



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**ESTIMACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS POR FUENTES  
MÓVILES EN RUTA APLICANDO LA METODOLOGÍA COPERT Y  
DETERMINACIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL  
PARTICULADO RESUSPENDIDO CON INFORMACIÓN LOCAL  
(MANIZALES – AÑO BASE 2017)**

**ESTIMATION OF ATMOSPHERIC EMISSIONS FROM ROAD  
MOBILE SOURCES USING COPERT METHODOLOGY AND  
DETERMINING THE EMISSIONS OF RESUSPENDED  
PARTICULATE MATTER WITH LOCAL INFORMATION  
(MANIZALES - BASE YEAR 2017)**

**ERIKA MARCELA TREJOS ZAPATA**

Ingeniera Química - Especialista en Ingeniería Ambiental

Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Manizales, Colombia

Año 2021



**ESTIMACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS POR FUENTES  
MÓVILES EN RUTA APLICANDO LA METODOLOGÍA COPERT Y  
DETERMINACIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL  
PARTICULADO RESUSPENDIDO CON INFORMACIÓN LOCAL  
(MANIZALES – AÑO BASE 2017)**

**ERIKA MARCELA TREJOS ZAPATA**  
Ingeniera Química - Especialista en Ingeniería Ambiental  
entrejosz@unal.edu.co

Trabajo final presentado como requisito para optar por el título de:  
**Magister en Ingeniería – Ingeniería Química**

Directora:

Ph.D. Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga

Grupo de Investigación:

Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental – GTAIHA  
Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Co-Director:

Ph.D. Jorge Eduardo Pachón Quinche

Grupo de Investigación:

Centro Lasallista de Investigación y Modelación Ambiental – CLIMA  
Universidad de La Salle

Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Manizales, Colombia

Año 2021



# AGRADECIMIENTOS

---

Los siguientes agradecimientos van dirigidos a las personas e instituciones por su apoyo y aportes durante el desarrollo de este trabajo.

A mis directores de tesis, la doctora Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga y el doctor Jorge Eduardo Pachón Quinche, por sus contribuciones y conocimientos compartidos, así como también la disposición y paciencia.

Al doctor Carlos Mario Duque Gonzáles por el conocimiento compartido tanto académico, profesional y personal.

A los profesores Mauricio Osses, Luis Silva y Jorge Herrera Murillo por sus aportes en la realización de partes importantes de este trabajo.

A los integrantes del grupo de calidad del aire por su apoyo y ayuda, especialmente a Felipe Cifuentes y Ángel Gálvez, y la profesora Beatriz Aristizábal por permitirme ser parte de él.

A la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales por el apoyo financiero, administrativo y operacional mediante la vinculación en proyectos de investigación.

Finalmente, de manera especial a mis madres Esneda y Yasmin por su amor incondicional y apoyo desmedido, a mi familia y amigos por la motivación.

# RESUMEN

---

En los últimos años los centros urbanos han sufrido un deterioro en la calidad del aire debido al rápido crecimiento demográfico que trae consigo aumentos acelerados en las actividades industriales y en las tasas de motorización. Las emisiones por fuentes móviles en ruta son una de las fuentes de emisión más contaminantes de acuerdo a diferentes estudios reportados en literatura. Los inventarios de emisiones atmosféricas para la ciudad de Manizales año base 2014 y su posterior actualización al año base 2017 utilizando el modelo IVE determinaron que este tipo de fuente aporta más del 80% al total de emisiones de monóxido de carbono, material particulado, compuestos orgánicos volátiles, óxidos de nitrógeno y gases de efecto invernadero.

De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta que las emisiones por fuentes móviles en ruta comprenden a su vez tres tipos de emisiones (asociadas al tubo de escape, emisiones evaporativas, emisiones de material particulado resuspendido), en este trabajo se estimaron emisiones asociadas al tubo de escape y evaporativas con enfoque top-down aplicando el modelo COPERT versión 5.4 para la ciudad de Manizales (año base 2017). Se estimaron emisiones de contaminantes criterio, gases de efecto invernadero, compuestos orgánicos volátiles para cinco categorías vehiculares: (1) vehículo particular, (2) motocicleta, (3) taxi, (4) bus y (5) camión. Se obtuvieron los siguientes flujos de emisiones: CO<sub>2</sub> (318041 ton/año), CO (11422 ton/año), COV (2166 ton/año), COVNM (2008 ton/año), NO<sub>x</sub> (1965 ton/año), CH<sub>4</sub> (157 ton/año), PM<sub>2.5</sub> (107 ton/año), BC (35 ton/año), SO<sub>2</sub> (19 ton/año), N<sub>2</sub>O (18 ton/año).

Con respecto al IEA-2017 estimado mediante IVE se obtuvieron diferencias mayores al -60%, las cuales se deben principalmente al parámetro base función de los factores de emisión de cada modelo, en el caso de IVE el bin de potencia específica del motor y en el caso de COPERT la velocidad promedio vehicular. Manizales se caracteriza por tener una orografía compleja con pendientes inclusive mayores al 22%, estas incrementan la resistencia en el motor del vehículo ya que implica revolucionarlo más, generando mayor estrés en él y por lo tanto mayores emisiones (principalmente CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>). En contraste, COPERT solo considera pendientes de hasta 6% y solo para bus y camión, por lo que los resultados del modelo IVE pueden ser más representativos de la ciudad. Otras diferencias como los valores de FE de partida y tipo de correcciones de cada modelo causan diferencia en las emisiones obtenidas en menor proporción.

Por otra parte, se estimaron las emisiones de material particulado susceptible de resuspensión (RD<sub>10</sub>) con medidas locales. Se desarrolló una campaña de campo para estimar la carga de sedimento de RD<sub>10</sub> para el ajuste los factores de emisión. Adicionalmente, se determinó la composición química y morfológica del RD<sub>10</sub> mediante ICP-MS, cromatografía, FE-SEM y HR-TEM, estas últimas acopladas a EDS. El factor de emisión

de RD<sub>10</sub> promedio fue de 0.043 g/VKT y las emisiones de RD<sub>10</sub> de 69.0 ton/año a partir de la carga de sedimento promedio de la ciudad que estuvo en el rango de 0.77 a 26.8 mg/m<sup>2</sup>. La composición química y morfología mostraron fuentes de aporte tanto vehiculares como desgaste de frenos y neumáticos (Cu, Pb, Sb, Co), desgaste de carretera (Na, Al, Ca, Fe) y fuentes industriales (Cd, Se, V, As), y también fuentes volcánicas (sal amoníaco, complejos hidratados Al-Si-K, diferentes metales).

**Palabras clave:** fuentes móviles, COPERT, material particulado resuspendido, morfología.

# ABSTRACT

---

Urban centers have been exposed to air quality problems due to the fast population growth, increasing in industrial activities and motorization rates. Emissions from road mobile sources are one of the most concerning emission sources according to different studies reported in literature. The inventories of atmospheric emissions (IAE) for the city of Manizales base year 2014 and its update to the base year 2017 using the IVE model determined that this type of source contributes more than 80% to the total emissions of carbon monoxide, particulate matter, volatile organic compounds, nitrogen oxides and greenhouse gases.

Considering that the emissions from road mobile sources comprise three types of emissions (exhaust emissions, evaporative emissions, emission of road dust), in this work, exhaust emissions and evaporative emissions were estimated for the city of Manizales (base year 2017). COPERT version 5.4 model and top-down approach were applied. Emissions of criteria pollutants, greenhouse gases, and volatile organic compounds were estimated for five vehicle categories, such as: (1) private vehicle, (2) motorcycle, (3) taxi, (4) bus and (5) truck. Emission flows were obtained of: CO<sub>2</sub> (318 041 ton/year), CO (11422 ton/ year), COV (2166 ton/year), COVNM (2008 ton/year), NO<sub>x</sub> (1965 ton/year), CH<sub>4</sub> (157 ton/year), PM<sub>2.5</sub> (107 ton/year), BC (35 ton/year), SO<sub>2</sub> (19 ton/year), N<sub>2</sub>O (18 ton/year).

Respect to the IAE-2017 estimated by IVE, differences higher of 60% were obtained, which are mainly due to the base parameters of the emission factors of each model, among others. which are mainly due to the base parameter of the emission factors of each model, in the case of IVE the bin of specific engine power and in the case of COPERT the average vehicle speed. Manizales is characterized by having a complex orography with slopes even greater than 22%, these increase the resistance in the vehicle's engine since it implies revolutionizing it more, generating greater stress in it and therefore greater emissions (mainly CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>). In contrast, COPERT only considers slopes of up to 6% and only for bus and truck, so the results of the IVE model may be more representative of the city. Other differences such as the initial FE values and type of corrections of each model cause a difference in the emissions obtained in a lesser proportion.

On the other hand, emissions of particulate material susceptible to resuspension (RD<sub>10</sub>) were estimated with local measured. A field campaign was developed to estimate the sediment load of RD<sub>10</sub> and to evaluate the emission factors for the city. Additionally, the chemical and morphological composition of RD<sub>10</sub> was determined by ICP-MS, chromatography, FE-SEM and HR-TEM, the latter coupled to EDS. The average RD<sub>10</sub> emission factor was 0.043 g/VKT y RD<sub>10</sub> emissions of 69.0 tons/year were estimated from the city's average sediment load, which was in the range of 0.77 to 26.8 mg/m<sup>2</sup>. The chemical composition and morphology showed sources of contribution from vehicle sources such as brake and tire

wear (Cu, Pb, Sb, Co), road wear (Na, Al, Ca, Fe) and industrial sources (Cd, Se, V, As), but also from volcanic sources (salammoniac, Al-Si-K hydrated complex, different metals).

**Keywords:** mobile sources, COPERT, road dust, chemical composition, morphology.

# TABLA DE CONTENIDO

---

Listado de figuras.....	13
Listado de tablas .....	16
Listado de anexos.....	21
Listado de abreviaturas .....	22
Objetivos.....	24
Estructura de la tesis .....	25
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>28</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>INVENTARIO DE EMISIONES POR FUENTES MÓVILES EN RUTA PARA LA CIUDAD DE MANIZALES UTILIZANDO EL MODELO COPERT.....</b>	<b>33</b>
<b>2.1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>33</b>
<b>2.2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>40</b>
2.2.1. Estadísticas del parque automotor de la ciudad de Manizales – año 2017 .....	40
2.2.2. Estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta en la ciudad de Manizales....	44
2.2.3. Estudios previos relacionados con la estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta .....	44
<b>2.3. GENERALIDADES DE LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR FUENTES MÓVILES EN RUTA MEDIANTE COPERT.....</b>	<b>47</b>
<b>2.4. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR FUENTES MOVILES EN RUTA APLICANDO LA METODOLOGÍA COPERT .</b>	<b>54</b>
2.4.1. Información de entrada a COPERT 5.4 para el caso de estudio Manizales año base 2017.....	54
2.4.2. Análisis de resultados .....	71
2.4.3. Análisis de sensibilidad.....	71
<b>2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>72</b>
2.5.1. Factores de emisión ajustados de acuerdo con las condiciones de la ciudad de Manizales .....	72

2.5.2. Emisiones de contaminantes atmosféricos de la ciudad de Manizales año base 2017 .....	72
2.5.3. Comparativo de emisiones y FE con otros estudios .....	77
2.5.4. Análisis de sensibilidad.....	86
<b>2.6. CONCLUSIONES PARCIALES.....</b>	<b>93</b>
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>ESTIMACIÓN DE EMISIONES Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO SUSCEPTIBLE DE RESUSPENSIÓN CON INFORMACIÓN LOCAL .....</b>	
<b>95</b>	
<b>3.1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>96</b>
<b>3.2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>98</b>
3.1.1. Estimación de emisiones de material particulado susceptible de resuspensión en la ciudad de manizales .....	98
3.1.2. Estudios previos relacionados con la estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta.....	101
<b>3.3. GENERALIDADES DE LAS EMISIONES DE RD<sub>10</sub>.....</b>	<b>103</b>
<b>3.4. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO RESUSPENDIDO .....</b>	<b>105</b>
3.4.1. Estimación de emisiones de RD <sub>10</sub> .....	106
3.4.2. Análisis morfológico de las partículas de RD <sub>10</sub> .....	113
3.4.3. Composición química del RD <sub>10</sub> en Manizales .....	114
<b>3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>117</b>
3.5.1. Estimación de emisiones de RD <sub>10</sub> .....	117
3.5.2. Morfología de las partículas de RD <sub>10</sub> por FE-SEM / EDS y HR-TEM / EDS en la ciudad de Manizales.....	127
3.5.3. Resultados de la composición química de RD <sub>10</sub> en Manizales.....	129
<b>3.6. CONCLUSIONES PARCIALES.....</b>	<b>141</b>
<b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	
<b>143</b>	
<b>4.1. CONCLUSIONES.....</b>	<b>143</b>
<b>4.2. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>145</b>

<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>146</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>158</b>

# LISTADO DE FIGURAS

---

## *Capítulo 2.*

Figura 2. 1. Modos de transporte empleados por la población en el año 2017 (Fuente: Manizales Como Vamos, 2017).....	40
Figura 2. 2. Reducción de sustancias contaminantes de acuerdo a la clasificación de tecnologías Euro.....	42
Figura 2.3. Publicaciones científicas anuales asociadas a las palabras clave “COPERT” e “IVE” en la base de datos SCOPUS. ....	45
Figura 2.4. Interfaz del software COPERT 5.4.....	52
Figura 2.5. Esquema de la estructura general del software COPERT 5.4. ....	53
Figura 2.6. Esquema general metodológico de la estimación mediante el modelo COPERT – Manizales, 2017. ....	54
Figura 2.7. Esquema metodológico de la estimación de emisiones exhosto y evaporativas en Manizales mediante el modelo COPERT. ....	55
Figura 2.8. Interfaz del software COPERT 5.4, pestaña de ingreso de información de propiedades generales, ventanas: información ambiental y características de viaje. ....	59
Figura 2.9. Interfaz del software COPERT 5.4, pestaña de ingreso de información de combustibles, ventana de especificaciones del combustible.....	61
Figura 2.10. Interfaz del software COPERT 5.4, pestaña de ingreso de información de vehicular. Ventana: configuración del parque automotor.....	62
Figura 2.11. (a) Distribución porcentual del parque automotor de la ciudad de Manizales año 2017.....	62
Figura 2.12. Distribución porcentual de tecnologías vehiculares del parque automotor de la ciudad de Manizales año 2017.....	64
Figura 2.13. Relación entre el kilometraje acumulativo y la edad del vehículo y regresión lineal de la categoría de vehículos particulares.....	65
Figura 2.14. Interfaz del software COPERT 5.4, pestaña de ingreso de información de vehicular. Ventana: datos de circulación. ....	67

Figura 2.15. Interfaz del software COPERT 5.4, pestaña de ingreso de información de vehicular. Ventana: condiciones de manejo.....	68
Figura 2.16. Interfaz del software COPERT 5.4, sección de estado del archivo, configuración y tipo correcciones. ....	69
Figura 2.17. Interfaz del software COPERT 5.4. (a) Pestaña de resultados desagregados por categoría y tecnología vehicular, ventanas: emisiones y FE. (b) Pestaña de resultados agregados por categoría vehicular, ventanas: emisiones y FE.....	70
Figura 2.18. Contribución porcentual al total de emisiones por categoría vehicular – año base 2017 .....	75
Figura 2.19. (a) Distribución porcentual del uso de combustibles por categoría vehicular. (b) Contribución porcentual al total de emisiones por tipo de combustible – año base 2017..	76
Figura 2.20. Esquema del término VSP – Potencia específica del vehículo. (Tomado de: Jiménez, 1999; Tolvett; 2009). ....	78
Figura 2.21. Comparativo de FE ajustados para diferentes ciudades obtenidos mediante diferentes modelos de estimación de emisiones vehiculares: (a) FE NO <sub>x</sub> , (b) FE SO <sub>2</sub> .....	79
Figura 2.22. Comparativo de FE ajustados para diferentes ciudades obtenidos mediante diferentes modelos de estimación de emisiones vehiculares: (a) FE CO <sub>2</sub> (b) FE PM <sub>2.5</sub> . Notación: PC1: ECE 15/04, PC2: Open Loop. PC3: convencional, PC4: Euro 1, PC5: Euro 2. TX1: Euro 1, TX4: Euro 2. HDT1: Euro 1, HDT2: Euro 2.....	80
Figura 2.23. Índice per cápita (IPC) de emisión vehicular en carretera para diferentes ciudades del mundo.....	85
Figura 2.24. Factor de emisión en función de la velocidad – COPERT 5.4.....	90
 <b>Capítulo 3.</b>	
Figura 3.1. Publicaciones científicas anuales asociadas a las palabras clave “road dust” y “vehicle emissions” en la base de datos SCOPUS.....	101
Figura 3.2. Muestreos de material particulado resuspendido de estudios realizados desde el año 2000 (Tomado de: Haynes et. al., 2020). ....	104
Figura 3.3. Esquema metodológico de la estimación de emisiones de RD <sub>10</sub> , caracterización química y morfológica en Manizales.....	106
Figura 3.4. Dominio y localización de los puntos de monitoreo de RD <sub>10</sub> . ....	107

Figura 3.5. Equipo “RD <sub>10</sub> in Road Dust” para el muestreo de RD <sub>10</sub> . .....	110
Figura 3.6. Esquema de pretratamiento y postratamiento de filtros. ....	111
Figura 3.7. Ficha de campo de monitoreo de RD <sub>10</sub> en la ciudad de Manizales. ....	113
Figura 3.8. Variación de la carga de sedimento, Cs (carga de RD <sub>10</sub> ) en Manizales. ....	118
Figura 3.9. Carga de sedimento en función de las características del área de muestreo. .	119
Figura 3.10. Imágenes generales FE-SEM. (A) Materiales carbonosos amorfos y cristalinos. (B) Nanotubos de carbono esféricos. (Tomada parcialmente de: Trejos et. al., 2021).....	128
Figura 3.11. Distribución porcentual de la composición química del RD <sub>10</sub> en la ciudad de Manizales por componentes analizados. (a) Componente mineral. (b) Componente iónico. (c) Componente de seguimiento. ....	130
Figura 3.12. Factores de enriquecimiento calculados para 15 puntos de muestreo de RD <sub>10</sub> en la ciudad de Manizales. Mínimo (EF = 1-2), moderado (EF = 2-5), significativo (EF = 5-20), muy alto (EF = 20-40) y extremadamente alto (EF ≥ 40). ....	135
Figura 3.13. Gráfico de correlación de elementos químicos. Columnas (izquierda-derecha): Be, Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Hg, F <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , RD <sub>10</sub> .....	137

**Anexos.**

Figura 1B. Perfiles de tráfico vehicular de la ciudad de Manizales obtenidos en el PMM - 2017 (Tomado de: Findeter, 2017; Steer Davies Gleave; 2017). ....	160
Figura 2B. Distribución de velocidad por tipo de vía en la ciudad de Manizales obtenidos en el PMM - 2017 (Tomado de: Findeter, 2017; Steer Davies Gleave; 2017). ....	160

# LISTADO DE TABLAS

---

## *Capítulo 1.*

Tabla 1.1. Composición química de RD <sub>10</sub> en la ciudad de Bogotá (Fuente: Ramírez et. al., 2019). .....	30
--	----

## *Capítulo 2.*

Tabla 2.1. Comparación de los principales parámetros de entrada de los modelos de emisión (Adaptada de: Gonzáles, 2017; Tolvett, 2009, Rojas, 2015; EPA, 2020). .....	36
---	----

Tabla 2.2. Comparación de las principales características de los modelos de emisión (Adaptada de: Gonzáles, 2017; Rojas, 2015; EPA, 2020). .....	37
--	----

Tabla 2.3. Comparativo de FE base para motocicletas, disponibles en los modelos IVE y COPERT. ....	38
--	----

Tabla 2.4. Distribución del parque automotor de la ciudad de Manizales (Tomado de: Valencia, 2019). .....	41
---	----

Tabla 2.5. Distribución tecnológica de las principales categorías vehiculares del parque automotor de la ciudad de Manizales (Tomada de: Unal-Corpocaldas, 2019; Valencia, 2019). .....	42
---	----

Tabla 2.6. Estudios de IEA por fuentes móviles en ruta a nivel internacional y nacional. ....	46
---	----

Tabla 2.7. Ecuaciones para la estimación de emisiones por tipo. ....	49
--	----

Tabla 2.8. Tipo de información requerida por el software COPERT 5.4. ....	55
---	----

Tabla 2.9. Datos meteorológicos de la ciudad de Manizales año 2017 - Estación meteorológica Hospital de Caldas (Fuente: CDIAC, 2020). .....	59
---	----

Tabla 2.10. Propiedades de los combustibles (Fuente: Ecopetrol, 2020; UPB-AMVA, 2019; Transmetano, 2020). .....	60
---	----

Tabla 2.11. Propiedades de los combustibles en diferentes años (Fuente: Resolución 898 de 1995; Resolución 90963 de 2014). .....	60
--	----

Tabla 2.12. Conformación del parque automotor de la ciudad de Manizales año 2017 (Fuente: Unal-Corpocaldas, 2019; Valencia, 2019). .....	63
--	----

Tabla 2.13. Información de actividad vehicular para cada categoría vehicular del parque automotor de Manizales - año base 2017 (Adaptado de: Unal-Corpocaldas, 2019). .....	66
Tabla 2.14. Parámetros considerados en análisis de sensibilidad. ....	71
Tabla 2.15. Factores de emisión en ruta por vehículo ajustados a las condiciones de de Manizales año 2017- COPERT 5.4.....	72
Tabla 2.16. Tipo de emisiones estimadas mediante COPERT 5.4. ....	73
Tabla 2.17. Emisiones totales anuales estimadas para Manizales - año base 2017. ....	74
Tabla 2.18. Diferencial porcentual de las emisiones de la ciudad de Manizales obtenidas mediante IVE y COPERT.....	77
Tabla 2.19. Porcentajes de diferencia de los factores de emisión de buses obtenidos por COPERT 5.4 y COPERT 4 Chile. ....	81
Tabla 2.20. Porcentajes de diferencia de los factores de emisión de camiones obtenidos por COPERT 5.4 y COPERT 4 Chile. ....	82
Tabla 2.21. Porcentajes de diferencia de los factores de emisión de motocicletas obtenidos por COPERT 5.4 y COPERT 4 Chile. ....	82
Tabla 2.22. Porcentajes de diferencia de los factores de emisión de vehículos particulares a gasolina obtenidos por COPERT 5.4 y COPERT 4 Chile. ....	83
Tabla 2.23. Porcentajes de diferencia de los factores de emisión de vehículos particulares a diésel obtenidos por COPERT 5.4 y COPERT 4 Chile. ....	83
Tabla 2.24. Porcentajes de diferencia de los factores de emisión de taxis a gasolina obtenidos por COPERT 5.4 y COPERT 4 Chile. ....	84
Tabla 2.25. Diferencia porcentual de los FE base y los obtenidos mediante análisis (1) de sensibilidad (aumento del 50% en el tiempo de un viaje promedio). ....	87
Tabla 2.26. Diferencia porcentual de los FE base y los obtenidos mediante análisis (1) de sensibilidad (aumento del 50% la distancia de un viaje promedio). ....	87
Tabla 2.27. Cambio porcentual en la variable de actividad vehicular en hora pico y hora valle. ....	88
Tabla 2.28. Diferencia porcentual de los FE del análisis de sensibilidad (2) (cambio en el porcentaje de vehículos en hora pico y hora valle). ....	88

Tabla 2.29. Cambio porcentual en la variable de velocidad vehicular en hora pico y hora valle.....	89
Tabla 2.30. Diferencia porcentual de los FE del análisis de sensibilidad (3) (cambio +50% en la velocidad en hora pico y hora valle). .....	89
Tabla 2.31. Diferencia porcentual de los FE del análisis de sensibilidad (3) (cambio -50% en la velocidad en hora pico y hora valle). .....	90
Tabla 2.32. Diferencia porcentual de los FE del análisis (4) de sensibilidad con respecto al cambio de pendiente positiva (+4%).....	91
Tabla 2.33. Análisis de sensibilidad en los FE asociado al cambio de contenido de azufre .....	92
Tabla 2.34. Resumen análisis de sensibilidad en los FE. ....	93
 <b>Capítulo 3.</b>	
Tabla 3.1. Cargas de sedimento de Bogotá adaptadas a Manizales (Fuente: Valencia, 2019). .....	98
Tabla 3.2. Estudios previos de estimación de emisiones de material particulado susceptible de resuspensión. ....	101
Tabla 3.3. Diferentes tipos de condiciones de carretera para Manizales. ....	107
Tabla 3.4. Localización y descripción de los puntos de monitoreo. ....	109
Tabla 3.5. Parámetros para la estimación de exposiciones diarias. ....	116
Tabla 3.6. Dosis de referencia (RFD) y factor potencial cancerígeno (qj). ....	117
Tabla 3.7. Carga de sedimento obtenidas en la ciudad de Manizales. ....	117
Tabla 3.8. Comparación de cargas medias de sedimentos en diferentes ciudades. ....	119
Tabla 3.9. Comparativo de las Cs adaptadas de la ciudad de Bogotá por Valencia (2019) y las estimadas en campo en la ciudad de Manizales (presente estudio). ....	121
Tabla 3.10. Factores de emisión de RD <sub>10</sub> obtenidos para la ciudad de Manizales. ....	122
Tabla 3.11. Comparativo de factores de emisión de RD10 (Tomado de: Espitia y Porra, 2017; Amato, 2016; Amato, 2018). ....	123

Tabla 3.12. Emisiones de RD <sub>10</sub> susceptible de resuspensión en Manizales para el año 2017. .....	124
Tabla 3.13. Emisiones de RD <sub>10</sub> para cuatro avenidas en Manizales para el año 2017. ....	125
Tabla 3.14. Emisiones estimadas mediante COPERT 5.4 para Manizales – año 2017....	126
Tabla 3.15. Composición química por zonas de estudio de Manizales. Unidades: µg/m <sup>2</sup> . .....	131
Tabla 3.16. Resultados del PCA (se muestran 7 de los 14 componentes principales resultantes). .....	138
Tabla 3.17. Rotación del PCA (Varimax).....	138
Tabla 3.18. Dosis de exposición diaria por vía oral, respiratoria y dérmica de MPR en Manizales. ....	140
Tabla 3.19. Índice de riesgo no cancerígeno por vía oral, respiratoria y dérmica de MPR en Manizales. ....	141
Tabla 3.20. Índice de riesgo cancerígeno por vía oral, respiratoria y dérmica de MPR en Manizales. ....	141

**Anexos.**

Tabla 1B. Conteos vehiculares reportados por el PMM-2017 (Findeter, 2017).....	161
Tabla 1D. Correspondencia de tecnologías vehiculares de IVE a COPERT 5.4.....	163
Tabla 2D. Indicadores de precisión de la estimación de factores de emisión para diferentes contaminantes según categoría y tecnología vehicular (Fuente: EEA, 2020). ....	165
Tabla 3D. Balance de emisiones de CO <sub>2</sub> de diésel y gasolina.....	166
Tabla 4D. Cronograma de introducción de tecnologías a Colombia (Unal-Corpocaldas, 2019). ....	167
Tabla 1E. Análisis de sensibilidad en los FE (Relación de cambio: % Cambio del FE / % Cambio en la variable).....	168



# LISTADO DE ANEXOS

---

**Anexo A.** Base de datos del parque automotor de la ciudad de Manizales – año base 2017 (Digital, formato .xlsx – excel).

**Anexo B.** Información de actividad vehicular

**Anexo C.** Base de datos de factores de emisión ajustados para Manizales – 2017 estimados mediante COPERT 5.4 (Digital, formato .xlsx – excel).

**Anexo D.** Correspondencia de la distribución tecnológica del modelo COPERT 5.4 e IVE.

**Anexo E.** Análisis de sensibilidad del modelo COPERT 5.4

**Anexo F.** Fichas de campo del muestreo de material particulado resuspendido (Digital, formato .xlsx – excel).

**Anexo G.** Caracterización química de RD<sub>10</sub> (Digital, formato .xlsx – excel).

# LISTADO DE ABREVIATURAS

Tabla I. Listado de símbolos.

Símbolo	Definición	Símbolo	Definición
Al	Aluminio	K	Potasio
Ag	Plata	Mg	Magnesio
As	Arsénico	Mn	Manganeso
Ba	Bario	Mo	Molibdeno
BC	Black Carbón, carbono negro	N <sub>2</sub> O	Óxido de nitrógeno
Be	Berilio	Na	Sodio
Br <sup>-</sup>	Bromuro	NH <sup>+4</sup>	Amoniaco
Ca	Calcio	Ni	Níquel
Cd	Cadmio	NO <sub>2</sub>	Nitritos
CH <sub>4</sub>	Metano	NO <sub>3</sub>	Nitrato
Cl <sup>-</sup>	Cloro	NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
Co	Cobalto	OC	Carbón orgánico
CO	Monóxido de carbono	P	Fosforo
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	Pb	Plomo
COV	Compuestos orgánicos volátiles no metanados	PM <sub>10</sub>	Material particulado menor a 10 µm
COVNM	Compuestos orgánicos volátiles	PM <sub>2.5</sub>	Material particulado menor a 2.5 µm
Cr	Cromo	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Fosfatos
Cu	Cobre	S	Azufre
EC	Carbón elemental	Sb	Antimonio
ETBE	éter etil tert-butílico	Se	Selenio
ETH	Etanol	SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
F <sup>-</sup>	Fluoruro	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfato
Fe	Hierro	Ti	Titanio
HC	Hidrocarburos	V	Vanadio
Hg	Mercurio	Zn	Zinc

Tabla II. Listado de abreviaturas.

Abreviatura	Descripción
A/C	Efecto de aire acondicionado
AVK	Avenida Kevin Ángel
AVP	Avenida Paralela
AVS	Avenida Santander
Canc.	Cancerígeno

<b>Abreviatura</b>	<b>Descripción</b>
cat.	Catalizador
CDA	Centro de Diagnóstico Automotor
CDIAC	Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas
CEN	Zona comercial
COM	Zona Comercial
CONST	Zona de construcción
COPERT	Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport
Cs	Carga se sedimento
E100	Volatilidad en el rango medio de la gasolina
E150	Volatilidad final – fondos – de la gasolina
E <sub>caliente</sub>	Emisiones cuando el motor se estabilizo térmicamente
E <sub>Desgaste N</sub>	Emisiones por desgaste de neumáticos y frenos
E <sub>evap</sub>	Emisiones evaporativas
E <sub>frío</sub>	Emisiones sin el motor estabilizado térmicamente
EF	Factor de enriquecimiento
EPA	Agencia de Protección Ambiental
ERD10	Emisiones de material particulado resuspendido
E <sub>Total</sub>	Emisiones totales
FE	Factor de emisión
GEI	Gases de efecto invernadero
GNV	Gas Natural Vehicular
IEA	Inventario de Emisiones Atmosféricas
IND	Zona industrial
IPC	Índice Per Cápita de emisiones vehiculares
IVE	International Vehicle Emissions Model
MOVES	Motor Vehicle Emission Simulator
PBV	Peso Bruto Vehicular
PCS	Contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos
PMM	Plan Maestro de Movilidad de Manizales
RC	Riesgo cancerígeno
RD <sub>10</sub>	Material particulado resuspendido
RES	Zona residencial
RnC	Riesgo no cancerígeno
SCR	Aditivo lubricante (urea)
T95	Temperatura de destilación donde 95% del crudo se ha evaporado
veh.	Vehículo
VKT	Kilómetros recorridos diarios por vehículo

# OBJETIVOS

---

## OBJETIVO GENERAL

Estimar las emisiones contaminantes directas (exhosto) e indirectas (resuspensión) de fuentes móviles en ruta en la ciudad de Manizales año base 2017.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Aplicar la metodología COPERT para la estimación de emisiones asociadas al sistema de escape y emisiones evaporativas.
2. Estimar las cargas de sedimento en campo para el ajuste de los factores de emisión de material particulado susceptible de resuspensión en la Manizales al año base 2017.
3. Determinar la composición química de las emisiones de material particulado susceptible de resuspensión.

# ESTRUCTURA DE LA TESIS

---

El presente documento se encuentra estructurado en tres capítulos: (1) introducción y justificación, (2) Inventario de emisiones por fuentes móviles en ruta para la ciudad de Manizales utilizando el modelo COPERT, (3) Estimación de emisiones y caracterización química del material particulado susceptible de resuspensión con información de la ciudad de Manizales. En el capítulo uno se muestra la introducción general y el planteamiento del problema, en el capítulo dos y tres se presenta la introducción, antecedentes, generalidades de estimación de cada tipo de emisiones a modo de marco teórico, metodología y resultados relacionados a cada tema, con conclusiones parciales. Como producto del capítulo tres, se tiene un artículo publicado en revista indexada. Finalmente, se presenta el capítulo 4, donde se integra y analiza el trabajo mostrando las conclusiones globales y recomendaciones. Las referencias y anexos del trabajo están al final.

## *Productos académicos relacionados con el trabajo de tesis*

Como producto de la investigación se publicó el siguiente artículo (se abordó el objetivo dos y parte del tres):

- **Trejos, E. M.**, Silva, L. F., Hower, J. C., Flores, E. M., Gonzáles, C. M., Pachón, J. E., Aristizábal, B. H. (2021). Volcanic emissions and atmospheric pollution: A study of nanoparticles. *Geoscience Frontiers* 12 (2). 746-755. DOI: 10.1016/j.gsf.2020.08.013

Colaboración en la elaboración de un libro que fue aprobado para ser publicado por la editorial UN, el cual está en proceso de publicación. El libro está directamente relacionado con el trabajo de tesis (aborda el objetivo dos):

- Aristizábal, B. H., González, C. M., **Trejos, E. M.**, Cifuentes, F., Hernández, W., Valencia, M. C., Velasco, M. (2020) Integración de herramientas de simulación para la gestión de la calidad del aire en ciudades intermedias. Caso de estudio: Manizales, Colombia. Editorial UN. Código 51575. En proceso de publicación.

Se realizó la siguiente publicación no indexada (se incluye resultados del objetivo dos):

- **Trejos, E. M.**, Hernández, W., Gonzáles, C. M., Aristizábal, B. H. (2019). Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en la ciudad de Manizales año base 2017. *Boletín Convenio Interadministrativo de Asociación* 107 – 2018. 1-21.

Parte de los resultados de la investigación realizada se compartieron a la comunidad científica a través de un evento internacional (donde se abordó el objetivo uno):

- **Trejos, E. M.**, Gonzáles, C. M., Aristizábal, B. H. (2020). Atmospheric emissions inventory in a medium-sized andean city from on-road mobile sources. Application of COPERT 5.4 model. Poster virtual. AGU Fall Meeting, 1-17 diciembre.

Se apoyó el desarrollo de un trabajo de grado a nivel de pregrado:

- Ocampo, J.C. (2020). Estimación de emisiones evaporativas por fuentes móviles en ruta aplicando la metodología COPERT para la ciudad de Manizales 2017. Tesis de pregrado. Ganador al mejor trabajo de grado del departamento de ingeniería química. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

### *Participación en proyectos*

Durante la investigación se participó en los siguientes proyectos:

- Documento oficial proyecto “Aplicación de herramientas de simulación atmosférica en el estudio de la calidad del aire en Manizales” con objeto la actualización del inventario de emisiones para la ciudad de Manizales como base para el modelamiento de la calidad del aire. Convenio Interadministrativo No. 107-2018. Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. 2019.
- Documento oficial proyecto “Herramienta para la gestión de la calidad del aire en Manizales a partir de modelos de transporte y factores de emisión”. Convocatoria Nacional para el Fomento de Alianzas Interdisciplinarias. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. En proceso de finalización.

Parte de los resultados de la investigación realizada en los proyectos se compartieron a la comunidad científica a través de eventos internacionales y nacionales:

- González, C. M., **Trejos, E. M.**, Hernández, W., Cifuentes, F., Velasco, M., Aristizábal, B. H. (2020). Integrating tools for air quality management in a medium-sized andean city: emissions inventory, air pollutant monitoring and atmospheric modeling. Poster virtual. 19<sup>th</sup> GEIA: Global Emissions Initiative.
- González, C. M., Valencia, M.C., **Trejos, E. M.**, Hernández, W., Velasco, M., Aristizábal, B. H. (2019). Trends in anthropogenic emissions in the andean city of Manizales, Colombia, between 2014-2017. Poster. Air Pollution Conference Brazil and 4<sup>th</sup> CMAS South America, community modeling and analysis system.
- **Trejos, E. M.**, Gonzáles, C. M., Valencia, M. C., Hernández, W., Velasco, M., Aristizábal, B. H. (2019). Update of the atmospheric emission inventory – year 2017

- in the city of Manizales, Colombia. Presentación oral. Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Pública - CASAP.
- Hernández, W., **Trejos, E. M.**, González, C. M., Aristizábal, B. H. (2019). Estimation of PM<sub>2.5</sub> and black carbon emissions from on road vehicular sources in Manizales, Colombia. Presentación oral. Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Pública - CASAP.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

---

Actualmente ciudades intermedias de países emergentes en Latinoamérica están experimentando un rápido crecimiento demográfico que trae consigo un aumento en las actividades industriales, incrementos en las tasas de motorización y aumentos en el consumo de recursos naturales; estas actividades son generadoras de grandes emisiones contaminantes a la atmósfera (González, 2017). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS – WHO, por sus siglas en inglés) la contaminación del aire es el principal riesgo ambiental para salud pública en las Américas, los efectos adversos a la salud van desde enfermedades respiratorias hasta enfermedades cardiovasculares, deterioro cognitivo y accidente cerebrovascular (WHO, 2016; Kioumourtzoglou et al., 2016; Chen et al., 2017; Saikia et al., 2018; Ramírez et al., 2019).

Diferentes estudios han reportado que la mayor fuente de contaminación del aire en los centros urbanos se debe a fuentes móviles (Schifter et al., 2003; Ghose et al., 2004; Ramírez et al., 2017; González, 2017). Las emisiones por fuentes móviles se estiman en los inventarios de emisiones atmosféricas (IEA), los cuales compilan las emisiones por tipo de fuente (generalmente fuentes estacionarias, fuentes móviles, fuentes de área y en algunos casos se incluyen fuentes biogénicas) y el tipo y cantidad de contaminante emitido en un área geográfica y en un intervalo de tiempo determinado (MINAMBIENTE, 2017). Los IEA son una herramienta básica de gran importancia en la gestión de la calidad del aire y un insumo fundamental en la implementación de modelos de transporte químico de contaminantes atmosféricos (Pachón, 2013).

El total de las emisiones por fuentes móviles se estiman como la suma de las emisiones exhosto o por tubo de escape que comprenden dos tipos: emisiones en caliente (con el motor a temperatura normal de funcionamiento) y emisiones en frío (ocurren antes que el motor alcanza la temperatura de estabilización de funcionamiento), las emisiones evaporativas (por evaporación de combustible) y emisiones de material particulado susceptible de resuspensión (denominado comúnmente como polvo de carretera, RD, por sus siglas en inglés). Este último contiene emisiones por abrasión de la carretera y aquellas generadas por el desgaste de frenos y neumáticos (ver ecuación (1.1)) (MINAMBIENTE, 2017; Amato et al., 2011).

$$E_{TOTAL} = E_{Caliente} + E_{Frío} + E_{Evaporativa} + E_{Carretera} + E_{Neumáticos} + E_{Frenos} \quad (1.1)$$

Según el Banco Mundial, en las ciudades de Latinoamérica como Sao Paulo, ciudad de México, Belo Horizonte, Rio de Janeiro, Santiago de Chile, Buenos Aires, Bogotá y Medellín, las fuentes móviles aportan el 70% de la contaminación atmosférica (DNP, 2018). En los últimos años en Colombia el parque automotor ha venido presentando un aumento acelerado y sostenido. En el año 2017 en el país había 13637663 vehículos, de los cuales el 43% son automóviles y vehículos pesados y el 57% son motocicletas, valor que aumentó 6% en el año 2018, conservándose las mismas proporciones en cuanto a vehículos y motocicletas (RUNT, 2018, 2019). La problemática de la contaminación atmosférica por fuentes móviles es aún más grave ya que todavía es común la circulación de flotas vehiculares antiguas que tienen sistemas de control de emisiones deficientes, el 9% del parque automotor nacional tiene más de 40 años y un tercio registra más de 20 años de edad, principalmente en buses, camiones y camperos (DNP, 2018).

Por su parte, el departamento de Caldas en el año 2017 tuvo una participación del 2.4% en el parque automotor nacional (correspondiente a 332381 vehículos), ocupando el onceavo puesto de los departamentos de mayor aporte a este sector (Andemos, 2017). Manizales capital del departamento de Caldas es una ciudad intermedia con una población urbana de 405234 habitantes en el año 2017, de los cuales el 93% habitaban en la zona urbana, su área urbana es de 54 km<sup>2</sup> aproximadamente (DANE, 2019). La ciudad se encuentra a 2150 m.s.n.m. y se caracteriza por tener una alta precipitación anual (1670 mm), temperatura diaria entre 12 y 24 °C y bajas velocidades del viento (< 4 m/s). El parque industrial de la ciudad está conformado por 43 empresas donde el 49% corresponden a industrias de bebidas y alimentos e industrias químicas (Unal-Corpocaldas, 2019). La ciudad se encuentra en proximidad con el volcán Nevado de Ruiz (a 28 km de distancia aproximadamente al sureste) que registra actividad significativa desde el año 2010 (Carn et al., 2017).

Manizales en cuanto al parque automotor en el año 2017 estaba conformado por 169142 vehículos, la tasa de motorización tuvo un aumento de 202 vehículos por cada mil habitantes en el año 2009 a 424.8 vehículos por cada mil habitantes en el 2017, ocupando el tercer lugar de ciudades con mayor tasa de motorización del país. En el mismo año las ciudades de Medellín y Bogotá se encontraban en el segundo y sexto lugar con 433.7 y 322.4 vehículos por cada mil habitantes (Valencia, 2019; Manizales Cómo Vamos, 2018). A través de los años la tasa de motorización sigue aumentando, en el año 2019 Manizales presentó un aumento de esta del 4% respecto al año 2017 (Manizales Cómo Vamos, 2020).

Los altos índices de motorización traen consigo congestiones vehiculares y al mismo tiempo explican los altos niveles de contaminación en áreas urbanas producto de material particulado, precursores de ozono (como el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles), gases efecto invernadero (GEI - como dióxido de carbono,

metano y óxido nitroso); y otros contaminantes asociados a sustancias acidificantes, compuestos orgánicos persistentes y especies carcinogénicas generadas por este tipo de fuentes (MINAMBIENTE, 2017). El material particulado a su vez tiene una composición química diversa y a partir de esta se puede determinar posibles fuentes aportantes diferentes a las fuentes móviles (Amato et. al., 2011; Amato et. al, 2016; Ramírez et. al., 2019). La composición química generalmente se distribuye en seis componentes principales, en la Tabla 1.1 se muestra la distribución de la caracterización química del RD<sub>10</sub> agrupada para un caso de estudio de la ciudad de Bogotá.

**Tabla 1.1. Composición química de RD<sub>10</sub> en la ciudad de Bogotá (Fuente: Ramírez et. al., 2019).**

<b>Componente Composición</b>	<b>Porcentaje, %</b>
Elementos de la corteza terrestre (Al, Fe, Mg, Ca, Na, S, K, P)	49 – 62
Carbono Orgánico (OC)	13 – 29
Iones solubles en agua (SO <sup>2-</sup> <sub>4</sub> , Cl <sup>-</sup> , NO <sup>-</sup> <sub>3</sub> , F <sup>-</sup> , NO <sup>-</sup> <sub>2</sub> , Br <sup>-</sup> , PO <sup>3-</sup> <sub>4</sub> , NH <sup>+</sup> <sub>4</sub> )	1.4 - 3.8
Carbono Elemental (EC)	0.2 - 1.9
Elementos traza (V, Cd, Pb, Ni, Ba, Zn, Cu)	0.2 - 0.5
Otros	12 – 34

El estudio de las fuentes de emisión (estimación de flujos de emisión, caracterización química y morfología) son fundamentales para evaluar el grado de impacto que tienen en la calidad del aire y sobre los receptores (por ejemplo: población, ecosistemas, materiales y clima) (Cuesta A., 2017). En la ciudad Manizales se ha realizado la estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta en el IEA año base 2014 y su posterior actualización al año base 2017. Las emisiones asociadas al tubo de escape y emisiones evaporativas se estimaron mediante la aplicación del modelo IVE (International Vehicle Emissions Model) en ambos IEA. Las emisiones obtenidas para el año base 2017 presentaron el siguiente perfil: CO<sub>2</sub> > CO > COV > NO<sub>x</sub> > CH<sub>4</sub> > PM<sub>10</sub> > SO<sub>x</sub>. La mayor emisión del grupo de GEI fue 511947.2 ton/año de CO<sub>2</sub> y del grupo de contaminantes criterio de 28243.4 ton/año de CO (Unal-Corpocaldas, 2019; Unal-Corpocaldas, 2016).

En cuanto a las emisiones de material particulado susceptible de resuspensión (RD<sub>10</sub>) se tiene un primer estudio realizado por Valencia (2019) mediante la adaptación de parámetros determinados en campo en la ciudad de Bogotá. Los resultados obtenidos mostraron que las emisiones de RD<sub>10</sub> para el año 2014 según la metodología basada en la carga de sedimento de material particulado menor a 10 μm (Amato et. al., 2011) contribuyeron un 8% al total

de las emisiones de  $PM_{10}$  por fuentes móviles en ruta, y para el año 2017 contribuyeron un 11% (Valencia, 2019).

El estudio de composición química en la ciudad de Manizales solo se ha estudiado en aire ambiente en la fracción de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ . Se destacan los estudios realizados por Velasco (2015) y Franco (2020), donde se encontraron elementos asociados a fuentes móviles como Pb, S, Cu, Na, Al, Cl y Fe, otros elementos relacionados con industrias del acero como fundición y soldadura como Fe, Al, S, Na, Ca y Mg. También, otros elementos asociados a fuentes volcánicas como P, S, Zn, F, As, Mn, Mg, Ga y Ti. El análisis morfológico realizado por Franco (2020) para la ciudad de Manizales, mostró múltiples formas que van desde partículas esféricas asociadas a la combustión de carbón, a partículas amorfas con bordes filosos asociadas a emisiones volcánicas. También se encontraron aglomeraciones de hollín, relacionadas a la combustión de vehículos a diésel. Otras formas identificadas fueron partículas geométricas irregulares vinculadas a fuentes naturales tales como material mineral.

En cuanto a los inventarios de emisiones realizados para la ciudad, en el año 2014 y 2017 se usó el modelo IVE (Unal-Corpocaldas, 2019; Unal-Corpocaldas, 2016), este modelo a pesar de haber sido creado para ciudades de países en vías de desarrollo no presenta actualizaciones desde el año 2008. Considerar otros modelos diferentes de estimación de emisiones para fuentes móviles permite revisar y comparar las emisiones evaluando parámetros importantes como los factores de emisión (FE) usados en cada modelo, el cambio de tecnologías, tipo de correcciones, tipos de emisiones calculadas e información de entrada. En cuanto a la estimación de las emisiones de  $RD_{10}$  la estimación de la carga local permite la caracterización química y el estudio de la influencia de las características del área geográfica, así como también determinar posibles fuentes aportantes a la composición química de este tipo de emisiones.

En este sentido, este trabajo va dirigido a complementar los estudios previos y generar nuevas herramientas para la ciudad, por lo tanto, se estimaron las emisiones atmosféricas por fuentes móviles en ruta (emisiones asociadas al tubo de escape -emisiones en caliente y en frío- y emisiones evaporativas) aplicando la metodología COPERT 5.4. Adicionalmente, se estimaron las emisiones de  $RD_{10}$ , para lo cual se determinó la carga de sedimento en campo, se determinó la composición química y morfología de este tipo de emisiones mediante técnicas de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), cromatografía iónica, microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM), estas últimas acopladas a espectroscopía de rayos X (EDS).

Este trabajo genera nuevas herramientas de importancia para la realización de los IEA, los cuales son insumo de entrada a los modelos de transporte de alta resolución de calidad del

aire que se trabajan en la ciudad. De esta manera, se lograría avanzar en la comprensión en materia de calidad del aire de la región y con ello generar estrategias de control de la misma con mayores criterios de calidad, a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente.

### ***Hipótesis***

La estimación de emisiones atmosféricas asociadas al tubo de escape y evaporativas aplicando una nueva metodología, permitirán obtener resultados de importancia para la toma de decisiones en futuras actualizaciones del IEA. Las emisiones asociadas al tubo de escape y evaporativas aplicando la metodología COPERT continuaran presentando un perfil de emisiones típico de fuentes móviles en ruta, es decir, emisiones predominantes de CO, COV, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> y SO<sub>x</sub>. Posiblemente las emisiones obtenidas aplicando la metodología COPERT serán mayores que las emisiones reportadas en el IEA oficial de la ciudad de Manizales al año base 2017, dado que la metodología COPERT presenta FE mayores frente a los FE de la metodología IVE, adicionalmente este último contiene valores posiblemente desactualizados. En el caso de las emisiones de material particulado susceptible de resuspensión se espera que sean menores que las obtenidas en el estudio previo (Valencia, 2019). Debido a que la Cs (parámetro del que depende los FE) varía en función de factores como: meteorológicos, usos del suelo, características de la vía y características del flujo vehicular; factores que en la ciudad de Manizales difieren de la ciudad de Bogotá de donde el estudio previo las obtuvo.

