típico, cifra alejada de los 36.5 km promedio diarios que se

obtienen del análisis de los CDA, esto se puede deber a un subregistro del parque automotor del municipio, donde posiblemente sólo la mitad de los vehículos particulares que circulan en el municipio están registrados en este. No obstante, la proporción de emisión de CO₂ por tipo de combustible es similar en los enfoques Bottom-up y Top-Down por ventas de combustible (Bottom-up 62.3% por vehículos a gasolina y Top-Down 68.9%).

Las emisiones asociadas a los vehículos particulares (automóviles, camionetas, camperos y motos) representan en algunos contaminantes como CH₄, CO, COV y COVNM alrededor del 90% de las emisiones totales, lo que está directamente relacionado con el consumo de gasolina, ya que este combustible presenta una contribución similar a la emisión de estos contaminantes.

En cuanto a los contaminantes generados por los vehículos de carga y buses, se tienen que alrededor del 84% del BC es aportado por estos, el 76% de NO₂, y el 60% y 64% del PM₁₀ y el PM_{2.5} respectivamente, vehículos que usan en su mayoría diésel como combustible.

Por su parte los vehículos tipo “taxi”, no presentan una mayor participación en la emisión de contaminantes, teniendo su mayor aporte en las emisiones de N₂O con un aporte de 8%, SO₂ (6%) y CO₂ (5%).

Revisando el perfil diario de emisiones de cada contaminante, se puede evidenciar el comportamiento similar entre el viernes y el jueves (día típico), donde se evidencian 2 picos de emisión en las horas de la mañana y la tarde. Para los sábados si bien se presentan valores máximos similares a los del día típico, su perfil horario de emisiones solo presenta un pico hacia el mediodía. El día Domingo presentan valores inferiores de emisión, un 25% por debajo de un día típico, y presentando un pico de emisión en la tarde.

4. BIBLIOGRAFIA

AMVA, & UPB. (2019). *Actualización inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá - Año 2018*.

Cuza-Sorolla, A., Hernandez-Aguilar, M. L. and Barrera-Rojas, M. Á.: Aplicación de poligonos de Thiessen para definición y análisis de zonas de influencia del sistema de salud en ciudades costeras del estado de Quintana Roo, *Rev. Estud. Territ.*, 23, 49–71
https://www.redalyc.org/journal/401/40167332003/html/#redalyc_40167332003_ref1, 2021.

DANE-Departamento Administrativo de Estadística. 2020. Evidencias del desarrollo socioeconómico del Valle de Cauca. Disponible en el URL: <https://cutt.ly/tv5QQGE>

Emisia SA. Conscious of Transport's Impact. (2021). COPERT Versions | Emisia SA. Disponible en: <https://www.emisia.com/utilities/copert/versions/>CCpalmira: Anuario estadístico de Palmira 2021, 2. Demografía, Palmira., 2022.

DANE: Censo Nacional de Población y Vivienda, Dep. Nac. Estad. https://sitios.dane.gov.co/cnpv/#!/donde_estamos, last access: 3 February 2020, 2018.

Ghorbani, H.: Mahalanobis Distance and Its Application for Detecting Multivariate Outliers, *Facta Univ. Ser. Math. Informatics*, 583, <https://doi.org/10.22190/fumi1903583g>, 2019.

Calculadora FECOC 2016 (Factores de Emisión de los combustibles colombianos): http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY [EPA] (1998). Emissions Factors & AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors#5thed>

EPA, U. S. (2008). *Transportation and Marketing of Petroleum Liquids*. Washington D.C.: United States Environmental Protection Agency.

Kawashima, A.B., de Morais, M.V.B., Martins, L.D., Urbina, V., Rafee, S.A.A., Capucim, M.N. and Martins, J.A. (2015) Estimates and Spatial Distribution of Emissions from Sugar Cane Bagasse Fired Thermal Power Plants in Brazil. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 3, 72-76. <http://dx.doi.org/10.4236/gep.2015.36012>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Guía para la Elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas. Recuperado el 30 de agosto de 2021 de: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf

5. ANEXOS

ANEXO A. ANALISIS ESTADISTICO DE LOS CDA DE PALMIRA

ANEXO B. PERFIL HORARIO POR DÍA PARA CADA PUNTO DE AFORO

ANEXO C. DESAGREGACIÓN HORARIA Y POR TIPO DE VÍA DE LOS KILÓMETROS
RECORRIDOS DEL PARQUE AUTOMOTOR

ANEXO D. DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO COPERT DE LA FLOTA
VEHICULAR EN PALMIRA, SIN TAXIS

ANEXO E. DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO COPERT DE LA FLOTA DE TAXIS
EN PALMIRA

ANEXO F. FACTORES DE EMISIÓN PARA LA FLOTA VEHICULAR DE PALMIRA

ANEXO G. DESAGREGACIÓN HORARIA DE EMISIONES POR TIPO DE VEHÍCULO.