## CAPÍTULO 2

# INVENTARIO DE EMISIONES POR FUENTES MÓVILES EN RUTA PARA LA CIUDAD DE MANIZALES UTILIZANDO EL MODELO COPERT

---

En este capítulo se presenta la estimación del inventario de emisiones por fuentes móviles en ruta (asociadas al tubo de escape y evaporativas) aplicando el modelo y software COPERT 5.4 para la ciudad de Manizales al año base 2017. En la primera parte se presenta la introducción donde se abordan las generalidades de la estimación de emisiones: ecuaciones, modelos y sus principales diferencias (en cuanto a información de entrada, contaminantes estimados, categorías vehiculares, entre otros). Seguidamente se presentan los antecedentes en los cuales se traen a colación las estadísticas del parque automotor y estudios a nivel local, nacional e internacional de estimación de emisiones. Después se presenta un marco teórico referente al modelo COPERT, descripción de las ecuaciones principales, software e interfaz. En la sección de metodología se realiza una descripción detallada del software y a su vez la información ingresada para el caso de estudio, además los análisis realizados. Los resultados se muestran en diferentes secciones como factores emisión y flujos de emisiones totales por categoría vehicular para contaminantes criterio, COV y GEI. Así como también, un ejercicio comparativo de factores de emisión con otras ciudades de Latinoamérica y un análisis de sensibilidad a diferentes parámetros de entrada del software. Por último, se exponen las conclusiones más relevantes con base a los resultados obtenidos.

### 2.1. INTRODUCCIÓN

Los IEA por fuentes móviles en ruta se realizan a partir de dos enfoques: (1) top-down (parte de información macro hasta llegar a información específica) y (2) bottom-up (parte de información micro que permite agregarse para obtener información general). Por lo tanto, de acuerdo a la disponibilidad de información (teniendo en cuenta criterios de calidad y cantidad) y el nivel de detalle requerido del IEA se selecciona el enfoque. Cabe mencionar que la selección del enfoque no determina la correcta realización del mismo (MINAMBIENTE, 2017; González, 2017).

La estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta está en función de las características del parque automotor como categoría vehicular, año y modelo del vehículo, tecnología vehicular, dispositivos de control de emisiones, actividad de funcionamiento del vehículo, entre otros. Adicionalmente, el tipo y composición química del combustible determinan los contaminantes emitidos, por ejemplo, las emisiones de PM y NO<sub>x</sub> se asocian a la combustión del diésel, mientras que las emisiones de CO, COV y SO<sub>x</sub> están asociadas a la combustión de gasolina (González, 2017). Las emisiones por fuentes móviles en ruta se estiman a partir de la ecuación (2.1), la cual relaciona un factor de emisión (FE) y un factor de actividad vehicular (FA).

$$E_i = F.E_{i,j,k} \times F.A._{j,t} \quad (2.1)$$

Donde E es el tipo de emisión (g/año), FE<sub>i,j,k</sub> es el factor de emisión del contaminante (i), para el vehículo de la categoría vehicular (j), y combustible (k) (g/km). FA<sub>i,t</sub> corresponde al factor de actividad de los vehículos de la categoría vehicular (j), durante el tiempo (t) (veh×km/veh/año).

El factor de actividad vehicular asociado a estos tipos de emisiones son los kilómetros recorridos o consumo de combustible. En cuanto a los FE existen diferentes bases de datos para cada tipo de emisión como la base de datos de la EPA (por sus siglas en inglés, Agencia de Protección Ambiental - <https://www.epa.gov/moves>), la IPCC (por sus siglas en inglés, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>) y EEA (por sus siglas en inglés, Agencia Europea de Medio Ambiente), estas son aplicados parcial o completamente en la estimación de emisiones de los IEA. En el primer caso corresponde generalmente a cuantificaciones sin uso de modelos de emisión, mientras que en el segundo caso se hace uso de estos.

El uso de base de datos de FE se debe a que la medición en campo es un proceso costoso, complejo y dispendioso, ya que se debe realizar para cada tipo de vehículo con una tecnología vehicular determinada bajo ciertas condiciones, y con ello, el tratamiento de datos para la obtención final de los FE (Carrasco, 2009; Tolvett, 2009). Es recomendable que al implementar las bases de datos de FE diseñados para una región diferente a la zona de estudio estos sean ajustados y/o corregidos de acuerdo a las características del parque automotor, características de circulación y la meteorología de la zona de estudio (Henríquez, 2007; MINAMBIENTE, 2017).

Diferentes modelos computacionales de emisiones vehiculares han sido desarrollados dado la necesidad y la alta complejidad de estimación de este tipo de emisiones, ya que involucra información detallada del parque automotor (tipo de vehículo, año y modelo del vehículo, tecnología vehicular, combustible, kilometraje recorrido, ciclos de conducción, entre otros) (González, 2017; MINAMBIENTE, 2017). Modelos como MOVES (Motor Vehicle

Emission Simulator), IVE (International Vehicle Emissions Model) y COPERT (International Vehicle Emissions Model) cuentan con un gran número de aplicaciones a nivel internacional (MINAMBIENTE, 2017).

Los modelos difieren principalmente en el tipo y cantidad de datos de entrada que requieren, los FE y emisiones de contaminantes estimados, las tecnologías vehiculares que contienen, las condiciones de la región para los cuales fueron diseñados y el tipo de corrección y/o ajuste de los FE. En la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 se muestra un comparativo de las principales características de dichos modelos. La selección del modelo de emisión se realiza de acuerdo a la información de entrada requerida y de la disponibilidad de información, teniendo en cuenta que una limitación para la realización de IEA por fuentes móviles es la ausencia de información detallada de la distribución del parque automotor.

Otro comparativo a destacar entre los modelos de emisión es la diferencia de los valores de FE base de las especies contaminantes para las distintas categorías vehiculares, la metodología COPERT presenta valores de FE sin corregir mayores que la metodología IVE. Por ejemplo, en la Tabla 2.3 se presenta un comparativo de los FE para la categoría vehicular de motocicletas, la cual presenta una importante diferencia principalmente en el FE de CO. Cabe destacar que la tecnología vehicular es uno de los factores con mayor sensibilidad en la estimación de emisiones.

**Tabla 2.1. Comparación de los principales parámetros de entrada de los modelos de emisión (Adaptada de: EPA, 2020; Gonzáles, 2017; Rojas, 2015; Tolvett, 2009; SMARN et. al, 2009).**

<b>Modelo</b>	<b>Año base calendario y mes</b>	<b>Altitud de la zona de estudio</b>	<b>Temperatura ambiente</b>	<b>Humedad relativa</b>	<b>Consumo de combustible</b>	<b>Características del combustible</b>	<b>Número de categorías vehiculares</b>	<b>Distribución de la flota vehicular por clase y tecnología</b>	<b>Crecimiento promedio de la flota vehicular del año base al año de análisis</b>	<b>Kilómetros recorridos por tipo de vehículo y de vía</b>	<b>Distribución de kilómetros recorridos por tecnología vehicular y hora del día</b>	<b>Velocidad promedio por tipo de vehículo y de vía</b>	<b>Distribución de velocidad promedio por hora y tipo de vía</b>	<b>Número de arranques por tipo de vehículo</b>	<b>Tiempo de reposo del vehículo</b>	<b>Distribución de la longitud promedio de los viajes</b>	<b>Descripción del programa de inspección y mantenimiento</b>	<b>Uso de aire acondicionado</b>
<b>MOVES<sup>a</sup></b>	X	X	X		X	X	13	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
<b>IVE<sup>b</sup></b>		X	X	X		X	7	X		X				X			X	X
<b>COPERT<sup>c</sup></b>	X		X	X	X	X	5	X		X	X	X	X			X		X

Nota:

<sup>a</sup> Motor Vehicle Emission Simulator, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2020).

<sup>b</sup> International Vehicle Emissions Model, desarrollado por el Centro Internacional de Sistemas Sostenibles (ISSRC) y la Universidad de California en Riverside (IVE, s. f.).

<sup>c</sup> Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport, desarrollado por la Agencia Europea del Medioambiente (Emisia SA., 2020).

Tabla 2.2. Comparación de las principales características de los modelos de emisión (Adaptada de: Gonzáles, 2017; Rojas, 2015; EPA, 2020).

Modelo	Alcance geográfico			Tipos de fuentes		Tipos de emisiones		Contaminantes					Número de categorías vehiculares		Número de variables de entrada		Tipos de combustible								Especificaciones tecnológicas		Variable elemental		Año de última actualización
	Municipal	Departamental o estatal	Nacional	En ruta	Fuera de ruta	En caliente, en frío y evaporativas	De polvo resuspendido y/o desgaste de frenos y neumáticos	Criterio <sup>a</sup>	Hidrocarburos <sup>b</sup>	Efecto invernadero <sup>c</sup>	Metales <sup>d</sup>	Otros <sup>e</sup>	Gasolina	Diésel	GNV	GLP	Etanol	Metanol	H <sub>2</sub>	Híbrido - Electricidad	Balance de energía	Estados Unidos	Europa	Aceleración	Velocidad				
<b>MOVES</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X*			13	13	X	X	X		X			X	X	X			X	X	2018
<b>IVE</b>	X	X	X	X		X		X	X	X	X*	X	7	9	X	X	X	X	X				X	X	X			X	2008
<b>COPERT</b>	X	X	X	X	X	X	X	X*	X	X	X	X	6	9	X	X	X	X	X	X	X		X		X		X	2020	

Nota:

<sup>a</sup> CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>.

<sup>b</sup> CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O.

<sup>c</sup> COV, COVNM.

<sup>d</sup> Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Zn.

<sup>e</sup> MOVES: NH<sub>3</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, naftaleno, formaldehído, IVE: NH<sub>3</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, 1,3-butadieno, acetaldehído, formaldehído, COPERT: NH<sub>3</sub>, MO, especiación COVNM

\* MOVES: solamente CO<sub>2</sub>. IVE: solamente Pb. COPERT: adicional PM<sub>2.5</sub>.

**Tabla 2.3. Comparativo de FE base para motocicletas, disponibles en los modelos IVE y COPERT.**

Categoría vehicular	Tipo de motor	Tecnología	Modelo	CO	COVNM	NO <sub>x</sub>	N <sub>2</sub> O	PM
Motocicleta	2 tiempos	Convencional	COPERT	24.3	9.97	0.067	0.002	0.16
	2 tiempos	Sin catalizador	IVE	15.3	8.3	0.053	0	0.288
	4 tiempos	Convencional	COPERT	25.7	1.68	0.233	0.002	0.014
	4 tiempos	Sin catalizador	IVE	10.4	2.6	0.42	0	0.04

Nota:

Unidades:	g/km	
Combustible:	gasolina	
Cilindraje:	COPERT	2 tiempo > 50 cm <sup>3</sup>
	IVE	2 tiempos < 250 cm <sup>3</sup>
Fuente:	COPERT	Tabla 3.25 “Tier 2 exhaust emission factors for L-category vehicles, NFR 1.A.3.b.iv” (EEA, 2020)
	IVE	Anexo A del modelo IVE “BERAFtemplateAUTOMATED” (IVE, 2008)

Tanto el modelo MOVES como el modelo IVE permite ajustar los FE a condiciones locales principalmente mediante cuatro componentes: patrones de conducción, partidas en frío, tecnología vehicular y composición dinámica de la flota. En cuanto a los patrones de conducción, este involucra los bins de potencia que correlacionan el nivel de estrés del motor y la potencia específica vehicular (VSP). La VSP se define como la energía requerida para desplazar un vehículo por unidad de peso (unidad: kW/ton), este parámetro incluye la resistencia a la rodadura, la aerodinámica, la energía cinética para acelerar el vehículo y el efecto de la pendiente de la vía (tiene en cuenta el producto de la velocidad por la aceleración equivalente). De esta manera, los resultados serán más representativos en relación con la topografía del área de estudio (EPA, 2020; González, 2017; Jiménez, 1999).

IVE cuenta con un gran número de implementaciones a nivel regional en diferentes ciudades de Latinoamérica como Ciudad de México, Santiago de Chile, São Paulo, Lima y Buenos Aires. En Colombia ha sido aplicado en ciudades como Bogotá, Manizales y Envigado (González, 2017). En Manizales ha sido aplicado en dos casos de estudio, en el primer IEA desarrollado para la ciudad – año base 2014 y su posterior actualización para el año base 2017. Sin embargo, como se observa en la Tabla 2.2 el modelo IVE no ha tenido actualizaciones importantes desde el año 2008 (IVE versión 2.0); en consecuencia, el modelo presenta desventajas para la toma de decisiones dado que la cuantificación de emisiones atmosféricas será limitada al no tener disponibles FE para nuevas tecnologías

vehiculares que ingresen a Colombia (superiores a la normativa Euro 5). IVE presenta solo tiene FE disponibles para vehículos particulares hasta la normativa Euro IV y para buses hasta Euro V tanto para vehículos a gasolina como a diésel. En cuanto al modelo MOVES en Colombia ha sido aplicado de manera parcial (uso solamente de FE) en la ciudad de Bogotá (Ramírez et. al., 2019a), sin embargo, este fue desarrollado atendiendo principalmente a las características de tecnologías vehiculares y estándares de emisión de la flota vehicular estadounidenses, así como también la actividad vehicular asociada con los patrones de conducción.

En contraste, el modelo COPERT ajusta a condiciones locales los FE por medio de la tecnología vehicular y composición dinámica de la flota, la edad del vehículo (en términos de kilometraje acumulativo), mejoras del combustible, la velocidad promedio y condiciones meteorológicas. Es preciso destacar que el modelo COPERT incluye la estimación de más tipos de emisiones (emisiones no exhosto: emisiones de  $RD_{10}$  y emisiones por desgaste de carretera) y más contaminantes en comparación con los otros modelos, como metales (Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Zn), BC y  $PM_{2.5}$ , estos últimos de gran importancia debido a los efectos adversos sobre la salud y el medio ambiente (WHO, 2016). Adicionalmente, COPERT presenta constantes actualizaciones, siendo su última en octubre de 2020 (COPERT versión 5.4) que incluye correcciones y mejoras de las versiones anteriores del software y nuevos FE para diferentes categorías vehiculares (por ejemplo, FE para tecnologías superiores a Euro 5 como vehículos híbridos) (Emisia SA., 2019). En cuanto a los insumos de entrada que requiere son menores y similares en comparación con los modelos estadounidenses (MOVES e IVE) como se muestra en la Tabla 2.2, sumado a que las tecnologías vehiculares del parque automotor en Colombia se representan mejor con la normativa euro bajo la cual está basado el modelo COPERT.

En este sentido, en este capítulo se aplicó el modelo COPERT para estimar emisiones directas (exhosto/asociadas al tubo de escape y evaporativas) por fuentes móviles en ruta en Manizales (año base 2017), con el fin de generar nuevas herramientas de cálculo de emisiones útiles para la toma de decisiones en futuras actualizaciones del IEA - como la selección del modelo de emisión. Como se mencionó anteriormente, el modelo COPERT es actualizado periódicamente e incluye nuevos FE conforme se desarrollan nuevas tecnologías vehiculares (por ejemplo: Euro V y Euro VI que se esperan ingresen al país), adicionalmente permite estimar emisiones que no pueden obtenerse mediante el modelo IVE, por ejemplo, emisiones de  $PM_{2.5}$ , BC, metales y emisiones no exhosto. La selección del año base 2017 permite realizar un comparativo con el estudio previo del IEA oficial de la ciudad (Unal-Corpocaldas, 2019), teniendo como base la misma información del parque automotor.

## 2.2. ANTECEDENTES

### 2.2.1. ESTADÍSTICAS DEL PARQUE AUTOMOTOR DE LA CIUDAD DE MANIZALES – AÑO 2017

Manizales es una ciudad intermedia con una población 405234 habitantes en el año 2017 (93% habitaban zona urbana) y su área urbana consta de 54 km<sup>2</sup> aproximadamente (DANE, 2019). En la Figura 2. 1 se muestra la distribución de los modos de transporte empleados por la población en el año 2017, se observa que solo el 18% de la población se movilizó en transportes sostenibles (cable aéreo, bicicleta y a pie), mientras que el restante, 72%, se movilizó en transporte público (bus y taxi) y transporte particular (vehículo particular y moto). De acuerdo al informe de Calidad de Vida (Manizales como vamos, 2018) los hábitos en los modos de transporte no han presentado variaciones significativas en los últimos cinco años.

El parque automotor en la ciudad de Manizales para el año 2017 estaba conformado por 169142 vehículos distribuidos en cinco categorías vehiculares como se muestra en la Tabla 2.4, valor que aumentó un 22% respecto al año 2014 (año base de estudio del IEA en la ciudad de Manizales) (Valencia, 2019). Cabe destacar que las categorías de vehículos particulares y motocicletas presentaron las mayores variaciones porcentuales, 27.41% y 31.52% respectivamente.

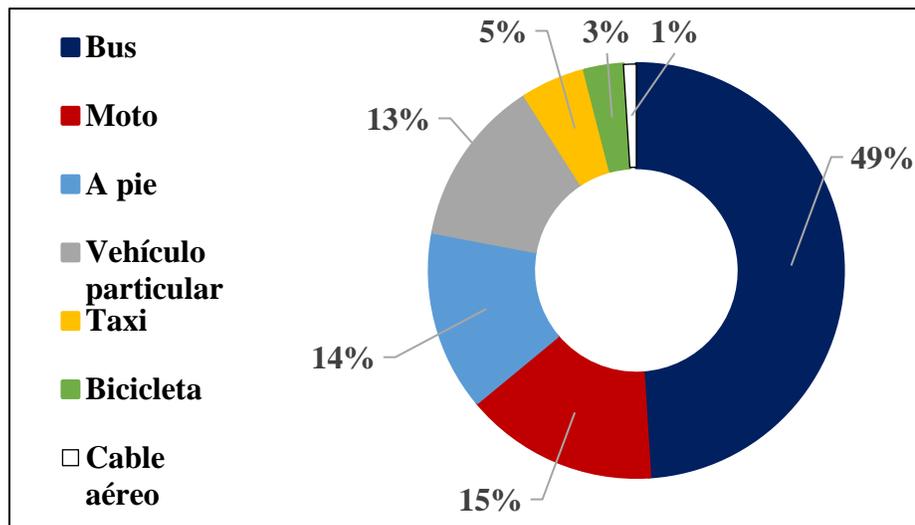


Figura 2. 1. Modos de transporte empleados por la población en el año 2017 (Fuente: Manizales Como Vamos, 2017).

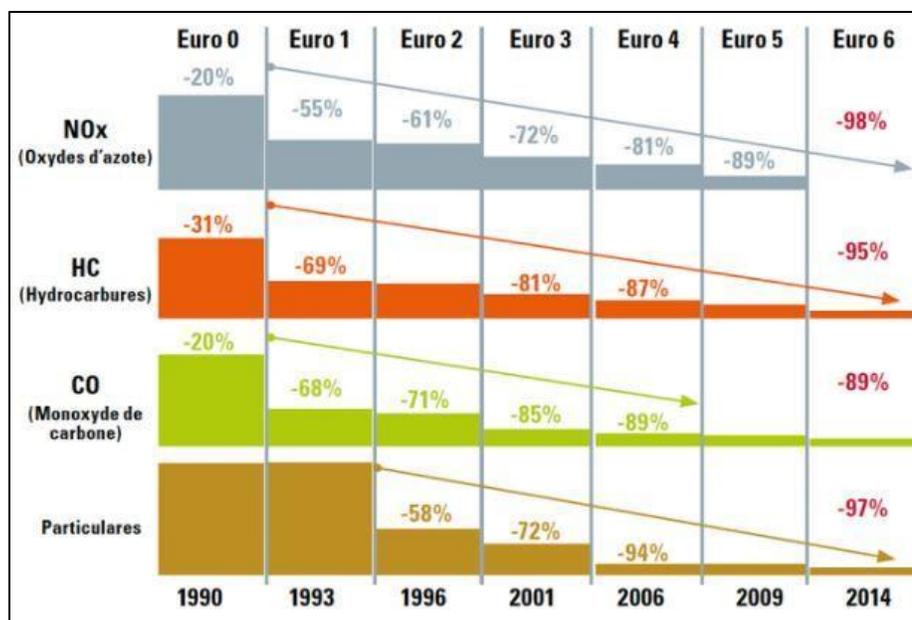
**Tabla 2.4. Distribución del parque automotor de la ciudad de Manizales (Tomado de: Valencia, 2019).**

<b>Categoría</b>	<b>Año 2014</b>	<b>Año 2017</b>	<b>Variación porcentual (%)</b>
Vehículos particulares	64090	81659	27.41
Motocicletas	60625	79734	31.52
Taxis	2402	2320	-3.414
Buses	2367	2604	10.01
Vehículos pesados	2528	2825	11.75
<b>Total</b>	<b>132012</b>	<b>169142</b>	<b>21.95%</b>

Las tecnologías vehiculares tanto de los nuevos vehículos que ingresan a la ciudad como de los vehículos antiguos que aun transitan juegan un papel importante en el tema de emisiones contaminantes al aire. Las tecnologías vehiculares corresponden a diferentes sistemas de control de reducción de emisiones de sustancias contaminantes como: CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM e HC, por tal razón es un componente clave en la estimación de emisiones. Dispositivos de post tratamiento (remueven contaminantes en la corriente del tubo de escape), sistemas modificadores de combustión (alteran el ambiente durante la combustión del combustible en el motor), nuevos tipos de motor de combustión interna como inyección directa de gasolina, autoencendido controlado y encendido por compresión de carga homogénea, son algunos de los tipos de sistemas de control de emisiones (MINAMBIENTE, 2017).

La clasificación de las tecnologías vehiculares está de acuerdo a la normativa de cada país, sin embargo, la clasificación de la normativa de Europa (Euro) es la más reconocida a nivel mundial, en la Figura 2. 2 se muestra el porcentaje de reducción de sustancias contaminantes de acuerdo a cada tecnología Euro. Cabe mencionar que una tecnología vehicular puede tener uno o más sistemas de control de emisiones.

González (2017) y Valencia (2019) realizaron una caracterización de la distribución tecnológica del parque automotor de la ciudad de Manizales al año base 2014 y 2017, se determinó que al año 2017 en el caso de la categoría de los vehículos particulares, en el sistema de distribución de aire/combustible la tecnología de inyección multipunto (sistema de control que permite la dosificación electrónica del combustible) aumentó su participación con un 72% (al año 2014 tuvo una participación del 55%). Entre los demás cambios se destaca que en el año 2014 la tecnología Euro III sólo tenía una participación del 4% y el 33% de la flota no contaba con ningún tipo de sistemas de control. Comparado con el año 2017 la participación de la tecnología Euro III aumentó al 20% y el 33% de la flota que no contaba con ningún tipo de sistemas de control se redujo a 14% como se muestra en la Tabla 2.5 (González, 2017; Valencia, 2019).



**Figura 2. 2. Reducción de sustancias contaminantes de acuerdo a la clasificación de tecnologías Euro (Fuente: Cesvismap, 2016).**

En el caso de la categoría vehicular de motocicletas se encontró que para el año 2017 el 80% son de motores de 4 tiempos (con carburador y con inyección directa) comparado con el 46% en el año 2014. Adicionalmente, para el año 2017 el 29% no contaban con catalizador (sistema de control de emisiones por tubo de escape) comparado con el 54% en el año 2014, mientras que los porcentajes restantes corresponden a las motocicletas con catalizador, 71% y 46%. En la distribución tecnológica de la categoría de buses se encontró que el sistema de control de aire/combustible presentó una reducción del 11% en el sistema de inyección directa al año 2017 respecto al año 2014 (González, 2017; Valencia, 2019).

**Tabla 2.5. Distribución tecnológica de las principales categorías vehiculares del parque automotor de la ciudad de Manizales (Tomada de: Unal-Corpocaldas, 2019; Valencia, 2019).**

Categoría Vehicular	Sistema de control por tubo de escape	Distribución porcentual (%)		Sistema de distribución Aire/Combustible	Distribución porcentual (%)	
		IE 2014	IE 2017		IE 2014	IE 2017
Vehículo particular (PC)	Ninguno	33.4	14.4	Carburador	22.1	9.3
	Catalizador de 2 vías	4.5	2.3	Inyección Monopunto	8.6	3.9
	Catalizador de 3 vías	41.6	41.8	Inyección Multipunto	55.4	72.0
	Catalizador de 3 vías/EGR	8.7	7.6	Carburador/Mixer	8.3	5.5

Categoría Vehicular	Sistema de control por tubo de escape	Distribución porcentual (%)		Sistema de distribución Aire/Combustible	Distribución porcentual (%)	
		IE 2014	IE 2017		IE 2014	IE 2017
	Euro II	4.6	7.7	Inyección Precámara	1.6	0.8
	Euro III	4.1	19.7	Inyección Directa	3.1	3.3
	Euro IV	-	3.3	FI	0.8	5.3
	EGR+Mejorado	3.1	3.3			
Moto	Ninguno	54.4	28.8	Motor 2 tiempos	54.4	19.8
	Catalizador	45.6	71.2	Motor 4 tiempos	45.6	78.0
				Motor 4 tiempos, FI	-	2.2
Taxi	Ninguno	4.1	3.9	Carburador	0.7	2.5
	Catalizador de 2 vías	3.8	0.6	Inyección Monopunto	0.3	0.3
	Catalizador de 3 vías	21.0	13.0	Inyección Multipunto	23.4	38.6
	Catalizador de 3 vías/EGR	64.8	53.8	Carburador/Mixer	71.7	55.2
	Euro II	1.7	0.3	Inyección Precámara	0.0	0.3
	Euro III	0.7	25.4	Inyección Directa	3.8	2.8
	Euro IV	-	0.3	FI	0.0	0.3
	EGR+Mejorado	3.8	2.8			
Bus	Ninguno	0.3	0.4	Inyección Precámara	0.3	0.4
	Mejorado	94.8	83.7	Inyección Directa	94.8	83.7
	Euro II	4.0	7.4	FI	4.9	15.9
	Euro III	0.9	8.5			
Camión	Ninguno	26.9	12.5	Inyección Precámara	26.9	12.1
	Mejorado	71.7	54.4	Inyección Directa	71.7	54.4
	Euro II	1.4	4.8	FI	1.4	33.1
	Euro III	-	7.5			
	Euro IV	-	20.7			

Nota:

\*Convenciones asociadas a las tecnologías vehiculares disponibles en el modelo IVE:

EGR: Recirculación del gas del tubo de escape.

FI: Sistema mejorado de inyección de combustible.

### **2.2.2. ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR FUENTES MÓVILES EN RUTA EN LA CIUDAD DE MANIZALES**

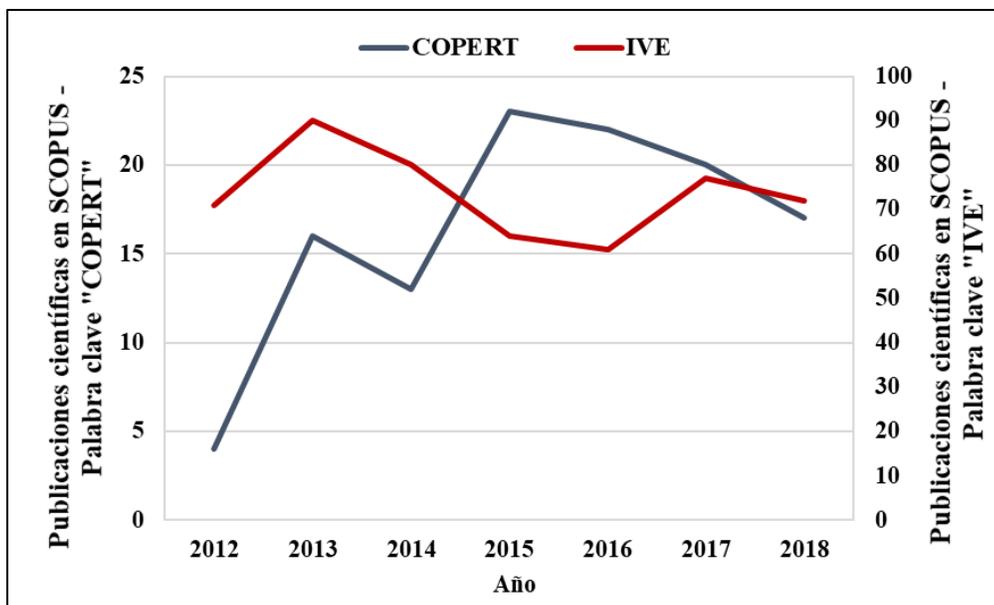
Manizales posee pocos estudios realizados que incluyen estimaciones de emisiones por fuentes vehiculares. El primer estudio se realizó en el año 2003 aplicando FE y un modelo de dispersión gaussiano, en el cual se estimaron emisiones de CO, HC y CO<sub>2</sub>. Sin embargo, este no consideró la totalidad del área urbana de la ciudad, dado que se realizó la estimación solo para un sector (Carrera 21 entre la calle 17 y 28) (Buitrago, 2003).

Se ha realizado un primer IEA año base 2014 y su posterior actualización al año base 2017, en estos se consideraron tanto fuentes móviles como fuentes fijas. En ambos IEA las emisiones asociadas al tubo de escape y emisiones evaporativas -emisiones por fuentes móviles- se estimaron mediante la aplicación del modelo IVE (International Vehicle Emissions Model). Las emisiones obtenidas para el año base 2017 de CO<sub>2</sub> del grupo de GEI fue de 511947.2 ton/año y del grupo de contaminantes criterio para CO de 28243.4 ton/año, estas emisiones con respecto al IEA-2014 aumentaron un 13% para CO y disminuyeron -35% para CO<sub>2</sub>. Otros aumentos obtenidos fueron en N<sub>2</sub>O (70%) y SO<sub>x</sub> (10%), este último atribuible al aumento de vehículos particulares y motos impulsados por gasolina. En cuanto a los demás contaminantes (NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, COV, CH<sub>4</sub>) disminuyeron en un rango de -5 y -50%, disminuciones que debieron al aumento de vehículos con mejores tecnologías vehiculares (Unal-Corpocaldas, 2019; Unal-Corpocaldas, 2016).

### **2.2.3. ESTUDIOS PREVIOS RELACIONADOS CON LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR FUENTES MÓVILES EN RUTA**

En los últimos años los estudios de estimación de emisiones de contaminantes al aire se han centrado en las fuentes antropogénicas, principalmente las fuentes móviles en ruta incluidas en los IEA locales. En el caso de Manizales, la ciudad cuenta un IEA año base 2014 y su posterior actualización al año base 2017, ambos se han realizado aplicando el modelo IVE. De acuerdo a lo discutido en las secciones anteriores, una de las principales desventajas del modelo IVE es que no presenta actualizaciones en los FE, razón por la cual a fin de generar nuevas herramientas para la estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta se estudia la implementación del modelo COPERT, el cual presenta actualizaciones que incluye FE conforme se desarrollan nuevas tecnologías vehiculares.

En la Figura 2.3 se muestra el número de publicaciones científicas en la base de datos SCOPUS de estimación de emisiones evaporativas y asociadas al tubo de escape mediante los modelos de emisión COPERT e IVE (comúnmente aplicados).



**Figura 2.3. Publicaciones científicas anuales asociadas a las palabras clave “COPERT” e “IVE” en la base de datos SCOPUS.**

En la Figura 2.3 se observa que los estudios de estimación de emisiones vehiculares evaporativas y asociadas al tubo de escape implementado modelos de emisión ha tenido gran interés, que se ve reflejado en el aumento de publicaciones científicas en la base de datos SCOPUS desde el año 2012. Adicionalmente, se observa que el aumento de publicaciones implementando el modelo IVE es superior a las publicaciones implementando el modelo COPERT, lo cual se debe a que IVE es un modelo de estimación de emisiones vehiculares desarrollado con fines aplicativos tanto para Estados Unidos como para países en vías de desarrollo, mientras que COPERT está dirigido inicialmente para países de la Unión Europea. Sin embargo, desde el año 2014 las publicaciones relacionadas con el modelo IVE disminuyeron mientras que las del modelo COPERT aumentaron, tendencia que se debe a las desventajas que tiene un modelo frente al otro, como la falta de actualizaciones periódicas que se relaciona directamente con la disponibilidad de factores de emisión.

El modelo COPERT es uno de los modelos que cuenta con un gran número de aplicaciones a nivel mundial, cuenta con implementaciones en países de Latinoamérica como Chile, Argentina y Colombia, además de países de la Unión Europea (zona de estudio para el cual fue desarrollado principalmente). En la Tabla 2.6 se presentan algunos casos de estudio IEA por fuentes móviles en diferentes países.

**Tabla 2.6. Estudios de IEA por fuentes móviles en ruta a nivel internacional y nacional.**

Zona de estudio	Aspectos relevantes	Fuente
<i>Aplicaciones del modelo COPERT</i>		
Foshan, China	IEA por fuentes vehiculares en el periodo de febrero de 2014 hasta enero de 2015. Se estimaron emisiones de CO, NO <sub>x</sub> , COV y PM <sub>2.5</sub> siguiendo un enfoque de aproximación bottom-up y aplicando la metodología COPERT IV.	(Liu et. al., 2018)
España,	Estimación de contaminantes por fuentes vehiculares durante el periodo de 1988-1999. Aplicación del modelo COPERT III.	(Burón et. al., 2004)
Buenos Aires, Argentina	Inventario de emisiones anual para fuentes móviles en ruta en el área metropolitana año base 2006, siguiendo el enfoque bottom-up y aplicando la metodología COPERT para estimación de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero.	(D'Angiola et al., 2010)
Región metropolitana de Santiago de Chile, Chile	Medición de emisiones de NO <sub>x</sub> , CO, HC, MP y CO <sub>2</sub> de fuentes vehiculares mediante dinamómetro de chasis y con sistemas portátiles en ruta. Adicionalmente, se determinaron FE utilizando la metodología CONAMA (basada en COPERT) y la metodología MOVES.	(Carrasco, 2009)
Bogotá, Colombia	IEA por fuentes fijas y fuentes móviles año base 2008. En el componente de fuentes móviles se estimaron emisiones de CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , PM y COV mediante la metodología COPERT y estudios previos. Se realizó la desagregación espacial en una malla de 55 km x 55 km con una resolución de 1 km x 1 km y la desagregación temporal a 1 h.	(Peñaloza, 2010)
Bogotá, Colombia	Actualización del IEA previo aplicando la metodología IVE. Se estimaron emisiones de contaminantes criterio, COVNM y gases de efecto invernadero.	(Rodríguez y Beherentz, 2009)
Bogotá, Colombia	Evaluación de emisiones vehiculares para el año 2015 y dos escenarios relacionados al aumento de la capacidad vial. Se utilizaron factores de emisión de COPERT IV. Se estimaron emisiones de 5 contaminantes: CO, NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> y COV.	(Mangones et. al., 2020)
Valle de Aburrá - Medellín	Actualización del IEA al año base 2015. Implementando los modelos de emisiones MODEMED y ETROME. Se estimaron contaminantes criterio y COV. Adicionalmente, se desagregó	(Toro et. al., 2017)

Zona de estudio	Aspectos relevantes	Fuente
	espacial y temporalmente a una resolución de 1 km x 1 km y 1h respectivamente.	
Envigado, Colombia	IEA por fuentes móviles en ruta año base 2011 aplicando la metodología IVE. Se estimaron contaminantes criterio y COV. Adicionalmente, se desagregó espacial y temporalmente a una resolución de 0.25 km x 0.25 km y 1h respectivamente.	(Londoño et. al., 2011)
Santiago de Cali, Colombia	IEA año base 2011. Se estimaron emisiones anuales de contaminantes criterio, COV y gases de efecto invernadero.	(DAGMA, 2012)

### 2.3. GENERALIDADES DE LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR FUENTES MÓVILES EN RUTA MEDIANTE COPERT

#### *Modelo COPERT*

COPERT es un modelo para el cálculo de emisiones del sector de transporte por carreteras tanto a nivel local como nacional, desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA). Estima emisiones en caliente, frío, evaporativas y no exhosto; de contaminantes criterio, GEI, COV, COVNM y metales. Adicionalmente, tiene la opción de realizar un balance de energía a partir de las ventas de combustible (Emisia SA, 2020). Es aplicable tanto para inventarios de emisiones atmosféricas a nivel local y nacional, para este último caso considera diferentes tipos de carretera como: urbana, rural e intermunicipales.

La metodología COPERT posee tres niveles para la estimación de emisiones según la información disponible, estos difieren entre sí por el detalle de la información de entrada que se requiere. Así, el nivel (1) estima emisiones a partir de la información de las ventas anuales de combustible, el nivel (2) estima emisiones a partir del kilometraje promedio anual por tecnología vehicular, y el nivel (3) estima emisiones a partir de información de una combinación de datos del parque automotor como: categoría y tecnología vehicular, kilometraje anual y acumulativo promedio por categoría y tecnología vehicular y velocidad promedio por categoría y tecnología vehicular, entre otra. Este último corresponde al nivel más detallado tanto en insumos de entrada como en cálculos internos del software para la estimación de emisiones (Ntziachristos y Zissis, 2009; EEA, 2020; Emisia SA., 2020).

COPERT dispone de un software libre (en su última versión COPERT 5.4 – año 2020) que puede ser descargado en la página: <https://www.emisia.com/utilities/copert/download/>

desarrollado en Microsoft Windows por la EEA y EMISA S.A. El software dispone de dos niveles, 2 y 3, para la estimación de emisiones según la disponibilidad de información (Emisia SA., 2020).

### ***Ecuaciones de estimación de emisiones***

La estimación de emisiones utiliza una combinación de datos del parque automotor, actividad vehicular, condiciones climatológicas y calidad de los combustibles para el cálculo de los FE y emisiones. El cálculo de las emisiones totales se basa en la ecuación (2.2) (EEA, 2020).

$$E_{\text{Total}} = E_{\text{Caliente}} + E_{\text{Frío}} + E_{\text{Evaporativas}} + E_{\text{No exhosto}} \quad (2.2)$$

Donde  $E_{\text{Caliente}}$ , emisiones provenientes del tubo de escape que se producen en el motor y el sistema de control de emisiones cuando se ha alcanzado una temperatura de funcionamiento ideal del motor.  $E_{\text{Frío}}$ , emisiones mientras el motor aún no ha alcanzado su temperatura de funcionamiento óptimo.  $E_{\text{Evaporativas}}$ , emisiones por evaporación en los tanques de combustible, en los sistemas de inyección y las líneas de repartición del combustible.  $E_{\text{No exhosto}}$ , emisiones por abrasión de la carretera, desgaste de frenos y neumáticos.

En la Tabla 2.7 se muestran las ecuaciones correspondientes a cada tipo de emisión, cabe mencionar que en este capítulo no se abordaran las emisiones no exhosto. Las emisiones asociadas al sistema de escape de los gases de combustión cuando el motor está en operación y estabilizado térmicamente se calculan por medio de la ecuación (2.3). Las emisiones asociadas al sistema de escape de los gases de combustión cuando el motor está en fase de calentamiento (emisiones en frío) se calculan análogamente a las emisiones en caliente. Sin embargo, se incluye la fracción de kilómetros recorridos con motores fríos o catalizadores operados por debajo de la temperatura de apagado y la proporción de frío/calor de los factores de emisión para la especie  $i$ , como se muestra en la ecuación (2.4) (EEA, 2020).

En cuanto a las emisiones evaporativas, en COPERT 5.4 hacen referencia a emisiones que no surgen de la combustión de la gasolina, sino que se dan por procesos de evaporación debido a cambios de temperatura y de presión de la gasolina. Corresponden a la evaporación en los tanques de combustible, en los sistemas de inyección y las líneas de repartición del combustible, así como también por las pérdidas en los procesos de filtración del combustible a través de las partes plásticas o de caucho de los vehículos. Estas se calculan mediante la ecuación (2.5) (EEA, 2020).

**Tabla 2.7. Ecuaciones para la estimación de emisiones por tipo.**

<b>Tipo de emisión</b>	<b>Ecuación</b>	<b>No.</b>
Caliente	$E_{i,j,k} = N_{j,k} \times VKT_{j,k} \times FE_{i,j,k}$	(2.3)
Frío	$E_{Frío} = \beta \times FE_{i,j,k} \times N_{j,k} \times VKT_{j,k} \times [(FE'/FE) - 1]$	(2.4)
Evaporativa	$E_{Evap} = \sum_s D_s \times \sum_j N_j \times (HS_j + e_{d,j} + RL_j)$	(2.5)
<p>Donde:</p> <p><math>E_{i,j}</math>, son las emisiones de la especie <math>i</math> por categoría del vehículo <math>j</math>, tipo de vía <math>k</math> y motor estabilizado térmicamente. <math>N_{j,k}</math>, es el número de vehículos en circulación por categoría <math>j</math>. <math>VKT_{j,k}</math>, son los kilómetros recorridos por categoría de vehículo <math>j</math> y tipo de vía <math>k</math>. <math>FE_{i,j,k}</math>, es el factor de emisión en caliente de la especie <math>i</math> por categoría de vehículo <math>j</math> y tipo de vía <math>k</math>. <math>\beta</math>, es la fracción del kilometraje conducido con el motor en frío u operando en una temperatura por debajo de la ideal para una categoría y tecnología vehicular, que depende directamente del tiempo de un viaje. <math>D_s</math>, es el número total de días con una temperatura ambiente específica que afecte al factor de emisión (día). <math>N_j</math>, es el número de vehículos a gasolina de una categoría <math>j</math> (veh). <math>HS_j</math>, es el promedio de emisiones que se dan cuando se apaga un motor y la temperatura del combustible se encuentra elevada, por lo que se pueden presentar fugas (g/día). <math>e_{d,j}</math>, es el promedio de emisiones diurnas debido a los cambios de temperatura que se dan en el día por lo que genera una evaporación del combustible (g/día). <math>RL_j</math>, es el promedio de las emisiones por pérdidas en funcionamiento que son el resultado de los vapores generados en el tanque de combustible (g/día) (Emisia SA, 2020).</p>		

Por otra parte, los factores de emisión (FE) son valores representativos que relacionan la cantidad de un contaminante que se emite a la atmósfera con una actividad (relacionada a los kilómetros recorridos). En el caso de fuentes móviles en ruta, los FE para cada contaminante son específicos según el tipo de vehículo, peso bruto vehicular (PBV), cilindraje, tecnología vehicular y tipo de combustible. COPERT 5.4 define los FE en función de la velocidad vehicular promedio como se muestra en la ecuación (2.6) (EEA, 2020).

$$FE = \frac{\text{Alpha} \times V^2 + \text{Beta} \times V + \text{Gamma} + \frac{\text{Delta}}{V}}{(\text{Epsilon} \times V^2 + \text{Zeta} \times V + \text{Eta}) \times (1 - RF)} \quad (2.6)$$

Donde alpha, beta, gamma, delta, épsilon, zeta y eta, son parámetros adimensionales proporcionados por COPERT, específicos para la categoría y tecnología vehicular, el peso vehicular bruto y el tipo de combustible usado.  $V$ , es la velocidad promedio vehicular para

cada tecnología vehicular. RF, es el factor de reducción de emisiones específico para cada tecnología vehicular.

### ***Corrección y/o ajuste de factores de emisión***

Los factores de emisión (FE) base en COPERT son corregidos a partir de cuatro componentes: (1) edad del vehículo (asociado al kilometraje acumulativo – aplica para la categoría de vehículos particulares y vehículos de carga livianos), (2) mejoras en la calidad del combustible a través de los años, (3) pendiente de la vía (aplica para la categoría de bus y camión), (4) porcentaje de carga transportada (aplica para la categoría de bus y camión) (EEA, 2020). A continuación, se describen cada corrección.

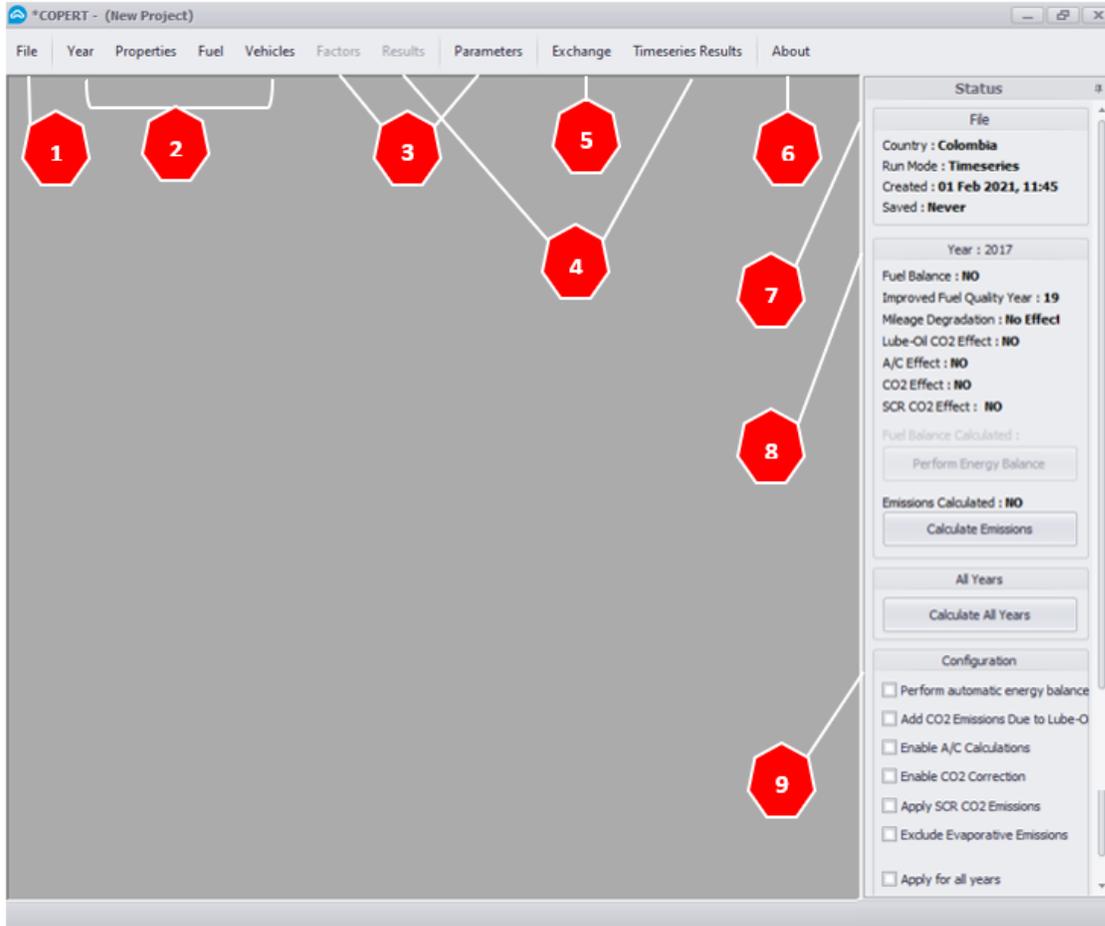
- Corrección por la edad del vehículo, hace referencia al kilometraje acumulativo e indica que a una mayor edad del vehículo se incrementa la tasa de emisión, aplica solo para vehículos particulares con un kilometraje superior a 60000 km. El valor máximo de corrección se aplica hasta alcanzar un kilometraje de 120000 para tecnología Euro 1 y 2, y de 160000 km para tecnología Euro 3.
- Corrección por mejoras en la calidad de combustibles, las características del combustible influyen el nivel de emisión de cada contaminante, dicha corrección solo aplica para el diésel y la gasolina. Los siguientes parámetros son considerados: (1) % de aromáticos, % olefinas y volatilidad para el caso de la gasolina, y (2) contenido de aromáticos policíclicos, número de cetano y T95 para el caso de la gasolina, el software contiene valores preestablecidos para dichos parámetros y pueden ser modificados por el usuario. Las mejoras en las características de los combustibles aplican para los años: 1996 (año base, asociado para tecnologías antes de Euro 3), 2000 (asociado para tecnologías Euro 3), 2005 (asociado para tecnologías Euro 4) y 2009 (asociado para tecnologías Euro 5). La corrección se realiza según el año seleccionado e indica que todos los vehículos funcionan con dicho combustible después del año base asociado a la tecnología vehicular.
- Pendiente de la vía, relaciona una mayor tasa de emisiones a un mayor valor de pendiente, aplica solo para los buses y camiones. Se considera un rango de pendiente de la vía máximo entre -6% a 6% en intervalos de 2.
- Porcentaje de carga, relaciona una mayor tasa de emisiones a una mayor ocupación, aplica solo para los buses y camiones. Se considera un valor porcentual de 0 a 100%, el software tiene asignado un valor preestablecido de 50%.

### ***Interfaz y estructura del software COPERT***

La interfaz del software COPERT 5.4 es amigable con el usuario como se muestra en la Figura 2.4. A continuación, se realiza una descripción general de cada parte de esta y en la

siguiente sección de metodología, en la Tabla 2.8, se muestra la información detallada de cada pestaña.

1. Pestaña “File” corresponde a la sección de crear, abrir, guardar, renombrar y cerrar archivo, así como también de salir del programa.
2. Agrupa las pestañas “Year”, “Properties”, “Fuel” y “Vehicles”, en estos se ingresa la información de entrada requerida para la estimación de los FE y las emisiones de la zona de estudio.
3. Agrupa las pestañas “Factors” y “Parameters”, en estas se encuentran los parámetros base para la estimación de los FE y factores de corrección de los cuales parte el modelo para ajuste a condiciones locales. En “Parameters” se encuentran los parámetros correspondientes a la ecuación (2.6) y parámetros para el cálculo de factores de corrección. En “Factors” se muestran los factores de corrección calculados de acuerdo a la información de entrada y los FE en función de la velocidad sin ningún tipo de corrección.
4. Agrupa las pestañas “Results” y “Timeseries Results”, en estas se muestran los FE y las emisiones de cada contaminante por categoría y tecnología vehicular corregidos a condiciones locales con base a la información de los ítems anteriores.
5. Pestaña “Exchange” es la opción de importar la información de entrada ingresada y de exportar los resultados obtenidos tanto de los FE como las emisiones de cada contaminante por categoría y tecnología vehicular en formato Excel 2003 y 2010.
6. Pestaña “About” corresponde a la sección en la que se verifican actualizaciones del software, enviar errores identificados a los desarrolladores, ayuda en línea (descripción general de los parámetros) e información de los desarrolladores del software.
7. Estado del archivo, contiene información del país para el cual se está realizando la estimación de emisiones, fecha de creación del archivo y el estado de guardado del mismo.
8. Estado e información del archivo, estos corresponden al resumen de activación de las funciones principales como balance de energía, correcciones por: mejoras de combustible, degradación de la flota en términos de kilómetros recorridos acumulativos, efecto de aire acondicionado (A/C) y aditivos (aceites y SCR – urea). También se encuentra la opción para ejecutar el software (calcular los FE, emisiones y balance de energía).
9. Corresponde a la sección de configuración donde se habilitan o deshabilitan las principales funciones descritas en el ítem anterior, además del cálculo de estimación de emisiones evaporativas.



**Figura 2.4. Interfaz del software COPERT 5.4.**

Con el fin de tener una visión general del software en la Figura 2.5 se muestra la estructura general del mismo, esta considera 4 partes básicamente: información de entrada, selección de funciones, cálculos intermedios e información de salida.

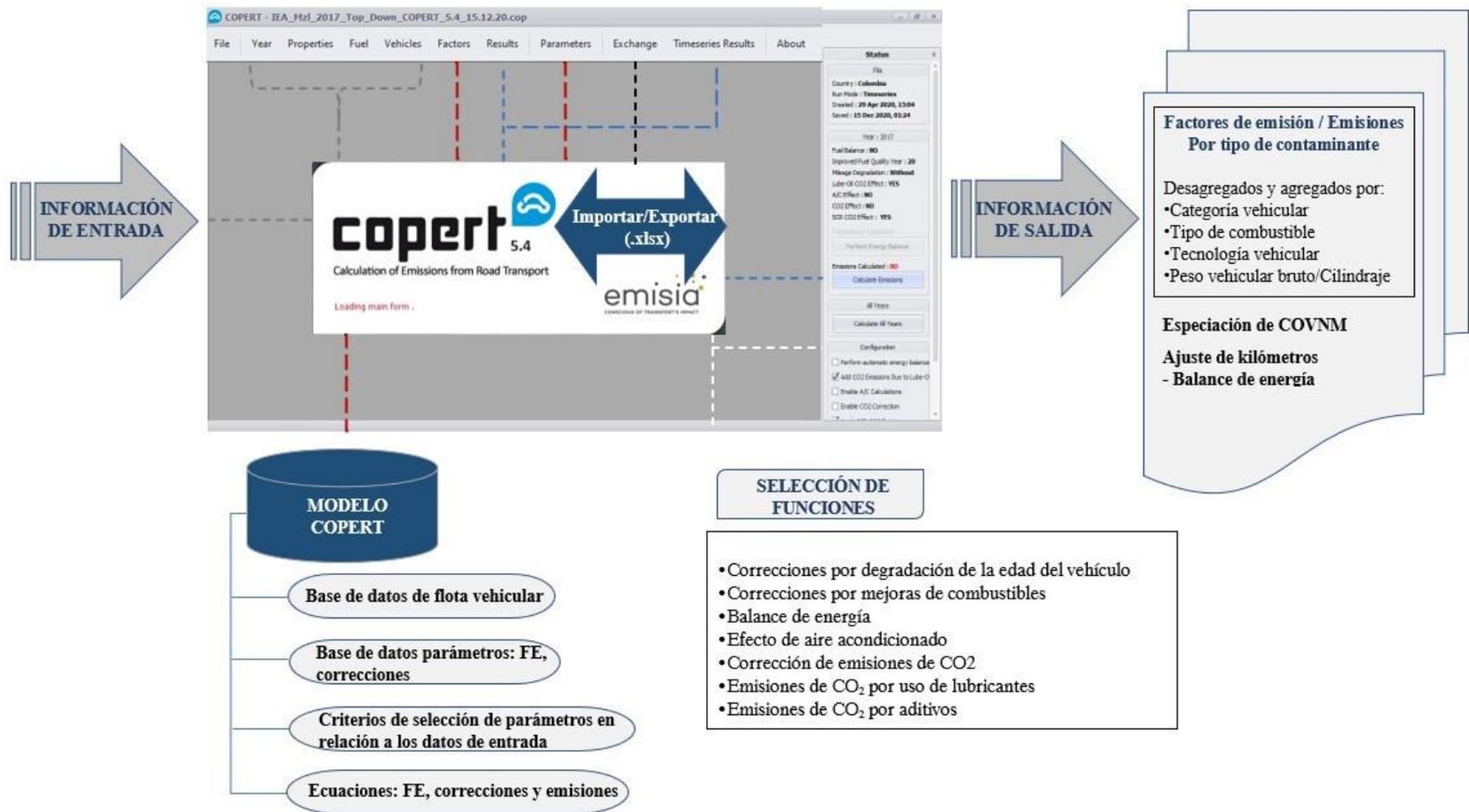


Figura 2.5. Esquema de la estructura general del software COPERT 5.4.

## 2.4. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR FUENTES MOVILES EN RUTA APLICANDO LA METODOLOGÍA COPERT

En la Figura 2.6 se muestra el esquema con las consideraciones para la estimación de flujos de emisiones totales anuales por fuentes móviles en ruta para la ciudad de Manizales al año base 2017.

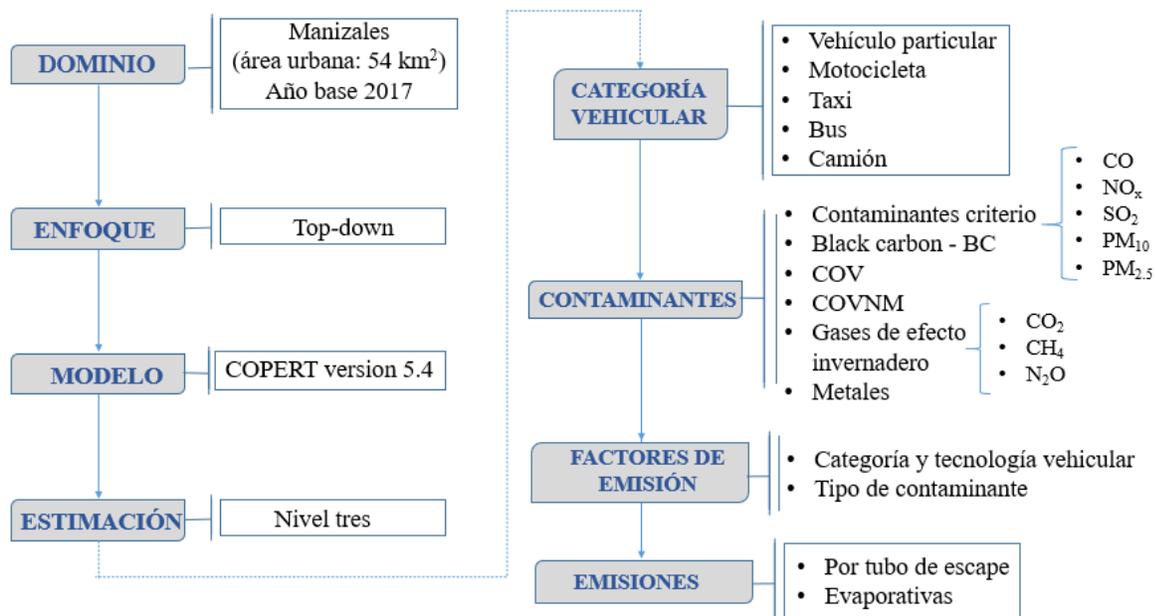


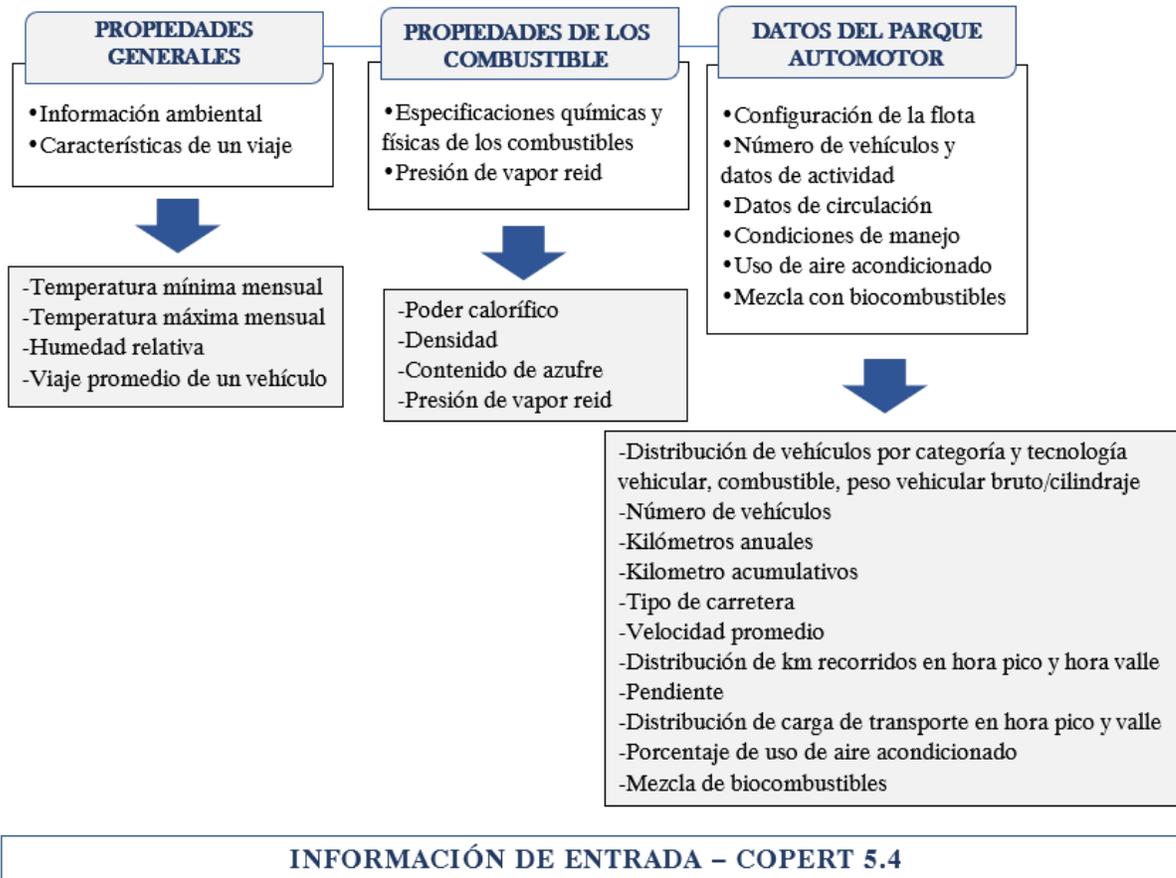
Figura 2.6. Esquema general metodológico de la estimación mediante el modelo COPERT – Manizales, 2017.

### 2.4.1. INFORMACIÓN DE ENTRADA A COPERT 5.4 PARA EL CASO DE ESTUDIO MANIZALES AÑO BASE 2017

#### *Estimación de emisiones mediante la metodología COPERT – Manizales, año base 2017*

El software COPERT 5.4 requiere un conjunto de información de entrada agrupada en tres tipos: (1) propiedades generales, (2) propiedades de combustibles y (3) datos del parque automotor. En la Figura 2.7 se muestra la información asociada a cada grupo de información ingresada al software para el caso de estudio y en la Tabla 2.8 se muestra el total de información detallada de entrada requerida. Cabe mencionar que el software tiene valores

preestablecidos para algunos subgrupos de información, por lo tanto, en la columna “Información ingresada” en los campos que no están señalados por una X se dejaron los parámetros preestablecidos.



**Figura 2.7. Esquema metodológico de la estimación de emisiones exhosto y evaporativas en Manizales mediante el modelo COPERT.**

**Tabla 2.8. Tipo de información requerida por el software COPERT 5.4.**

Grupo de información	Subgrupo de información	Información detallada	Información ingresada
Propiedades generales	Característica de viaje	Viaje promedio recorrido por un vehículo (km/h)	X
	Información ambiental	Temperatura mínima mensual (°C)	X
		Temperatura máxima mensual (°C)	X
		Humedad relativa mensual (%)	X
	Contenido energético	Poder calorífico (MJ/kg)	X

Grupo de información	Subgrupo de información	Información detallada	Información ingresada
Propiedades de combustible	Especificaciones	Relación H:C	
		Relación O:C	
		Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	X
	Contenido de especies	S, Pb, Cd, Cu, Cr, Ni, Se, Zn, Hg, As (ppm)	X (S)
	Especificaciones avanzadas - Años: 1996, 2000, 2005, 2009.	Gasolina (% vol.): E100, E150, Aromáticos y Olefinas	X
		Diésel: PCS (% vol.), número cetano, T95 (°C)	X
	Especificaciones de lubricantes	Relación H:C	
		Relación O:C	
		S, Pb, Cd, Cu, Cr, Ni, Se, Zn, Hg, As (ppm)	
	Estadísticas de consumo de energía	Consumo de combustibles anual (TJ)	
	Contenido de ETBE	%ETBE/Total(ETBE+ETH) (%)	
	Presión de vapor reid	Presión de vapor reid mensual (kPa)	X
	Fracción de combustible fósil en biodiesel	Biodiesel (%)	
		CO <sub>2</sub> de combustible fósil/ Biodiesel (g/g)	
Contenido energético del biodiesel (MJ/kg)			
Datos del parque automotor	Configuración del parque automotor	Categorías y tecnologías vehiculares	X
	Datos de cantidad y actividad vehicular	Número de vehículos por categoría según tipo combustible, PBV y/o cilindraje y tecnología vehicular	X
		Actividad promedio anual asociada al kilometraje por categoría vehicular según tipo combustible, PBV y/o cilindraje y tecnología vehicular (km)	X

<b>Grupo de información</b>	<b>Subgrupo de información</b>	<b>Información detallada</b>	<b>Información ingresada</b>
		Actividad acumulativa asociada al kilometraje por categoría vehicular según tipo combustible, PBV y/o cilindraje y tecnología vehicular (km)	X
	Datos de circulación	Actividad vehicular recorrida asociada al kilometraje por tipo de carretera (urbana en hora pico, urbana en hora valle, rural, carretera) categoría vehicular según tipo combustible, PBV y/o cilindraje y tecnología vehicular (%)	X
		Velocidad en hora pico y en hora valle por tipo de carretera (urbana, rural, carretera) categoría vehicular según tipo combustible, PBV y/o cilindraje y tecnología vehicular (km/h)	X
	Datos de evaporación en el taque combustible por tecnología para vehículos particulares, taxis y motocicletas	Capacidad del tanque de combustible (l)	
		Combustible en el tanque (l)	
		Inyección de combustible (%)	
		Control de evaporación (%)	
		Evaporación por tipo de carretera (urbana hora pico, urbana hora valle, rural, carretera) (%)	
	Condiciones de manejo por tecnología para camiones y buses	Carga por tipo de carretera (urbana en hora pico, urbana en hora valle, rural, carretera) (%)	X
		Pendiente por tipo de carretera (urbana en hora pico, urbana en hora valle, rural, carretera) por vehículo según tipo combustible, PBV y tecnología vehicular (desde -6% a +6%, intervalos de 2%)	X
	Número de ejes	Número de ejes por tecnología vehicular para camiones y buses	
	Factor de consumo de urea	Consumo de urea para camiones Euro IV (%)	
	Uso de aire acondicionado	Vehículos con aire acondicionado para vehículos particulares y taxis según tipo combustible, PBV y tecnología vehicular (%)	

Grupo de información	Subgrupo de información	Información detallada	Información ingresada
		Uso de aire acondicionado por tecnología para vehículos particulares (%)	X
	Tecnologías de control de emisiones	Uso de tipos de tecnologías vehiculares y taxis en vehículos particulares (Euro III y Euro IV) y camiones (Euro IV) (%)	
	Mezclas de combustibles	Mezclas de combustibles con biocombustibles para gasolina y diésel (%)	X
	Mezclas de biocombustibles	Mezclas de biocombustible para gas natural vehicular (%)	

Nota:

ETBE: éter etil tert-butílico, aditivo oxigenado. ETH: etanol. PBV: peso bruto vehicular.

La información base de entrada al software fue obtenida de la actualización del inventario de emisiones atmosféricas de la ciudad de Manizales año base 2017 (Unal-Corpocaldas, 2019), del trabajo desarrollado por Valencia (2019), del Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC), del Plan de Maestro de Movilidad de Manizales – PMM (Findeter, 2017), de los informes de calidad de combustibles y normatividad nacional de calidad de combustibles (Resolución 898 de 1995, Resolución 90963 de 2014). Esta fue seleccionada y clasificada de acuerdo a los criterios del manual y el software COPERT 5.4. A continuación, se muestra detalladamente los datos ingresados para el caso de estudio, cabe recordar que se dejaron los valores predeterminados del software para la información que no se muestra.

### ***Información ambiental***

Los parámetros de información ambiental intervienen en el cálculo de emisiones en frío y emisiones evaporativas. En la

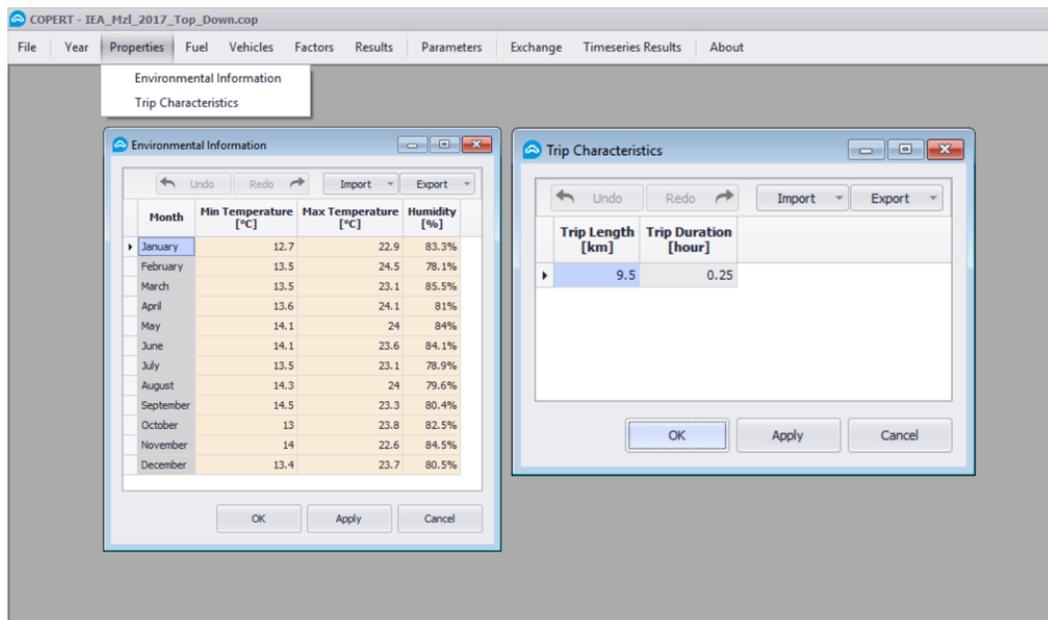
Tabla 2.9 se muestran las temperaturas mínima y máxima, así como también la humedad relativa mensual para el año 2017 de la estación meteorológica Hospital de Caldas ubicada en el centro geográfico de la ciudad, esta es considerada una estación de referencia ya que además de su ubicación presenta registros estables en el periodo de estudio (año 2017). En la Figura 2.8 se muestra la interfaz del software donde se debe ingresar la información.

**Tabla 2.9. Datos meteorológicos de la ciudad de Manizales año 2017 - Estación meteorológica Hospital de Caldas (Fuente: CDIAC, 2020).**

Mes	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Humedad relativa (%)
Enero	12.7	22.9	83.3
Febrero	13.5	24.5	78.1
Marzo	13.5	23.1	85.5
Abril	13.6	24.1	81
Mayo	14.1	24	84
Junio	14.1	23.6	84.1
Julio	13.5	23.1	78.9
Agosto	14.3	24	79.6
Septiembre	14.5	23.3	80.4
Octubre	13	23.8	82.5
Noviembre	14	22.6	84.5
Diciembre	13.4	23.7	80.5

***Información de un viaje promedio de vehículos particulares***

El viaje promedio de un vehículo es necesario para el cálculo de las emisiones en frío, estas solo son calculadas para esta categoría vehicular. En el caso de estudio el viaje promedio recorrido por un vehículo se estableció 9.5 km en 0.25 horas teniendo en cuenta que Manizales es una ciudad pequeña con una longitud de oriente a occidente de 14 km aproximadamente.



**Figura 2.8. Interfaz del software COPERT 5.4, pestaña de ingreso de información de propiedades generales, ventanas: información ambiental y características de viaje.**

### **Información de combustibles**

El modelo COPERT requiere información de las características de la composición química de los tipos de combustible y otras características de propiedades físicas, estas para la estimación de emisiones y corrección por mejoras de combustibles a través de los años. En la Tabla 2.10 se muestran las especificaciones de los tipos de combustibles: gasolina, diésel y gas natural vehicular, distribuidos en la ciudad para el año 2017 reportados en los informes de calidad de combustibles. En cuanto al contenido de azufre y densidad se obtuvo de Ecopetrol S.A. (S. González, comunicación directa, 4 de junio de 2020). Así mismo, en la Tabla 2.11 se muestra especificaciones de los combustibles para los años 1996, 2000, 2005, 2009, esta información se asumió como el límite máximo reportado en la normatividad nacional de calidad de combustibles (Resolución 898 de 1995, Resolución 90963 de 2014).

**Tabla 2.10. Propiedades de los combustibles (Fuente: UPB-AMVA, 2020; Transmetano, 2020).**

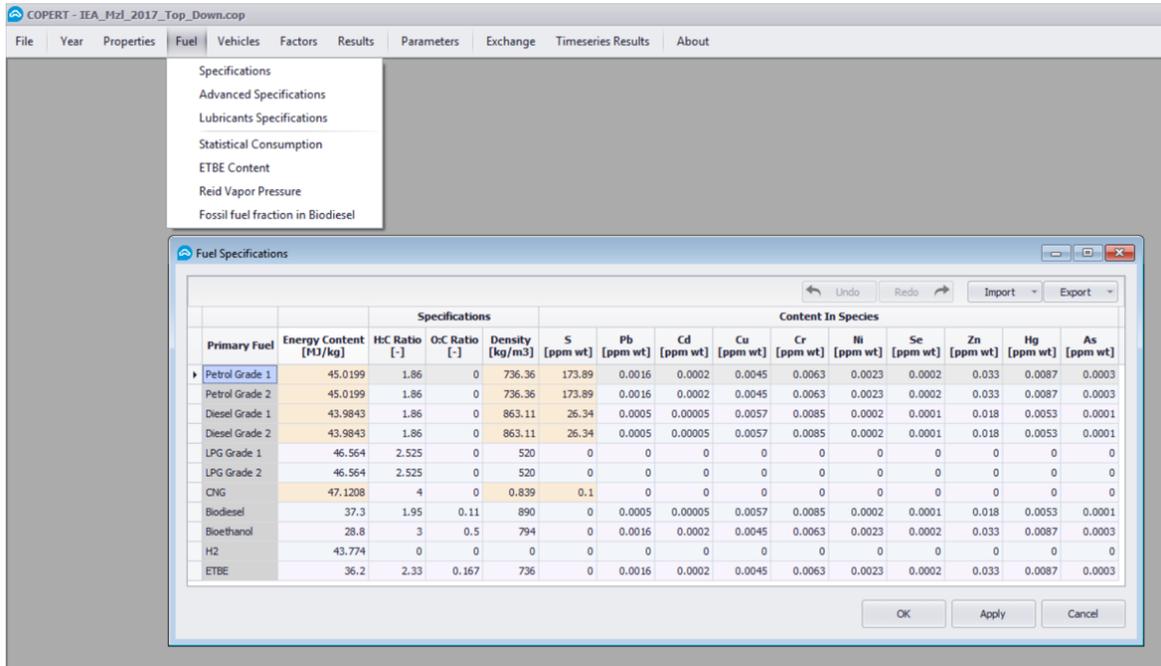
<b>Tipo de combustible</b>	<b>Poder calorífico (MJ/kg)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Contenido de azufre (ppm)</b>	<b>Presión de vapor reid (kPa)</b>	<b>Mezcla con biocombustibles</b>
Gasolina	45.02	736.36	173.89	55.85	-
Diésel	43.98	863.11	26.34	-	B2
GNV	47.12	0.823	0.1	-	-

**Tabla 2.11. Propiedades de los combustibles en diferentes años (Fuente: Resolución 898 de 1995; Resolución 90963 de 2014).**

<b>Año</b>	<b>Gasolina</b>	<b>Diésel</b>	
	<b>Aromáticos (% vol.)</b>	<b>Número de cetano</b>	<b>T95 (°C)</b>
1996	25%	43	360
2000	28%	45	360
2005	28%	45	360
2009	28%	45	360

En cuanto al consumo de combustibles esta información es requerida para realizar un balance de energía que ajusta la actividad vehicular (kilometraje) de acuerdo a las ventas en las estaciones de servicio de combustible. En este caso de estudio no se activó esta opción ya que no se dispone de las ventas de GNV, y en cuanto los datos disponibles de gasolina y diésel reportados por Valencia (2019) al activar el balance de energía se disminuye la actividad vehicular de kilómetros recorridos ingresados obtenidos de los registros de CDA, por lo tanto, las emisiones calculadas disminuyen. En la Figura 2.9 se muestra la interfaz del

software correspondiente al grupo de información de entrada relacionada con los combustibles.



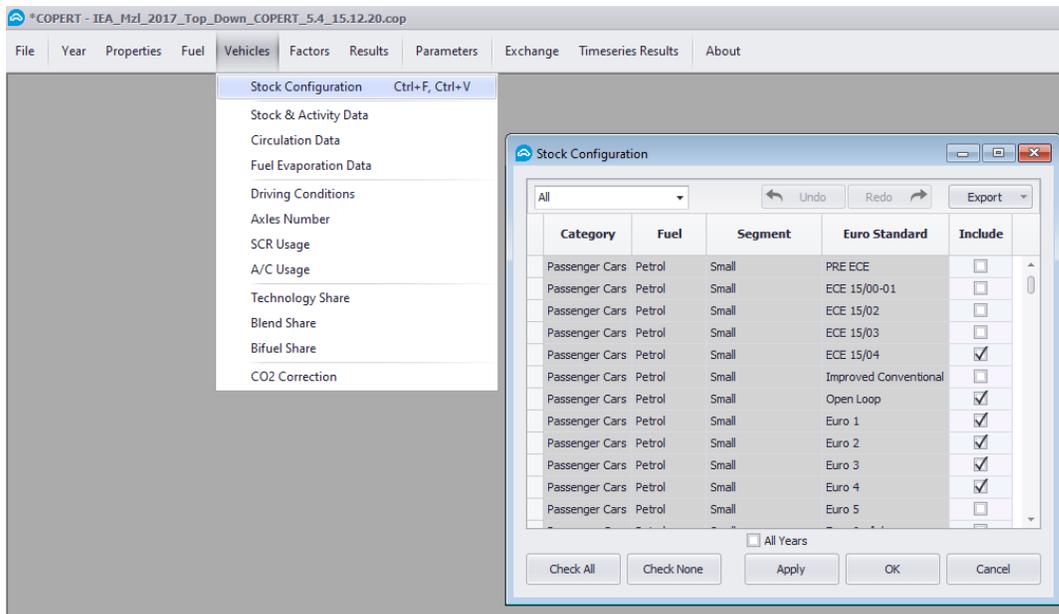
**Figura 2.9. Interfaz del software COPERT 5.4, pestaña de ingreso de información de combustibles, ventana de especificaciones del combustible.**

### *Información del parque automotor*

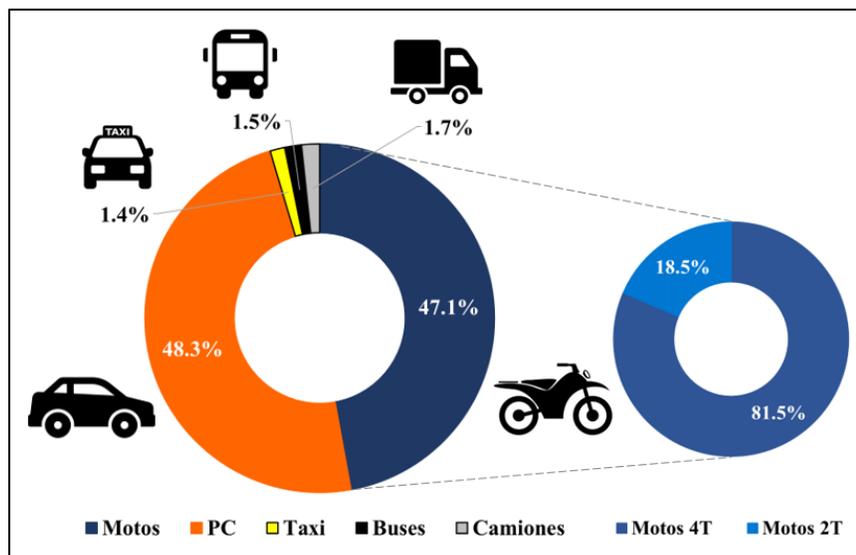
#### *Conformación y distribución tecnológica del parque automotor*

En la Figura 2.10 se muestra la interfaz del software correspondiente a la selección de categorías y tecnologías vehiculares para el caso de estudio. La información de la conformación del parque automotor fue obtenida de la actualización oficial del IEA oficial de la ciudad de Manizales año base 2017 (Unal-Corpocaldas, 2019) y del trabajo realizado por Valencia (2019) (información que proviene de la Secretaría de Tránsito, los Centros de Diagnóstico Automotor (CDA) y la Asociación Colombiana de Vehículos Automotores (Andemos)).

El parque automotor de Manizales al año 2017 estaba conformado por 169142 vehículos, este se agrupó en cinco (5) categorías vehiculares de acuerdo a la guía metodológica, a saber: (1) vehículos particulares, (2) motocicletas, (3) taxis, (4) buses y (5) camiones. En la Figura 2.11 y Tabla 2.12 se muestra la distribución porcentual y el total de vehículos por categoría vehicular que conformaban el parque automotor.



**Figura 2.10. Interfaz del software COPERT 5.4, pestaña de ingreso de información de vehicular. Ventana: configuración del parque automotor.**



**Figura 2.11. (a) Distribución porcentual del parque automotor de la ciudad de Manizales año 2017.**

En lo que respecta a la distribución tecnológica por categoría vehicular se tomó una muestra aleatoria de 9999 registros para conformar una muestra representativa que incluyera todas las categorías. No se determinó el tamaño de la muestra a analizar, sin embargo, se aplicaron criterios que se reportan en literatura (López, P. L., 2004; Unidad Técnica de Control Externo, 2012). Entre ellos el mayor número posible de la muestra de acuerdo con los recursos que se tienen disponibles para su análisis, asimismo, otro aspecto importante es que

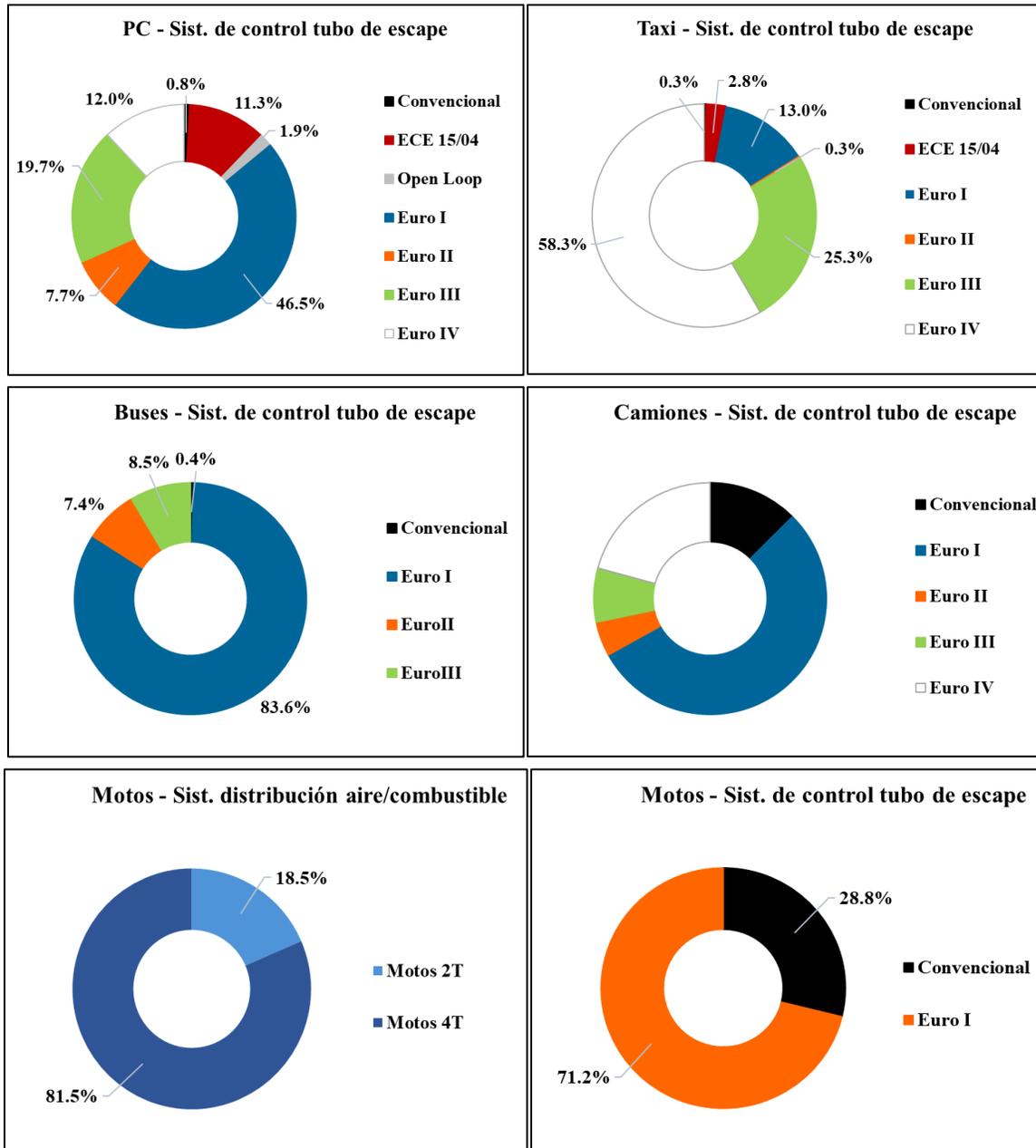
de cada categoría vehicular se seleccionó el número de elementos en proporción a la contribución de esa categoría en el parque automotor, y la selección de los mismos se realizó de forma aleatoria. Dichos registros corresponden a las mismas bases de datos de la actualización oficial del IEA-2017 oficial de Manizales (Unal-Corpocaldas, 2019) y del trabajo realizado por Valencia (2019), información que proviene de las entidades como la Secretaría de Tránsito, los Centros de Diagnóstico Automotor (CDA) y la Asociación Colombiana de Vehículos Automotores (Andemos).

A partir de los registros que contienen para cada tipo de vehículo características específicas como: tipo, marca, año modelo, kilometraje acumulado, tipo de combustible, tipo de motor (solo para la categoría de motocicletas), PBV, cilindraje, tecnología de mezcla aire/combustible, tecnología de control de emisiones por tubo de escape y tecnología de control de emisiones evaporativas; se clasificó según las tecnologías vehiculares por categoría de la guía metodológica de COPERT (EEA, 2020). Se destaca que la distribución tecnológica por categoría vehicular determinada de la muestra se asumió que es proporcional al total de vehículos del parque automotor, debido a que una de las limitaciones para establecer la distribución en la totalidad del parque automotor es la disponibilidad de la información completa en los registros de la Secretaria de Transito, los CDA y Andemos, lo cual dificulta aún más el proceso de caracterización.

**Tabla 2.12. Conformación del parque automotor de la ciudad de Manizales año 2017**  
(Fuente: Unal-Corpocaldas, 2019; Valencia, 2019).

<b>Categoría vehicular</b>	<b>Tipo de Vehículo</b>	<b>Cantidad de vehículos</b>	<b>Registros analizados para la distribución tecnológica</b>
Vehículos particulares (PC)	Autos	57058	3777
	Camioneta	24560	
	Van	41	
Motocicletas	Motos 2T	14761	4235
	Motos 4T	64973	
Taxis	Taxi	2320	355
Buses	Bus	2604	928
Camiones	Liviano 2 ejes	2044	704
	Pesado 2 ejes	665	
	Pesado 3 o más ejes	104	
	Vehículos de carga	12	
<b>Total</b>		<b>169142</b>	<b>9999</b>

En la Figura 2.12 se muestra la distribución porcentual de tecnologías del sistema de control de emisiones por tubo de escape de cada categoría vehicular, adicionalmente, se muestra la distribución porcentual del sistema de distribución aire/combustible. El anexo A contiene las bases de datos analizadas.



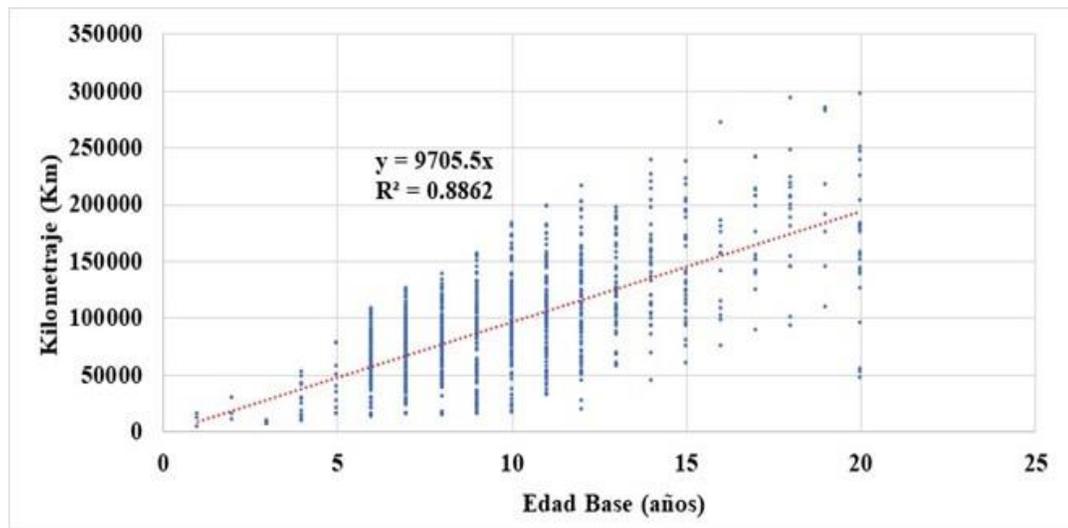
**Figura 2.12. Distribución porcentual de tecnologías vehiculares del parque automotor de la ciudad de Manizales año 2017.**

### ***Actividad vehicular asociada a los kilómetros recorridos***

La actividad vehicular (anual y acumulativa) se estimó a partir de la información de la actualización oficial del IEA-2017 de la ciudad de Manizales año base 2017 (Unal-Corpopaldas, 2019) y del trabajo realizado por Valencia (2019). Los registros que contiene las bases de datos de dichas fuentes provienen en su mayoría de los Centros de Diagnóstico Automotor (CDA), empresas de transporte (buses) y en menor proporción de encuestas realizadas en campo. Cabe mencionar, que dicha información también se utilizó para determinar la distribución de tecnología vehicular como se mencionó anteriormente.

En el caso de la actividad vehicular acumulativa (kilómetros recorridos acumulativos) se tomó un promedio por tecnología y categoría vehicular de la lectura del odómetro de los registros. En la categoría de vehículos particulares en los registros donde faltaba el dato de kilometraje fue calculado a partir de una ecuación representativa, que relaciona la edad del vehículo (año modelo) y los km recorridos de la lectura del odómetro, como se muestra en la Figura 2.13.

La actividad vehicular promedio anual (kilómetros recorridos anuales) por tecnología y categoría vehicular se tomó a partir de la actividad diaria (VKT) reportada en el IEA oficial de Manizales 2017. Dicha actividad se extrapolo a los días del año teniendo en cuenta el uso de un factor de 0.5 para días festivos y domingos, y de 1 para los sábados debido al comportamiento del parque automotor en la ciudad. En la Tabla 2.13 se muestra los kilómetros recorridos anuales para cada categoría vehicular, para el caso de estudio se asumió que todas las tecnologías de una misma categoría tienen el mismo kilometraje anual.



**Figura 2.13. Relación entre el kilometraje acumulativo y la edad del vehículo y regresión lineal de la categoría de vehículos particulares.**

### ***Datos de circulación del parque automotor***

Respecto a la información de circulación vehicular ya que el software está diseñado para inventarios nacionales incluye tres tipos de carretera (rural, urbana e intermunicipal), sin embargo, se consideró solo el tipo de carretera urbana, dado que el caso de estudio es un IEA local. Los datos asociados a la distribución porcentual del kilometraje recorrido en hora pico y hora valle se asumió que guarda relación con la dinámica del parque automotor de la ciudad en dichas condiciones, por lo cual se tomó la información de aforos vehiculares para cada categoría reportados en el Plan Maestro de Movilidad de Manizales - PMM-2017 para las cuatros avenidas principales de la ciudad, en este se reporta que la ciudad presenta cuatro picos de tráfico: (1) 6:30 – 7:30, (2) 11:45 – 12:45, (3) 13:30 – 14:30, (4) 17:30 – 18:30 (ver Anexo B) (Findeter, 2019).

En cuanto a la velocidad promedio en hora pico y hora valle para cada categoría vehicular se seleccionó en el rango de velocidades de las vías principales reportado en el PMM-2017 (ver Anexo B). En la Tabla 2.13 se muestra la información asociada a la actividad y circulación vehicular anteriormente descrita, así como también la ventana de información correspondiente (ver Figura 2.14) cabe mencionar que se asumió que es igual para todas las tecnologías vehiculares de una misma categoría vehicular.

**Tabla 2.13. Información de actividad vehicular para cada categoría vehicular del parque automotor de Manizales - año base 2017 (Adaptado de: Unal-Corpocaldas, 2019).**

Categoría vehicular	Actividad vehicular (año: 330 días)		Distribución porcentual de km recorridos		Velocidad	
	km/veh/día	km/veh/año	Hora pico (%)	Hora valle (%)	Hora pico (km/h)	Hora valle (km/h)
PC	25	8250	27.74	72.26	31	47
Motocicletas	23	7590	28.51	71.49	31	47
Taxis	199	65670	23.05	76.95	25	41
Buses	168	55440	31.23	68.77	22	31
Camiones	50	16500	23.41	76.59	22	31

Vehicle				Share				Speed				Min - Max Speed [km/h]
Category	Fuel	Segment	Euro Standard	Urban Peak [%]	Urban Off Peak [%]	Rural [%]	Highway [%]	Urban Peak [km/h]	Urban Off Peak [km/h]	Rural [km/h]	Highway [km/h]	
Passenger Cars	Petrol	Small	ECE 15/04	27.3%	72.7%	0%	0%	31	47	0	0	10 - 130
Passenger Cars	Petrol	Small	Open Loop	27.3%	72.7%	0%	0%	31	47	0	0	10 - 130
Passenger Cars	Petrol	Small	Euro 1	27.3%	72.7%	0%	0%	31	47	0	0	5 - 130
Passenger Cars	Petrol	Small	Euro 2	27.3%	72.7%	0%	0%	31	47	0	0	5 - 130
Passenger Cars	Petrol	Small	Euro 3	27.3%	72.7%	0%	0%	31	47	0	0	5 - 130
Passenger Cars	Petrol	Small	Euro 4	27.3%	72.7%	0%	0%	31	47	0	0	5 - 130
Passenger Cars	Petrol	Medium	ECE 15/04	27.3%	72.7%	0%	0%	31	47	0	0	10 - 130
Passenger Cars	Petrol	Medium	Open Loop	27.3%	72.7%	0%	0%	31	47	0	0	10 - 130
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 1	27.3%	72.7%	0%	0%	31	47	0	0	5 - 130
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 2	27.3%	72.7%	0%	0%	31	47	0	0	5 - 130
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 3	27.3%	72.7%	0%	0%	31	47	0	0	5 - 130
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 4	27.3%	72.7%	0%	0%	31	47	0	0	5 - 130

**Figura 2.14. Interfaz del software COPERT 5.4, pestaña de ingreso de información de vehicular. Ventana: datos de circulación.**

### *Condiciones de manejo*

En la Figura 2.15 se muestra la ventana de información relacionada a las condiciones de manejo, la cual hace referencia a la distribución porcentual de la carga de transporte en condiciones hora pico y hora valle. En la misma sección se establece el porcentaje de la pendiente de la carretera para cada tecnología vehicular, para esta última habilita un rango de -6% a 6% en intervalos de 2. Ambos parámetros se aplican solo a la categoría de bus y camión. En el caso de la distribución de carga de los vehículos en condiciones de hora pico y hora valle para la categoría de camión se mantuvo el valor preestablecido del software (50% en hora pico y 50% en hora valle) y para la categoría de bus se estableció un valor de 50% en hora valle y 70% en hora pico. Lo anterior, conociendo el comportamiento de esta categoría en la ciudad y teniendo en cuenta que este tipo de información detallada y a nivel de tecnología vehicular no está disponible.

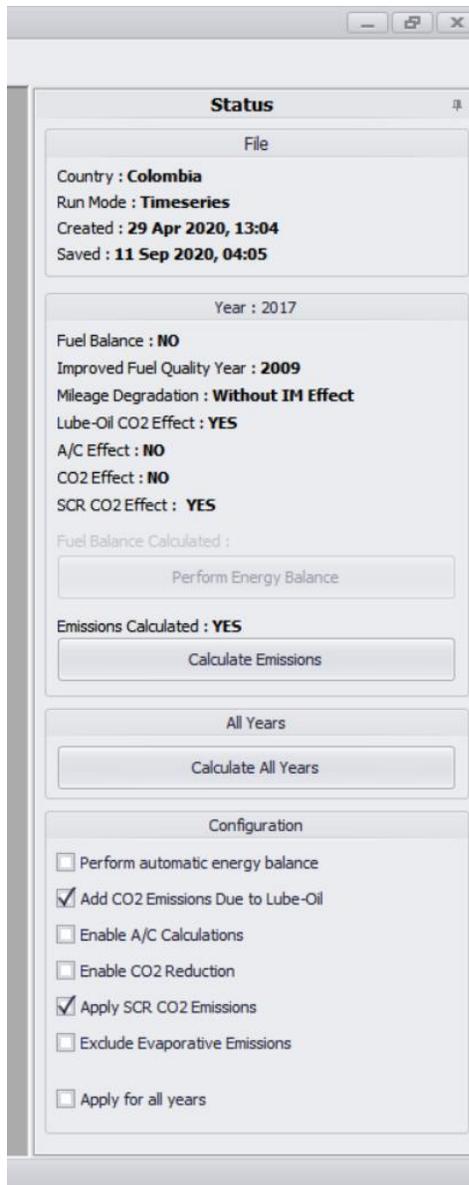
En cuanto al porcentaje de pendiente de carretera se estableció un valor de 2% para todas las tecnologías vehiculares, este valor se estableció arbitrariamente con el fin de poder penalizar los FE debido a las altas pendientes que tiene la ciudad. A pesar de que la ciudad tiene pendientes de vía más altas (de hasta 22% de acuerdo con el PMM) el establecer un valor de pendiente positiva a todos los vehículos indica que estos se encuentran en subida lo que causaría un mayor estrés en el motor del vehículo y por ende un aumento de las emisiones, así mismo el seleccionar un valor bajo se contrarresta el supuesto de considerar que todos los vehículos se encuentran en dicha condición.

Vehicle				Load				Road Slope				Min - Max Speed [km/h]
Category	Fuel	Segment	Euro Standard	Urban Off Peak [%]	Urban Peak [%]	Rural [%]	Highway [%]	Urban Off Peak [%]	Urban Peak [%]	Rural [%]	Highway [%]	
Heavy Duty Trucks	Diesel	Rigid 26 - 28 t	Euro IV	50%	50%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	12 - 86
Heavy Duty Trucks	Diesel	Rigid 28 - 32 t	Conventional	50%	50%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	12 - 86
Heavy Duty Trucks	Diesel	Rigid 28 - 32 t	Euro I	50%	50%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	12 - 86
Heavy Duty Trucks	Diesel	Rigid 28 - 32 t	Euro II	50%	50%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	12 - 86
Heavy Duty Trucks	Diesel	Rigid 28 - 32 t	Euro III	50%	50%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	12 - 86
Heavy Duty Trucks	Diesel	Rigid 28 - 32 t	Euro IV	50%	50%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	12 - 86
Buses	Diesel	Urban Buses Midi <= 15 t	Conventional	50%	70%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	11 - 86
Buses	Diesel	Urban Buses Midi <= 15 t	Euro I	50%	70%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	11 - 86
Buses	Diesel	Urban Buses Midi <= 15 t	Euro II	50%	70%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	11 - 86
Buses	Diesel	Urban Buses Midi <= 15 t	Euro III	50%	70%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	11 - 86
Buses	Diesel	Urban Buses Standard 15 - 18 t	Conventional	50%	70%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	11 - 86
Buses	Diesel	Urban Buses Standard 15 - 18 t	Euro I	50%	70%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	11 - 86
Buses	Diesel	Urban Buses Standard 15 - 18 t	Euro II	50%	70%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	11 - 86
Buses	Diesel	Urban Buses Standard 15 - 18 t	Euro III	50%	70%	0%	0%	2%	2%	0%	0%	11 - 86

**Figura 2.15. Interfaz del software COPERT 5.4, pestaña de ingreso de información de vehicular. Ventana: condiciones de manejo.**

Por último, una vez ingresada toda la información se ejecutó el software sin activar el balance de energía, además, se habilitaron correcciones por degradación de la flota vehicular (asociada a los kilómetros acumulativos), mejoras de combustible a través de los años y uso de aditivos (aceite lubricante y urea), como se muestra en la Figura 2.16. Las correcciones por degradación de la flota vehicular asociada a los kilómetros acumulativos son calculadas para los contaminantes: CO, NO<sub>x</sub> y COV, y solo aplica para los vehículos particulares con tecnología Euro 1 y 2 (con un kilometraje mayor a 120000 km) y Euro 3 y 4 (con un kilometraje mayor a 160000 km). Las correcciones por uso de lubricantes corresponden a un factor preestablecido para todas las categorías y tecnologías vehiculares, son aplicadas para el contaminante de CO<sub>2</sub>.

En cuanto a las correcciones como uso de aire acondicionado y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> no fueron habilitadas ya que en el primer caso la ciudad se caracteriza por ser de clima frío (temperatura ambiente de 22°C) por lo que no es común el uso de aire acondicionado. En el segundo caso se requería de información no disponible (ver Tabla 2.7, subgrupo de información: dimensiones del taque combustible por tecnología vehicular para vehículos particulares y motocicletas).

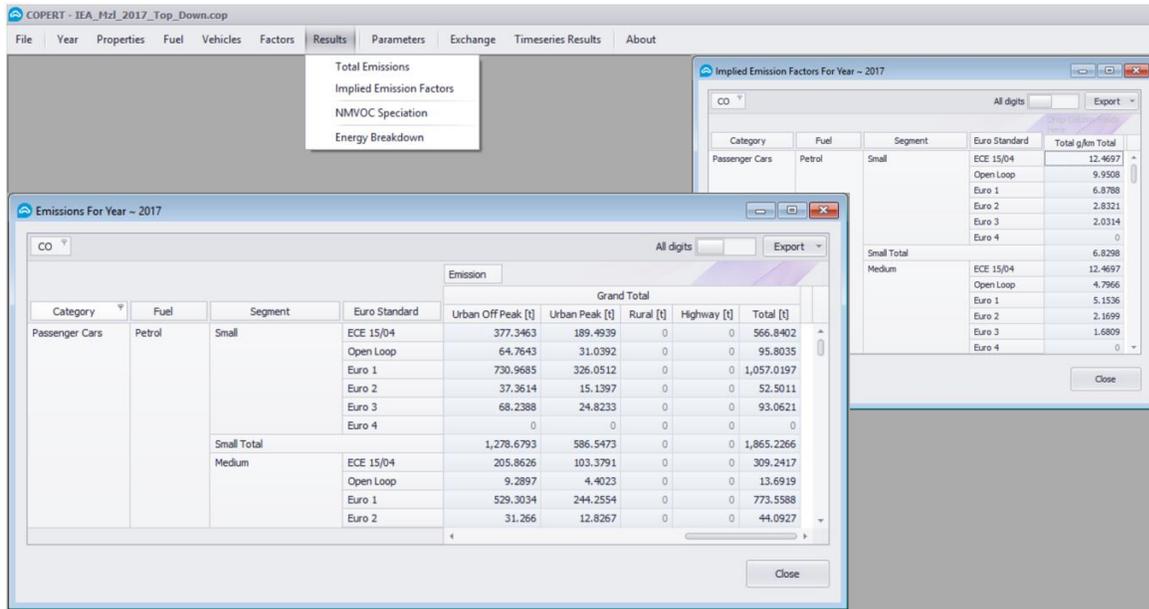


**Figura 2.16.** Interfaz del software COPERT 5.4, sección de estado del archivo, configuración y tipo correcciones.

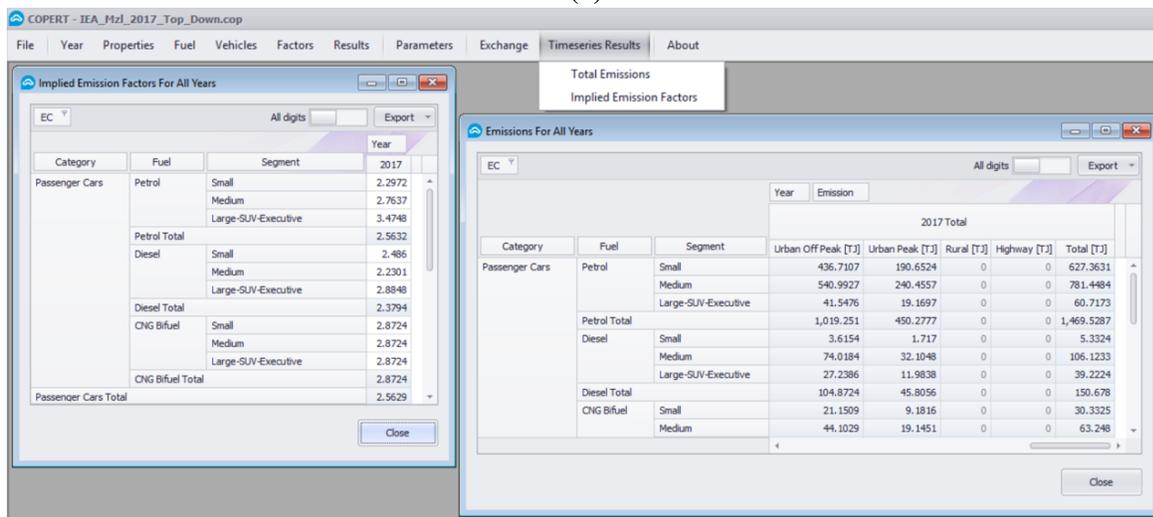
### *Sección de resultados del software*

En el desarrollo del trabajo se emplearon diferentes herramientas informáticas a saber: software COPERT versión 5.4 de acceso libre y el paquete ofimático de Microsoft Office (Word y Excel). Los resultados obtenidos del software corresponden a los FE y emisiones de contaminantes por tecnología y categoría vehicular, los FE agregados corresponden a un promedio ponderado.

En la Figura 2.17 se muestran las ventanas de información de los FE y emisiones, estos permiten ser exportados a un archivo en formato Excel 2003 o 2010. Así mismo, permite exportar los datos de entrada que fueron ingresados (Figura 2.4 pestaña “Exchange”). En la Figura 2.17 las pestañas de “factores” y “parámetros” son activadas una vez se ejecute, estas corresponden a los parámetros base que utiliza el mismo para la estimación de FE y emisiones, en “factores” se permite cambiar valores de FE si el usuario lo desea. Cabe mencionar que en la pestaña “acerca de” direcciona a una página del manual en línea del software.



(a)



(b)

**Figura 2.17. Interfaz del software COPERT 5.4. (a) Pestaña de resultados desagregados por categoría y tecnología vehicular, ventanas: emisiones y FE. (b) Pestaña de resultados agregados por categoría vehicular, ventanas: emisiones y FE.**

## 2.4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos se analizaron mediante diferentes ejercicios comparativos de los FE y emisiones estimadas en el presente estudio mediante COPERT 5.4 y las reportadas en la actualización del IEA estimadas mediante IVE para la ciudad, teniendo que cuenta que comprenden el mismo periodo de tiempo (año base 2017) y se partió de la misma información del parque automotor. Así mismo, con otros estudios latinoamericanos de implementaciones del modelo COPERT. También, se determinó el índice per cápita (PCI) de emisiones por fuentes móviles en ruta para diferentes ciudades tanto a nivel nacional como internacional, este se define como el cociente del flujo total de emisión entre la población.

## 2.4.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizó un análisis de sensibilidad a diferentes parámetros con posible influencia en los FE. En la Tabla 2.14 se muestra los parámetros y porcentajes de cambio asociados a cada variable con respecto a la simulación base. Cabe mencionar que cada cambio en una variable implica una ejecución del software.

**Tabla 2.14. Parámetros considerados en análisis de sensibilidad.**

Parámetro	Variables	Porcentaje de cambio
Viaje promedio de un vehículo	Distancia	50%
	Tiempo	50%
Distribución de km recorridos	Hora pico	50%
Velocidad	Hora pico	50%
	Hora valle	50%
Velocidad	Hora pico	-50%
	Hora valle	-50%
Distribución de carga	Hora pico	50%
	Hora valle	50%
Distribución de carga	Hora pico	-50%
	Hora valle	-50%
Pendiente		100%
		-100%
Contenido de azufre		90%

## 2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.5.1. FACTORES DE EMISIÓN AJUSTADOS DE ACUERDO CON LAS CONDICIONES DE LA CIUDAD DE MANIZALES

El software COPERT 5.4 estima un solo FE diario por contaminante teniendo en cuenta las condiciones de hora pico y valle, así como también las condiciones del motor del vehículo en frío y caliente. En la Tabla 2.15 se muestran los FE por categoría vehicular y tipo de combustible ajustados de acuerdo a la distribución de tecnologías vehiculares, dinámica de la flota, características del combustible e información meteorológica de la ciudad. Cabe mencionar que los FE corresponden a un promedio ponderado de las tecnologías vehiculares y subcategoría asociada al PBV y/o cilindraje. El anexo C contiene la base de datos de todos los FE ajustados por categoría y tecnología vehicular.

**Tabla 2.15. Factores de emisión en ruta por vehículo ajustados a las condiciones de así Manizales año 2017- COPERT 5.4.**

Categoría vehicular	Combustible	FE (g/km)									
		CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	BC	PM <sub>2.5</sub>	COVNM	COV	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
Vehículo particular	Gasolina	5.69	0.75	0.02	0.002	0.02	0.82	0.87	180.29	0.02	0.05
	Diésel	0.20	0.57	0.003	0.036	0.06	0.03	0.03	172.14	0.008	0.004
	GNV	0.54	0.09	0.00	0.00	0.02	0.03	0.10	167.68	0.003	0.07
Moto 2T	Gasolina	16.21	0.03	0.009	0.02	0.21	8.38	8.53	86.99	0.002	0.15
Moto 4T	Gasolina	11.52	0.33	0.008	0.005	0.03	1.01	1.16	73.46	0.002	0.15
Taxi	Gasolina	4.48	0.48	0.019	0.00	0.02	0.47	0.50	176.82	0.01	0.04
	Diésel	0.17	0.58	0.003	0.04	0.06	0.03	0.03	169.84	0.01	0.003
	GNV	0.55	0.09	0.00	0.00	0.02	0.03	0.10	177.51	0.003	0.07
Camión	Diésel	1.38	5.29	0.01	0.12	0.25	0.38	0.47	552.83	0.01	0.09
Bus	Diésel	1.64	7.23	0.01	0.15	0.29	0.34	0.50	684.78	0.01	0.16

Nota:

El FE de PM<sub>2.5</sub> es igual para PM<sub>10</sub>.

### 2.5.2. EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS DE LA CIUDAD DE MANIZALES AÑO BASE 2017

El tipo de emisiones estimadas mediante el software COPERT 5.4 para la ciudad de Manizales año base 2017 se muestran en la Tabla 2.16. Los resultados descritos

corresponden a las emisiones asociadas al tubo escape y evaporativas corregidas por: (1) por mejoras de combustible a través de los años, (2) degradación del kilometraje, (3) efectos de lubricantes y (4) efectos de aditivos (urea, aplicable a camiones Euro IV). Así mismo, en la Tabla 2.17 se muestran los flujos totales anuales (ton/año) y la contribución porcentual de cada categoría vehicular, las emisiones predominantes corresponden a CO (11483.7 ton/año) del grupo de contaminantes criterio, mientras que del grupo de GEI fue el CO<sub>2</sub> (367907.7 ton/año); el perfil de emisiones correspondiente siguió el orden de CO<sub>2</sub> > CO > COV > COVNM > NO<sub>x</sub> > CH<sub>4</sub> > PM<sub>2.5</sub> > BC > SO<sub>2</sub> > N<sub>2</sub>O. Cabe destacar que las emisiones no exhosto no se incluyen en esta sección de resultados, estas se muestran en el capítulo 3 (sección 3.5.1. Tabla 3.13).

**Tabla 2.16. Tipo de emisiones estimadas mediante COPERT 5.4.**

Categoría vehicular	Combustible	Emisiones					
		Caliente <sup>a</sup>	Frío <sup>a</sup>	Evaporativas <sup>b</sup>	No Exhosto <sup>c</sup>	Lubricantes <sup>d</sup>	Aditivos <sup>e</sup> SCR-Urea
Vehículo particular (PC o Autos)	Gasolina	x	x	x	x	x	
	Diésel	x	x*		x	x	
	GNV	x	x		x	x	
Camión	Diésel	x			x	x	x
Bus	Diésel	x			x	x	
Moto 2T	Gasolina	x		x	x	x	
Moto 4T	Gasolina	x		x	x	x	
Taxi	Gasolina	x	x	x	x	x	
	Diésel	x	x		x	x	
	GNV	x	x		x	x	

Nota:

Las emisiones estimadas corresponden a:

<sup>a</sup> Contaminantes criterio, GEI, metales y otros.

<sup>b</sup> CO, COV, COVNM.

<sup>c</sup> PM<sub>2.5</sub>, metales.

<sup>d</sup> CO<sub>2</sub>, metales.

<sup>e</sup> CO<sub>2</sub> para camiones con tecnología Euro IV.

\* Especificada para la fracción fósil y bio.

**Tabla 2.17. Emisiones totales anuales estimadas para Manizales - año base 2017.**

Categoría vehicular	Combustible	Emisiones totales: en caliente, en frío y evaporativas (ton/año)									
		CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	BC	PM <sub>2.5</sub>	COVNM	COV	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
Vehículo Particular (PC o Autos)	Gasolina	3261.9	432.2	11.3	0.4	1.6	468.6	497.0	103363.8	12.4	28.4
	Diésel	13.0	35.9	0.2	2.3	3.0	1.8	2.1	10897.7	0.5	0.3
	GNV	19.9	3.2	0.0	0.0	0.0	1.0	3.6	6212.7	0.0	2.6
Motos 2T	Gasolina	1816.5	3.1	1.0	2.2	22.4	938.8	955.6	9746.6	0.2	16.8
Motos 4T	Gasolina	5681.4	161.1	4.0	2.3	9.9	499.6	573.2	36225.2	1.0	73.5
Taxi	Gasolina	282.6	28.3	1.2	0.0	0.1	29.6	31.9	11159.0	0.9	2.3
	Diésel	0.9	3.0	0.0	0.2	0.3	0.1	0.2	880.8	0.1	0.0
	GNV	46.0	7.7	0.0	0.0	0.1	2.3	8.5	14883.5	0.0	6.2
Bus	Diésel	286.5	1470.3	2.2	26.3	40.5	52.6	76.4	137059.8	1.7	23.7
Camión	Diésel	75.1	373.7	0.6	6.7	10.8	19.0	23.1	37478.7	0.5	4.1
<b>Total</b>		<b>11483.7</b>	<b>2518.4</b>	<b>20.5</b>	<b>40.5</b>	<b>88.7</b>	<b>2013.5</b>	<b>2171.4</b>	<b>367907.7</b>	<b>17.2</b>	<b>157.9</b>

Nota:

Las emisiones calculadas asociadas al tubo escape – exhosto – de PM<sub>10</sub> son iguales a las emisiones de PM<sub>2.5</sub>, la metodología COPERT considera que la fracción gruesa en este caso es insignificante. Las emisiones de GEI equivalen a 1142052.7 ton de CO<sub>2</sub>-eq (AR5 - CO<sub>2</sub>: 1, N<sub>2</sub>O: 265, CH<sub>4</sub>: 28) (IPCC, 2016). Los niveles de precisión de estimación del IEA se muestran en el Anexo D.

### ***Contribución al total de emisiones por categoría vehicular***

En la Figura 2.18 se muestra la contribución porcentual al total de emisiones por categoría vehicular, las categorías que conforman el 95% del parque automotor (PC y motos) e impulsados por gasolina contribuyen principalmente a las emisiones de CO, COV, COVNM (94% cada contaminante) > N<sub>2</sub>O (82%) > SO<sub>2</sub> (80%) > CH<sub>4</sub> (77%) > CO<sub>2</sub> (45%). Por otra parte, las categorías vehiculares que utilizan diésel como combustible (buses y camiones) tiene una baja participación en el parque automotor; sin embargo, tiene un aporte significativo en las emisiones de BC (82%) > NO<sub>x</sub> (73%) > PM<sub>2.5</sub> (58%).

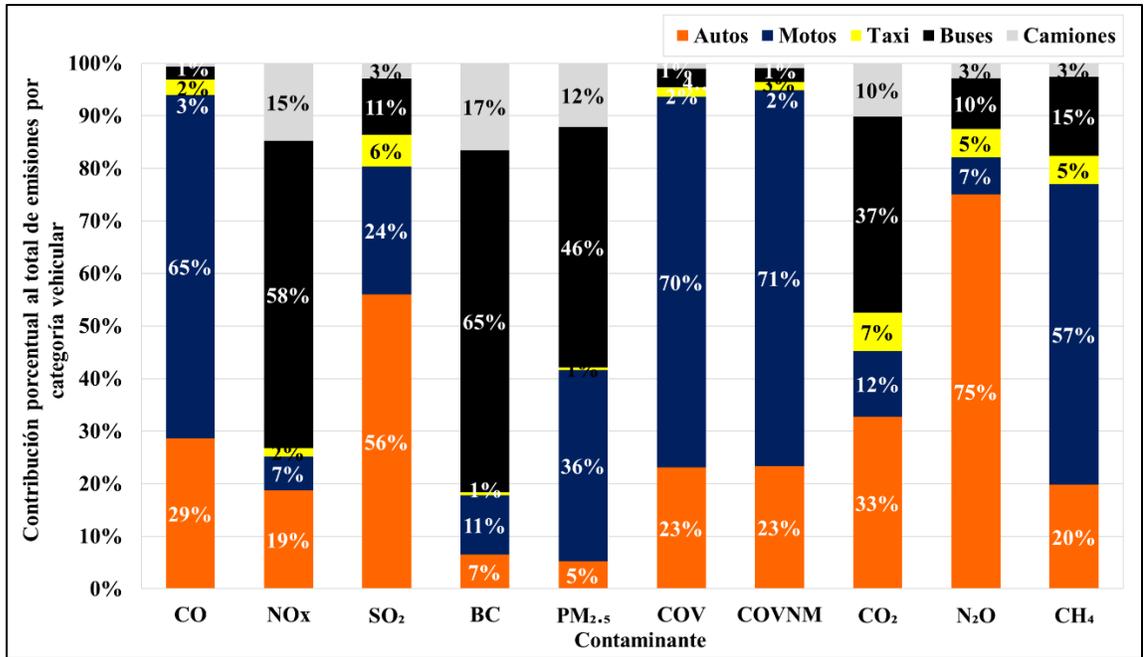
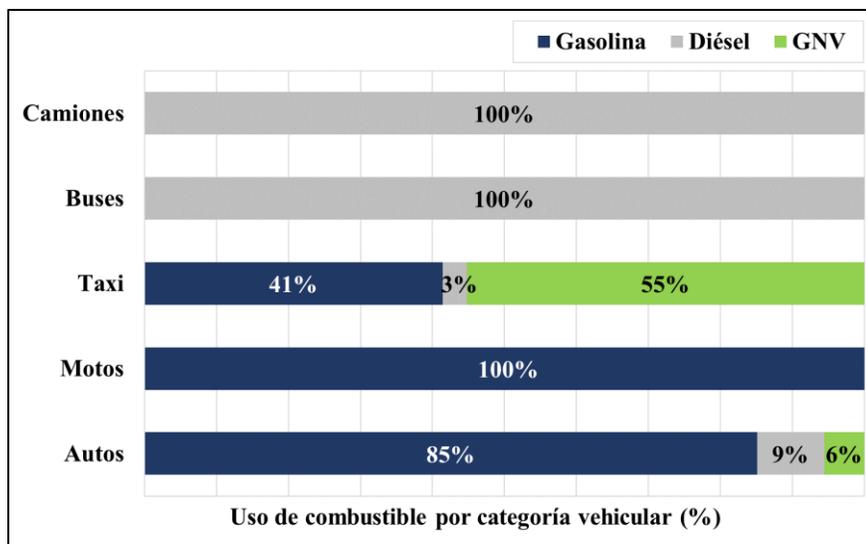


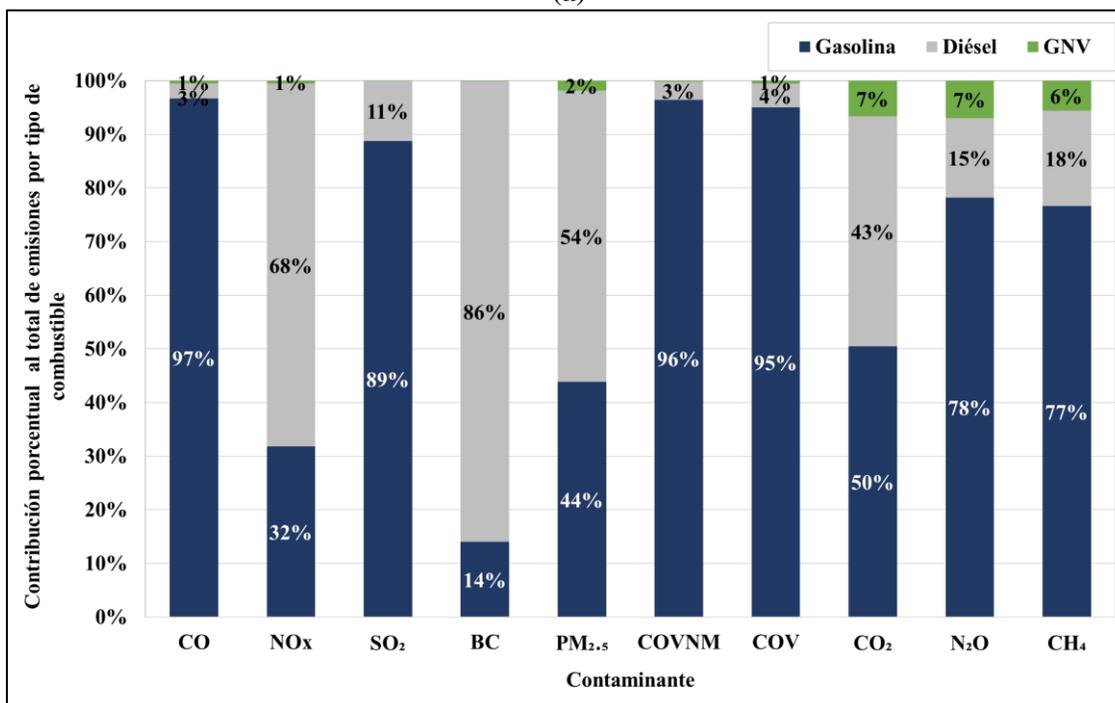
Figura 2.18. Contribución porcentual al total de emisiones por categoría vehicular – año base 2017

### *Contribución al total de emisiones por tipo combustible*

En la Figura 2.19 se muestra la distribución de usos de combustible y la contribución porcentual al total de emisiones contaminantes. En el parque automotor de la ciudad los buses y camiones que tiene una baja participación y utilizan diésel como combustible tienen un aporte significativo en BC (86%) > NO<sub>x</sub> (68%) > PM<sub>2.5</sub> (55%) > CO<sub>2</sub> (43%); en cuanto al uso de GNV, este es utilizado por el 55% de los taxis y solo un 6% de los vehículos particulares aportando menos del 7% a cada contaminante de GEI. Respecto a la gasolina es utilizada por las motos, seguido de los autos y taxis estos aportan a casi la totalidad de las emisiones de CO (97%), COVNM (96%), COV (95%), SO<sub>2</sub> (89%), N<sub>2</sub>O (82%), CH<sub>4</sub> (77%).



(a)



(b)

Figura 2.19. (a) Distribución porcentual del uso de combustibles por categoría vehicular. (b) Contribución porcentual al total de emisiones por tipo de combustible – año base 2017.

### 2.5.3. COMPARATIVO DE EMISIONES Y FE CON OTROS ESTUDIOS

#### *Comparativo de emisiones de COPERT 5.4 y IVE para Manizales*

En la Tabla 2.18 se muestra la diferencia porcentual de las emisiones de la ciudad de Manizales obtenidas mediante IVE y COPERT 5.4 para el año 2017, para este caso y con fines comparativos fue necesario realizar una correspondencia de tecnologías vehiculares la cual se muestra en el anexo D. Las emisiones obtenidas mediante COPERT fueron menores a las obtenidas mediante IVE, de manera general todas las emisiones disminuyeron significativamente (mínima -7% N<sub>2</sub>O bus, máxima -98% CH<sub>4</sub> taxis) a excepción del N<sub>2</sub>O en la categoría de PC (14%), SO<sub>x</sub> (4%) y N<sub>2</sub>O (1110%) en la categoría de motos y CH<sub>4</sub> en los camiones (576%).

**Tabla 2.18. Diferencial porcentual de las emisiones de la ciudad de Manizales obtenidas mediante IVE y COPERT.**

<b>Categoría vehicular</b>	<b>CO</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>SO<sub>x</sub></b>	<b>PM<sub>10</sub></b>	<b>COV</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>
Veh. Particular	-69%	-43%	-42%	-84%	-42%	-45%	14%	-94%
Motos	-35%	-17%	4%	-65%	-58%	-7%	1110%	-87%
Taxis	-93%	-84%	-46%	-90%	-75%	-54%	-71%	-98%
Camiones	-87%	-61%	0%	-93%	-78%	-31%	-70%	576%
Buses	-65%	-40%	68%	-88%	-60%	6%	-7%	
<b>Total</b>	<b>-59%</b>	<b>-46%</b>	<b>-29%</b>	<b>-86%</b>	<b>-57%</b>	<b>-28%</b>	<b>-5%</b>	<b>-90%</b>

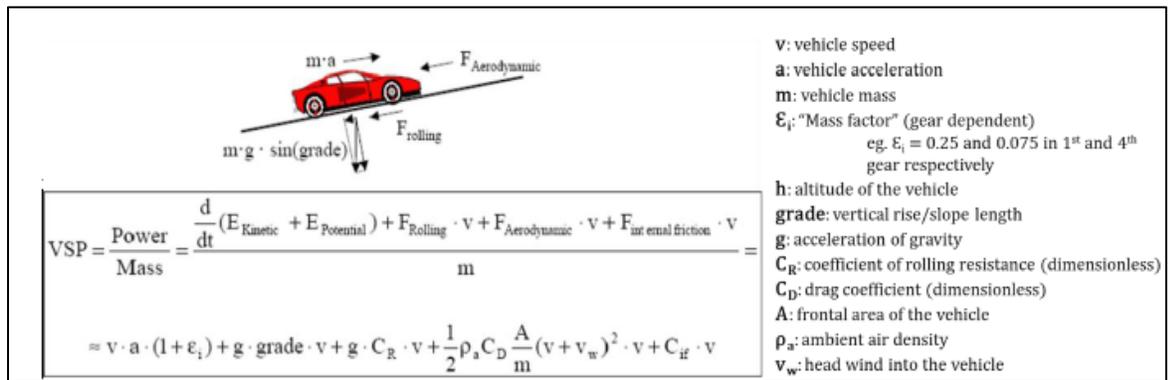
Nota:

%Diferencia: (COPERT- IVE) / IVE × 100

Las diferencias obtenidas se deben principalmente a los FE base y el parámetro función de los FE, IVE considera potencia específica del motor mientras que COPERT la velocidad promedio vehicular. El término de la potencia específica del motor representa efectivamente la resistencia del motor del vehículo cuando este se encuentra en una pendiente positiva o negativa (contiene a su vez el producto de la velocidad por la aceleración equivalente, entre otros parámetros) como se muestra en la Figura 2.20. En el caso de COPERT el efecto de la pendiente solo aplica para las categorías de bus y camión y con un valor máximo de ±6%. Manizales se caracteriza por tener una orografía compleja con pendientes inclusive mayores a 22% lo que causa una mayor resistencia en el motor del vehículo ya que implica revolucionarlo más, generando mayor estrés en él y por lo tanto se esperarían tasas de emisiones de contaminantes altas. Sin embargo, cabe señalar que también el modelo IVE debido a su falta de actualización posiblemente contengan valores de FE base y/o ajustes altos y desactualizados, medidos para condiciones de tráfico antes del 2008 (año de última actualización).

En el caso de la diferencia de emisiones de SO<sub>x</sub> se debe a que el cálculo para cada modelo se realizó con diferente contenido de azufre en los combustibles (IVE, gasolina: 300 ppm y diésel: 50 ppm; COPERT, gasolina: 173.9 ppm y diésel: 26.4 ppm). La diferencia en el contenido de azufre en los combustibles del IEA Manizales-2017 con COPERT (presente estudio) y el IEA Manizales-2017 con IVE, se debe a que se actualizaron dichos datos en el presente estudio. En el primer caso corresponde a un promedio de los datos suministrados por Ecopetrol S.A. de la distribución de combustibles para Manizales en el año 2017 (información desde el mes de marzo a noviembre) y en el segundo caso corresponden a datos antiguos reportados en los informes de calidad de combustibles del año 2013. Cabe señalar que un cambio en el contenido de azufre en los combustibles en COPERT 5.4 solo produce un cambio en las emisiones de SO<sub>x</sub> (sección 2.5.4.).

Adicionalmente, ambos modelos consideran diferentes tipos de correcciones como: calidad de combustibles, kilometraje acumulado, patrones de encendido, patrones de conducción, uso de aditivos, entre otras. En contraste con los resultados obtenidos en el presente estudio, Tolvett (2009) ha reportado para vehículos pesados de transporte de carga diferencia de emisiones entre el modelo COPERT 4 e IVE 2.0 para en Santiago de Chile de NO<sub>x</sub> y MP de -42%, para México D. F. -18% NO<sub>x</sub> y -54% MP y para Sao Paulo -39% NO<sub>x</sub> y -60% MP.

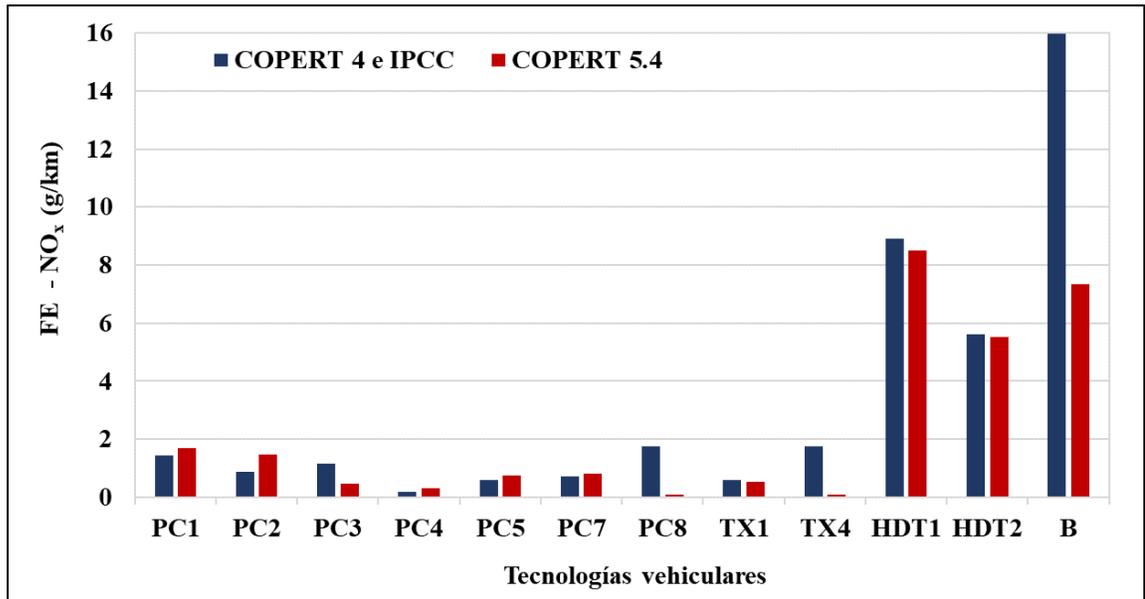


**Figura 2.20.** Esquema del término VSP – Potencia específica del vehículo. (Tomado de: Jiménez, 1999; Tolvett; 2009).

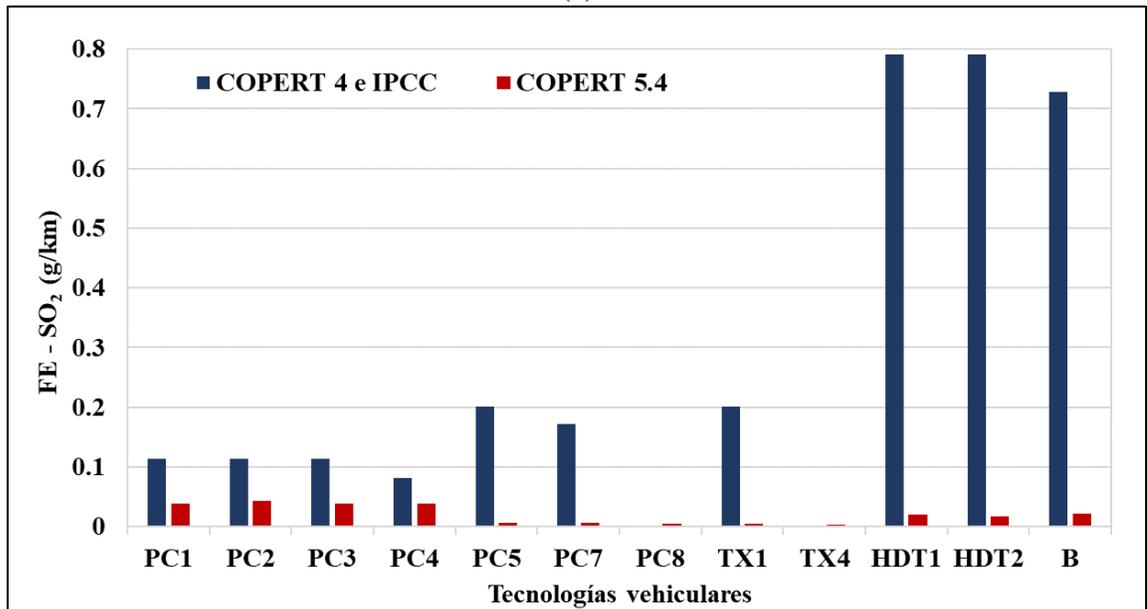
**Comparativo de FE de COPERT 5.4 de Manizales y COPERT 4 de Buenos Aires**

En cuanto a las diferencias de los FE, en las Figura 2.21 y Figura 2.22 se muestra un comparativo de los FE obtenidos mediante COPERT 5.4 para la ciudad de Manizales con respecto a los reportados para el área metropolitana de Buenos Aires, Argentina obtenidos mediante COPERT 4 e IPCC (datos disponibles hasta tecnología Euro II) (D’Angiola et. al., 2010). El comparativo se realizó para los contaminantes CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub>, los cuales son de mayor interés por sus efectos negativos sobre la salud humana. Se observa que todos los FE calculados con COPERT 5.4 con respecto a los de COPERT 4 e IPCC son inferiores (especialmente para el contaminante SO<sub>2</sub>), a excepción de los FE de NO<sub>x</sub> de los vehículos

particulares. Las diferencias en el mismo modelo se deben a que en la nueva versión se incluyen actualizaciones de los FE estimados en campo, así como también a los parámetros bajo los cuales están ajustados los FE para ciudad como es el caso de los FE de SO<sub>2</sub> que están influenciados por el contenido de azufre en los combustibles.

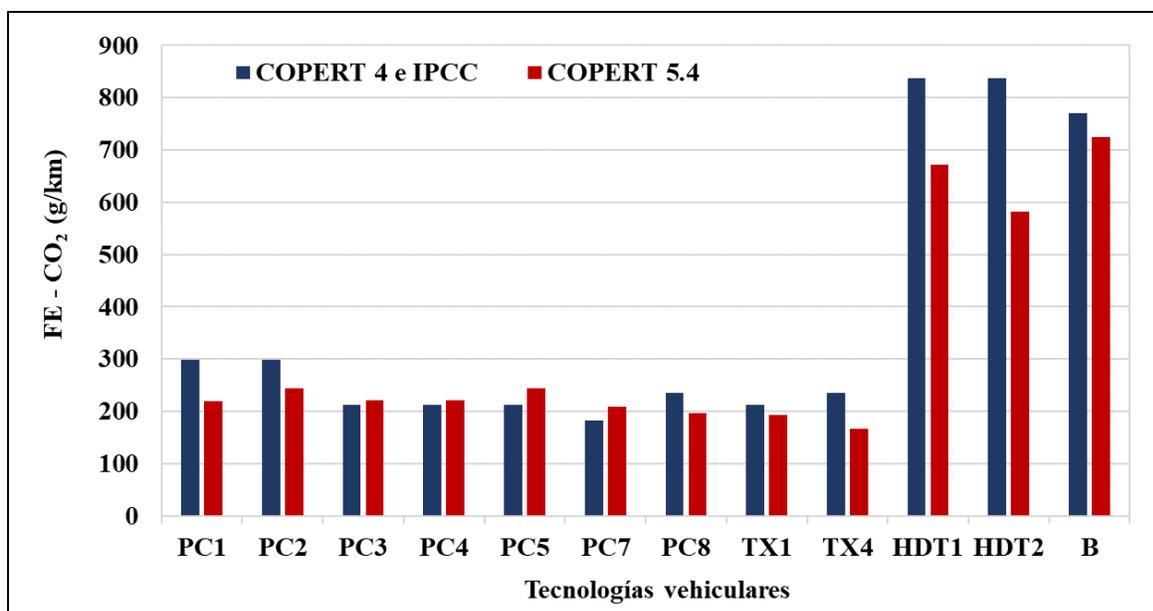


(a)

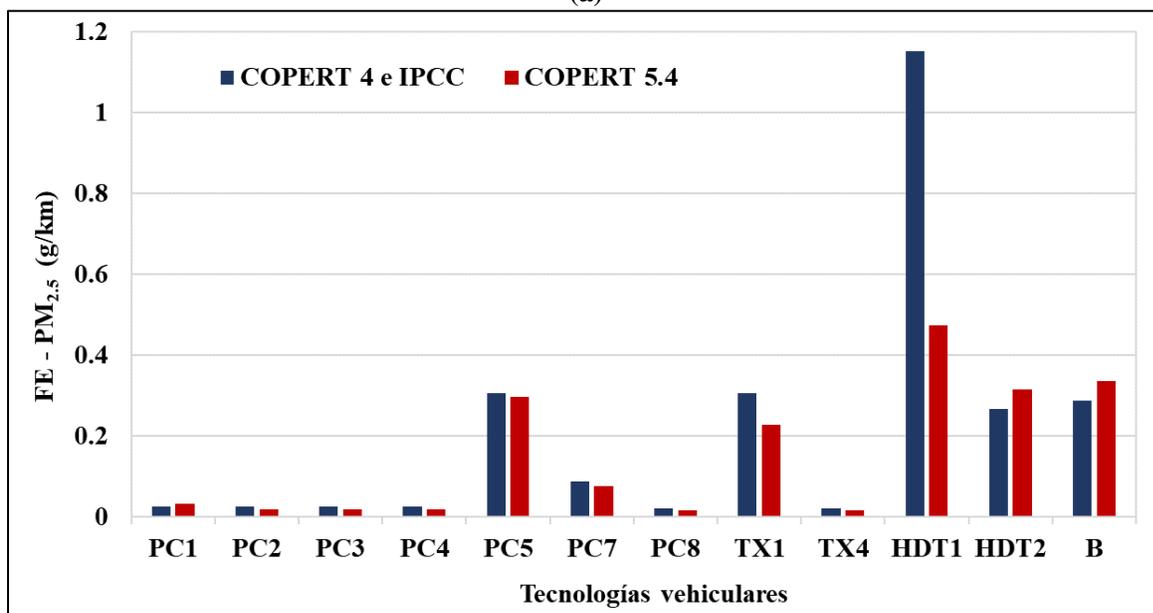


(b)

Figura 2.21. Comparativo de FE ajustados para diferentes ciudades obtenidos mediante diferentes modelos de estimación de emisiones vehiculares: (a) FE NO<sub>x</sub>, (b) FE SO<sub>2</sub>.



(a)



(b)

Figura 2.22. Comparativo de FE ajustados para diferentes ciudades obtenidos mediante diferentes modelos de estimación de emisiones vehiculares: (a) FE CO<sub>2</sub> (b) FE PM<sub>2.5</sub>.  
 Notación: PC1: ECE 15/04, PC2: Open Loop. PC3: convencional, PC4: Euro 1, PC5: Euro 2. TX1: Euro 1, TX4: Euro 2. HDT1: Euro 1, HDT2: Euro 2.

### Comparativo de FE de COPERT 5.4 de Manizales y COPERT 4 de Chile

En contraste, se realizó el mismo ejercicio comparativo con los FE locales empleados en Chile mediante COPERT 4 (M. Osses, comunicación directa, 31 de marzo de 2020). Cabe

mencionar que los FE comparados de la ciudad de Chile corresponden a FE en ruta, mientras que en el caso de estudio es un FE para todas las horas del día teniendo en cuenta las condiciones de hora pico y valle, así como también de las condiciones del motor del vehículo en frío y caliente. A continuación, se describe las observaciones para cada categoría vehicular:

**Buses:** para todas las tecnologías en general los FE estimados mediante COPERT 5.4 son menores, con diferencias desde -10% hasta el -50%, a excepción de la tecnología sin catalizador para COV (12%) y CH<sub>4</sub> (0%) (ver Tabla 2.19). Lo anterior se atribuyen principalmente a la diferencia de velocidad (parámetro función de los FE), kilómetros recorridos y edad del parque automotor.

**Tabla 2.19. Porcentajes de diferencia de los factores de emisión de buses obtenidos por COPERT 5.4 y COPERT 4 Chile.**

Bus (<15 ton) – FE (g/km)							
Tecnología vehicular	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	COV	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Sin catalizador	-29%	-48%	-38%	-23%	12%	-32%	0%
Euro 1	-48%	-37%	-41%	-41%	-47%	-35%	0%
Euro 2	-50%	-36%	-41%	-26%	-44%	-35%	-35%
Euro 3	-49%	-38%	-40%	-20%	-42%	-34%	-41%

**Camiones:** en todas las subcategorías correspondientes a livianos, medianos y pesados se observaron diferencias considerables ( $\pm 30\%$ ) en todos los contaminantes de las tecnologías sin catalizador y Euro 1, 2 y 3 (ver Tabla 2.20), estas diferencias se atribuyen a las mismas razones mencionadas anteriormente en la categoría de buses. Sin embargo, en la tecnología Euro 4 se observan diferencias mayores al 100% para la tecnología Euro 4 en los contaminantes CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, COV y CH<sub>4</sub>.

Las tecnologías vehiculares se diferencian en los límites de emisiones, siendo las tecnologías más nuevas con límites inferiores de emisiones, en el caso de las emisiones de los contaminantes SO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub> la reducción entre Euro 3 y Euro 4 tanto en COPERT 5.4 como en COPERT 4 Chile son comparables (entre el 2% y 8%); mientras que en los contaminantes CO, NO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub> COPERT 4 Chile presenta reducciones alrededor del 90%, 60% y 80% respectivamente para todas las categorías. En contraste, las reducciones en COPERT 5.4 son de 50%, 30% y 55% respectivamente.

**Tabla 2.20. Porcentajes de diferencia de los factores de emisión de camiones obtenidos por COPERT 5.4 y COPERT 4 Chile.**

Camión – FE (g/km)								
PBV	Tecnología vehicular	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	COV	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Liviano (7-12 ton)	Sin catalizador	-10%	60%	18%	-20%	-48%	29%	0%
	Euro 1	17%	36%	30%	34%	9%	41%	0%
	Euro 2	-	-	-	-	-	-	-
	Euro 3	28%	34%	31%	84%	21%	43%	-44%
	Euro 4	679%	176%	27%	297%	196%	39%	310%
Mediano (14-20 ton)	Sin catalizador	2%	3%	1%	-2%	-3%	11%	106%
	Euro 1	-1%	3%	-3%	4%	-6%	6%	106%
	Euro 2	0%	7%	-2%	33%	0%	7%	32%
	Euro 3	2%	7%	-2%	36%	3%	7%	15%
	Euro 4	598%	109%	-5%	160%	132%	4%	-53%
Pesado (26-28 ton)	Sin catalizador	-25%	-19%	-24%	-26%	-35%	-17%	0%
	Euro 1	-24%	-19%	-23%	-26%	-34%	-16%	0%
	Euro 2	-21%	-17%	-22%	-2%	-30%	-15%	-36%
	Euro 3	-25%	-18%	-22%	-6%	-28%	-15%	-44%
	Euro 4	405%	-8%	-22%	80%	79%	-14%	-53%

**Motocicletas:** se destaca la diferencia en el FE de SO<sub>x</sub> (mayor a 500%) para las motocicletas de 4 tiempos con cilindraje entre 250-750 cm<sup>3</sup> sin catalizador y Euro 1 (ver Tabla 2.21), esta diferencia está asociado al contenido de azufre en la gasolina. En Colombia el contenido de azufre es de 300 ppm, mientras que en Chile es de 10 ppm. En cuanto a los demás contaminantes (CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, COV y CO<sub>2</sub>) presentaron diferencias menores al 45% asociadas a las condiciones de cada región.

**Tabla 2.21. Porcentajes de diferencia de los factores de emisión de motocicletas obtenidos por COPERT 5.4 y COPERT 4 Chile.**

Motocicleta 4 tiempos (250 – 750 cm <sup>3</sup> ) – FE (g/km)							
Tecnología vehicular	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	COV	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Sin catalizador	23%	1%	633%	34%	45%	30%	-58%
Euro 1	-4%	-7%	719%	34%	10%	46%	-15%

**Vehículos particulares a gasolina:** se destaca la diferencia en el FE de SO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub> (mayor a 200%, ver Tabla 2.22) para todas las tecnologías y categorías, esta diferencia está asociado al contenido de azufre en la gasolina. En Colombia el contenido de azufre es de 300 ppm, mientras que en Chile es de 10 ppm. En cuanto a la diferencia en el FE de PM<sub>2.5</sub> se atribuyen posiblemente a las condiciones de circulación asociados al porcentaje de vehículos que transitan en horas pico y valle, así mismo a las condiciones meteorológicas y especificaciones del combustible.

**Tabla 2.22. Porcentajes de diferencia de los factores de emisión de vehículos particulares a gasolina obtenidos por COPERT 5.4 y COPERT 4 Chile.**

Vehículo particular a gasolina – FE (g/km)								
PBV	Tecnología vehicular	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	COV	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
VLP (Pequeño)	Sin catalizador	-58%	-11%	198%	471%	-23%	-47%	16%
	Euro 1	56%	30%	329%	471%	177%	-24%	21%
	Euro 2	134%	36%	336%	471%	235%	-22%	-
	Euro 3	278%	52%	333%	1186%	790%	-23%	780%
VLC (Grande)	Sin catalizador	-44%	-2%	395%	471%	-7%	-12%	16%
	Euro 1	-65%	-16%	308%	471%	614%	-27%	21%
	Euro 2	-83%	-48%	329%	471%	304%	-24%	-
	Euro 3	-80%	8%	294%	1186%	226%	-30%	780%

**Vehículos particulares a diésel:** esta categoría presenta la menor diferencia entre los FE de todos los contaminantes para todas las tecnologías vehiculares (menores al 50%, ver Tabla 2.23), a excepción del FE de NO<sub>x</sub> para vehículos sin catalizador (VLC) el cual presenta una diferencia del -69%.

**Tabla 2.23. Porcentajes de diferencia de los factores de emisión de vehículos particulares a diésel obtenidos por COPERT 5.4 y COPERT 4 Chile.**

Vehículo particular a diésel – FE (g/km)								
PBV	Tecnología vehicular	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	COV	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
VLP (Pequeño)	Sin catalizador	-6%	-8%	-13%	-2%	-12%	-5%	-6%
	Euro 2	-7%	-13%	-14%	21%	-7%	-6%	-
	Euro 3	-8%	-9%	-12%	38%	-7%	-4%	0%
	Euro 4	-15%	-11%	-12%	42%	-14%	-4%	-47%
VLC (Grande)	Sin catalizador	-35%	-69%	-32%	5%	47%	-25%	-6%
	Euro 2	-15%	-45%	-20%	-34%	-8%	-13%	-
	Euro 4	-63%	-32%	-20%	27%	-46%	-13%	-66%

**Taxi a gasolina (simulados como vehículos particulares):** esta categoría al igual que la categoría de PC presenta las mismas diferencias principalmente en los FE de SO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub> (mayor a 150%, ver Tabla 2.24) para todas las tecnologías y categorías, esta diferencia está asociado al contenido de azufre en la gasolina (Colombia: 300 ppm, Chile: 10 ppm). En cuanto a la diferencia en el FE de PM<sub>2.5</sub> se atribuyen posiblemente a las condiciones de circulación asociados al porcentaje de vehículos que transitan en horas pico y valle, así mismo a las condiciones meteorológicas y especificaciones del combustible

**Tabla 2.24. Porcentajes de diferencia de los factores de emisión de taxis a gasolina obtenidos por COPERT 5.4 y COPERT 4 Chile.**

Vehículo particular (taxi) a gasolina – FE (g/km)								
PBV	Tecnología vehicular	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	COV	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
VLP (Pequeño)	Sin catalizador	-71%	-3%	155%	454%	-43%	- 55%	16%
	Euro 1	42%	30%	262%	454%	87%	- 36%	21%
	Euro 2	131%	34%	253%	454%	396%	- 37%	-
	Euro 3	311%	61%	263%	1142%	535%	- 35%	780%

De acuerdo con lo anterior, los cambios de los FE para todos los contaminantes (se destacan los de SO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub>) se deben a los datos de actividad vehicular asociadas a cada flota vehicular principalmente: velocidades de circulación, kilometraje acumulativo de la flota y calidad de combustibles (contenido de azufre – gasolina: 50 ppm, diésel: 15 ppm en Chile con COPERT 4; gasolina: 173.89 ppm, diésel: 26.34 ppm en Manizales con COPERT 5.4). Adicionalmente, la inclusión de nuevos FE estimados a bordo entre las versiones COPERT 4 y COPERT 5.4.

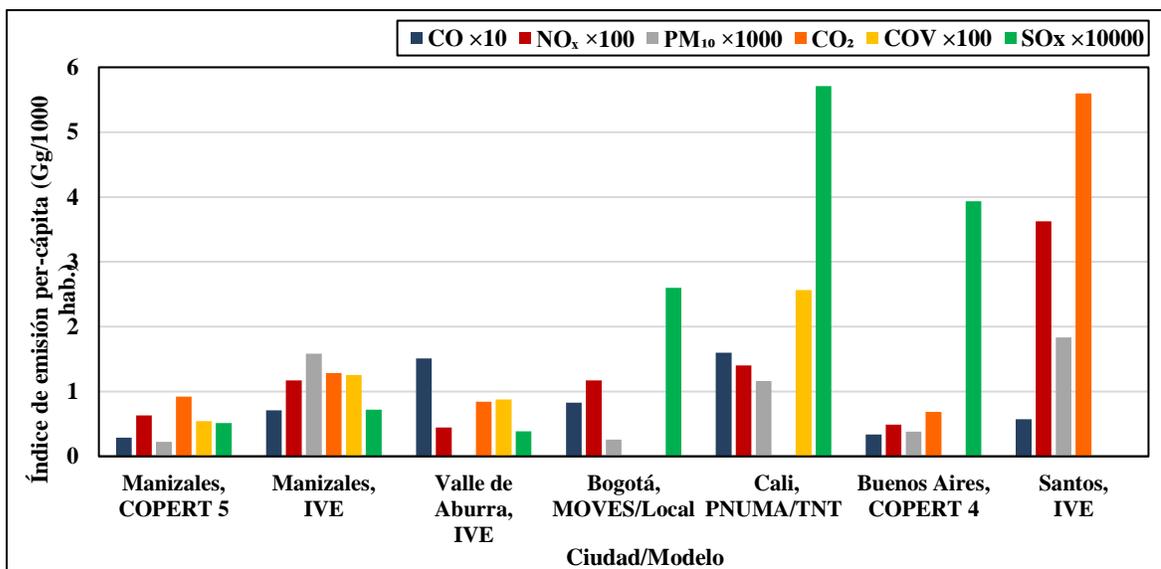
### ***Índice de emisión per cápita (IPC) por fuentes móviles en ruta***

En la Figura 2.23 se muestran el índice de emisión per cápita (IPC) por fuentes móviles para diferentes ciudades Latinoamericanas. Manizales (ciudad media) presenta los IPC de emisiones por fuentes móviles más bajos (menores emisiones) en comparación con grandes ciudades (como Bogotá, Cali y Medellín). Si bien Manizales presenta una tasa alta de motorización, ocupó el segundo lugar del país con 455.2 veh./1000 hab. en el año 2017 después de Medellín (433.7), Bogotá y Cali se encontraban en el sexto y séptimo lugar con 322.4 y 298.5 (Manizales Cómo Vamos, 2018), estas ciudades tienen una mayor área urbana, población y actividad vehicular.

Manizales presento los IPC de las emisiones estimadas por COPERT incluso menores a las estimadas para la misma ciudad mediante IVE, lo cual se debe a la diferencia de los algoritmos de cálculo, tipos de corrección y parámetro base de cada modelo, este último para el modelo IVE corresponde a los bins de potencia del motor y en COPERT es la velocidad promedio vehicular. Manizales es una ciudad caracterizada por presentar altas pendientes por lo que los motores de los vehículos sufren mayor presión, esto se ve mejor representado mediante los bins de potencia (González, 2017).

Se observa un perfil de IPC de emisiones vehiculares para la ciudad de Manizales mediante el modelo COPERT de CO<sub>2</sub>, CO, COV, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> y SO<sub>x</sub>, los tres primeros contaminantes se asocian mayormente a las emisiones de vehículos particulares (aporte principalmente a CO<sub>2</sub>) y motocicletas (CO y COV) como se muestra en la Figura 2.22. También, se observa que todas las ciudades tienen un IPC de emisiones de COV es levemente mayor a NO<sub>x</sub>, así como también el IPC de SO<sub>x</sub> de las ciudades de Cali, Bogotá y Buenos Aires es dos veces mayor que las demás ciudades, contaminantes asociados principalmente a los vehículos particulares y motocicletas que utilizan gasolina como combustible, y asociado al contenido de azufre.

Si bien la comparación del IPC es limitada debido a las altas incertidumbre del IEA, diferencias en los modelos de estimación de emisiones implementados y los parámetros de actividad vehicular, se ha utilizado con el fin de analizar: tendencias de emisión de contaminantes, el impacto relativo de las fuentes móviles en ruta de una ciudad, diferencias generales entre ciudades medianas y megaciudades en términos de la influencia vehicular en la contaminación del aire (González, 2017; Huo et. al., 2011).



**Figura 2.23. Índice per cápita (IPC) de emisión vehicular en carretera para diferentes ciudades del mundo (Fuente: Unal-Corpocaldas, 2019; UPB-AMVA, 2020; SDA, 2019; CVC, 2018; D'Angiola, 2010).**

## 2.5.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizó un análisis de sensibilidad para el cual se definieron cinco posibles variables que influyen en los FE y emisiones estimadas, las cuales son: (1) viaje promedio,  $L_{trip}$  (relacionado a la longitud recorrida y al tiempo), (2) condiciones de circulación asociado al porcentaje de km totales recorridos en hora pico y hora por vehículo, (3) condiciones de circulación asociado a la velocidad promedio en hora pico y hora valle, (4) condiciones de manejo asociadas al porcentaje de vías con pendientes y (5) contenido de azufre en la gasolina. Algunas de estas se seleccionaron teniendo en cuenta que se consideran como corrección de los FE base para el ajuste de condiciones locales.

Los resultados obtenidos fueron comparados con respecto a los FE y emisiones obtenidas anteriormente (Tabla 2.15 y Tabla 2.17), los cuales se mencionarán seguidamente como FE y/o emisiones base. Las diferencias porcentuales fueron calculadas mediante la ecuación (2.7).

$$\text{Porcentaje diferencia} = \frac{\text{Valor nuevo} - \text{Valor base}}{\text{Valor base}} \times 100 \quad (2.7)$$

### *(1) Viaje promedio recorrido por un vehículo*

En el software COPERT 5.4 se establece el viaje promedio de un vehículo para toda la flota vehicular denominado como l-trip y el cual tiene una distancia máxima permitida de 20 km. En la estimación base se estableció una distancia de 9.5 km en un tiempo de 0.25 h, se realizó un aumento del 50% a cada parámetro de manera independiente (distancia 14 km, tiempo 0.375 h). Este parámetro se consideró dentro la evaluación del cambio de los FE debido a que está involucrado en el cálculo de las emisiones frío, las cuales son calculadas solo para la categoría de vehículos particulares y taxis. El software calcula un factor multiplicativo a los FE, el factor corresponde a la fracción de los kilómetros recorridos mientras se alcanza la temperatura de estabilización del motor y está en función del viaje promedio recorrido por un vehículo y la temperatura ambiental.

En la Tabla 2.25 se muestra la diferencia porcentual de los FE al realizar un aumento en el tiempo del 50% (0.375 h) y manteniendo la misma distancia (9.5 km), se observó que los FE no sufren cambios, a excepción de la categoría de vehículos particulares y taxis a gasolina, donde se observa cambios bajos en COVMNM y COV del 0.1% y 0.2% respectivamente, siendo mayores los nuevos FE obtenidos.

**Tabla 2.25. Diferencia porcentual de los FE base y los obtenidos mediante análisis (1) de sensibilidad (aumento del 50% en el tiempo de un viaje promedio).**

Categoría vehicular	Combustible	Factores de emisión en ruta (g/km) - Diferencia porcentual											
		CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	BC	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	COVNM	COV	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	
Vehículo particular	Gasolina	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%
	Diésel	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	GNV	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Taxi	Gasolina	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%
	Diésel	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	GNV	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

En la Tabla 2.26 se muestra la diferencia porcentual de los FE al realizar un aumento en la distancia del 50% (14 km) y manteniendo el mismo tiempo (0.25 h), se observó que los FE tienen un cambio en las categorías de vehículos particulares y taxis, con una diferencia máxima de -37% en COVNM para ambas categorías cuando se aumenta la distancia del viaje. El cambio solo en dichas categorías se debe a que la metodología COPERT solo calcula emisiones en frío para estas como se mencionó anteriormente. En un estudio realizado en Irlanda se concluyó que al aumentar la distancia de un viaje las emisiones de CO, VOC, NMVOCs y N<sub>2</sub>O, tienen cambios de más de 10%, mientras que para el CO<sub>2</sub> el cambio no fue significativo (Dey et al., 2018).

**Tabla 2.26. Diferencia porcentual de los FE base y los obtenidos mediante análisis (1) de sensibilidad (aumento del 50% la distancia de un viaje promedio).**

Categoría vehicular	Combustible	Factores de emisión en ruta (g/km) - Diferencia porcentual										
		CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	BC	PM <sub>2.5</sub>	COVNM	COV	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	
Vehículo particular	Gasolina	-10.4%	-5.0%	-2.5%	0.0%	0.0%	-11.4%	-11.2%	-2.5%	-5.9%	-7.5%	
	Diésel	-3.3%	-0.5%	-1.7%	-2.1%	-1.6%	-4.8%	-4.0%	-1.7%	-4.0%	1.3%	
	GNV	-17.5%	-11.2%	0.0%	0.0%	0.0%	-37.5%	-13.9%	-2.4%	-9.6%	-5.2%	
Taxi	Gasolina	-12.8%	-6.2%	-2.6%	0.0%	0.0%	-14.2%	-14.2%	-2.6%	-7.1%	-13.5%	
	Diésel	-3.5%	-0.6%	-1.7%	-2.1%	-1.6%	-5.0%	-4.3%	-1.7%	-4.6%	1.3%	
	GNV	-18.4%	-10.4%	0.0%	0.0%	0.0%	-37.8%	-14.9%	-2.6%	-9.7%	-6.3%	

**(2) Condiciones de circulación - Porcentaje de kilómetros en condiciones de hora pico y hora valle**

La actividad vehicular porcentual en el presente caso de estudio se asumió como el porcentaje de vehículos recorridos en condiciones de hora pico y valle, en estas condiciones el valor porcentual total debe sumar 100%. Se realizó un cambio porcentual de 50% en hora pico, en la Tabla 2.27 se muestra los valores base y los nuevos valores, así mismo en la Tabla 2.28 se muestran las diferencias porcentuales obtenidas, las cuales no fueron

significativas, estas variaron entre -3% (NO<sub>x</sub>, motos 2T y CO, taxis) a 7% (COVNM, buses y taxis a diésel).

**Tabla 2.27. Cambio porcentual en la variable de actividad vehicular en hora pico y hora valle.**

Categoría vehicular	Simulación base		Cambio - Nuevos datos (Análisis de sensibilidad 2)		% de cambio en la variable	
	Actividad (% veh.)		Actividad (% veh.)		Actividad (% veh.)	
	Hora pico	Hora valle	Hora pico	Hora valle	Hora pico	Hora valle
Vehículo particular	28%	72%	42%	58%	50%	24%
Moto	29%	71%	43%	57%	50%	25%
Camión	23%	77%	35%	65%	50%	18%
Buses	31%	69%	47%	53%	50%	29%
Taxi	23%	77%	35%	65%	50%	18%

**Tabla 2.28. Diferencia porcentual de los FE del análisis de sensibilidad (2) (cambio en el porcentaje de vehículos en hora pico y hora valle).**

Categoría vehicular	Combustible	Factores de emisión en ruta (g/km)									
		CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	BC	PM <sub>2.5</sub>	COVNM	COV	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
Vehículo particular	Gasolina	2%	0%	2%	0%	1%	2%	2%	2%	0%	0%
	Diésel	6%	3%	2%	3%	2%	6%	5%	2%	0%	0%
	GNV	-3%	1%	2%	0%	1%	-3%	-1%	2%	0%	-1%
Moto 2T	Gasolina	0%	-2%	2%	0%	0%	5%	5%	2%	0%	0%
Motos4T	Gasolina	0%	-3%	1%	0%	0%	5%	4%	1%	0%	0%
Taxi	Gasolina	1%	0%	3%	0%	0%	1%	1%	3%	0%	0%
	Diésel	6%	3%	2%	2%	2%	7%	6%	2%	0%	0%
	GNV	-3%	1%	2%	0%	0%	-2%	-1%	2%	0%	-1%
Camión	Diésel	3%	2%	2%	3%	2%	4%	3%	2%	0%	0%
Bus	Diésel	5%	3%	3%	4%	3%	7%	4%	3%	0%	0%

### ***(3) Condiciones de circulación - Velocidad vehicular en condiciones de hora pico y hora valle***

En el software COPERT 5.4 se establecieron velocidades diferentes para cada categoría vehicular, en este caso se realizó un aumento y una disminución porcentual del 50% y -50% respectivamente. En la Tabla 2.29 se muestran los nuevos datos de entrada para todas las categorías vehiculares.

**Tabla 2.29. Cambio porcentual en la variable de velocidad vehicular en hora pico y hora valle.**

Categoría vehicular	Simulación base				Nuevos datos			
	Velocidad (km/h)		Velocidad (km/h)		Cambio velocidad +50% (km/h)		Cambio velocidad -50% (km/h)	
	Hora pico	Hora valle	Hora pico	Hora valle	Hora pico	Hora valle	Hora pico	Hora valle
Vehículo particular	31	47	31	47	16	24	47	71
Moto	31	47	31	47	16	24	47	71
Camión	22	31	22	31	11	16	33	47
Bus	22	31	22	31	11	16	33	47
Taxi	25	41	25	41	13	21	38	62

En la Tabla 2.30 y Tabla 2.31 se muestran los resultados obtenidos de las diferencias porcentuales de los FE, en el caso de aumentar la velocidad los FE de emisión tienden a disminuir en todos los contaminantes para todas las categorías vehiculares (ver Tabla 2.30), en un rango de -1% (PM<sub>2.5</sub> motos 2T) a -60% (NO<sub>x</sub> vehículos particulares a GNV), a excepción de las motos 2T y 4T en CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub>, donde aumentaron los FE en un rango de 2% a 29%. En el caso de disminuir la velocidad los FE tienden a aumentar en todos los contaminantes para todas las categorías vehiculares (Tabla 2.31), en un rango de 3% (NO<sub>x</sub> vehículos particulares a gasolina) a 110% (COVNM de buses), a excepción de las motos 2T y 4T en NO<sub>x</sub> donde disminuyeron -13 y -23%.

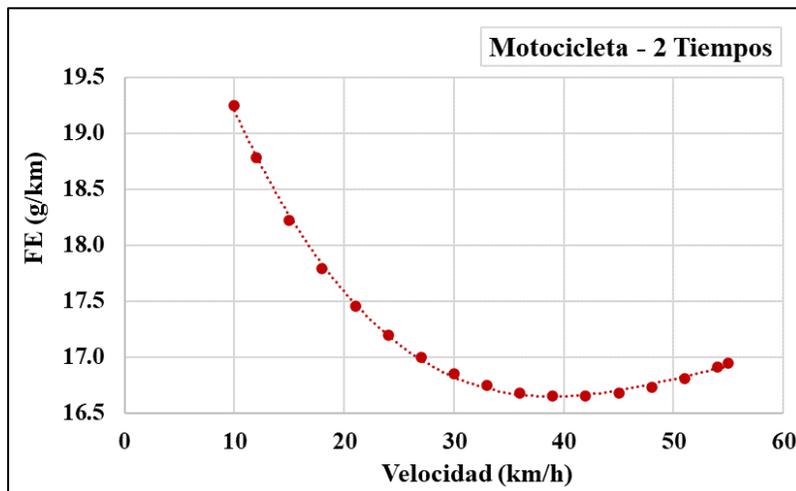
**Tabla 2.30. Diferencia porcentual de los FE del análisis de sensibilidad (3) (cambio +50% en la velocidad en hora pico y hora valle).**

Categoría vehicular	Combustible	Factores de emisión en ruta (g/km) - Diferencia porcentual									
		CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	BC	PM <sub>2.5</sub>	COVNM	COV	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
Vehículo particular	Gasolina	-45%	-12%	-11%	0%	-14%	-43%	-42%	-11%	-42%	-30%
	Diésel	-40%	-14%	-10%	-16%	-17%	-38%	-32%	-10%	0%	0%
	GNV	-50%	-60%	0%	0%	-15%	-48%	-44%	-10%	-53%	-42%
Moto 2T	Gasolina	17%	17%	2%	0%	-1%	-13%	-13%	2%	0%	0%
Moto 4T	Gasolina	22%	29%	8%	0%	-4%	-18%	-16%	8%	0%	0%
Taxi	Gasolina	-52%	-25%	-13%	0%	-12%	-54%	-54%	-13%	-46%	-52%
	Diésel	-35%	-19%	-12%	-17%	-17%	-38%	-34%	-12%	0%	0%
	GNV	-56%	-56%	-13%	0%	-12%	-59%	-49%	-13%	-54%	-45%
Camión	Diésel	-25%	-14%	-17%	-25%	-20%	-35%	-28%	-17%	0%	0%
Bus	Diésel	-26%	-18%	-17%	-21%	-18%	-37%	-25%	-17%	0%	0%

**Tabla 2.31. Diferencia porcentual de los FE del análisis de sensibilidad (3) (cambio -50% en la velocidad en hora pico y hora valle).**

Categoría vehicular	Combustible	Factores de emisión en ruta (g/km) - Diferencia porcentual									
		CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	BC	PM <sub>2.5</sub>	COVNM	COV	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
Vehículo particular	Gasolina	49%	3%	37%	0%	4%	43%	40%	36%	0%	0%
	Diésel	76%	40%	32%	32%	27%	100%	86%	32%	0%	0%
	GNV	-4%	8%	0%	0%	4%	16%	15%	32%	0%	15%
Moto 2T	Gasolina	15%	-13%	40%	0%	0%	66%	65%	38%	0%	0%
Moto 4T	Gasolina	19%	-23%	22%	0%	1%	63%	55%	22%	0%	0%
Taxi	Gasolina	35%	3%	37%	0%	1%	42%	39%	37%	0%	0%
	Diésel	74%	36%	30%	27%	22%	99%	88%	30%	0%	0%
	GNV	-2%	5%	33%	0%	1%	21%	17%	33%	0%	16%
Camión	Diésel	61%	41%	44%	64%	50%	84%	69%	44%	0%	0%
Bus	Diésel	72%	49%	47%	62%	50%	110%	75%	47%	0%	0%

De manera similar, en estudios realizados en Foshan (China) a partir de la variación de la velocidad en un rango de 20 km/h hasta 80 km/h se obtuvo que el comportamiento de los FE para CO, NO<sub>x</sub>, VOC y PM<sub>2.5</sub> tienen una tendencia a disminuir al aumentar la velocidad hasta un valor constante (Yong-Hong et al., 2018). En el presente estudio se obtuvo el mismo comportamiento, al disminuir la velocidad los factores de emisión aumentaron (lo que generaría una mayor emisión del contaminante). De lo anterior, se observa que la velocidad y el factor de emisión guardan una relación inversa, sin embargo, de acuerdo a la Figura 2.24 al aumentar la velocidad continuamente se llega a un valor mínimo del FE y posteriormente este aumentara de nuevo.



**Figura 2.24. Factor de emisión en función de la velocidad – COPERT 5.4.**

#### ***(4) Condiciones de manejo - Pendiente de la carretera***

En cuanto a las condiciones de manejo relacionadas con el porcentaje de –km o vehículos – que transitan en horas valle y horas pico se mantuvieron los porcentajes constantes para las categorías vehiculares, se realizó un cambio en la inclinación de las vías del 0 a 4%. Cabe destacar que las variaciones de pendiente en el software comprenden un rango de -6% a +6% con intervalos de 2%, además este tipo de información solo aplica a vehículos pesados (camiones) y buses. En la Tabla 2.32 se muestra el porcentaje de diferencia de los FE obtenidos, se observó que aumentaron en un rango de 12% (COV camión) a 105% (NOx camión) en todos los contaminantes, a excepción del N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> donde no se obtuvieron diferencias. Los resultados obtenidos se deben a que al tener una pendiente positiva se genera mayor estrés en el motor del vehículo por lo cual tanto los FE como las emisiones tienden a aumentar.

**Tabla 2.32. Diferencia porcentual de los FE del análisis (4) de sensibilidad con respecto al cambio de pendiente positiva de 0% a +4%).**

Categoría vehicular	Combustible	Factores de emisión en ruta (g/km)									
		CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	BC	PM <sub>2.5</sub>	COVNM	COV	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
Camión	Diésel	44%	108%	97%	40%	31%	15%	12%	97%	0%	0%
Bus	Diésel	49%	82%	79%	40%	32%	19%	13%	79%	0%	0%

De acuerdo a las altas diferencias obtenidas en los FE y teniendo en cuenta que la ciudad tiene una orografía compleja, se considera que una estimación con pendiente del 0% no se representaría adecuadamente condiciones de pendiente de una ciudad, además, este factor debería considerarse para todas las categorías vehiculares. Cabe mencionar que el porcentaje de pendiente de carretera se estableció un valor de 2% para todas las tecnologías vehiculares del inventario de emisión base.

#### ***(5) Contenido de azufre en la gasolina***

Se realizó un análisis de sensibilidad con respecto al contenido de azufre en la gasolina, se realizaron estimaciones con contenidos de azufre de 30 y 300 ppm, es decir, se realizó un cambio del -90%. Se obtuvo que los FE se redujeron en la misma proporción como se muestra en la Tabla 2.33. Adicionalmente, se realizó una vez más el ejercicio comparativo con COPERT 4 de Santiago de Chile con los FE a gasolina teniendo en cuenta el mismo contenido de azufre (10 ppm) y se obtuvieron diferencias alrededor del -80%. En este caso los FE por COPERT 5.4 fueron menores y se relacionan con las condiciones de circulación asociados al porcentaje de vehículos que transitan en horas pico y valle, velocidad, asimismo a las condiciones meteorológicas. Cabe destacar que no se observaron cambios en los FE de otros contaminantes.

**Tabla 2.33. Análisis de sensibilidad en los FE asociado al cambio de contenido de azufre**

Categoría vehicular	Subcategoría	Combustible	Tecnología Vehicular	%Diferencia FE SO <sub>2</sub>			
				COPERT 4 - COPERT 5.4 (300ppm)	COPERT 4 - COPERT 5.4 (30ppm)	COPERT 5.4 (300ppm - 30 ppm)	COPERT 4 - COPERT 5.4 (10ppm)
<b>Moto</b>	<b>4T - (250-750 cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Gasolina</b>	<b>No cat.</b>	634%	-27%	-90%	-76%
			<b>Euro 1</b>	718%	-18%	-90%	-73%
<b>Vehículo Particular</b>	<b>VLP (Pequeño)</b>	<b>Gasolina</b>	<b>No cat.</b>	198%	-71%	-90%	-90%
			<b>Euro1</b>	329%	-57%	-90%	-86%
			<b>Euro2</b>	337%	-56%	-90%	-85%
			<b>Euro 3</b>	333%	-57%	-90%	-86%
			<b>Euro 4</b>	NA	NA	NA	NA
	<b>VLC(Grande)</b>		<b>No cat.</b>	396%	-50%	-90%	-83%
			<b>Euro 1</b>	309%	-59%	-90%	-86%
			<b>Euro 2</b>	329%	-57%	-90%	-86%
			<b>Euro 3</b>	294%	-61%	-90%	-87%
			<b>Euro 4</b>	NA	NA	NA	NA
<b>Taxi</b>	<b>Pequeño</b>	<b>Gasolina</b>	<b>No cat.</b>	155%	-74%	-90%	-92%
			<b>Euro 1</b>	262%	-64%	-90%	-88%
			<b>Euro 2</b>	253%	-65%	-90%	-88%
			<b>Euro 3</b>	263%	-64%	-90%	-88%
			<b>Euro 4</b>	NA	NA	NA	NA

Nota:

COPERT 4: contenido de azufre 10 ppm.

En el Tabla 2.34 se muestra un resumen de los análisis de sensibilidad realizados para las categorías vehiculares con mayor cambio, en el anexo E se muestra el resumen completo para todas las categorías vehiculares. De acuerdo a los análisis de sensibilidad anteriormente realizados los parámetros con más influencia sobre los FE en orden de mayor a menor son: velocidad, el contenido de azufre, la pendiente de las vías, porcentaje de carga, viaje promedio y porcentaje de kilómetros en hora pico.

**Tabla 2.34. Resumen análisis de sensibilidad en los FE.**

Variable	Cambio en la variable	Relación de cambio: % Cambio del FE / % Cambio en la variable				
		PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
Viaje promedio <sup>a</sup>	50%	0	-0.1	-0.05	-0.21	-0.5
% km en hora pico <sup>a</sup>	50%	0.01	0	0.05	0.05	0.05
Velocidad <sup>b</sup>	-50%	-0.54	-0.79	-0.63	-1.52	-0.63
Velocidad <sup>b</sup>	50%	-0.33	-0.29	-0.21	-0.8	-0.21
Contenido de azufre <sup>a</sup>	90%	0	0	-1.0	0	0
Porcentaje de carga <sup>c</sup>	-50%	0.02	0	0	0	0
Porcentaje de carga <sup>c</sup>	50%	0.07	0.06	0.07	0.08	0.07
Pendiente <sup>c</sup>	-100%	0.25	0.65	0.62	0.45	0.62
Pendiente <sup>c</sup>	100%	0.25	0.83	0.75	0.34	0.75

Nota:

<sup>a</sup> Vehículo particular a gasolina

<sup>b</sup> Vehículo particular a diésel

<sup>c</sup> Camión

## 2.6. CONCLUSIONES PARCIALES

Las emisiones predominantes obtenidas para la ciudad de Manizales mediante COPERT 5.4 al año base 2017 corresponden a CO (11483.7 ton/año) del grupo de contaminantes criterio, mientras que del grupo de GEI fue el CO<sub>2</sub> (367907.7 ton/año). El perfil de emisiones correspondiente siguió el orden de CO<sub>2</sub> > CO > COV > COVNM > NO<sub>x</sub> > CH<sub>4</sub> > PM<sub>2.5</sub> > BC > SO<sub>2</sub> > N<sub>2</sub>O. Las categorías que usan gasolina (vehículos particulares y motos - conforman el 95% del parque automotor) contribuyen principalmente a las emisiones de CO, COV, COVM (cada contaminante aporta el 94%) > N<sub>2</sub>O (82%) > SO<sub>2</sub> (80%) > CH<sub>4</sub> (77%) > CO<sub>2</sub> (45%). Por otra parte, las categorías vehiculares que utilizan diésel como combustible tiene una participación en el parque automotor del 3.2% (bus y camión); sin embargo, tiene un aporte significativo en las emisiones de BC (82%) > NO<sub>x</sub> (73%) > PM<sub>2.5</sub> (58%). En cuanto al uso de GNV, este es utilizado por el 55% de los taxis y solo un 6% de los vehículos particulares aportando menos del 7% a los contaminantes de GEI. Manizales como ciudad intermedia presenta los ICP de emisiones vehiculares estimadas en el caso de estudio

inferiores con respecto a una ciudad grande como Bogotá, 2.9 más bajo en emisiones de CO, 2.5 veces más bajo en emisiones de NO<sub>x</sub>, 5.3 veces más bajo en emisiones SO<sub>x</sub> y 0.8 veces más bajo en emisiones de PM<sub>10</sub>.

Las emisiones obtenidas mediante COPERT 5.4 fueron menores a las obtenidas mediante el modelo IVE, de manera general todas las emisiones disminuyeron (mínima -7% CO<sub>2</sub> motos, máxima -98% CH<sub>4</sub> taxis) a excepción de: N<sub>2</sub>O en la categoría de vehículos particular (14%), SO<sub>x</sub> (4%) y N<sub>2</sub>O (1110%) en la categoría de motos, SO<sub>x</sub> (68%) y CO<sub>2</sub> (6%) en buses y CH<sub>4</sub> en los camiones (576%). Las diferencias obtenidas se deben principalmente a los FE base y al parámetro función de los FE de cada modelo, donde el bin de potencia específica del vehículo (en el caso de IVE) representa mejor las condiciones de orografía de la ciudad que la velocidad (en el caso de COPERT). Teniendo en cuenta que el software COPERT 5.4 realiza una corrección por pendientes  $\pm 6\%$  para las categorías de bus y camión, y que Manizales tiene pendientes inclusive mayores al 22%. Además, del tipo de correcciones que implementa cada modelo como calidad de combustibles, edad del vehículo, uso de aditivos, entre otras. En cuanto a los parámetros con mayor sensibilidad sobre los FE en el software COPERT 5.4, siguen el orden de mayor influencia: pendiente > velocidad > contenido de azufre.

De acuerdo a lo anterior, si bien se obtienen emisiones coherentes no recomienda que el modelo COPERT se aplique en Manizales ni en ciudades que se caractericen por tener vías con pendientes muy pronunciadas (>6%), ya que el software no comprende pendientes en un rango mayor. Además, teniendo en cuenta que la corrección por pendiente de la vía solo se aplica para las categorías de bus y camión es conveniente que se estudie la aplicación de un factor de corrección adicional para las otras categorías vehiculares, con el fin de que los resultados obtenidos sean más representativos de acuerdo a la orografía de la zona de estudio.

El modelo COPERT resulta ser una herramienta funcional para ciudades con pendientes de vías no mayores a  $\pm 6\%$  con el cual se obtienen resultados coherentes, presenta ventajas importantes como actualizaciones en los FE conforme se desarrollan nuevas tecnologías vehiculares, el cual es un componente de importancia en la estimación de emisiones. Una ventaja adicional es que puede estimar emisiones de partículas de la fracción fina (BC y PM<sub>2.5</sub>) y metales, y emisiones de material particulado susceptible de resuspensión.

## CAPÍTULO 3

# ESTIMACIÓN DE EMISIONES Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO SUSCEPTIBLE DE RESUSPENSIÓN CON INFORMACIÓN LOCAL

---

En este capítulo se presenta la estimación de emisiones de material particulado susceptible de resuspensión ( $RD_{10}$ ) con información local aplicando la metodología Amato (2011) para el año base 2017. Adicionalmente, se presenta un análisis de morfología y caracterización química de este tipo de emisiones. La primera parte comprende la introducción en la que se aborda la importancia de la estimación de emisiones de  $RD_{10}$  y caracterización química, así como también técnicas de análisis. Seguidamente se presentan antecedentes de la estimación de emisiones de  $RD_{10}$  en dos secciones, la primera detalla el estudio previo realizado en la ciudad y la segunda describe de manera general estudios previos a nivel local y nacional. Después se presenta un marco teórico referente a dos metodologías del cálculo de emisiones, determinación de composición química y morfología, así como también las técnicas generalmente aplicadas. Posteriormente, se describe la metodología detallada de la información determinada en campo, donde se incluye los protocolos de pretratamiento de filtros, muestreo y postratamiento de filtros. También, se describe el cálculo realizado de las emisiones de  $RD_{10}$ , y los análisis de caracterización química y morfología. Más adelante se presentan los resultados obtenidos en tres secciones: (1) estimación de parámetros en campo para el ajuste de FE y la estimación de emisiones, en esta también se incluye un análisis de los parámetros determinados en campo en relación con el área de muestreo. (2) Análisis morfológico y (3) caracterización química del material susceptible de resuspensión.

La metodología y resultados detallados referentes a la morfología de las partículas de  $RD_{10}$  se consolidaron en el artículo, titulado: “*Volcanic emissions and atmospheric pollution: A study of nanoparticles*”, publicado en la revista internacional *Geoscience Frontiers* con el doi [10.1016/j.gsf.2020.08.013](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.013). En este capítulo, sin embargo, se ampliará información sobre la metodología y las campañas de campo realizadas en la ciudad.

### 3.1. INTRODUCCIÓN

El material particulado es uno de los contaminantes más preocupantes por sus efectos en la salud humana y su compleja y variada composición, forma y tamaño (PM10, PM2.5, ultrafinas y nanopartículas) (WHO, 2016). Estos efectos van desde enfermedades respiratorias (relacionadas con elementos como Ni, Si y Ti) hasta enfermedades cardiovasculares (relacionadas con metales como Zn y V), deterioro cognitivo, accidente cerebrovascular y enfermedades cancerígenas (relacionadas con compuestos orgánicos incluidos los HAP) (Kioumourtzoglou et al., 2016; WHO, 2016; Chen et al., 2017; Saikia et al., 2018; Ramírez et al., 2019; Stafoggia y Faustini, 2018; Grigoratos y Martini, 2015).

Diferentes estudios han concluido que la mayor contribución de material particulado se debe a fuentes vehiculares, las emisiones asociadas al sistema del tubo de escape de los gases de combustión pueden llegar a ser comparables con las emisiones de material particulado susceptible de resuspensión y emisiones por desgaste de frenos y neumáticos (Padoan et. al., 2018). Las emisiones que no son de escape (emisiones de material particulado susceptible de resuspensión y por desgaste de frenos y neumáticos) son propensas a ser suspendidas en vórtices verticales por la acción de agentes externos (aire, paso de los vehículos o actividades de construcción) a la atmósfera local (Alves et al., 2018), y también pueden transportarse en la escorrentía de aguas pluviales a otros lugares ecológicamente sensibles (Gunawardana et al., 2012).

El RD<sub>10</sub> varían ampliamente en cantidad y composición química en cada lugar, ya que están influenciadas por diferentes parámetros como: características de la carretera, tráfico vehicular y la meteorología (Amato et. Al., 2009, 2011; Pachón et al., 2020), además de la contribución de otras fuentes de emisión cercanas como industrias, actividades de construcción y volcanes. La estimación de emisiones de RD<sub>10</sub> se realiza mediante la metodología de FE ajustados a condiciones locales y modelos de emisión. Los FE son comúnmente usados, estos se ajustan mediante la carga de sedimento (Cs) la cual corresponde a una fracción del material particulado en un área delimitada (Amato et al., 2011). Los modelos de emisión contienen una base de datos de FE, por lo que las emisiones estimadas tienen asociadas altas incertidumbre al estar influenciadas por las características del área geográfica donde fueron determinados los FE.

En cuanto a la caracterización química del RD<sub>10</sub> diferentes estudios (Espitia y Porras, 2017; Amato et. al., 2011) han reportado generalmente la composición química distribuida en 6 componentes: (1) elementos de la corteza terrestre (Al, Fe, Mg, Ca, Na, S, K, P), (2) carbono orgánico (CO), (3) carbono elemental (CE), (4) iones insolubles en agua (SO<sup>2-</sup><sub>4</sub>, Cl<sup>-</sup>, NO<sup>-3</sup><sub>3</sub>, F<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub>, Br<sup>-</sup>, PO<sup>3-</sup><sub>4</sub>, NH<sup>+4</sup>), (5) trazas (V, Cd, Pb, Ni, Ba, Zn, Cu, entre otros) y (6) otros. La determinación de estos componentes se realiza a partir de técnicas de espectrometría de

masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, para los componentes de elementos de la corteza terrestre y trazas), cromatografía iónica (componente de iones insoluble en agua) y método termo-óptico (CO y CE) (Amato, 2011).

En cuanto al estudio de la morfología de partículas finas en el tema de calidad del aire generalmente se implementan técnicas de microscopía electrónica de barrido (FE-SEM) y microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HR-TEM) acoplado con espectroscopía rayos X dispersiva (EDS). Técnicas que ha dado resultados importantes en la fracción de  $PM_{10}$  (material particulado en aire ambiente menor a  $10\ \mu m$ ) e incluso en fracciones menores ( $PM_{2.5}$ , NP - nanopartículas, UFP - partículas ultrafinas). Sin embargo, no han sido aplicadas en  $RD_{10}$  ya que no ha sido estudiada la morfología de estas partículas.

Manizales cuenta con un primer estudio de aproximación al cálculo de las emisiones de  $RD_{10}$  realizado por Valencia (2019), en el cual se implementaron dos metodologías de cálculo de FE en función de la carga de material particulado depositado sobre la carretera (metodología EPA (2018) y metodología Amato (2011)), parámetro que es propio de cada área de estudio. Sin embargo, dicho parámetro no fue estimado en campo en la ciudad de Manizales, fue adaptado de los valores obtenidos en campo en la ciudad de Bogotá (Espitia y Porras, 2017). Por lo anterior, los resultados obtenidos posiblemente estén subestimados por la aplicación de parámetros locales de otra ciudad. Cabe mencionar que además el haber utilizado datos de campo de otra ciudad diferente no permitió el estudio de la composición química y morfológica de estas partículas, información valiosa para determinar las posibles fuentes de contribución a este tipo de emisiones.

En consecuencia, Valencia (2019) plantea la necesidad de realizar una campaña de campo que permita determinar la Cs en diferentes zonas de la ciudad, con el fin de disminuir la incertidumbre de las emisiones estimadas previamente. Además, permite realizar un estudio de la composición química y morfológica de estas partículas, este último de gran interés y poco realizado ya que generalmente los estudios se centran en la caracterización química y determinación de las fuentes de contribución.

En relación con lo anterior, en este trabajo se estimaron las emisiones de  $RD_{10}$  a partir de datos de Cs locales y se realizó un análisis de composición química aplicando técnicas de ICP-MS y cromatografía iónica. Adicionalmente, se aplicaron técnicas de análisis avanzadas de microscopía electrónica (FE-SEM / EDS y HR-TEM / EDS) para el estudio de la morfología de las partículas. Los resultados obtenidos serán de gran importancia para el entendimiento de una de las fuentes de contribución al problema de contaminación por material particulado en los centros urbanos (los parámetros que influyen y las posibles fuentes de contribución a las emisiones de  $RD_{10}$ ). Adicionalmente, generar interés en el estudio morfológico de estas partículas ya que son muy pocos o nulos los estudios en esta área.

## 3.2. ANTECEDENTES

### 3.1.1. ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO SUSCEPTIBLE DE RESUSPENSIÓN EN LA CIUDAD DE MANIZALES

En Manizales, Valencia (2019) realizó por primera vez la estimación de emisiones de material particulado susceptible de resuspensión (RD<sub>10</sub>). Dicho estudio permitió complementar la estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta de los IEA año base 2014 y su actualización al año base 2017 (que incluyó solo emisiones por tubo de escape y evaporativas). La estimación de emisiones de RD<sub>10</sub> se realizó siguiendo dos metodologías de cálculo basadas en la carga de material particulado depositado sobre la carretera. Cada metodología difiere por el diámetro de partícula para las que fueron diseñadas: Amato (PM<sub>10</sub>) y EPA (PM<sub>75</sub>).

En el estudio realizado por Valencia (2019) no se estimó la carga de material particulado depositado sobre la carretera para Manizales, aplicaron datos obtenidos en campo con la metodología Amato de la ciudad de Bogotá (Espitia y Porras, 2017) y se aplicó para ambas metodologías (a pesar de que la metodología EPA está en función de material particulado con un diámetro de 75 µm). Adicionalmente, las emisiones de RD<sub>10</sub> estimadas por ambas metodologías tienen aplicado un factor de corrección por eventos de precipitación propuesto por la metodología EPA.

Las zonas consideradas y cargas de RD<sub>10</sub> adaptadas se muestran en la Tabla 3.1, se consideraron las características del área circundante a cada zona como: vegetación, flujo vehicular, estado de la vía y uso del suelo. Cabe mencionar que debido a que no se determinaron parámetros en campo no fue posible estudiar la composición química y morfología del RD<sub>10</sub> en Manizales.

**Tabla 3.1. Cargas de sedimento de Bogotá adaptadas a Manizales (Fuente: Valencia, 2019).**

ID	Zona	Vegetación	Cs (mg/m <sup>2</sup> )	FE Amato (g/VKT)	FE EPA (g/VKT)
Av. Kevin Ángel Mejía		Alta	1.52	0.017	0.006
Vía Panamericana		Alta	1.52	0.017	0.006

ID	Zona	Vegetación	Cs (mg/m <sup>2</sup> )	FE Amato (g/VKT)	FE EPA (g/VKT)
Av. Gilberto Álzate		Baja	7.93	0.066	0.021
Av. Santander		Baja	7.93	0.066	0.014
Av. Paralela.		Baja	7.93	0.066	0.012
Vía Neira - Sector Autónoma		Media	5.09	0.046	0.014
Zona Industrial		Media	5.09	0.046	0.026
Sector Centro		Nula	7.93	0.066	0.031
<b>Promedio</b>			<b>5.62</b>	<b>0.049</b>	<b>0.016</b>

Las emisiones de RD<sub>10</sub> obtenidas aplicando la metodología Amato y EPA mostraron que las para el año 2014 contribuyeron 8% (69.0 ton/año) y 3% (23.2 ton/año) al total de las emisiones de PM<sub>10</sub> por fuentes móviles en ruta y para el año 2017 contribuyeron un 11% (73.9 ton/año) y 4% (24.86 ton/año) respectivamente (Valencia, 2019). El aumento de las emisiones obtenido es atribuido principalmente al aumento en el parque automotor, que paso de tener 132012 vehículos en el año 2014 a 169142 vehículos en el año 2017.

Las estimaciones de emisiones de RD<sub>10</sub> obtenidas probablemente están sujetas a un alto grado de incertidumbre debido principalmente a que los valores de carga de material particulado depositado sobre la carretera están asociados a la dinámica específica de un área

determinada (Valencia, 2019). Por otra parte, las diferencias obtenidas entre la metodología Amato y EPA se debe posiblemente a un error en la implementación de esta última, dado que la EPA está basada en la carga de material particulado de  $75 \mu\text{m}$  (“silt loading –  $S_L$  (PM<sub>75</sub>)”) y está se calculó en función de PM<sub>10</sub>.

En cuanto al estudio de caracterización química y morfología de las partículas de RD<sub>10</sub> como se ha mencionado anteriormente no fue posible a causa de la utilización del parámetro determinado en campo de una ciudad diferente. De manera general Manizales cuenta con solo tres estudios de caracterización química y un estudio de morfología en la fracción de material particulado en aire ambiente, PM<sub>10</sub>, realizados por Velasco (2015), Zapata (2019) y Franco (2020).

Velasco (2015) analizó mediante difracción de rayos X, cromatografía iónica y transmitancia termo-óptica, las concentraciones de metales e hidrocarburo aromáticos policíclicos (HAPs), iones y cationes y CO y CE, respectivamente en PM<sub>10</sub> de muestras entre 2010 y 2013. Se obtuvo la siguiente distribución: CE (28%), CO (14%), iones como  $\text{SO}_4^{2-}$  (6%),  $\text{NO}_3^-$  (2%) y  $\text{NH}_4^+$  (1.8%). Elementos como Zn, Pb, Mn y Fe fueron asociados a una mezcla de emisiones móviles y actividades industriales. Los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NH}_4^+$  fueron relacionados con aerosoles secundarios; mientras que compuestos como  $\text{NO}_3^-$ , CE y Ca mostraron una fuente más específica como las emisiones de vehículos que empleaban ACPM y polvo de construcción o de calles, y el Ti fue asociado a material mineral.

Zapata (2019) analizó la distribución de la concentración de los 16 HAPs en la fracción gaseosa y particulada de PM<sub>10</sub> en el periodo comprendido entre julio y septiembre de 2018. Se encontró en este estudio que el rango de las concentraciones totales de  $\Sigma 16$  HAPs (particular + gas) estaba entre  $15.5 \text{ ng m}^{-3}$  y  $46.0 \text{ ng m}^{-3}$ . Los HAPs monitoreados en fracción particulada y gaseosa presentaron en todas las muestras mayor concentración (aproximadamente 3 veces) en la fracción gaseosa.

Franco (2015) estudio la fracción de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el periodo de octubre de 2018 a febrero de 2019 mediante la técnica de SEM/EDS. Los resultados de caracterización química mostraron la presencia de elementos tales como: Pb, S, Cu, Na, Al, Cl y Fe asociados a fuentes vehiculares, Pb y Na asociado a procesos de combustión, Pb, S, K y Cu asociados al desgaste de llantas y frenos, Fe, Cu y Pb provenientes de desgaste de piezas móviles, y Pb, Cr, Ge, Cu y Al asociado al polvo de carretera. Elementos como Fe, Al, S, Na, Ca y Mg se relacionaron con industrias del acero como fundición y soldadura. Mientras que elementos como P, S, Zn, F, As, Mn, Mg, Ga y Ti son atribuidos a fuentes volcánicas. El análisis morfológico, primero de este tipo en la ciudad de Manizales, mostro formas variadas que van desde partículas esféricas asociadas a la combustión de carbón, a partículas amorfas con bordes filosos asociadas a emisiones volcánicas. También se encontraron aglomeraciones de hollín, relacionadas con emisiones vehiculares especialmente a la combustión de motores

diésel. Otras formas identificadas fueron partículas geométricas irregulares vinculadas a fuentes naturales tales como material mineral.

### 3.1.2. ESTUDIOS PREVIOS RELACIONADOS CON LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR FUENTES MÓVILES EN RUTA

En los últimos años los estudios en estimación de emisiones de RD<sub>10</sub> han sido de gran interés por la comunidad científica (Amato et. al., 2011; Beltrán et. al., 2012; Espitia y Porras, 2017; Pachón et. al., 2018, 2021; Ramírez et. al., 2019) como se muestra en la Figura 3.1, donde el número de publicaciones científicas en la base de datos SCOPUS ha ido aumentando. Así mismo, en la Tabla 3.2 se presentan algunos casos de estudio de la estimación de emisiones de RD<sub>10</sub> tanto a nivel internacional como nacional.

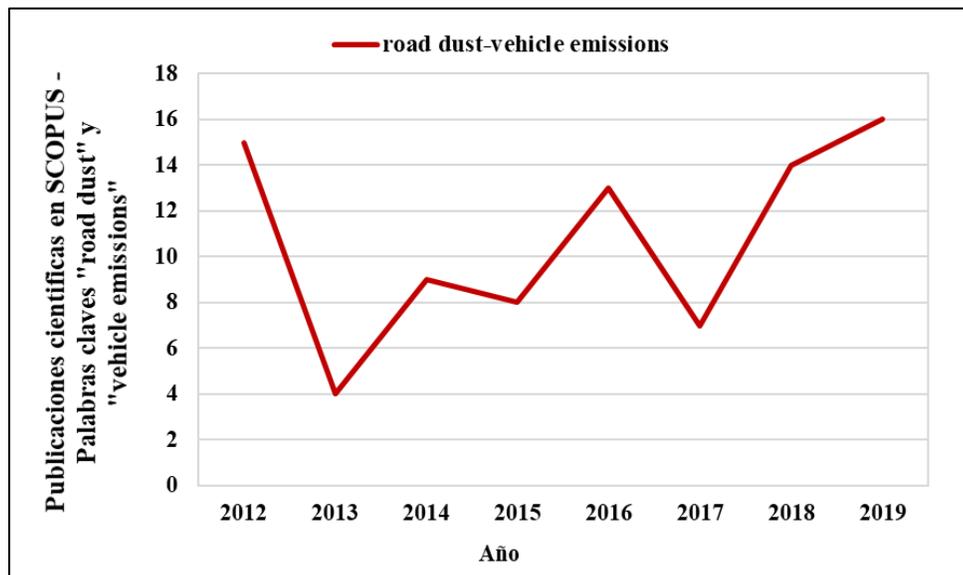


Figura 3.1. Publicaciones científicas anuales asociadas a las palabras clave “road dust” y “vehicle emissions” en la base de datos SCOPUS.

Tabla 3.2. Estudios previos de estimación de emisiones de material particulado susceptible de resuspensión.

<i>Emisiones y caracterización química de RD<sub>10</sub></i>		
Barcelona, Girona y Zúrich	Se realizó la estimación de polvo de carretera resuspendido y se determinó las fuentes aportantes mediante caracterización química.	(Amato et. al., 2011)

<i>Emisiones y caracterización química de RD<sub>10</sub></i>		
Paris, Francia	Se realizó mediciones en campo para la cuantificación de factores de emisión en vías de la ciudad. Adicionalmente, se estudió su variabilidad y las contribuciones al aire ambiente.	(Amato et. al., 2016)
Kuala Lumpur, Malasia	Composición de metales pesados seleccionados en el polvo de la carretera en el centro de la ciudad.	(Han et. al., 2014)
Sao Paulo, Brasil	Caracterización del material particulado fino emitido por la resuspensión de polvo de carreteras y pavimentos en el área metropolitana de Sao Paulo.	(Hetem & Andrade, 2016)
Nanjing, China	Contaminación y riesgo para la salud de metales potencialmente tóxicos en el polvo de las carreteras urbanas una megaciudad.	(Liu, et. at., 2014)
Bogotá, Colombia	Se realizó la estimación de cargas de sedimento en vías pavimentadas. Adicionalmente, se desagregó por medio de modelos de interpolación IDW y se identificó las fuentes aportantes por medio de modelos receptores.	(Espitia y Porras, 2017)
Bogotá, Colombia	IEA año base 2012. Incluyo fuentes estacionarias puntuales, móviles en ruta y biogénicas. El componente de fuentes móviles en ruta se estimó emisiones exhosto y no exhosto. Las emisiones de RD <sub>10</sub> , se realizó por primera vez la estimación de S <sub>L</sub> de acuerdo a la metodología US-EPA AP-42 en la ciudad. Adicionalmente, el IEA se desagregó espacial y temporalmente a 1 km x 1 km y 1 h respectivamente y se implementó en un modelo de transporte químico.	(Pachón et. al., 2018)
Bogotá, Colombia	Se realizó la caracterización de iones solubles en agua, elementos principales y oligoelementos, CO y CE, y con ello un análisis de las fuentes aportantes del RD <sub>10</sub> . Se encontró que más del 50% de la composición corresponde a elementos de la corteza, seguido de CO y en menor proporción iones solubles en agua, CE, elementos traza y otros. De lo anterior, y mediante un análisis de componentes principales se identificaron 5 fuentes de aporte (desgaste de carretera, actividades de construcción, actividades industriales, desgaste de frenos y humos del tupo de escape).	(Ramírez et. al., 2019)
Bogotá, Colombia	Se estimaron las cargas de RD <sub>10</sub> en 41 puntos de la ciudad de Bogotá siguiendo la metodología de Amato. Se evaluó los factores principales del área circundante de los puntos de	(Pachón et. al., 2021)

<i>Emisiones y caracterización química de RD<sub>10</sub></i>		
	muestreo que afectan las cargas de RD <sub>10</sub> (características de la carretera, estado del tráfico, uso del suelo y meteorología)	

### 3.3. GENERALIDADES DE LAS EMISIONES DE RD<sub>10</sub>

Las emisiones no exhosto (emisiones de polvo de resuspendido y emisiones por desgaste de frenos y neumáticos) tienen un aporte importante en el material particulado en el aire ambiente. Existen diferentes metodologías de estimación de este tipo de emisiones, incluyendo FE en función de parámetros locales y modelos de emisión. Sin embargo, estos últimos son pocos utilizados ya que tienen asociadas altas incertidumbres debido principalmente a que las emisiones están asociados a la dinámica específica de un área determinada.

Las emisiones de RD<sub>10</sub> se estiman mediante la ecuación general (3.1) corregidas por actividad vehicular de la ciudad.

$$E_{RD10} = FE \times A_{CV} \times N_{CV} \quad (3.1)$$

Donde  $E_{MPPR}$ , son las emisiones de RD<sub>10</sub> (kg/año) y FE es el factor de emisión (kg/VKT).  $A_{CV}$  la actividad vehicular asociada a una categoría vehicular (VKT/veh) y  $N_{CV}$  el número de vehículos de la categoría vehicular.

En cuanto a los F.E. para la estimación de emisiones de RD<sub>10</sub> se han reportado diferentes metodologías, la metodología Amato y EPA son utilizadas comúnmente. La ecuación (3.2) propuesta por la metodología Amato están en función de la carga de sedimento para material particulado con diámetro menor a 10  $\mu\text{m}$ . En contraste, la metodología EPA incluye la carga, el peso medio de los vehículos en la estimación de emisiones y un factor multiplicador asociado a partículas con diámetro menor a 75  $\mu\text{m}$  como se muestra en la ecuación (3.3).

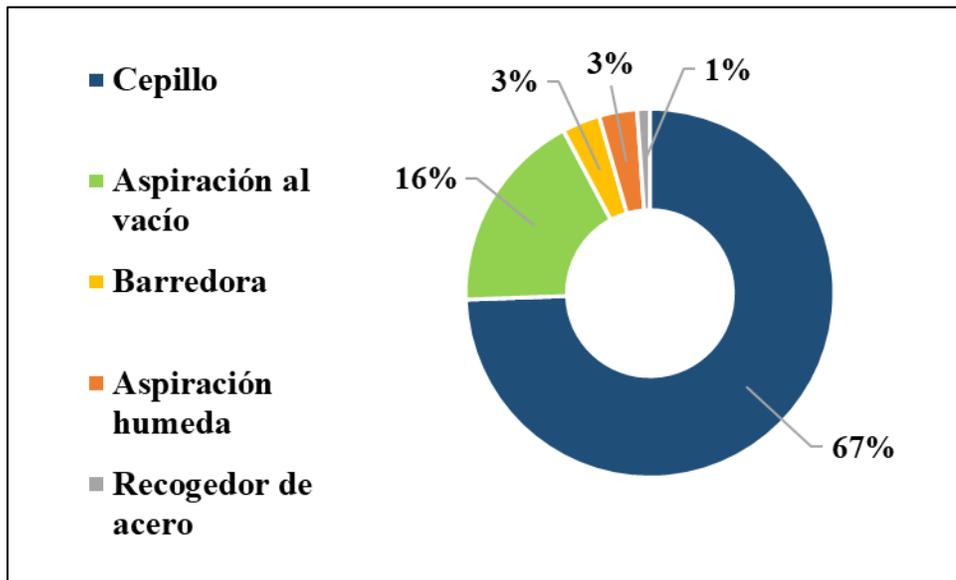
$$FE_{Amato} = 45.9 C_s^{0.81} \quad (3.2)$$

$$FE_{EPA} = k \times S_L^{0.67} \times W^{0.85} \quad (3.3)$$

Donde  $FE_{Amato}$  es el factor de emisión de RD<sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{veh}\cdot\text{km}$ ),  $C_s$  la carga de sedimento en función de PM<sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ).  $FE_{EPA}$  el factor de emisión de RD<sub>10</sub> (g/VKT), k el factor multiplicador específico del tamaño de partícula aplicable para partículas menores a 75  $\mu\text{m}$  (g/VKT),  $S_L$  carga de material particulado depositado sobre la carretera de diámetro de 75  $\mu\text{m}$  (g/m<sup>2</sup>) y W peso promedio de los vehículos (ton).

De acuerdo con lo anterior, el parámetro correspondiente a la carga de sedimento se determina en campo mediante la recolección de material particulado depositado sobre la carretera. Sin embargo, la metodología EPA dispone de una amplia base de datos de  $S_L$  determinadas en campo para características específicas relacionadas con el entorno, por lo cual su selección es compleja. Características propias de identificación de la zona asociadas a la presencia de vegetación, condición de la vía pavimentada, velocidad media de los vehículos que transitan por la vía, condición de carril activo, son algunas de ellas.

El ajuste de FE se realiza mediante la estimación de cargas de material particulado en campo de la zona de estudio. Se ha reportado el muestreo de material particulado susceptible de resuspensión basados en el tamizado escalonado ( $63\ \mu\text{m}$  - limo grueso,  $125\ \mu\text{m}$  - partículas muy fina,  $250\ \mu\text{m}$  - partículas finas y  $500\ \mu\text{m}$  - partículas medianas) o submuestras para determinadas fracciones de partícula ( $2.5\ \mu\text{m}$  y  $10\ \mu\text{m}$ ), mediante diferentes medios como se muestran en la Figura 3.2 (Haynes et. al., 2020). Los métodos de muestreos donde se determina la granulometría mediante procesos de tamizaje o cámaras de resuspensión la muestra tiende a tener mayor pérdida de partículas finas que los muestreos mediante aspiración, debido a la adhesión electrostática que presentan las partículas a los diferentes materiales (como mallas de tamices, cepillos, entre otros) (Pachón et. al., 2018).



**Figura 3.2. Muestreos de material particulado resuspendido de estudios realizados desde el año 2000 (Tomado de: Haynes et. al., 2020).**

Por otra parte, una vez determinada las cargas de  $RD_{10}$  las técnicas de análisis cualitativas y cuantitativas permiten comprender la naturaleza de estas emisiones y la identificación de posibles fuentes aportantes a la composición química. Por ejemplo, las partículas de  $RD_{10}$  con enriquecimiento de fuentes antropogénicas identificadas mediante técnicas de microscopía incluyen partículas esféricas con incrustaciones de metales tóxicos y ricas en

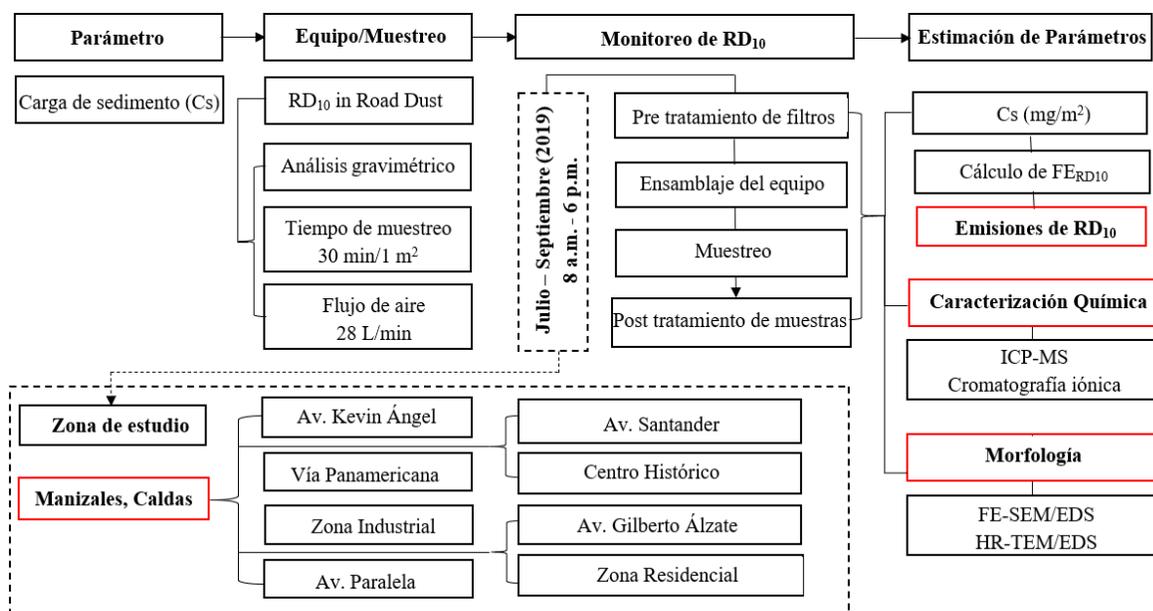
Fe de 10 a 150  $\mu\text{m}$  y agregados angulares ricos en Fe/Cr (Bourliva et al. 2016; Byrne et al. 2017). Partículas de hierro esféricas están a menudo asociados con los procesos de combustión de alta temperatura (Spiteri et al. 2005), mientras que los agregados angulares están asociados con las emisiones de escape y el desgaste de la carrocería / motor (Bucko et al. 2010). También se han observado partículas alargadas atribuidas al desgaste de los neumáticos (Gunawardana et al. 2012). Las fuentes de aporte predominante son el desgaste de frenos (asociado con la presencia de Fe, Cu, Zn, Cr, Sn y Sb), humos de escape (asociado al CE y CO), el polvo de carretera resuspendido (asociado a la presencia de Mg, Al, Si, Ca y Ti) y derrames de aceite sobre la carretera (asociado a Al y Ca), entre otros (Amato et. al., 2014; Espitia y Porras, 2017; Ramírez et. al., 2019).

Las técnicas de análisis de composición química como la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM), permiten visualizar y caracterizar físicamente partículas individuales muy pequeñas. Estas técnicas acopladas con herramientas secundarias (como espectroscopía de rayos X - EDS), permite un mapeo cualitativo de elementos a escala de partículas individual, es decir, dan información de la cantidad de elementos que contiene la partícula a nivel superficial. Técnicas como espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y cromatografía iónica proporcionan resultados de composición química cuantitativos.

La espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) usa una fuente de energía para vaporizar y ionizar parcialmente pequeñas cantidades de material particulado, las cuales, bajo condiciones controladas, son accesibles para el análisis por espectrometría de masas. La ventaja de este método es que se puede detectar simultáneamente cada elemento en la tabla periódica, con rangos de partes por millón (ppm) y sub-ppm (Malek et. al., 2019). En contraste la cromatografía iónica permite la separación de iones y moléculas polares, según su afinidad con el compuesto de la columna de cromatografía, detecta iones y cationes con rangos de partes por millón (ppm) y sub-ppm. Los LC y LD de cada técnica son diferentes para cada elemento analizado y dependen de los equipos y métodos utilizados (Malek et. al., 2019).

### **3.4. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO RESUSPENDIDO**

En la Figura 3.3 se presenta el esquema general metodológico para la estimación de emisiones de  $\text{RD}_{10}$  y caracterización química por efecto vehicular en Manizales.



**Figura 3.3. Esquema metodológico de la estimación de emisiones de RD10, caracterización química y morfológica en Manizales.**

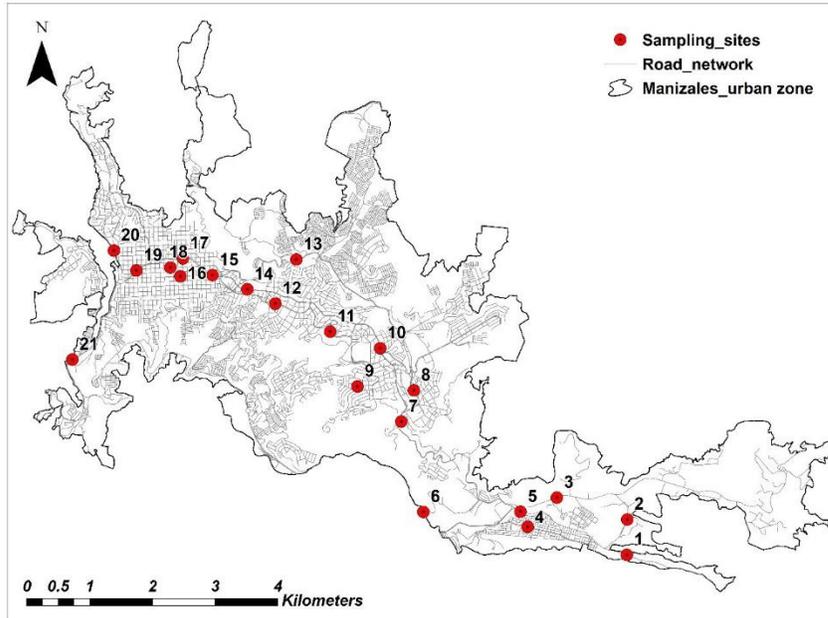
### 3.4.1. ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE RD10

Las emisiones de material particulado susceptible de resuspensión (RD<sub>10</sub>) por efecto vehicular se estimaron mediante la ecuación (3.1) e implementando la metodología de factores de emisión propuestos por Amato (2011) (ver ecuación 3.2). De acuerdo a la ecuación de los FE para el ajuste mediante el parámetro de carga de sedimentos se determinó en una campaña de campo en la ciudad.

$$E_{RD10} = FE \times A_{CV} \times N_{CV} \quad (3.1)$$

$$FE_{Amato} = 45.9 C_s^{0.81} \quad (3.2)$$

Se monitorearon 21 puntos distribuidos sobre las avenidas principales que conforman el eje estructurante de la ciudad, como lo son: avenida Kevin Ángel Mejía, avenida Paralela, avenida Santander, vía Panamericana, la zona industrial, una zona residencial y la vía del centro histórico. El muestreo se realizó en tiempo seco (mínimo 24 horas posterior a un evento de precipitación) entre julio y septiembre del 2019. En la Figura 3.4 se presenta la localización de cada punto de monitoreo, estos se seleccionaron bajo criterio de condición de vía pavimentada, carril activo de tráfico, flujo vehicular, cobertura vegetal, uso del suelo, condiciones de seguridad y logística, entre otros.



**Figura 3.4. Dominio y localización de los puntos de monitoreo de RD<sub>10</sub>.**

En cuanto a la clasificación de la cobertura vegetal se establecieron cuatro categorías: (1) Alta corresponde cuando sus alrededores hay zonas verdes extensas y separadores. (2) Media hace referencia a zonas verdes pequeñas a sus alrededores, separadores y/o andenes con poca vegetación. (3) Baja cuando se tienen separadores con vegetación. (4) Nula no hay presencia en vegetación en el área. Así mismo, en la Tabla 3.3 se muestra la clasificación de las condiciones de la carretera basadas en los tipos de pavimentación.

**Tabla 3.3. Diferentes tipos de condiciones de carretera para Manizales.**

Condiciones de la carretera - Tipos de pavimentación	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Muy bueno</b></li> </ul> <p>Superficie lisa. No presenta ningún tipo de fallas.</p>

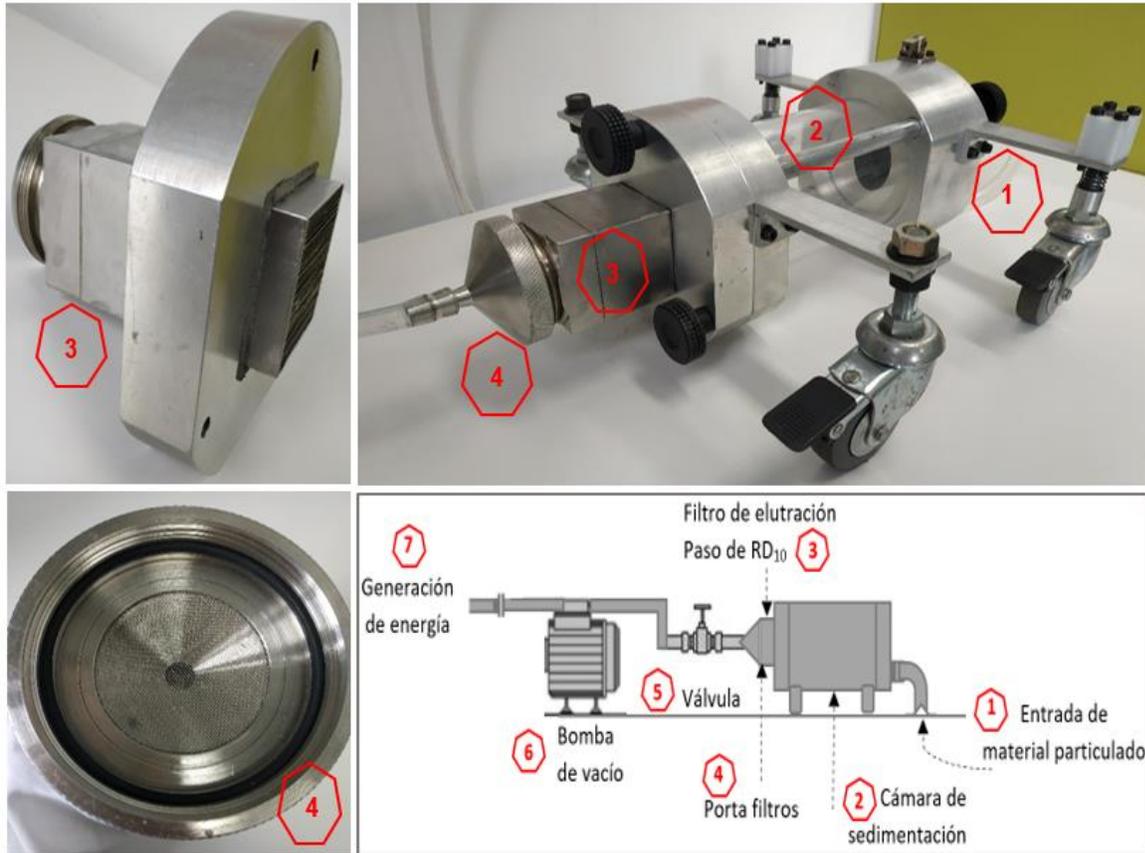
Condiciones de la carretera - Tipos de pavimentación	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Bueno</b></li> </ul> <p>Superficie con líneas de textura.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Regular</b></li> </ul> <p>Superficie rugosa que favorece la acumulación de polvo.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Malo</b></li> </ul> <p>Presenta grietas y desgaste de la superficie, que favorecen la acumulación de polvo.</p>

En la Tabla 3.4 se muestran otras características principales asociadas a cada punto de monitoreo de acuerdo con la información reportada en el Plan Maestro de Movilidad de Manizales (2017), en el cual se establece la clasificación del territorio geográfico de la ciudad desde diferentes aspectos (Findeter, 2017).

**Tabla 3.4. Localización y descripción de los puntos de monitoreo.**

Punto No.	Sector	ID	Fecha muestreo	Longitud	Latitud	Condiciones de la vía	Flujo Vehicular	Velocidad (km/h)	Pendiente de la vía	Cobertura vegetal	Uso del suelo
1	Vía Gallinazo	IND1	02/09/2019	5.02794 N	-75.45139 W	Malo	Medio	23-31	>22%	Nula	Industrial
2	Sena	IND2	20/08/2019	5.03301 N	-75.45135 W	Regular	Alto	11-22	13-21%	Media	Industrial
3	Vía Maltería	IND3	02/09/2019	5.03614 N	-75.46143 W	Muy bueno	Alto	23-31	<12%	Media	Industrial
4	Enea	COM2	31/07/2019	5.03195 N	-75.46563 W	Bueno	Alto	11-22	<12%	Baja	Comercial
5	Construcción	CONST	30/08/2019	5.03413 N	-75.46665 W	Muy bueno	Alto	32-47	>22%	Alta	Mixto
6	Panamericana	AV1	28/08/2019	5.03386 N	-75.48126 W	Muy bueno	Alto	>48	Plano	Alta	Mixto
7	Batallón Av. Santander	AVS1	09/08/2019	5.04704 N	-75.48372 W	Bueno	Alto	32-47	>22%	Baja	Mixto
8	Cruz Roja. Av Kevin	AVK1	08/08/2019	5.05149 N	-75.48191 W	Regular	Medio	11-22	<12%	Baja	Comercial
9	Palermo Residencial	RES1	28/08/2019	5.05206 N	-75.49001 W	Bueno	Bajo	11-22	<12%	Baja	Residencial
10	Cable Av. Santander	AVS2	09/08/2019	5.05754 N	-75.48675 W	Regular	Alto	11-22	13-21%	Baja	Comercial
11	Estadio Av. Paralela	AVP1	30/08/2019	5.05992 N	-75.4939 W	Muy bueno	Alto	23-31	13-21%	Baja	Mixto
12	Cementerio Av. Paralela	AVP2	20/08/2019	5.06392 N	-75.50177 W	Muy bueno	Alto	11-22	13-21%	Baja	Mixto
13	Vía Neira Av. Kevin	AVK2	22/08/2019	5.07024 N	-75.49876 W	Malo	Alto	32-47	>22%	Alta	Mixto
14	La Estación Av. Santander	AVS3	06/08/2019	5.06598 N	-75.5058 W	Muy bueno	Alto	11-22	<12%	Baja	Comercial
15	Fundadores Centro	CEN1	22/08/2019	5.06801 N	-75.51079 W	Bueno	Alto	11-22	<12%	Baja	Mixto
16	Carrera 22 Centro	CEN2	01/08/2019	5.06783 N	-75.51538 W	Bueno	Alto	11-22	13-21%	Nula	Comercial
17	Galería Av. Gilberto	CEN4	28/08/2019	5.07040 N	-75.51501 W	Bueno	Alto	11-22	>22%	Baja	Mixto
18	Gobernación Centro	CEN3	06/08/2019	5.0691 N	-75.51682 W	Bueno	Alto	11-22	13-21%	Nula	Comercial
19	Agustinos Centro	CEN5	08/08/2019	5.06866 N	-75.52168 W	Bueno	Alto	11-22	>22%	Baja	Comercial
20	Chipre	COM1	01/08/2019	5.07151 N	-75.52493 W	Regular	Alto	32-47	13-21%	Media	Comercial
21	Salida Manizales	AV2	06/08/2019	5.05591 N	-75.53086 W	Muy bueno	Medio	>48	13-21%	Alta	Mixto

En la Figura 3.5 se muestra el equipo “RD<sub>10</sub> in Road Dust” utilizado para la determinación de la Cs diseñado por Amato et. al., (2009), las partes que lo conforman y la conexión a otros elementos para su funcionamiento. El equipo se operó a un flujo de aire de 30 L/min (rango operable: 25 a 30 L/min), este se midió al iniciar el muestreo y al finalizar el mismo con el fin de garantizar que la caída de flujo al finalizar no fuera mayor al 5%.



**Figura 3.5. Equipo “RD<sub>10</sub> in Road Dust” para el muestreo de RD<sub>10</sub>.**

El muestreo de material particulado susceptible de resuspensión constó de muestrear un área de 1 m<sup>2</sup> durante 30 min sobre el carril derecho y a una distancia mínima de 0.7 m del costado del carril, este se realizó por triplicado para cada punto de muestreo. Se aseguró de recorrer toda el área de muestreo manteniendo un orden de movimiento de derecha a izquierda y una vez finalizado el recorrido se iniciaba nuevamente hasta completar todo el tiempo. Cabe mencionar que el muestreo se realizó con los protocolos de seguridad como: vehículo de seguridad, señalización, conos, chalecos, guantes, entre otros. En total se obtuvieron 57 filtros muestreados y 5 filtros blancos, estos últimos se sometieron al mismo proceso del pretratamiento y acondicionamiento que los filtros para el muestreo.

Se seleccionaron filtros de fibra de vidrio ( $\varnothing = 47$  mm), en la Figura 3.6 se muestra el esquema de pretratamiento y post tratamiento de los filtros. La  $C_s$  se determinó por diferencia de pesos como se muestra en la ecuación (3.4). Donde  $C_s$  carga de sedimento ( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ),  $P_{Final}$  peso final del filtro impactado (g),  $P_{Inicial}$  peso inicial del filtro no impactado (g) y  $A$  área de muestreo ( $1 \text{ m}^2$ ).

$$C_s = \frac{P_{Final} - P_{Inicial}}{A} \quad (3.4)$$

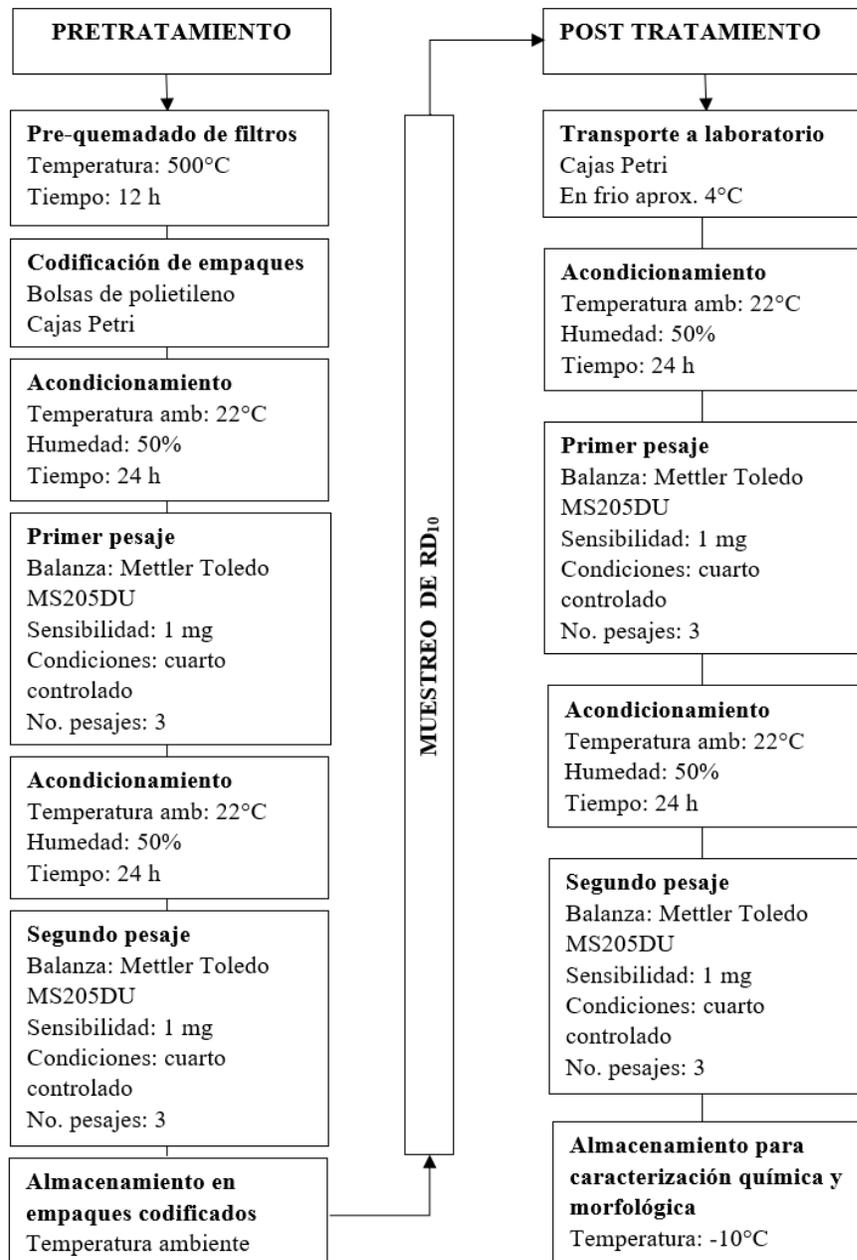
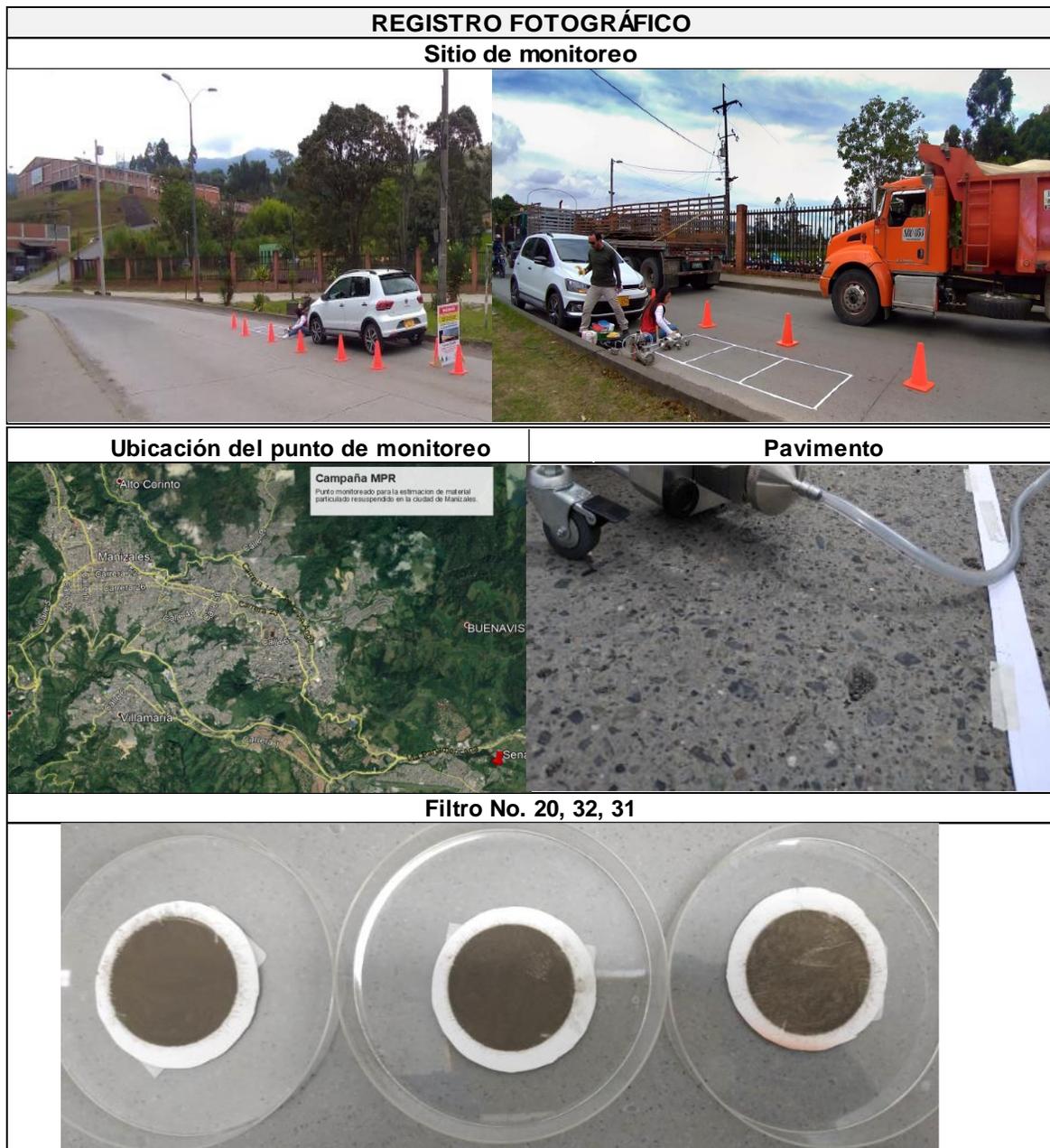


Figura 3.6. Esquema de pretratamiento y postratamiento de filtros.

En la Figura 3.7 se muestra un ejemplo de la ficha de campo con la información registrada en el muestreo y el registro fotográfico de un punto de monitoreo, en el anexo F se encuentran las fichas de campo para los demás puntos de monitoreo.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES		<b>Campaña de monitoreo de RD10</b>		<b>Punto No. 2</b>	<b>SENA</b>		
		<b>Manizales, Caldas</b>					
<b>DESCRIPCIÓN CONDICIONES LOCALES</b>							
<b>Fecha</b>	20/08/2019		<b>Hora</b>		10:40		
<b>Coordenadas</b>	5.03301 N	-75.45135W	<b>Altura (m.s.n.m)</b>		2144		
<b>Uso del suelo</b>		Industrial					
<b>Estado de la vía</b>		Regular (Pavimendo no liso, con grietas)					
<b>Cobertura vegetal</b>		Media (Costado izquierda pasto y costado derecho bosque pequeño)					
<b>Tipo de trafico</b>		Transporte pesado, público y particular (Alto trafico de transporte pesado)					
<b>Otras fuentes aportantes</b>							
<b>Observaciones</b>		Vía de doble sentido con dos carriles. Zona de frenado (paso de peatones y resalto) a 15 m detras del punto de monitoreo y adelante hay curva.					
<b>ACCIONAR DEL MUESTREO</b>							
Muestreo	Codigo de filtro	Caudal inicial (L/min)	Caudal final (L/min)	Área de muestreo (m <sup>2</sup> )	Hora inicio	Hora final	Tiempo de operación (min)
Sena 1	31	30	29.8	1	10:50	11:20	30
Sena 2	32	30	29.37	1	11:30	12:00	30
Sena 3	20	30	28.92	1	12:06	12:36	30
<b>Observaciones</b>							
<b>CARGA DE SEDIMENTO</b>							
Muestreo	Codigo de filtro	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Área de muestreo (m <sup>2</sup> )	Cs (g/m <sup>2</sup> )	Cs prom. (g/m <sup>2</sup> )	Cs prom. (mg/m <sup>2</sup> )
Sena 1	31	0.08863	0.09805	1	0.00941	0.01172	11.72
Sena 2	32	0.09133	0.10370	1	0.01237		
Sena 3	20	0.08766	0.101015	1	0.01336		



**Figura 3.7. Ficha de campo de monitoreo de RD<sub>10</sub> en la ciudad de Manizales.**

### 3.4.2. ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE LAS PARTÍCULAS DE RD<sub>10</sub>

El análisis morfológico de RD<sub>10</sub> se realizó con el fin de entender la naturaleza de las partículas en cuanto a tamaño y forma, y determinar posibles fuentes de emisión que tienen contribución a este tipo de emisiones. El análisis de morfología mediante técnicas avanzadas

de microscopia se llevó a cabo en el laboratorio ambiental de la Universidad Federal de Santa María (Santa María, Brasil) para los 21 puntos muestreados.

Se seleccionó un filtro aleatorio por cada punto de muestreo, teniendo en cuenta que el muestreo se realizó por triplicado, adicionalmente se consideraron dos filtros blancos los cuales fueron sometidos al mismo proceso de pretratamiento (sección 3.4.1., Figura 3.6). Se aplicaron las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM), ambas acopladas a espectroscopía de rayos X (EDS). Las técnicas aplicadas dan información de la forma y tamaño de las partículas, y adicionalmente proporcionan la composición química de la misma a nivel superficial.

En el laboratorio las muestras se pasaron a la matriz agua y se evaluaron de dos maneras: (1) 1 ml de agua muestreada se depositó sobre la rejilla de Cu del FE-SEM y el portaobjetos del HR-TEM. (2) las partículas decantadas se muestrearon por separado y se suspendieron nuevamente en agua por ultrasonido, para luego ser transferidas y analizadas mediante microscopia. En algunos casos, fue necesario esperar hasta 48 h para que el agua se evaporara antes de poder analizar las muestras. Sin embargo, se eligió esta metodología para evitar modificaciones químicas, mineralógicas, morfológicas y geométricas de NP y UFP. Este procedimiento se estableció en base a estudios publicados (Ribeiro et al., 2010).

### **3.4.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL RD<sub>10</sub> EN MANIZALES**

El análisis de composición química de RD<sub>10</sub> se realizó para los 21 puntos de muestreo con el fin de determinar las posibles fuentes de aporte. Los análisis se realizaron en el laboratorio de análisis ambiental de la Universidad Nacional de Costa Rica (Heredia, Costa Rica), donde se determinaron minerales (Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, Mn, Fe), elementos traza (Be, V, Cr, Co, Ni, Cu, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Hg, Pb) y iones solubles en agua (fluoruros, sulfato, nitrato y cloruro) del RD<sub>10</sub>. Los análisis se realizaron mediante las técnicas de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y cromatografía iónica (Amato, 2011).

Después de realizar el análisis gravimétrico (proceso de pesaje para determinar la Cs) los filtros de fibra de vidrio muestreados se mantuvieron en almacenamiento en frío (menos de 4°C, congelador) hasta su envío para el análisis respectivo, se incluyeron 3 filtros blancos los cuales se sometieron al mismo proceso de pretratamiento (sección 3.4.1., Figura 3.6). Los filtros se destinaron a varios tratamientos analíticos destructivos para el análisis respectivo. A continuación, se describen brevemente los procedimientos (Amato et al., 2009; Querol et al., 2001):

- Los filtros de fibra de vidrio fueron sometidos a una digestión con ácido (5 ml de HF, 2,5 ml de HNO<sub>3</sub>, 2,5 ml de HClO<sub>4</sub>) para la determinación de elementos traza y elementos principales, se analizaron mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).
- Los filtros fibra de vidrio se lixiviaron en 20 ml de agua destilada para la extracción de iones solubles en agua y su posterior análisis por cromatografía iónica (IC) para sulfato, nitrato y cloruro.

Se aplicó un análisis de estadística básico para el tratamiento de los datos de composición química y un análisis de componentes principales para asociar posibles fuentes de contribución.

### ***Evaluación del riesgo a la salud***

La evaluación de riesgo para la salud humana es un proceso utilizado para estimar los efectos sobre la salud que podrían resultar de la exposición a contaminantes con composición química cancerígena y no cancerígena (Kamunda, et. al., 2016). En el área de estudio se identificaron metales pesados como Cr, Co, Ni, As, Cd, Pb y Sb como posibles elementos peligrosos para la comunidad. El propósito de la evaluación de la exposición es medir o estimar la intensidad, frecuencia y duración de la exposición humana a un contaminante ambiental (Shi, et. al., 2011).

Se aplicó el modelo propuesto por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos para calcular la exposición de los seres humanos a los metales definidos como peligrosos (EPA, 1989, 1996) en el RD<sub>10</sub>. En el estudio, la evaluación de la exposición se llevó a cabo midiendo la dosis diaria de exposición promedio (D) de los metales pesados mencionados anteriormente para adultos y niños, el análisis por separado se debe a las diferencias fisiológicas. La evaluación de dosis-respuesta estima la toxicidad debida a los niveles de exposición a sustancias químicas.

Los siguientes supuestos son considerados: (1) Los seres humanos están expuestos al polvo de la carretera a través de tres vías: ingesta de partículas de polvo, inhalación de partículas de polvo y contacto dérmico con partículas de polvo; (2) Las ecuaciones de exposición, tasas de ingesta y emisión de partículas se aproximaron por aquellas desarrolladas para el suelo; (3) Algunos parámetros de exposición de las personas corresponden a poblaciones de referencia; (4) El riesgo no cancerígeno total se estima sumando los riesgos individuales obtenidos de tres formas de exposición estimada para cada metal; (5) El riesgo carcinógeno total se determina para cada metal sumando los riesgos individuales calculados para las tres formas de exposición.

De acuerdo a lo anterior, en las ecuaciones (3.5) a la (3.7) se muestran las expresiones para calcular las cantidades de exposición de metales potencialmente tóxicos a través de las tres rutas establecidas por la EPA (EPA, 1989, 1996):

$$D_{inh} = \frac{C_{metal,i} \times AIR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (3.5)$$

$$D_{ing} = \frac{C_{metal,i} \times SRI \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (3.6)$$

$$D_{derm} = \frac{C_{metal,i} \times SAF \times SA \times ABF \times EF \times ED \times 24}{PBW \times AT} \times 10^{-6} \quad (3.7)$$

Así mismo, en las ecuaciones (3.8) a la (3.11) se muestran las expresiones para calcular el índice de riesgo cancerígeno y no cancerígeno establecidas por la EPA (EPA, 1989, 1996):

$$R_i \text{ No Cancerigeno} = \frac{D_i \times 10^{-6}}{RFD_i \times A} \quad (3.8)$$

$$R_{total} \text{ No Cancerigeno} = \sum_{i=1}^3 R_i \text{ No Cancerigeno} \quad (3.9)$$

$$R_i \text{ Cancerigeno} = \frac{1 - \exp(-D_i \times q_i)}{A} \quad (3.10)$$

$$R_{total} \text{ Cancerigeno} = \sum_{i=1}^3 R_i \text{ Cancerigeno} \quad (3.11)$$

En la Tabla 3.5 y Tabla 3.6 se muestran la descripción de cada parámetro y los valores utilizados para la aplicación del caso de estudio de la ciudad de Manizales.

**Tabla 3.5. Parámetros para la estimación de exposiciones diarias.**

Parámetro	Descripción	Unidad	Joven	Adulto
$C_{metal,i}$	Concentración del metal i en el RD <sub>10</sub>	mg/kg	-	-
<b>D<sub>inh</sub>-diario</b>	<b>Exposición por inhalación de partículas</b>	<b>mg/kg día</b>		
AIR-inhalación	Tasa de inhalación	m <sup>3</sup> /día	10	20
EF	Frecuencia de exposición	día/año	330	330
ED	Duración de exposición	año	40	40
PEF	Factor de emisión de partículas	m <sup>3</sup> /kg	6.80E+08	6.80E+08
BW	Peso promedio persona	kg	15	61.5
AT	Tiempo promedio de exposición	día	14600	15550
<b>D<sub>ing</sub>-diario</b>	<b>Exposición por ingestión de partículas</b>	<b>mg/kg día</b>		
SRI	Tasa de ingesta de polvo	mg/día	200	100
<b>D<sub>derm</sub>-diario</b>	<b>Exposición por contacto dérmico</b>	<b>mg/kg día</b>		
SAF	Factor de adherencia cutánea	mg/cm <sup>2</sup> h	0.07	0.07
SA	Área exposición cutánea	cm <sup>2</sup>	2650	5300
ABF	Factor de adsorción dérmico no cancerígeno		0.001	0.001

Parámetro	Descripción	Unidad	Joven	Adulto
ABF	Factor de adsorción dérmico cancerígeno		0.01	0.01
A	Tiempo promedio de vida	año	80	80

**Tabla 3.6. Dosis de referencia (RFD) y factor potencial cancerígeno (qj).**

Parámetro	Unidad	RFD - Rnc	qj - Rc
Cr	mg/kg-día		4.1E+00
As	mg/kg-día		1.5E+00
Cd	mg/kg-día		6.1E+00
Pb	mg/kg-día	1.4E-03	
Hg	mg/kg-día	3.0E-04	
Cu	mg/kg-día	3.8E-02	
Ni	mg/kg-día	2.0E-02	

### 3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.5.1. ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE RD<sub>10</sub>

##### *Cargas de sedimento obtenidas en la ciudad de Manizales*

La Tabla 3.7 y Figura 3.8 se muestra el promedio de las cargas de sedimento (Cs) para los 21 puntos muestreados. Los valores máximos se observaron en el área industrial seguida por el sector comercial. Las Cs máximas obtenidos corresponden a IND1 con un valor de 26.75 mg/m<sup>2</sup> e IND2 con 11.72 mg/m<sup>2</sup>, mientras que los valores mínimos se observaron en IND3 y CEN1, con 0.77 y 1.43 mg/m<sup>2</sup> respectivamente. En la Tabla 3.8 se muestra un comparativo del rango de las Cs estimadas bajo la misma metodología de diferentes ciudades, se observa que los rangos de variación de las cargas de sedimentos en Manizales son similares a los de Bogotá, Barcelona y Girona.

**Tabla 3.7. Carga de sedimento obtenidas en la ciudad de Manizales.**

Punto No.	Sector	ID	Cs (mg/m <sup>2</sup> )
1	Vía Gallinazo	IND1*	26.75
2	Sena	IND2	11.72
4	Enea	COM2	8.54
20	Chipre	COM1	7.53
8	Cruz Roja. Av Kevin	AVK1	7.19
16	Carrera 22 Centro	CEN2	7.14

Punto No.	Sector	ID	Cs (mg/m <sup>2</sup> )
19	Agustinos Centro	CEN5	6.52
14	La Estación Av. Santander	AVS3	6.46
18	Gobernación Centro	CEN3	5.92
21	Salida Manizales	AV2	5.03
17	Galería Av. Gilberto	CEN4	4.16
13	Vía Neira Av. Kevin	AVK2	3.57
11	Estadio Av. Paralela	AVP1	3.17
12	Cementerio Av. Paralela	AVP2	2.73
10	Cable Av. Santander	AVS2	2.72
5	Construcción	CONST	2.52
9	Palermo Residencial	RES1	2.22
7	Batallón Av. Santander	AVS1	1.96
6	Panamericana	AV1	1.74
15	Fundadores Centro	CEN1	1.43
3	Vía Maltería	IND3	0.77

Nota: Punto de muestreo sin pavimentación al costado derecho.

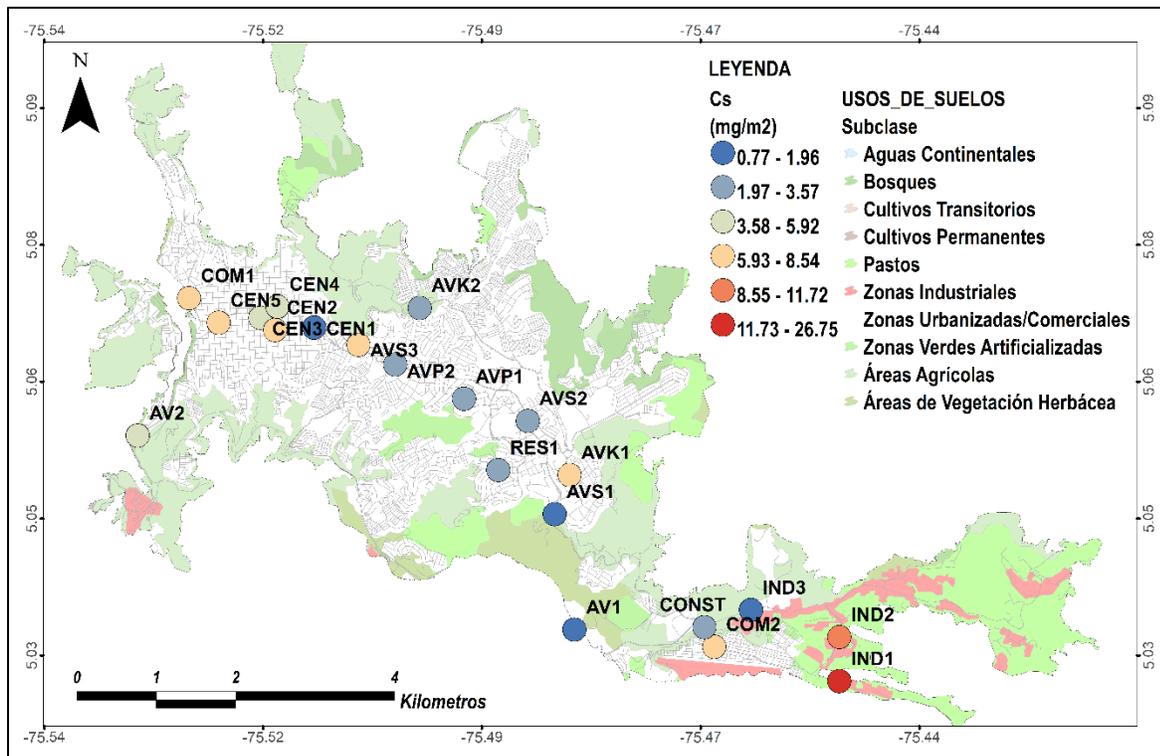


Figura 3.8. Variación de la carga de sedimento, Cs (carga de RD<sub>10</sub>) en Manizales.

Tabla 3.8. Comparación de cargas medias de sedimentos en diferentes ciudades.

Ciudad	Cs (mg/m <sup>2</sup> )		Referencia
	Minima	Maxima	
Bogotá	0.9	22	(Espitia y Porras et. al., 2017)
Bogotá	1.2	45.8	(Pachón et. al., 2021)
Zúrich	0.2	1.3	(Amato et al., 2011)
Barcelona	3.7	23.1	
Girona	1.3	48.7	
Manizales	<b>0.7</b>	<b>26.8</b>	<b>Este estudio</b>

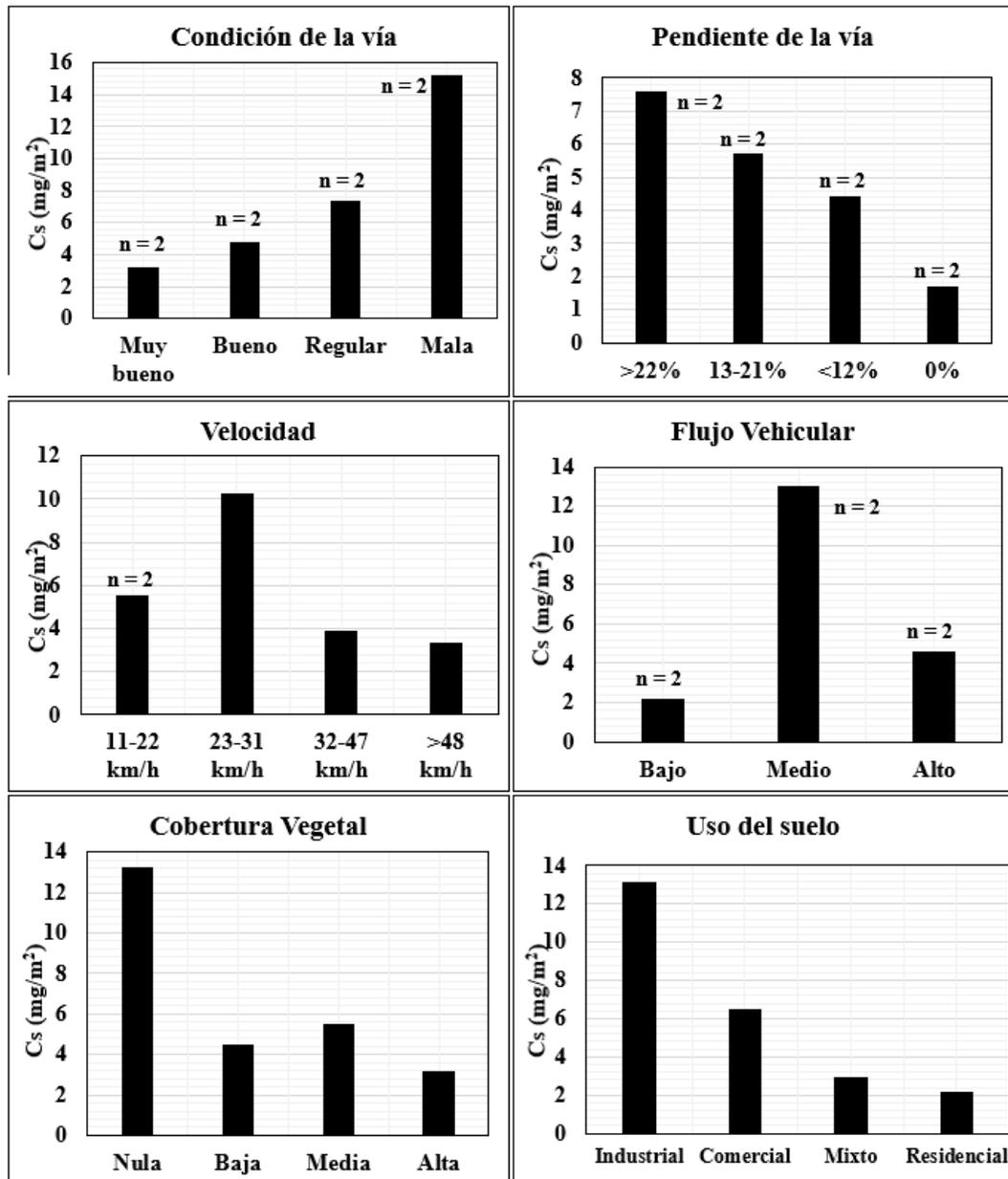


Figura 3.9. Carga de sedimento en función de las características del área de muestreo.

En la Figura 3.9 se muestra la influencia de las diferentes características del área de muestreo (ver Tabla 3.4) sobre la Cs. Se observa que las Cs mayores se obtienen en condiciones de vía mala, los diferentes tipos de pavimentación en los cuales se presentan pequeños huecos o grietas que acumulan material particulado causan dichas variaciones (ver Tabla 3.3). Ejemplo de lo anterior, se observa en los puntos de muestreo: IND1 (26.8 mg/m<sup>2</sup>), IND2 (11.7 mg/m<sup>2</sup>), COM2 (8.5 mg/m<sup>2</sup>), AVK1 (7.5 mg/m<sup>2</sup>), COM1 (7.2 mg/m<sup>2</sup>) y CEN2 (7.1 mg/m<sup>2</sup>), las cuales se caracterizan por tener condiciones de carretera mala y regular (ver Tabla 3.4).

Las altas pendientes se caracterizan por tener altas Cs, lo cual se debe a la generación de partículas por desgaste de frenos y neumáticos que el vehículo emite cuando se encuentra en vías con pendiente negativa principalmente. También a la deposición de material particulado emitido por el tubo de gases de escape de los vehículos en condiciones de pendiente positiva, donde el motor sufre mayor estrés y por ende tiene mayores emisiones. Los puntos AVS1 (1.96 mg/m<sup>2</sup>), AVK2 (3.57 mg/m<sup>2</sup>), CEN4 (4.16 mg/m<sup>2</sup>) y CEN5 (6.52 mg/m<sup>2</sup>) aunque presentan pendientes >22% tienen asociadas otras características que tienden a favorecer Cs bajas como estado de la carretera y vegetación (Pachón et. al., 2021), a excepción del IND1 (26.75 mg/m<sup>2</sup>).

Teniendo en cuenta que la Cs se define como la cantidad de material particulado en la vía susceptible de resuspensión en un área delimitada, la circulación de vehículos a altas velocidades aumenta los vórtices de viento y la resuspensión del material particulado de la carretera, por ende las Cs son menores (Pachón et. al., 2021). Caso contrario sucede cuando los vehículos circulan a bajas velocidades ya que dichos vórtices se reducen por lo cual el material particulado no tiende a resuspenderse en mayor medida y por ende las Cs son mayores.

En cuanto a las condiciones como la velocidad y el flujo vehicular se observa que a velocidades menores a 23-31 km/h y condiciones de flujo vehicular medio y alto, las Cs tienden a ser altas (IND2: 11.72 mg/m<sup>2</sup>, COM2: 8.54 mg/m<sup>2</sup>, AVK1: 7.19 mg/m<sup>2</sup>, AVS3: 6.46 mg/m<sup>2</sup>). Sin embargo, con las mismas características puntos como RES1 (2.22 mg/m<sup>2</sup>), AVP2 (2.73 mg/m<sup>2</sup>), AVS2 (2.72 mg/m<sup>2</sup>) muestran Cs bajas, pero tienen otras características que no favorecen la acumulación de partículas sobre la carretera como estados de la vía (muy bueno y bueno), esta combinación de características distorsiona la relación entre dichas variables.

En cuanto a la vegetación, se observa una reducción en la Cs cuando se tienen áreas con vegetación altas cercanas. De acuerdo a la Tabla 3.9 en el caso de cobertura vegetal bajo se esperaría que la Cs fuera mayor a la que presenta la cobertura vegetal media, esto se debe a que dicha condición de vegetación baja tiene asociadas otras características que favorecen las Cs bajas como estado de la carretera muy bueno. Ejemplo de lo anterior se ocurre en el

en el caso de COM1 (7.53 mg/m<sup>2</sup> con vegetación media y condición de carretera regular) y AVP1 (3.17 mg/m<sup>2</sup> con vegetación baja y condición de carretera muy bueno). En el uso del suelo, se tiene un comportamiento de esperarse, Cs bajas para zonas residenciales y Cs altas para zonas industriales, este último se asocia además a la circulación de vehículos pesados debido a sus actividades.

En la Tabla 3.9 se muestra un comparativo de las Cs adaptadas de la ciudad de Bogotá por Valencia (2019) y las estimadas en campo en la ciudad de Manizales para las zonas en común. Las Cs estimadas en el presente estudio fueron menores a las Cs adaptada de la ciudad Bogotá en un rango de -11% a -538%, a excepción del sector industrial para IND1 (81%) y IND2 (56%), la avenida Kevin Ángel (AVK1: 79%) y la vía Panamericana (AV1: 12%). Los casos en donde se obtuvieron Cs mayores se deben a las condiciones de la vía malo y regular, las cuales favorecen acumulación de polvo (ver Figura 3.5).

**Tabla 3.9. Comparativo de las Cs adaptadas de la ciudad de Bogotá por Valencia (2019) y las estimadas en campo en la ciudad de Manizales (presente estudio).**

Punto No.	ID	Cs estimadas (mg/m <sup>2</sup> )	Sector	Cs adaptadas (mg/m <sup>2</sup> )	Diferencia (%)
8	AVK1	7.2	Av. Kevin Ángel Mejía	1.5	79%
6	AV1	1.7	Vía Panamericana	1.5	12%
13	AVK2	3.6	Vía Neira - Sector Autónoma	5.1	-42%
1	IND1	26.8	Zona Industrial	5.1	81%
2	IND2	11.7			56%
3	IND3	0.8			-538%
17	CEN4	4.2	Av. Gilberto Álzate	7.9	-88%
7	AVS1	2	Av. Santander	7.9	-295%
10	AVS2	2.7			-193%
14	AVS3	6.5			-22%
12	AVP2	2.7	Av. Paralela.	7.9	-193%
11	AVP1	3.2			-147%
18	CEN3	5.9	Sector Centro	7.9	-34%
19	CEN5	6.5			-22%
16	CEN2	7.1			-11%
15	CEN1	1.4			-464%

Nota:

$$\% \text{ Diferencia} = (\text{Cs Estimada} - \text{Cs Adaptadas}) / \text{Cs Estimadas} \times 100$$

### **Factores de emisión de RD<sub>10</sub> en la ciudad de Manizales**

El factor de emisión y las emisiones de RD<sub>10</sub> se estimaron siguiendo la metodología propuesta por Amato (2011) ( $FE_{Amato} = 45.9 C_s^{0.81}$ ), en la Tabla 3.10 se muestra los resultados de factores de emisión obtenidos para cada punto de muestreo en la ciudad de Manizales. Los FE más altos corresponden a los puntos donde se obtuvieron mayor Cs (IND1 y IND2), mientras que el FE menor correspondió al punto IND3 donde se obtuvo la Cs más bajo en toda la ciudad. De acuerdo a la sección anterior el hecho de que las condiciones extremas (Cs mínima y máxima) se obtuvieran en el mismo sector industrial se debió principalmente a las condiciones de vía de dichos puntos.

El factor de emisión promedio de RD<sub>10</sub> obtenido para Manizales fue de 0.043 g/VKT (VKT corresponde a los kilómetros recorridos por un vehículo en un día), en este no se tuvieron en cuenta las Cs mínima y máxima ya que son condiciones no frecuentes en toda la ciudad como: pavimentación mala contigua a un área de gran extensión sin pavimentación (IND1) y pavimentación muy buena con superficie lisa (carretera nueva – IND3).

**Tabla 3.10. Factores de emisión de RD<sub>10</sub> obtenidos para la ciudad de Manizales.**

Punto No.	Nombre	ID	Cs	FE	FE
			( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ )	( $\mu\text{g}/\text{VKT}$ )	( $\text{g}/\text{VKT}$ )
1	Vía Gallinazo	IND1	<b>26752</b>	<b>176999</b>	<b>0.177</b>
2	Sena	IND2	11715	90676	0.091
3	Vía Maltería	IND3	<b>772</b>	<b>10018</b>	<b>0.010</b>
4	Enea	COM2	8540	70193	0.070
5	Construcción	CONST	2524	26152	0.026
6	Panamericana	AV1	1741	19358	0.019
7	Batallón Av. Santander	AVS1	1955	21264	0.021
8	Cruz Roja. Av Kevin	AVK1	7188	61047	0.061
9	Palermo Residencial	RES1	2224	23604	0.024
10	Cable Av. Santander	AVS2	2724	27818	0.028
11	Estadio Av. Paralela	AVP1	3169	31446	0.031
12	Cementerio Av. Paralela	AVP2	2729	27860	0.028
13	Neira Av. Kevin	AVK2	3571	34640	0.035
14	La Estación Av. Santander	AVS3	6465	56024	0.056
15	Fundadores Centro	CEN1	1427	16478	0.016
16	Carrera 22 Centro	CEN2	7137	60696	0.061
17	Galería Av. Gilberto	CEN4	4163	39222	0.039
18	Gobernación Centro	CEN3	5924	52195	0.052
19	Agustinos Centro	CEN5	6517	56389	0.056
20	Chipre	COM1	7525	63355	0.063

Punto No.	Nombre	ID	Cs	FE	FE
			( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ )	( $\mu\text{g}/\text{VKT}$ )	( $\text{g}/\text{VKT}$ )
21	Salida Manizales	AV2	5025	45681	0.046
<b>Promedio</b>			<b>5704</b>	<b>48148</b>	<b>0.048</b>
<b>Promedio sin valores extremos</b>			<b>4856</b>	<b>43374</b>	<b>0.043</b>

En la Tabla 3.11 se muestra un comparativo de los FE de  $RD_{10}$  en función de la Cs estimados para diferentes ciudades siguiendo la metodología de Amato (2011). El FE promedio de la ciudad de Manizales es mayor comparado con Barcelona (28%), mientras que con los demás casos es menor en un rango del -6 a -78% (%Diferencia = (FE Manizales – FE ciudad X) / FE ciudad X  $\times$  100). Cabe mencionar que la ecuación del FE propuesta por Amato (2011) es una ecuación empírica realizada bajo las condiciones de las ciudades de Barcelona, Zürich y Girona.

**Tabla 3.11. Comparativo de factores de emisión de  $RD_{10}$  (Tomado de: Espitia y Porra, 2017; Amato, 2016; Amato, 2018).**

Ciudad	FE (mg/VKT)
Bogotá	51.2
Turín	72
Barcelona	34
España	85
Finlandia	121
Suecia	198
Alemania	57
Dinamarca	46
Manizales (Valencia, 2019)	49
<b>Manizales (Presente estudio)</b>	<b>43.4</b>

### *Factores de emisión de $RD_{10}$ en la ciudad de Manizales*

El cálculo de emisiones de  $RD_{10}$  se realizó de dos formas siguiendo la ecuación (3.1): (1) Emisión a partir de la Cs promedio de la ciudad y el total de vehículos por categoría de la flota vehicular. (2) Emisiones para cuatro zonas de la ciudad con Cs promedio correspondiente a dicha zona y a partir de conteos vehiculares reportados por el Plan Maestro de Movilidad 2017 de la ciudad de Manizales (Findeter, 2017). En cuanto a la actividad vehicular por categoría vehicular para ambas formas de cálculo se tomó del IEA-2017 (ver Tabla 2.13) (Unal-Corpocaldas, 2019).

Las emisiones estimadas a partir de la Cs promedio de la ciudad de Manizales y el total de vehículos por categoría de la flota vehicular se muestran en la Tabla 3.12. El total de

emisiones de RD<sub>10</sub> fue de 69.0 ton/año, las categorías de vehículo particular y motocicleta contribuyen con el 80% al total de emisiones, esto se debe a que estas categorías representan el 95% del parque automotor. Aunque se obtuvieron porcentajes de diferencia altas en las Cs respecto al trabajo realizado por Valencia (2019) (ver Tabla 3.9), el total de emisiones de RD<sub>10</sub> obtenidas en el presente estudio comparadas con el mismo fueron superiores en solo un 7%. Lo anterior se debe a las diferencias en la distribución espacial de las Cs estimadas en el presente estudio y las adaptadas.

**Tabla 3.12. Emisiones de RD<sub>10</sub> susceptible de resuspensión en Manizales para el año 2017.**

Categoría vehicular	Actividad	Cantidad de veh.	Emisión RD <sub>10</sub>
	km/veh/día	#	ton/año
Vehículo particular	25	81659	29.22
Motocicleta	23	79734	26.25
Taxi	158	2320	5.25
Bus	168	2604	6.26
Camión	50	2825	2.02
<b>Total</b>			<b>69.00</b>

Se destaca que la metodología Amato considera un mismo factor de emisión para todas las categorías vehiculares. En este caso las emisiones de las motocicletas son comparables con las de los vehículos particulares, y estas a su vez son superiores a las emisiones de los buses (más de 4 veces) y camiones (más de 10 veces), debido a que la estimación se realiza con el total de vehículos del parque automotor y los vehículos particulares y motocicletas representan el 95%. Adicionalmente, la metodología tampoco establece el cálculo de emisiones con diferente VKT por categoría vehicular, aunque en el presente estudio se realizó la estimación por categorías vehiculares según el VKT asociado. Las razones anteriormente descritas sugieren una limitante en la metodología y una posible sobreestimación en los resultados obtenidos, ya que se estaría considerando que todos los tipos de vehículos generarían la misma emisión de resuspensión de material particulado.

En contraste, en el ejercicio de estimación de emisiones para cuatro avenidas principales de la ciudad con la Cs promedio correspondiente a dicha avenida y a partir de conteos vehiculares reportados por el Plan Maestro de Movilidad 2017 de la ciudad de Manizales, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.13. El cálculo se realizó teniendo en cuenta el número vehículos que transita en ambos sentidos (oriente-occidente y occidente-oriente), en el anexo B (Tabla 1B) se muestran los conteos vehiculares para cada avenida. En cuanto a la actividad vehicular (kilómetros recorridos) se realizó el supuesto que en las cuatro avenidas se recorre igual cantidad de kilómetros y la suma de estos debe corresponder

al VKT reportado en la actualización oficial del IEA de Manizales 2017 (Unal-Corpocaldas, 2019).

**Tabla 3.13. Emisiones de RD<sub>10</sub> para cuatro avenidas en Manizales para el año 2017.**

<b>Avenida</b>	<b>Santander</b>	<b>Kevin Ángel</b>	<b>Gilberto Álzate</b>	<b>Panamericana</b>
<b>FE (g/VKT)</b>	0.035 <sup>a</sup>	0.048 <sup>b</sup>	0.039 <sup>c</sup>	0.019 <sup>d</sup>
<b>Categoría veh.</b>	<b>Emisiones RD<sub>10</sub> (ton/año)</b>			
<b>Veh. particular</b>	1.21	1.52	1.83	0.64
<b>Moto</b>	1.00	1.45	1.30	0.97
<b>Taxi</b>	5.39	5.57	4.34	1.30
<b>Bus</b>	1.96	1.43	2.23	1.22
<b>Camión</b>	0.06	0.26	0.22	0.28
<b>Total</b>	<b>9.62</b>	<b>10.23</b>	<b>9.93</b>	<b>4.41</b>
<b>Total</b>	<b>34.18</b>			

Nota:

<sup>a</sup> Promedio de los puntos: AVS1, AVS2, AVS3

<sup>b</sup> Promedio de los puntos: AVK1, AVK2

<sup>c</sup> Dato correspondiente al punto: CEN4

<sup>d</sup> Dato correspondiente al punto: AV1

Según el ejercicio realizado las emisiones anuales de RD<sub>10</sub> totales para toda la ciudad corresponde a 34.18 ton/año, donde las emisiones más altas pertenecen a las avenidas centrales de la ciudad: Av. Santander, Av. Kevin Ángel y Av. Gilberto Álzate, entre 10.23 y 9.62 ton/año. En el caso de la avenida Panamericana se presentan la emisión anual de RD<sub>10</sub> más baja (4.41 ton/año). Los resultados anteriores guardan relación con las Cs estimadas y FE determinados para dichos puntos junto con las características del área asociadas como estado de pavimentación, entre otros.

Comparadas con las emisiones de la Tabla 3.12 difieren en un 50%, se observa que para esta forma de cálculo (2) para todas las avenidas las categorías vehiculares de taxi y bus tienen la mayor contribución a las emisiones de RD<sub>10</sub>, a diferencia de la forma de cálculo (1) donde la mayor contribución corresponde a las categorías de vehículo particular y motos, lo cual se debe a que los datos de conteos vehiculares registran una cantidad mayor para taxi y bus (Anexo B, Tabla 1B) que el total de vehículos de la flota vehicular para dichas categorías (ver Tabla 3.12), esto ya que un vehículo puede realizar más de un recorrido en la misma avenida.

En cuanto a las emisiones por categoría vehicular los taxis reportaron las mayores emisiones en todas las avenidas inclusive por encima de las categorías de bus y camión. Teniendo en cuenta que la metodología establece un mismo FE para todas las categorías, los resultados obtenidos se deben a que es la categoría que presenta el mayor VKT y de acuerdo a los

conteos vehiculares los taxis presentan mayor flujo vehicular que los buses en las avenidas Av. Santander, Av. Kevin Ángel y Av. Gilberto Álzate. De manera similar ocurre en el caso de las emisiones de los vehículos particulares y motocicletas comparado con los camiones.

***Comparativo de emisiones de RD<sub>10</sub> respecto a las estimadas por el software COPERT 5.4***

Por otra parte, en el capítulo 2 se estimaron las emisiones exhosto y evaporativas por fuentes móviles en ruta mediante la implementación del modelo COPERT versión 5.4, el modelo también estima emisiones de material particulado susceptible de resuspensión: emisiones por abrasión de la carretera, emisiones por desgaste de neumáticos y frenos para los contaminantes BC, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> y metales (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se). En la Tabla 3.14 se muestra las emisiones para los contaminantes asociados a material particulado estimadas mediante COPERT 5.4.

**Tabla 3.14. Emisiones estimadas mediante COPERT 5.4 para Manizales – año 2017.**

Categoría vehicular	Tipo de emisión	Emisión (ton/año)		
		BC	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
Vehículos particulares	Desgaste de neumáticos	0.62	4.06	5.80
	Desgaste de frenos	0.08	3.02	7.59
	Abrasión de la carretera	0.11	2.73	5.05
	<b>Total</b>	<b>0.81</b>	<b>9.81</b>	<b>18.44</b>
Motocicletas	Desgaste de neumáticos	0.24	1.57	2.24
	Desgaste de frenos	0.03	1.34	3.37
	Abrasión de la carretera	0.04	0.98	1.82
	<b>Total</b>	<b>0.31</b>	<b>3.89</b>	<b>7.42</b>
Taxi	Desgaste de neumáticos	0.14	0.95	1.35
	Desgaste de frenos	0.02	0.73	1.85
	Abrasión de la carretera	0.02	0.62	1.14
	<b>Total</b>	<b>0.19</b>	<b>2.30</b>	<b>4.34</b>
Bus	Desgaste de neumáticos	0.30	1.95	2.79
	Desgaste de frenos	0.08	3.16	7.95
	Abrasión de la carretera	0.12	2.96	5.49
	<b>Total</b>	<b>0.50</b>	<b>8.08</b>	<b>16.23</b>
Camión	Desgaste de neumáticos	0.10	0.65	0.93
	Desgaste de frenos	0.03	0.99	2.49
	Abrasión de la carretera	0.04	0.96	1.77
	<b>Total</b>	<b>0.16</b>	<b>2.60</b>	<b>5.19</b>
<b>Total</b>	<b>Desgaste de neumáticos</b>	<b>1.40</b>	<b>9.18</b>	<b>13.11</b>
	<b>Desgaste de frenos</b>	<b>0.24</b>	<b>9.25</b>	<b>23.24</b>
	<b>Abrasión de la carretera</b>	<b>0.32</b>	<b>8.24</b>	<b>15.27</b>

Categoría vehicular	Tipo de emisión	Emisión (ton/año)		
		BC	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
Total		1.97	26.67	51.62

Las emisiones totales de RD<sub>10</sub> obtenidas con COPERT fueron de 51.62 ton/año (desgaste de neumáticos, desgaste de frenos y abrasión de la carretera), comparadas con las estimadas siguiendo la metodología de Amato y a partir de la Cs promedio (forma de cálculo (1)) tienen una diferencia porcentual de 32.6% (tomando como referencia las estimadas bajo la metodología Amato). Esta diferencia se debe a que COPERT no estima emisiones de resuspensión mientras que la metodología Amato si las estima.

En cuanto al tipo de emisión en todas las categorías vehiculares predominó la emisión por desgaste de frenos, seguida del desgaste de neumáticos y abrasión de la carretera, a excepción del bus y camión donde en los dos últimos casos ocurrió al contrario. En cuanto a las emisiones totales por categoría vehicular las motocicletas, taxis y camiones tuvieron emisiones de un dígito (4-7 ton/año), mientras que los vehículos particulares y buses tuvieron mayores emisiones, de dos dígitos (16-18 ton/año) asociado principalmente a los FE base, los kilómetros recorridos y el número de vehículos de la categoría vehicular.

### 3.5.2. MORFOLOGÍA DE LAS PARTÍCULAS DE RD<sub>10</sub> POR FE-SEM / EDS Y HR-TEM / EDS EN LA CIUDAD DE MANIZALES

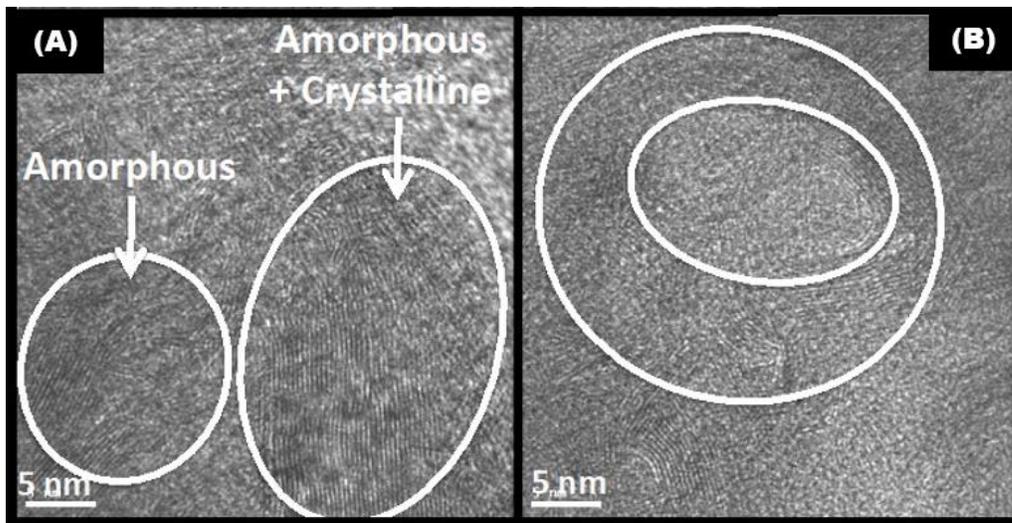
El análisis por morfología de las partículas finas y ultra finas de material particulado susceptible de resuspensión (RD) se realizó por técnicas avanzadas de microscopía como FE-SEM y HR-TEM, que además se acoplaron a EDS, este último realiza un análisis cualitativo de composición química (a nivel superficial de la partícula). Los resultados obtenidos mostraron aporte a la composición química de fuentes móviles, fuentes industriales y fuentes naturales.

Los resultados obtenidos del presente estudio de la morfología de las partículas de RD<sub>10</sub> asociados a fuentes volcánicas se consolidaron en el siguiente artículo titulado: “*Volcanic emissions and atmospheric pollution: A study of nanoparticles*”, y publicado en la revista internacional Geoscience Frontiers con el doi [10.1016/j.gsf.2020.08.013](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.013). Se observaron múltiples formas en partículas de tamaño micrométrico y nanométrico, formas esféricas y angulares se evidenciaron principalmente en todos los puntos de muestreo, adicionalmente, la composición química y mineralógica también presentó heterogeneidad. La composición mineral se detectó en el orden de cuarzo> mullita> calcita> caolinita> illita> goethita> magnetita> circonio> monacita, además de sal amoníaco, este último caracterizado como un

trazador de fuentes volcánicas. En cuanto a la composición química se detectaron elementos como Si, Al, Ca, Mg, Fe, Ti y complejos hidratados de Al-Si con K, además de otros compuestos tóxicos como As, Hg, Cd, Pb.

En cuanto a los componentes antropogénicos del RD identificados por la metodología analítica utilizada, estos estuvieron representados por partículas ultrafinas (que siempre contienen elementos inorgánicos) y nanométricas (que siempre contienen partículas orgánicas con elementos peligrosos como V, Ni, Ba, entre otros) que posiblemente se originaron a partir de varios procesos de combustión (especialmente diésel), partículas típicamente derivadas de actividades de construcción, desgaste de la carretera, desgaste de neumáticos y frenos de los vehículos, entre otras fuentes. La magnetita se presenta como un reservorio importante de elementos potencialmente peligrosos, esto se debe especialmente a su gran superficie, que facilita la adsorción de dichos elementos y compuestos orgánicos, como se evidencia en estudios previos (De Vallejuelo et al., 2017, 2011; Martinello et al., 2014; Wilcox et al., 2015).

Estudios recientes han demostrado que la quema de material orgánico (por ejemplo, carbón, diésel, aceite, desechos domésticos, neumáticos) tiene un gran potencial para formar nanopartículas de carbono como fullerenos, grafenos, compuestos carbonosos amorfos, nanotubos de carbono (Gredilla et al., 2019; Silva et al., 2020). En este estudio se detectaron más de 150 nanopartículas orgánicas en cada muestra, de estas la Figura 3.10A representa las fases amorfas y las partículas complejas que contienen combinaciones de fases cristalinas y amorfas. También 27 nanotubos multipared de varios diámetros y espesores se detectaron (Figura 3.10B), especialmente en las muestras COM1 y CEN2, puntos que se caracterizan por el alto flujo de buses y vehículos privados que utilizan como combustibles diésel y gasolina.



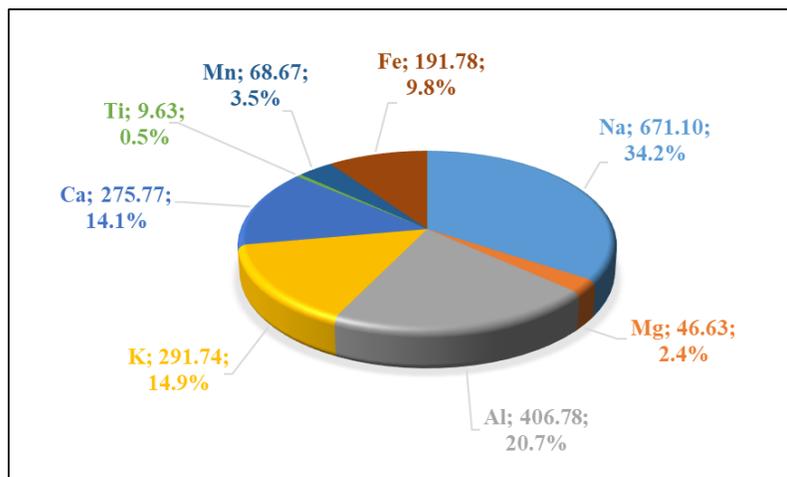
**Figura 3.10. Imágenes generales FE-SEM. (A) Materiales carbonosos amorfos y cristalinos. (B) Nanotubos de carbono esféricos. (Tomada parcialmente de: Trejos et. al., 2021).**

De todas las nanopartículas (NPs) detectadas por HR-TEM, las NPs orgánicas fueron las más abundantes. Se puede señalar que la quema o combustión de material orgánico es la principal fuente de NPs, mientras que el desgaste de la carretera (contaminado y/o natural) así como fuentes volcánicas son las principales fuentes de materiales mayores a 100 nm. Cabe señalar que Manizales se encuentra ubicado aproximadamente a 28 km del volcán Nevado del Ruiz, el cuál registra actividad significativa desde 2010 y es el quinto volcán más activo de Latinoamérica (Carn et al., 2017). Diferentes autores como González y Aristizábal, (2012), Velasco (2015), Cuesta et al. (2020), han estudiado y evidenciado el efecto de las emisiones volcánicas sobre la calidad del aire de la ciudad.

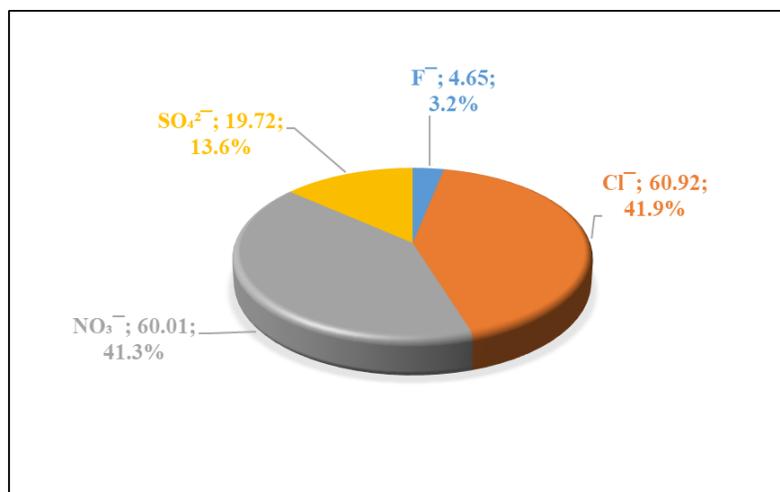
### 3.5.3. RESULTADOS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE RD<sub>10</sub> EN MANIZALES

#### *Distribución de la composición química promedio por componentes para la ciudad de Manizales*

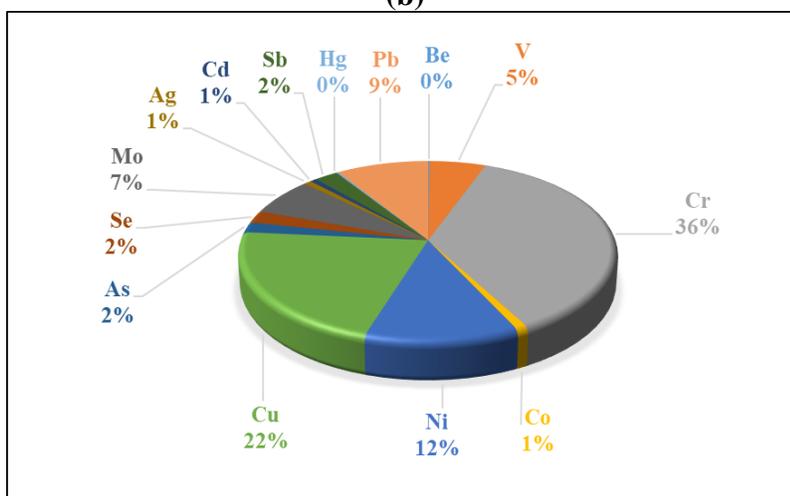
La Figura 3.11 muestra la distribución porcentual de los componentes químicos analizados promedio para toda la ciudad (mineral, iones y trazas). En la Figura 3.11a el componente mineral, los elementos Na y Al contribuyen ambos con un 55%, seguidos por K con un 15%. En la Figura 3.11b, el Cl<sup>-</sup> y el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> contribuyen en un 83% al componente iónico. Los elementos traza de la Figura 3.11c como Cr, Cu, Ni y Pb son los principales contribuyentes de este componente.



(a)



(b)



(c)

**Figura 3.11. Distribución porcentual de la composición química del RD<sub>10</sub> en la ciudad de Manizales por componentes analizados. (a) Componente mineral. (b) Componente iónico. (c) Componente de seguimiento.**

### *Composición química promedio del RD<sub>10</sub> por zonas de estudio*

Las concentraciones medias de todas las especies analizadas por zonas se muestran en la Tabla 3.15, las especies minerales más abundantes siguieron el orden de Na (671,10 µg/m<sup>2</sup>) > Al (406,78 µg/m<sup>2</sup>) > K (291,74 µg/m<sup>2</sup>) > Ca (275,77 µg/m<sup>2</sup>) > Fe (191,78 µg/m<sup>2</sup>). En el componente iónico las especies obtenidas fueron NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (60,01 µg/m<sup>2</sup>), Cl<sup>-</sup> (60,92 µg/m<sup>2</sup>) y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (19,72 µg/m<sup>2</sup>). Mientras tanto, los oligoelementos más abundantes fueron Cr (3,32 µg/m<sup>2</sup>), Cu (1,97 µg/m<sup>2</sup>), Ni (1,09 µg/m<sup>2</sup>) y Pb (0,82 µg/m<sup>2</sup>).

**Tabla 3.15. Composición química por zonas de estudio de Manizales. Unidades:  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ .**

<b>Especie</b>	<b>IND</b>	<b>COM</b>	<b>CEN</b>	<b>AV</b>	<b>CONST</b>	<b>Total</b>
<b>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^2</math>)</b>	<b>n=1</b>	<b>n=2</b>	<b>n=5</b>	<b>n=5</b>	<b>n=1</b>	<b>n=15</b>
Na	1106.33	561.54	689.49	669.19	363.11	671.1
Al	720.59	486.72	345.47	394.1	199.95	406.78
K	305.41	287.1	276.9	283.85	160.2	291.74
Ca	803.21	403.79	259.98	125.4	288.01	275.77
Fe	685.59	292.27	124.56	145.25	77.14	191.78
Mn	19.78	6.17	74.68	168.33	1.09	68.67
Mg	117.29	67.68	31.31	34.32	27.52	46.63
Ti	20.72	15.3	6.34	9.12	4.81	9.63
Cr	<L.D.	4.09	2.26	4.17	3.61	3.32
Cu	3.93	2.6	1.08	2.06	0.57	1.97
Ni	1.72	0.9	0.69	1.37	0.79	1.09
Pb	4.48	0.77	0.43	1.01	0.12	0.82
Mo	11.05	0.08	0.04	0.06	0.07	0.61
V	2.58	0.69	0.27	0.38	0.2	0.5
Sb	0.26	0.3	0.2	0.15	0.11	0.21
Se	0.38	0.19	0.16	0.23	0.1	0.2
As	0.24	0.21	0.12	0.2	0.07	0.17
Co	0.46	0.1	0.04	0.06	0.07	0.08
Ag	0.13	0.03	0.09	0.09	0	0.07
Cd	0.99	0.02	0.02	0.02	<L.D.	0.06
Hg	0.13	0.01	0.01	0.01	0.11	0.02
Be	<L.D.	0.14	0.04	0.04	<L.D.	0.01
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<L.D.	38.48	<L.D.	861.72	<L.D.	60.01
Cl <sup>-</sup>	<L.D.	13.38	53.55	322.34	4.78	60.92
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	13.09	44.35	15.79	57.97	<L.D.	19.72
F <sup>-</sup>	<L.D.	<L.D.	12.22	1.73	<L.D.	4.65

El componente mineral representa el 78.4%, 63.0%, 84.0%, 87.2% y 77.7% del RD<sub>10</sub> en los sectores industrial, comercial, centro, avenida y construcción, respectivamente. Los resultados obtenidos fueron similares a los reportados para el polvo de carreteras en ciudades como Bogotá, Colombia (~ 55%), Birmingham (~ 50%) y Gold Coast, Australia (~ 60%) (Ramírez et. Al., 2019; Gunawardana et al., 2012). Pero más alto en comparación con ciudades como Barcelona, España (~ 35%) y Fushun, China (~ 30%), esto puede deberse principalmente al mal estado de las carreteras y/o tipos de pavimento (Kong et al., 2011; Amato et. Al., 2009).

En cuanto a los iones, el mayor aporte estuvo en las avenidas con 6%, mientras que para el resto de áreas el aporte fue igual o menor al 1% de la carga RD<sub>10</sub>. La contribución de los iones siguió el orden de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Cl<sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. En Bogotá, Barcelona y Fushun se obtuvieron valores de aproximadamente 3%, 2% y 0,5%. El componente de trazas representó el 0.1%

de las zonas comerciales, centro y avenidas, y 0.2% de las zonas industriales y de construcción de la carga RD<sub>10</sub>. Los porcentajes de contribución de oligoelementos al polvo de carreteras obtenidos fueron inferiores a los de Bogotá (0,4%), Barcelona (0,3%) y Fushun (0,6%). Los elementos con mayor aporte fueron Cr, Cu, Ni y Pb.

La masa recuperada en los perfiles fue de 79% en la zona industrial, 65% en la zona comercial, 84% en la zona centro, 90% en las avenidas y 78% en la zona de construcción. La masa no recuperada corresponde a elementos no analizados como OC, EC, compuestos orgánicos y oxígeno de los óxidos de Si, Al, Fe, Ba, entre otros, además de la humedad (Ramírez et. al., 2019).

El sector industrial presentó altas cargas de oligoelementos, siguiendo el orden de: Mo> Pb> Cu> V> Ni. El sector comercial y el centro presentaron un aporte predominante de oligoelementos como Cr, Cu y Ni. Las avenidas mostraron una gran cantidad de oligoelementos, principalmente Cr, Cu, Ni y Pb. El sector de la construcción presentó el aporte mayoritario de Cr entre los oligoelementos. Según la literatura (Espitia y Porras, 2017; Grigoratos y Martini, 2015; Duong y Lee, 2011), la presencia de elementos como Pb, Cu, Cr, V, Sn y Sb sugiere el enriquecimiento del polvo de la carretera por el desgaste de neumáticos y pastillas de freno. Asimismo, oligoelementos de especies típicas de la corteza como Al, Ca, K, Mg, Ti, Fe y V sugieren el desgaste del pavimento (Amato et. Al., 2009; Espitia y Porras; 2017, Ramírez et. al., 2019). Sin embargo, como han demostrado otras investigaciones, no es fácil distinguir entre las emisiones de desgaste de la carretera y el polvo de la corteza porque su composición química es muy similar (Bukowiecki et al., 2010).

En el sector industrial, las altas cargas del componente mineral, sumadas a la presencia de Pb y Ni, indican la influencia de las industrias metalúrgicas y la quema de combustibles fósiles (Ramírez et. Al., 2019; Jeon et al., 2017). El punto de monitoreo se encuentra a menos de 2 kilómetros de una industria metalúrgica, zonas contiguas sin pavimentación y en cercanía con otras industrias que utilizan el carbón como fuente de energía, además presenta una carretera en estado regular. El sector industrial mostro un alto contenido de Mo comparado con los demás sectores (ver Tabla 3.14), este elemento se asocia con el desgaste de los discos de freno y las partes metálicas de los vehículos, así como también se relacionan con las emisiones de la industria del acero (Querol et al., 2007; Amato et al., 2009).

En cuanto al componente mineral, la presencia mayoritaria de los elementos de Al, Na, Ca, K y Fe, se debe a que Manizales se caracteriza por tener suelos volcánicos. Estudios realizados en Manizales de la composición de los suelos muestran altos contenidos de Si, Al, Fe, feldespato de plagioclasa (Ca-Na), vidrio volcánico, iones donde predomina el Na<sup>+</sup> seguido del Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Mg<sup>2+</sup> de los cationes solubles, mientras que de los aniones solubles predomina Cl<sup>-</sup> seguido de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Herrera, 2006). Esto afirma a su vez lo encontrado

en el análisis microscopia electrónica del RD<sub>10</sub> en el presente estudio (sección 3.5.2), donde se encontró trazadores de cenizas volcánica como complejos hidratados de Al-Si-K, metales pesados (As, Hg, Cd, Pb), minerales como sal amoníaco y feldespato de plagioclasa (Ca-Na), entre otros (Trejos et. al., 2021).

De las áreas estudiadas, las avenidas presentaron las mayores cargas de Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, este último puede estar asociado al alto tránsito vehicular de vehículos particulares y buses que utilizan gasolina y diésel como combustibles que emiten precursores como el SO<sub>2</sub>. En contraste, en el aire ambiente de Manizales en PM<sub>10</sub> se ha determinado una contribución de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> mayor a NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Franco, 2020), debido principalmente a emisiones de gases volcánicos y emisiones de escape de fuentes vehiculares (asociadas principalmente a vehículos a gasolina, los cuales conforman el 95% del parque automotor -vehículos particulares y motos-) (Unal-Corpocaldas, 2019; Idea-Corpocaldas; 2019). Sin embargo, el análisis de carbono faltante es necesario para evaluar la correlación de OC, EC y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y determinar las fuentes de contribución (Wang-Li, 2015, Ramírez et. al., 2019).

Las cargas mayoritarias obtenidas del Cl<sup>-</sup> se pueden atribuir principalmente a la deposición de partículas secundarias formadas a partir de gases precursores como el HCl (Ramírez et. al., 2019) (por ejemplo: emisiones de fuentes naturales como el volcán Nevado del Ruiz ubicado a 28 km al sureste de la ciudad) y en menor medida de precursores de fuentes industriales como NH<sub>3</sub> y quema de biomasa como NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y Br<sup>-</sup> (Ramírez et. al., 2019). De manera similar se obtuvo en un estudio donde analizó una corriente superficial del río Rioclaro que nace en el área de influencia del volcán Nevado del Ruiz, donde se encontraron concentraciones en el orden de mayor a menor de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> (35 mg / L), Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Erazo et. al., 2015).

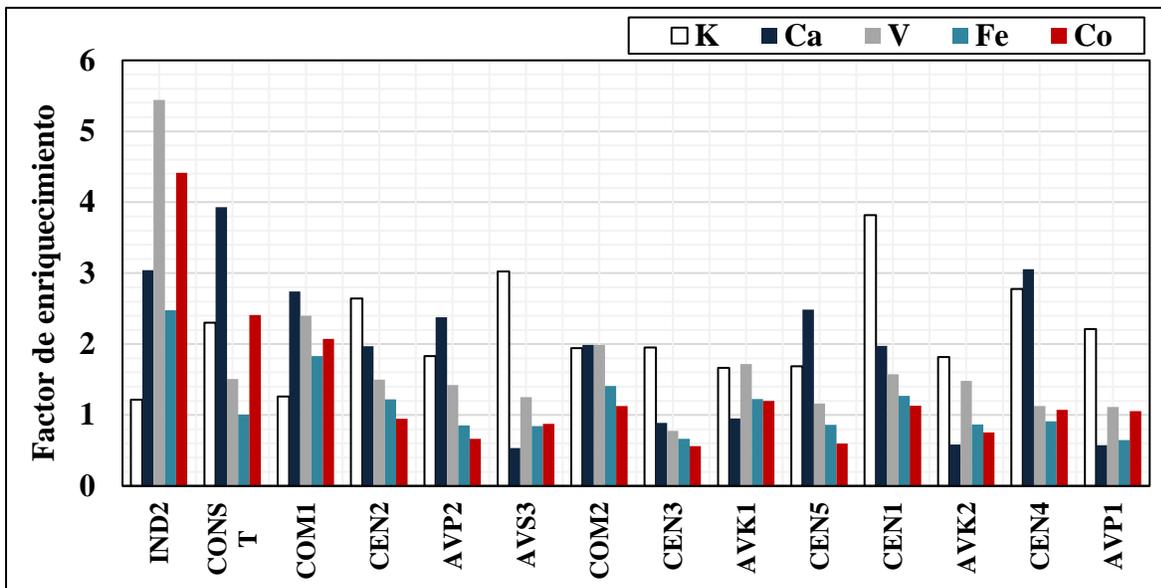
### ***Identificación de posibles fuentes de aporte a la composición química de RD<sub>10</sub>***

La Figura 3.12 muestra los factores de enriquecimiento (EF) calculados para 15 puntos de muestreo, estos se calcularon en base a las concentraciones de la corteza continental superior y se utilizó el aluminio como elemento de referencia por ser uno de los elementos más abundantes (Reimann y Caritat, 1998). Los EF son indicativos de la contribución de elementos específicos al RD<sub>10</sub> debido a fuentes antropogénicas, estos se evalúan en los siguientes rangos: mínimo (EF = 1-2), moderado (EF = 2-5), significativo (EF = 5-20), muy alto (EF = 20-40) y extremadamente alto (EF ≥ 40) (Ramírez et. al., 2019).

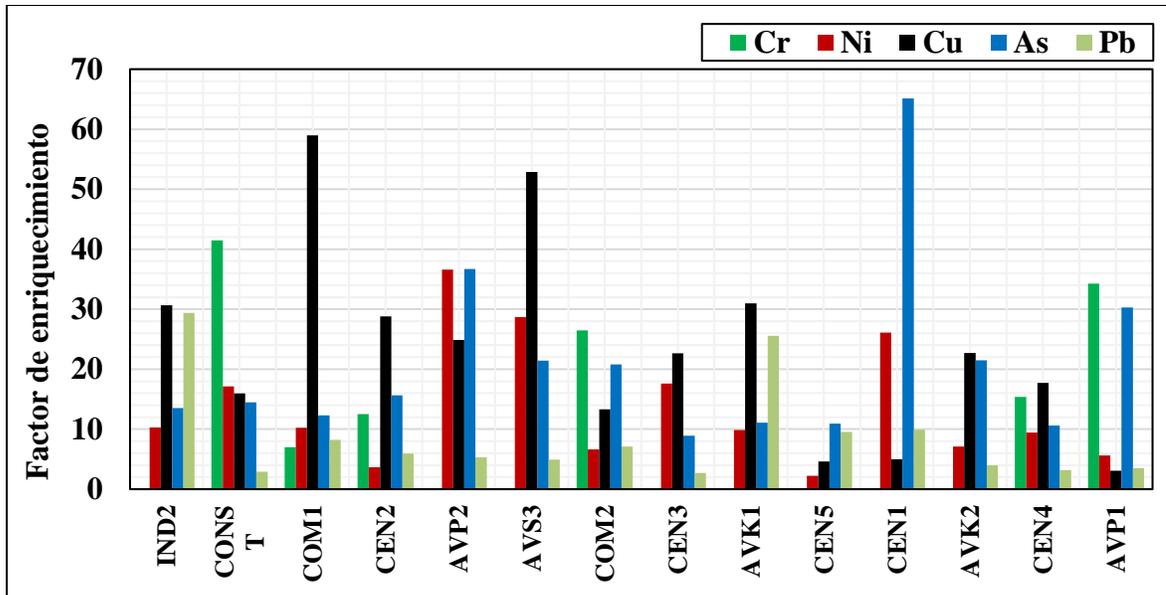
Elementos como K, Ca, V, Fe y Co mostraron contaminación mínima a moderada para todos los puntos de muestreo (Figura 3.12a), perfiles de elementos como Ca, V y Co están asociados con la erosión del suelo. Elementos como Cr, Ni, Cu, As y Pb mostraron niveles de enriquecimiento por fuentes antropogénicas entre significativos y muy altos (Figura 3.12b) relacionados con partículas de desgaste de frenos y neumáticos, relacionados a su vez

al volumen de tráfico, que para la mayoría de los puntos de muestreo el flujo vehicular es catalogado como alto (ver Tabla 3.4).

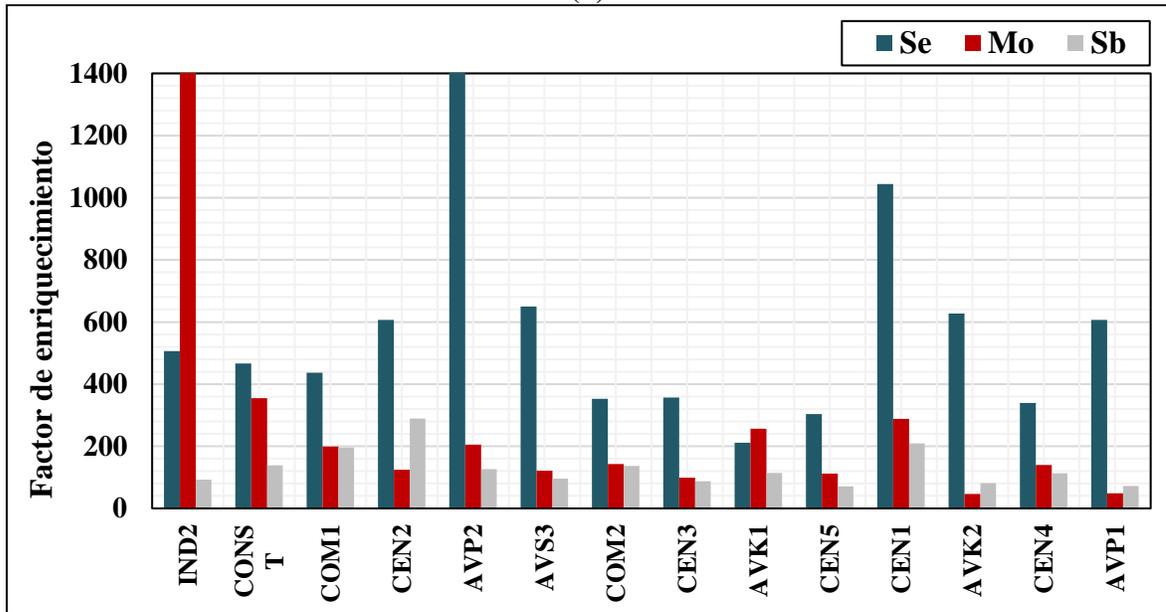
Se observaron niveles de enriquecimiento extremadamente altos para elementos como Se, Mo y Sb para todos los puntos de muestreo (Figura 3.12c). Sb mostró un enriquecimiento extremadamente alto, este elemento se utiliza en pastillas de freno para mejorar la estabilidad de la fricción. El enriquecimiento de Sb fue similar a los determinados en Barranquilla (50-100) (Ramírez et. al., 2020). Se ha reportado que la presencia de Mo se asocia con las emisiones de la industria del acero y con el desgaste de freno y las partes metálicas de los vehículos (Querol et al., 2007; Amato et al., 2009), esta evidencia el enriquecimiento extremadamente alto particularmente para el punto de monitoreo ubicado en el sector industrial (IND1).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.12. Factores de enriquecimiento calculados para 15 puntos de muestreo de RD10 en la ciudad de Manizales. Mínimo (EF = 1-2), moderado (EF = 2-5), significativo (EF = 5-20), muy alto (EF = 20-40) y extremadamente alto (EF  $\geq$  40).

La Figura 3.13 muestra la relación de los elementos analizados (el azul oscuro representa las correlaciones directas y el rojo las correlaciones inversas). En el perfil mineral se presentan correlaciones mayores a 0.75 entre los elementos Al-Na, Al-Mg, Mg-Ti, Mg-Fe, Al-K, Al-Ti, Al-Fe, Ca-Fe, Ti-Fe. En el caso del perfil de trazas se observan correlaciones principales de los elementos Co-V, Cu-Ni, Se-V, Se-As, Mo-V, Mo-Co, Mo-Se, Cd-V, Cd-

Co, Cd-Mo, Hg-Co, Hg-Mo, Hg-Cd, Pb-V, Pb-Co, Pb-Cu, Pb-Mo, Pb-Cd, mayores a 0.60. Por otra parte, en el componente de los iones se presenta correlación entre nitratos y cloruros de 0.98 y sulfatos con cloruro y nitrato mayor a 0.65. Entre los elementos minerales y trazas se observan correlaciones entre Mg-V, Mg-Co, Mg-Cu, Mg-Mo, Mg-Cd, Al-V, Al-Pb, Ca-V, Ca-Mo, Ca-Co, Ca-Cd, Ti-Co, Ti-Pb, Ti-V, Fe-Mo, Fe-Cd, Fe-Pb. Con respecto a la carga de RD<sub>10</sub> se observaron correlaciones con trazas de V, Co, Cu, Pb (r=0.7-0.8).

Las correlaciones entre los elementos Cu, Pb, Sn, Zn y Sb indican la contribución del desgaste de frenos (Grigoratos y Martini, 2015). Correlaciones entre Cd, As y Se, se atribuyen posiblemente con la combustión industrial emisiones (Liu et al., 2018). Sb y Se no tuvieron una correlación significativa (r = 0.36), lo que indica diferentes fuentes de enriquecimiento, posiblemente tráfico (Sb) y emisiones industriales (Se). Correlaciones significativas de Se, As, Pb, Sr y V indican contribución por emisiones de combustión de carbón (Widory et al., 2010; Liu et al., 2018), así como también, las partículas de Se, As, Pb y V también podrían provenir de las emisiones del tubo de escape de los vehículos diésel (Schauer et al., 2006). Las correlaciones significativas entre Se, V y As indican que el origen común de estos elementos es la combustión de petróleo y carbón (Manno et al., 2006). Otros elementos utilizados como trazadores del desgaste de los frenos, como Sb y Sn, también tuvieron una correlación con Cu (Duong y Lee, 2011).

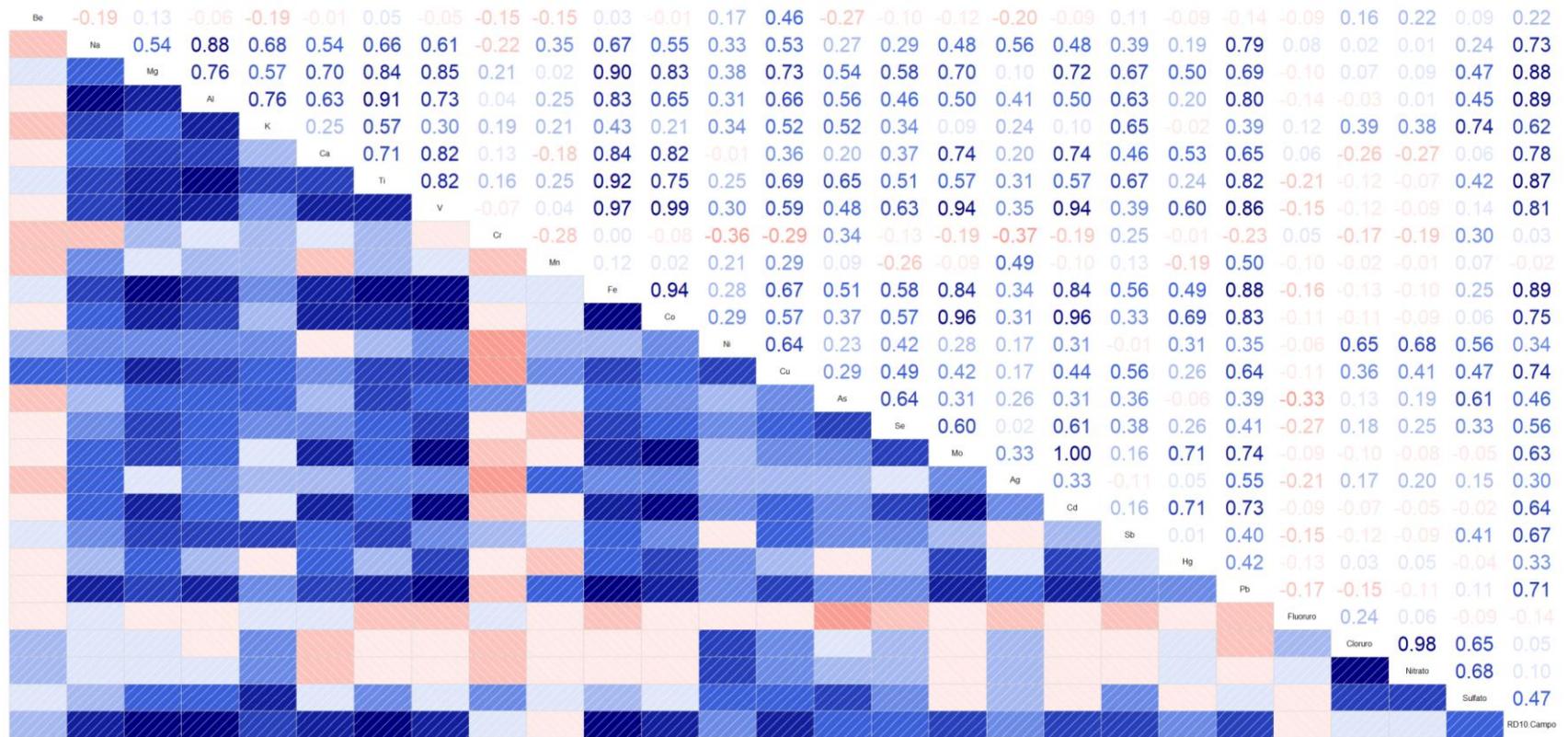


Figura 3.13. Gráfico de correlación de elementos químicos. Columnas (izquierda-derecha): Be, Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Hg, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, RD<sub>10</sub>.

### *Análisis de clúster*

En la Tabla 3.16 se muestran los resultados del PCA, se observa que en el componente 1 se agrupa el 43.9% de la información mientras que el componente 2 logra agrupar el 14.7% de la información, ambos explican el 58.6% de los datos de composición química. Según la regla de Kaiser, la totalidad de los datos se explican por medio de los componentes principales resultantes cuyos autovalores son mayores que 1, en este caso se retiene hasta el componente 6 que representan el 88.9% de los datos.

**Tabla 3.16. Resultados del PCA (se muestran 7 de los 14 componentes principales resultantes).**

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
<b>Desviación estándar</b>	3.444	1.997	1.646	1.532	1.291	1.200	0.923
<b>Varianza</b>	0.439	0.148	0.100	0.087	0.062	0.053	0.032
<b>Varianza acumulativa</b>	0.439	0.587	0.687	0.774	0.836	0.889	0.921

En la Tabla 3.17 se muestran los resultados del PCA una vez aplicada la rotación Varimax para facilitar interpretación de los resultados, se consideran en el análisis de PCA los valores con contribuciones mayores a 0.7 (Ramírez, et. al., 2019). En este caso, se encontró que el PC1 está dominado por los elementos Mg, Ca, Fe, V, Co, Mo, Cd, Hg y Pb, este componente sugiere la influencia principalmente del desgaste de frenos/neumáticos y procesos de combustión (Wiseman et.al., 2021; Amato et. al., 2013; Querol et al., 2007). En el PC2 se presentó contribución significativa de Ni y los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , y en menor proporción de K y Cu; este factor se asocia principalmente a emisiones de ceniza volcánica, erosión del suelo y abrasión mecánica (Ramírez et. al., 2019; Amato et. al., 2013; Herrera, 2006). En el procesamiento del PCA los signos son asignados de manera aleatoria, de modo que cuando se tienen signos contrarios en un mismo componente principal indican una relación inversa entre dichos elementos y una relación directa cuando los signos son iguales en un mismo componente principal.

**Tabla 3.17. Rotación del PCA (Varimax).**

Species	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
<b>Be</b>		0.132			-0.976	
<b>Na</b>	-0.404		0.198	0.173	0.123	-0.119
<b>Mg</b>	-0.762	0.178	-0.251		-0.164	
<b>Al</b>	-0.482			0.136		
<b>K</b>		0.408	-0.169		0.181	
<b>Ca</b>	-0.779	-0.208	-0.133	-0.181		-0.133

Species	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Ti	-0.616		-0.191	0.223	-0.15	0.123
V	-0.944					
Cr		-0.122	-0.954	-0.156		
Mn			0.136	0.95		
Fe	-0.859			0.112	-0.101	
Co	-0.977					
Ni	-0.28	0.753	0.233	0.219		0.101
Cu	-0.464	0.42	0.205	0.277	-0.444	
As	-0.303	0.238	-0.338		0.211	0.274
Se	-0.549	0.286	0.211	-0.286	0.155	0.247
Mo	-0.977		0.135			
Ag	-0.24	0.152	0.2	0.29	0.134	0.133
Cd	-0.975		0.135			
Sb	-0.212		-0.171		-0.136	0.107
Hg	-0.752	0.157			0.152	0.167
Pb	-0.728		0.135	0.449		
Fluoruro						-0.982
Cloruro		0.967				-0.176
Nitrato		0.979				
Sulfato		0.731	-0.362			0.127
RD10.Campo	-0.638	0.12			-0.26	
% Varianza	0.325	0.136	0.061	0.06	0.056	0.049
% Acumulativa	0.325	0.461	0.522	0.583	0.638	0.687

### *Evaluación del riesgo a la salud*

En la Tabla 3.18 se muestran los valores de dosis de exposición promedio del caso de estudio de la ciudad de Manizales. Cabe mencionar que las dosis de exposiciones y los índices de riesgo se estimaron a partir de la concentración promedio de cada metal en el RD<sub>10</sub> para la ciudad (Shahab et. al., 2020; Kamunda et. al, 2016; Guitao et al., 2011), y no se aplicó modelos de dispersión local para la determinar la concentración de metales en el aire y el aporte del RD<sub>10</sub> (Shuhan et. al., 2019).

En términos de cantidades de dosis de exposición total por cada metal Ni, Pb, Cu y Cr están en el orden de magnitud  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$ , mientras que As, Cd y Hg están en el orden de magnitud de  $10^{-4}$  a  $10^{-6}$ . En cuanto a las dosis de exposición por las tres vías domina la dosis de exposición dérmica seguido de ingesta e inhalación.

**Tabla 3.18. Dosis de exposición diaria por vía oral, respiratoria y dérmica de MPR en Manizales.**

<b>Dosis de exposición</b>		<b>Cr</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Pb</b>	<b>Hg</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>
Inhalación	Joven	4.4E-07	2.2E-08	7.6E-09	1.1E-07	2.4E-09	2.6E-07	1.4E-07
	Adulto	2.0E-07	1.0E-08	3.5E-09	4.9E-08	1.1E-09	1.2E-07	6.6E-08
Ingesta	Joven	6.0E-03	3.0E-04	1.0E-04	1.5E-03	3.3E-05	3.5E-03	2.0E-03
	Adulto	6.8E-04	3.4E-05	1.2E-05	1.7E-04	3.8E-06	4.0E-04	2.2E-04
Dérmico - No Canc.	Joven	1.3E-04	6.7E-06	2.3E-06	3.3E-05	7.3E-07	7.8E-05	4.4E-05
	Adulto	6.1E-05	3.1E-06	1.0E-06	1.5E-05	3.4E-07	3.6E-05	2.0E-05
Dérmico - Canc.	Joven	1.3E-03	6.7E-05	2.3E-05	3.3E-04	7.3E-06	7.8E-04	4.4E-04
	Adulto	6.1E-04	3.1E-05	1.0E-05	1.5E-04	3.4E-06	3.6E-04	2.0E-04
<b>Total - No cancerígeno</b>	<b>Joven</b>	<b>6.1E-03</b>	<b>3.1E-04</b>	<b>1.1E-04</b>	<b>1.5E-03</b>	<b>3.4E-05</b>	<b>3.6E-03</b>	<b>2.0E-03</b>
	<b>Adulto</b>	<b>7.4E-04</b>	<b>3.7E-05</b>	<b>1.3E-05</b>	<b>1.8E-04</b>	<b>4.1E-06</b>	<b>4.4E-04</b>	<b>2.4E-04</b>
<b>Total - Cancerígeno</b>	<b>Joven</b>	<b>7.3E-03</b>	<b>3.7E-04</b>	<b>1.3E-04</b>	<b>1.8E-03</b>	<b>4.0E-05</b>	<b>4.3E-03</b>	<b>2.4E-03</b>
	<b>Adulto</b>	<b>1.3E-03</b>	<b>6.5E-05</b>	<b>2.2E-05</b>	<b>3.2E-04</b>	<b>7.1E-06</b>	<b>7.6E-04</b>	<b>4.2E-04</b>

En la Tabla 3.19 y Tabla 3.20 se muestran los índices de riesgo cancerígeno y no cancerígeno. En el caso del índice de riesgo no cancerígeno todos los valores son menores a 1 (en el orden de magnitud de  $10^{-8}$  a  $10^{-10}$ ), lo que indica que no existe un riesgo evidente para la población. El índice de riesgo de cáncer fue de  $3.9 \times 10^{-4}$  y  $6.9 \times 10^{-5}$  para joven y adulto respectivamente, donde Cr fue el mayor contribuyente al riesgo de cáncer (96%, con valores en el orden de  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$ ) seguido del As y Cd. La EPA considera aceptable para fines reglamentarios un riesgo de cáncer en el rango de  $1 \times 10^{-6}$  a  $1 \times 10^{-4}$  (EPA, 2004), mientras que en Sudáfrica considera que el límite de riesgo de cáncer individual es de  $5 \times 10^{-6}$  (GSA, 2008). De acuerdo a lo anterior, los valores de índices de riesgo de cáncer para los adultos se encuentran en el rango aceptable, sin embargo, en el caso de los jóvenes se alcanza el umbral de  $10^{-4}$ . En ambos casos la ingesta y el contacto son las vías principales de exposición con mayor afectación.

Los resultados obtenidos de valores de riesgo que incluso alcanzan el umbral aceptable tienen asociado una alta incertidumbre, debido a que el cálculo se realizó a partir de la concentración promedio de  $RD_{10}$  de la ciudad y no de la concentración de metales en el aire y el aporte del  $RD_{10}$  (Shuhan et. al., 2019). Adicionalmente, el cálculo del promedio que estuvo influenciado por la zona industrial donde se obtuvo una composición química mayor a las demás zonas (esta zona se incluyó ya que se encuentra una presencia considerable de personas adultas en dicha zona). Así como también, a que la evaluación de riesgo se realizó bajo los supuestos descritos en la sección 3.4.3 – evaluación del riesgo a la salud –.

**Tabla 3.19. Índice de riesgo no cancerígeno por vía oral, respiratoria y dérmica de MPR en Manizales.**

Riesgo no carcinógeno		Pb	Hg	Cu	Ni	Total RnC
Inhalación	Joven	9.61E-13	1.01E-13	8.53E-14	9.00E-14	1.24E-12
	Adulto	4.40E-13	4.62E-14	3.91E-14	4.12E-14	5.66E-13
Ingesta	Joven	4.40E-13	4.62E-14	3.91E-14	4.12E-14	5.66E-13
	Adulto	1.31E-08	1.37E-09	1.16E-09	1.22E-09	1.68E-08
Contacto	Joven	2.91E-10	3.06E-11	2.58E-11	2.72E-11	3.74E-10
	Adulto	1.33E-10	1.40E-11	1.18E-11	1.25E-11	1.71E-10
Total	<b>Joven</b>	<b>2.92E-10</b>	<b>3.07E-11</b>	<b>2.59E-11</b>	<b>2.74E-11</b>	<b>3.76E-10</b>
	<b>Adulto</b>	<b>1.32E-08</b>	<b>1.39E-09</b>	<b>1.17E-09</b>	<b>1.24E-09</b>	<b>1.70E-08</b>

**Tabla 3.20. Índice de riesgo cancerígeno por vía oral, respiratoria y dérmica de MPR en Manizales.**

Riesgo carcinógeno		Cr	As	Cd	Total RC
Inhalación	Joven	2.24E-08	4.14E-10	5.77E-10	2.34E-08
	Adulto	1.03E-08	1.90E-10	2.64E-10	1.07E-08
Ingesta	Joven	3.02E-04	5.63E-06	7.85E-06	3.15E-04
	Adulto	3.49E-05	6.44E-07	8.99E-07	3.64E-05
Contacto	Joven	6.78E-05	1.25E-06	1.75E-06	7.08E-05
	Adulto	3.11E-05	5.74E-07	8.00E-07	3.25E-05
Total	<b>Joven</b>	<b>3.69E-04</b>	<b>6.88E-06</b>	<b>9.59E-06</b>	<b>3.86E-04</b>
	<b>Adulto</b>	<b>6.60E-05</b>	<b>1.22E-06</b>	<b>1.70E-06</b>	<b>6.89E-05</b>

### 3.6. CONCLUSIONES PARCIALES

Las emisiones de RD<sub>10</sub> obtenidas para la ciudad de Manizales fueron de 69 ton/año, donde los vehículos particulares y motocicletas aportan el 80% del total de emisiones de RD<sub>10</sub>. La determinación de información en campo como la carga de sedimento (Cs) para el ajuste de los factores de emisión a nivel local, mostró Cs relativamente bajas en un rango de 0.77 a 26.8 mg/m<sup>2</sup>. Se evidenció que variables como el mal estado de la carretera, altas pendientes de la vía, alto flujo vehicular y baja vegetación tienden a aumentar la Cs. Con base a la estimación de la Cs el factor de emisión de RD<sub>10</sub> promedio obtenido para la ciudad fue de 0.043 g/VKT.

En el análisis morfológico de las nanopartículas y partículas ultrafinas de RD<sub>10</sub> se encontraron formas esféricas (nanotubos de carbono) y formas angulares con fases cristalinas y amorfas. Minerales como cuarzo, mullita, calcita, caolita, magnetita, circonio y

sal amónico, con elementos de la corteza terrestre (Si, Al, Ca, Mg, Fe y Ti) como es de esperarse fueron encontrados, además de metales pesados como As, Hg, Pb, Ba, y complejos hidratados de Al-Si-K. Se destaca la sal amoníaco como un trazador de fuentes volcánicas y la magnética como depósito de metales pesados y compuestos orgánicos. Se observó que las nanopartículas contienen elementos orgánicos y metales pesados que indican orígenes de combustión, mientras que partículas ultrafinas contienen elementos inorgánicos de origen como el desgaste de la carretera y fuentes naturales (por ejemplo, volcanes).

En cuanto a los análisis de composición química cuantitativos se obtuvo que la fracción mineral representa el 75% del RD<sub>10</sub>, seguido iones con 1.8% y trazas con 0.1%, el 23% restante corresponde a los elementos no analizados como la fracción carbonácea, HAPs, humedad, entre otros. Se identificaron enriquecimiento y correlaciones significativas entre los elementos Cu, Pb, Co, Cd, Mo, V y Sb asociado al desgaste de frenos y neumáticos, desgaste de la carretera y emisiones de tubo de escape. Otras correlaciones como Cd, As y Se, se atribuyen posiblemente con la combustión industrial, como Se, V y As indican que el origen común de estos elementos es la combustión de petróleo y carbón. Se obtuvo un enriquecimiento extremadamente alto de Mo en la zona industrial (EF>100), asociado al desgaste de frenos y la industria de acero. El 58.6% de la composición química se explica mediante dos componentes principales: (1) asociados principalmente del desgaste de frenos/neumáticos y procesos de combustión (PC1: Mg, Ca, Fe, V, Co, Mo, Cd, Hg y Pb), y (2) asociado a emisiones de ceniza volcánica, erosión del suelo y abrasión mecánica (PC2: Ni, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, K y Cu).

La evaluación de riesgo a la salud mostro que según el índice de riesgo no cancerígeno no existe un riesgo evidente para la población (joven:  $3.8 \times 10^{-8}$ , adulto:  $1.7 \times 10^{-10}$  – valores inferiores al límite: 1). En el caso del índice de riesgo cancerígeno se obtuvo que para un adulto ( $3.9 \times 10^{-4}$ ) se encuentra dentro del rango aceptable, pero para un joven ( $6.9 \times 10^{-5}$ ) se alcanza el umbral del límite del orden de  $10^{-4}$ , donde el Cr contribuye al 96% del riesgo de cáncer. Sin embargo, los resultados obtenidos tienen asociados altos niveles de incertidumbre.

# CAPÍTULO 4

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. CONCLUSIONES

---

La estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta (emisiones exhosto, evaporativas y emisiones de material particulado susceptible de resuspensión – RD<sub>10</sub>) se desarrolló a partir del estudio de nueva información local e implementación de metodologías que hasta el momento no habían sido estudiadas para la ciudad y que son de gran importancia para el entendimiento de la dinámica de la calidad del aire, teniendo en cuenta que las fuentes móviles son la mayor fuente contaminante en los centros urbanos.

Las emisiones obtenidas mediante el modelo COPERT 5.4 (emisiones exhosto y evaporativas) mostraron un perfil típico de fuentes móviles en ruta. En las emisiones asociadas a la combustión de gasolina (CO, COV, COVM, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) los vehículos particulares y motocicletas (que representan el 95% del parque automotor) aportaron a más del 50% a cada contaminante. Mientras que en las emisiones de asociadas a la combustión de diésel (BC, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>) la categoría de bus y camión aportaron más del 50% a pesar de tener una representatividad del 3.2% en el parque automotor. Manizales a pesar de ser una ciudad intermedia y ocupar el tercer lugar de ciudades del país con mayor tasa de motorización por encima de una grande ciudad como Bogotá presenta una contaminación menor en comparación con base al índice de emisión per cápita (2.9 más bajo en emisiones de CO, 2.5 veces más bajo en emisiones de NO<sub>x</sub>, 5.3 veces más bajo en emisiones SO<sub>x</sub> y 0.8 veces más bajo en emisiones de PM<sub>10</sub>).

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo COPERT 5.4 en la ciudad de Manizales a pesar de ser coherentes no alcanzan a representar las condiciones orográficas de la ciudad, esto se evidenció al comparar con los resultados de flujos de emisiones con los reportados en el IEA-2017 estimado con el modelo IVE, donde se obtuvieron diferencias porcentuales significativas (>60%). Las diferencias obtenidas se deben principalmente a los FE base y al parámetro función de los FE de cada modelo, donde el bin de potencia específica del vehículo (en el caso de IVE) representa mejor las condiciones de orografía de la ciudad que la velocidad (en el caso de COPERT). El modelo COPERT incluye correcciones por pendiente de la vía parcialmente (solo en la categoría de bus y camión, y con valores preestablecidos máximos de  $\pm 6\%$  en intervalos de 2%), sin embargo, Manizales presenta pendientes incluso mayores al 22%.

En cuanto a las emisiones de material particulado susceptible de resuspensión (RD<sub>10</sub>) se obtuvieron emisiones de 69 ton/año, emisiones similares obtenidas en un estudio previo realizado en la ciudad. En cuanto a composición química y morfología del RD<sub>10</sub> se destaca aportes no solo de desgaste de frenos y neumáticos (V, Pb, Cd, Sb, Co, Cu, Mo), desgaste de carretera (Na, Al, Ca, Fe) y fuentes industriales (Cd, Se, V, As, Mo), sino también de fuentes volcánicas (sal amoníaco, complejos hidratados Al-Si-K, diferentes metales pesados).

En el caso del ajuste de factores de emisión y estimación de emisiones exhosto y evaporativas mediante la aplicación del modelo COPERT la búsqueda de información del parque automotor que no había sido utilizada en estudios previos (kilometraje acumulativo de los vehículos por tecnología vehicular, distribución de kilómetros recorridos en hora pico y hora valle, carga de los buses y camión en circulación de hora pico y hora valle) y el análisis de sensibilidad del software fue determinante. Así mismo, en el caso del ajuste de factores de emisión y estimación de emisiones de RD<sub>10</sub> mediante la determinación de la carga de sedimento en campo, junto con el análisis de composición química y morfológico. Lo anterior, permitió obtener resultados de importancia para la toma de decisiones futuras como la selección del modelo de emisión de fuentes móviles en ruta en las futuras actualizaciones de los IEA, que son un insumo de entrada a los modelos de transporte de alta resolución de calidad del aire. Además, se refleja la importancia del estudio de composición química y morfológica de RD<sub>10</sub> en zonas con influencia de volcanes activos.

## 4.2. RECOMENDACIONES

---

Se recomienda el estudio de nuevos modelos de estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta que consideren el parámetro de la pendiente de la vía, ya sea de manera directa o indirecta mediante el uso del término de potencia específica del motor como por ejemplo el modelo MOVES. También, en lo posible poder realizar una campaña de campo de medición de emisiones con el fin de obtener FE ajustados y representativos a las condiciones de la ciudad, teniendo en cuenta que son pocas las ciudades latinoamericanas que cuentan con FE propios.

En la estimación de emisiones exhosto y evaporativas el componente de distribución tecnológica del parque automotor es el de mayor importancia, sin embargo, en las bases de datos de información entregada por las entidades competentes no se registran datos completos. Por lo anterior, se recomienda que las autoridades correspondientes soliciten a los Centros de Diagnóstico Automotor – CDA información específica y que está a su alcance como: año, marca y modelo del vehículo, tipo de combustible y tipo de servicio del vehículo (particular o público), kilometraje total acumulativo, cilindraje y tipo de motor, este último en el caso de las motocicletas.

En un estudio futuro realizar una campaña de campo para la estimación de carga de sedimento de RD<sub>10</sub> que incluya más puntos en diferentes zonas de la ciudad, con el fin de aplicar modelos receptores como el PMF para identificar posibles fuentes aportantes a la composición química. Se recomienda además utilizar filtros de fibra de cuarzo marca Pall con el fin obtener una menor interferencia en la determinación de la composición química por contaminación en los filtros, ya que inclusive para la marca Whatman se ha reportado interferencias.

Teniendo en cuenta que la ecuación de FE propuesta por la metodología Amato (2011) se realizó bajo condiciones de tres ciudades europeas, se recomienda estimar los FE de RD<sub>10</sub> con muestreadores pasivos siguiendo la metodología propuesta por Amato et. al., (2013).

## REFERENCIAS

---

Alves CA, Evtyugina M, Vicente AMP, Vicente ED, Nunes TV, Silva PMA, Duarte MAC, Pio CA, Amato F, Querol X. (2018). Chemical profiling of PM10 from urban road dust. *Sci Total Environ* 634, 41– 51.

Amato F., Pandolfi M., Moreno T., Furger M., Pey J., Alastuey A., Bukowiecki N., Prevot A.S.H., Baltensperger U., Querol X. (2011). Sources and variability of inhalable road dust particles in three European cities. *Atmospheric Environment Vol. 45 (37)*, 6777-6787.

Amato F., Pandolfi M., Viana M, Querol X., Alastuey A., Moreno T. (2009). Spatial and chemical patterns of PM10 in road dust deposited in urban environment. *Atmospheric Environment* 43 (9), 1650-1659.

Amato, F., Favez, O., Pandolfi, M., Alastuey, A., Querol, X., Moukhtar, S., Bruge, B., Verlhac, S., Orza, J., Bonnaire, N., Priol, T., Petit, J., Sciare, J. (2016). Traffic induced particle resuspension in Paris: Emission factors and source contributions. *Atmospheric Environment* 129, 114-124.

Andemos – Asociación Colombiana de vehículos automotores. (2017). Inventario de emisiones vehículos Colombia – Movilidad Sostenible. Disponible en: <http://www.andemos.org/wp-content/uploads/2017/03/Presentacion-ANDEMOS-Emissiones-01.25.2017-v8.pdf>. (Consultado en septiembre de 2019).

Beltran, D., Belalcázar, L.C., Rojas, N. (2012). Emisiones vehiculares de material particulado (PM2.5 y PM10) por resuspensión de polvo y abrasión en Bogotá. *Acodal – Asociación de Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental* 231, 25-32. ISSN-0120-0798

Bourliva, A, Papadopoulou, L, Aidona, A. (2016). Study of road dust magnetic phases as the main carrier of potentially harmful trace elements. *Science Total Environment*. 553, 380–391.

Bucko, M.S., Magiera, T., Pesonen, L.J., Janus, B. (2010). Magnetic, geochemical, and microstructural characteristics of road dust on roadsides with different traffic volumes-case study from Finland. *Water Air Soil Pollut* 209, 295–306.

Buitrago J. (2003). Aplicación del modelo gaussiano para determinar la calidad del aire en Manizales. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales, Colombia.

Bukowiecki, N., Lienemann, P., Hill, M., Furger, M., Richard, A., Amato, F., Prevot, A.S.H., Baltensperger, U., Buchmann, B., Gehrig, R. (2010). PM10 emission factors for nonexhaust particles generated by road traffic in an urban street canyon and along a freeway in Switzerland. *Atmospheric Environment* 44 (19), 2330–2340.

Buron, J.M., Lopez, J.M., Aparicio, F., Martin, M. (2004). Estimation of road transportation emissions in Spain from 1988 to 1999 using COPERT III program. *Atmospheric Environment* 38 (5), 715-724. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.10.020>

Byrne, P., Runkel, R.L., Walton-Day, K. (2017). Synoptic sampling and principal components analysis to identify sources of water and metals to an acid mine drainage stream. *Environment Science Pollutant Res* 24, 17220–17240.

Carn S., Fioletov V., Mclinden C., Li C., Krotkov N., 2017. A decade of global volcanic SO<sub>2</sub> emissions measured from space. *Scientific Reports* 7, 44095. <http://doi.org/10.1038/srep44095>

Carrasco D. (2009). Medición y análisis de factores de emisión para vehículos motorizados de la región metropolitana de Santiago. Tesis de maestría. Universidad de Chile.

CDIAC – Centro de Indicadores Ambientales de Caldas. (2020). Resultados de indicadores climatológicos para el hospital de Caldas. Disponible en: <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/indicadores/public/searchClimatological>

Cesvismap - Centro de Experimentación y Seguridad Vial MAPFRE. (2016). Control de emisiones contaminantes en Europa y Estados Unidos. *Revista Cesvismap*. España.

Chen, H., Kwong, J., Copes, R., Hystad, P., van Donkelaar, A., Tu, K., Brook, J., Goldberg, M., Martin, R., Murray, B., Wilton, A., Kopp, A., Burnett, R. (2017). Exposure to ambient air pollution and the incidence of dementia: a population-based cohort study. *Environment International* 108, 271-277. <http://doi.org/10.1016/j.envint.2017.08.020>

Cuesta, A. P. (2017). Estudio del impacto de las emisiones antropogénicas y geogénicas de dióxido de azufre, en la calidad del aire de Manizales. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales, Colombia.

Cuesta, A., Wahl M., Acosta, J. García, A., Aristizábal, B., 2020. Mixing layer height and slope wind oscillation: Factors that control ambient air SO<sub>2</sub> in a tropical mountain city. *Sustainable Cities and Society* 52, 101852. <http://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101852>

CVC – Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2018). Informe final actualización del inventario de emisiones de Santiago de Cali. Contrato de Consultoría No. 0534 de 2017. Santiago de Cali, Colombia.

DAGMA. (2012). Fortalecimiento tecnológico de la red de monitoreo de calidad del aire y evaluación de la contaminación atmosférica de la ciudad de Santiago de Cali. Disponible en [www.cali.gov.co/descargar.php?idFile=9534&plantilla=admin](http://www.cali.gov.co/descargar.php?idFile=9534&plantilla=admin)

D'Angiola, A., Dawidowski, L.E., Gómez, D.R., Osses, M. (2010). On-road traffic emissions in a megacity. *Atmos. Environ.* 44, 483-493. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.004>.

De Vallejuelo, S. F. O., Gredilla, A., da Boit, K., Teixeira, E. C., Sampaio, C. H., Madariaga, J. M., Silva, L. F., (2017). Nanominerals and potentially hazardous elements from coal cleaning rejects of abandoned mines: Environmental impact and risk assessment. *Chemosphere* 169, 725–733. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.125>

De Vallejuelo, S.F.O., Arana, G., de Diego, A., Madariaga, J.M. (2011). Pattern recognition and classification of sediments according to their metal content using chemometric tools. A case study: The estuary of Nerbioi-Ibaizabal River (Bilbao, Basque Country). *Chemosphere* 85 (8), 1347-1352.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (2019). Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Población ajustada por cobertura. Recuperado el 25 de noviembre de 2019, de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018/informacion-tecnica>

Dey, S., Caulfield, B., Ghosh, B. (2018). Modelling uncertainty of vehicular emissions inventory: A case study of Ireland. *Journal of Cleaner Production* 213, 1115-1126.

DNP – Dirección Nacional de Planeación. (2018). Calidad del aire una prioridad de política pública en Colombia. Disponible en: [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Presentaci%C3%B3n%20Calidad%20del%20Aire%2015\\_02\\_2018.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Presentaci%C3%B3n%20Calidad%20del%20Aire%2015_02_2018.pdf). (Consultado septiembre de 2019).

Duong, T., Lee, B. (2011). Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics. *J. Environ.Manag.* 92 (3), 554–562.

EEA - European Environment Agency. (2020). EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019 – Update Oct. 2020. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>

Emisia SA. Conscious of Transport's Impact. (2020). COPERT Versions | Emisia SA. Disponible en: <https://www.emisia.com/utilities/copert/versions/>

Environmental Protection Agency - EPA. (2018). Paved Roads. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources, AP-42. <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/index.html>

EPA - Environmental Protection Agency. (1989). Risk assessment guidance for superfund. In: Human Health Evaluation Manual, vol. I. Office of Solid Waste and Emergency Response. EPA/540/1-89/002. Washington, D.C., Estados Unidos.

EPA - Environmental Protection Agency. (1996). Soil Screening Guidance: Technical Background Document. EPA/540/R-95/128. Office of Solid Waste and Emergency Response. Washington, D.C., Estados Unidos.

EPA - Environmental Protection Agency. (2004). Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation. Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment). Washington, D.C., Estados Unidos.

EPA - United States Environmental Protection Agency. (2018). MOVES and Other Mobile Source Emissions Models. Disponible en: <https://www.epa.gov/moves>. Washington, D.C., Estados Unidos.

EPA - United States Environmental Protection Agency. (2020). MOVES3 Technical Guidance: Using MOVES to Prepare Emission Inventories for State Implementation Plans and Transportation Conformity. EPA-420-B-20-052. Oficina de Transporte y Calidad del Aire. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Washington, D.C., Estados Unidos.

Erazo, D. E., Londoño, A., Aristizábal, B.H. (2015). Estudio del impacto de los fluidos volcánicos en el recurso hídrico de la cuenca del río Chinchiná. *Gestión y Ambiente* 18 (2). 81-93. ISSN 0124.177X

Espitia, S.O., Porras, S.P. (2017). Identificación preliminar del aporte de fuentes del material particulado susceptible de resuspensión en vías de Bogotá. Tesis de pregrado. Universidad de La Salle. Bogotá D.C., Colombia. Disponible en: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/707/](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/707/)

Findeter - Financiera de desarrollo. (2017). Plan Maestro de Movilidad de Manizales. Manizales, Caldas.

Franco, D. A. (2020). Análisis y caracterización del material particulado PM10 y PM2.5 en la ciudad de Manizales. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales, Colombia. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79214>

Ghose, M.K., Paul, R., Banerjee, S.K. (2004). Assessment of the impacts of vehicular emissions on urban air quality and its management in Indian context: The case of Kolkata (Calcutta). *Environmental Science and Policy* – 7, 345-351.

González, C. M. (2017). Dinámica e impacto de emisiones antrópicas y naturales en una ciudad andina empleando un modelo Euleriano de transporte químico on-line. Caso de estudio: Manizales, Colombia. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales, Colombia.

González, C., Aristizábal B., 2012. Acid rain and particulate matter dynamics in a mid-sized Andean city: The effect of rain intensity on scavenging. *Atmospheric Environment* 60, 164-171. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.054>

Goonetilleke A, Wijesiri B, Bandala ER (2017). Water and soil pollution implications of road traffic. *Environmental Impacts of Road Vehicles: Past, Present and Future* 44, 86–106.

Gredilla, A.; Fdez-Ortiz de Vallejuelo, S.; Rodriguez-Iruretagoiena, A.; Gomez, L.; Oliveira, M.L.S.; Arana, G.; De Diego, A.; Madariaga, J.M.; Silva, L.F.O. (2019). Evidence of mercury sequestration by carbon nanotubes and nanominerals present in agricultural soils from a coal fired power plant exhaust. *Journal of Hazardous Materials*, 378, 120747.

Grigoratos, T., Martini, G. (2015). Brake wear particle emissions: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 22, 2491–2504. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8>

Grigoratos, T., Martini, G. (2014). Non-exhaust traffic related emissions. Brake and Tyre Wear PM. Literature Review. Joint Research Centre, Luxembourg.

GSA – Gobierno de Sudáfrica. (2006). Regulation Gazette: No. 8454, Vol 490, No. 28755; Government of South Africa:Pretoria, South Africa.

Gunawardana, C., Goonetilleke, A., Egodawatta, P., Dawes, L., Kokot, S. (2012). Source characterisation of road dust based on chemical and mineralogical composition. *Chemosphere* 87, 163–170.

Han, N.M., Latif M.T., Othman, M., Dominick, D., Mohamad, N, Juahir, H., Tahir, N.M. (2014). Composition of selected heavy metals in road dust from Kuala Lumpur city centre. *Environment Earth Science* 72, 849–859.

Hetem, I.G., Andrade, M.D. (2016). Characterization of fine particulate matter emitted from the resuspension of road and pavement dust in the metropolitan area of Sao Paulo, Brazil. *Atmosphere* 7 (31).

Herrera M.C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia: estudio fundamental e implicaciones en ingeniería. Tesis de doctorado. Universidad de Los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

Huo, H., Zhang, Q., He, K., Yao, Z., Wang, X., Zheng, B., Streets, D.G., Wang, Q., Ding., 2011. Modeling vehicle emissions in different types of Chinese cities: Importance of vehicle fleet and local features. *Environ. Pollut.* 159, 2954-2960. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2011.04.025>

IPCC-EFDB - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). User Manual for WEB application. Database on Greenhouse Gas Emission Factors, Version 2.0 (IPCC-EFDB). National Greenhouse Gas Inventories Programme.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2016). Fifth Assessment Report. Greenhouse Gas Protocol. Global Warming Potential Values. Disponible en: [https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29\\_1.pdf](https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf)

IVE - International Sustainable System Research Center. (s. f.). Modeling IVE. Disponible en: <http://www.issrc.org/>

Jeon, S., Kwon, M., Yang, J., Lee, S. (2017). Identifying the source of Zn in soils around a Zn smelter using Pb isotope ratios and mineralogical analysis. *Science of the Total Environment* 601–602, 66–72.

Jiménez, J.L. (1999). Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing. Tesis de doctorado. Instituto de Tecnología de Massachusetts. Massachusetts, Estados Unidos.

Kamunda, C., Mathuthu, M., Madhuku, M. (2016). Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from Witwatersrand Gold Mining Basin, South Africa. *Int. J. Environmental Research and Public Health* 13, 663. DOI:10.3390/ijerph13070663

Kioumourtzoglou, M., Schwartz, J., James, P., Dominici, F., Zanobetti, A. (2016). PM<sub>2.5</sub> and Mortality in 207 US Cities: Modification by Temperature and City Characteristics. *Epidemiology* 27 (2), 221-227. doi:10.1097/EDE.0000000000000422

Kioumourtzoglou, MA., Schwartz, J., James, P, Dominici, F, Zanobetti, A. (2016). PM<sub>2.5</sub> and Mortality in 207 US Cities: Modification by Temperature and City Characteristics. *Epidemiology* 27 (2), 221-227.

Kong, Sh., Ji, Y., Lu, B., Chen, L., Han, B., Li, Z., Bai, Z. (2011). Characterization of PM<sub>10</sub> source profiles for fugitive dust in Fushun—a city famous for coal. *Atmospheric Environment* 45, 5351–5365.

Liu, E., Yan, T., Birch, G., Zhu, Y. (2014). Pollution and health risk of potentially toxic metals in urban road dust in Nanjing, a mega-city of China. *Science Total Environment* 476-477, 522–531.

Liu, Y., Xing, J., Wang, S., Fu, X., Zheng, H. (2018). Source-specific speciation profiles of PM<sub>2.5</sub> for heavy metals and their anthropogenic emissions in China. *Environmental Pollution*. 239. 544–553. *Environmental Pollution* 239, 544-553. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.047>

Londoño, J., Correa, M. A., & Palacio, C. A. (2011). Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia* 16, 149–162.

Malek, A., Eom, H., Hwang, H., Hur, S., Hong, S., Hou, S., Ro, C. (2019). Single particle mineralogy of microparticles from Himalayan ice-cores using SEM/EDX and ATR-FTIR imaging techniques for identification of volcanic ash signatures. *Chemical Geology* 504, 205-215. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.11.010>

Mangones, S., Jaramillo, P., Rojas, N., Fischbeck, P. (2020). Air pollution emission effects of changes in transport supply: the case of Bogotá, Colombia. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08481-1>.

Manizales Cómo Vamos. (2018). Informe calidad de vida Manizales 2018. Disponible en: [http://manizalescomovamos.org/wp-content/uploads/2018/09/mcvunificado\\_sept\\_14-2.pdf](http://manizalescomovamos.org/wp-content/uploads/2018/09/mcvunificado_sept_14-2.pdf). (Consultado el septiembre de 2019).

Manizales Cómo Vamos. (2020). Informe calidad de vida Manizales 2019. Disponible en: [http://manizalescomovamos.org/wp-content/uploads/2020/10/ICV-2019\\_Texto-completo\\_webVF.pdf](http://manizalescomovamos.org/wp-content/uploads/2020/10/ICV-2019_Texto-completo_webVF.pdf). (Consultado el junio de 2020).

Manno, E., Varrica, D., Dongarra, D. (2006). Metal distribution in road dust samples collected in an urban area close to a petrochemical plant at Gela, Sicily. *Atmos. Environ.* 40, 5929–5941.

Martinello, K., Oliveira, M.L.S., Molossi, F.A., Ramos, C.G., Teixeira, E.C., Kautzmann, Rubens M., Silva, L.F.O. (2014). Direct identification of hazardous elements in ultra-fine and nanominerals from coal fly ash produced during diesel co-firing. *Science of the Total Environment*. 470–471, 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.007>

Minambiente - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas. Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana. Bogotá, D.C., Colombia.

Nilsson, E., Joelsson, L., Heimdal, J., Johnson, M., Nielsen, O., 2013. Re-evaluation of the reaction rate coefficient of CH<sub>3</sub>Br+OH with implications for the atmospheric budget of methyl bromide. *Atmospheric Environment*. 80, 70–74.

Ntziachristos, L., Gkatzoflias, D., Kouridis, C., Samaras, Z. (2009). COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model. *Environmental Science and Engineering*. 491-504. DOI: 10.1007/978-3-540-88351-7\_37

Pachón, J.E. (2013). Revisión de metodologías usadas para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas en Colombia: caso de estudio Bogotá. IV Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública.

Pachón, J.E., Galvis, B., Lombana, O., Carmona, L.G., Fajardo, S., Rincón, A., Meneses, S., Chaparro, R., Nedbor-Gross, R., Henderson, B. (2018). Development and Evaluation of a Comprehensive Atmospheric Emission Inventory for Air Quality Modeling in the Megacity of Bogotá. *Atmosphere* 9, 49. DOI:10.3390/atmos9020049

Pachón, J.E., Vanegas, J., Saavedra, C., Amato, F., Silva, L.F.O., Blanco, K., Chaparro, R., Casas, O., 2021. Evaluation of factors influencing road dust loadings in an urban environment. *Journal of the Air & Waste Management Association* 71, 268-280. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1806946>

Pachón, J.E., Vanegas, S., Montealegre, J. (2018). Protocolo operacional muestreo de material particulado susceptible de resuspensión. Centro Lasallista de Investigación y Modelación Ambiental – CLIMA. Universidad de La Salle. Bogotá D.C., Colombia.

Padoan, E., Ajmone-Marsan, F., Querol, X., Amato, F. (2018). An empirical model to predict road dust emissions based on pavement and traffic characteristics. *Environmental Pollution* 237. 713-720. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.10.115

Peñaloza, N.E. (2010). Distribución espacial y temporal del inventario de emisiones provenientes de las fuentes móviles y fijas de la ciudad de Bogotá, D.C. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Bogotá D.C., Colombia.

Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Plana, F., Ruiz, C.R., Cots, N., Massagué, G., Puig, O. (2001). PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> source apportionment in the Barcelona Metropolitan Area, Catalonia, Spain. *Atmos. Environ.* 35, 6407–6419.

Ramírez, J., Pachón, J., Casas, O., González, S. (2019a). A new database of on-road vehicle emission factors for Colombia: a case study of Bogotá. *Ciencia, Tecnología y Futuro* 9 (1), 73-82. <https://doi.org/10.29047/01225383.154>

Ramírez O., Sánchez A., Sánchez de la Campa, A.M., Amato, F., Moreno, T., Silva L.F., De la Rosa, J. (2019). Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity. *Science of the Total Environment* 652, 434–446. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.214>.

Ramírez, O., Sánchez de la Campa, A.M., Sánchez-Rodas, D., de la Rosa, J. (2020). Hazardous trace elements in thoracic fraction of airborne particulate matter: assessment of temporal variations, sources, and health risks in a megacity. *Science of the Total Environment* 710. 136344.

Ramírez, O., Verdone, A., Amato, F., Moreno, T., Silva, L., de la Rosa, J. (2019). Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity. *Science of the Total Environment* 652, 434–446. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.214>

Registro Único Nacional de Transito, RUNT. (2018). El RUNT en cifras. Balance del sector tránsito y transporte 2017. Disponible en: <https://www.runt.com.co/sites/default/files/Bolet%C3%ADn%20001%20de%202018.pdf>. (Consultado el 13 de marzo de 2019).

Registro Único Nacional de Transito, RUNT. (2019). El RUNT en cifras. Balance del sector tránsito y transporte 2018. Disponible en: <https://www.runt.com.co/sites/default/files/Balance%20anual%20del%202018.pdf>. (Consultado el 13 de marzo de 2019).

Ribeiro, J., Flores, D., Ward, C., Silva, L.F.O. (2010). Identification of nanominerals and nanoparticles in burning coal waste piles from Portugal. *Science of the Total Environment* 408, 6032–6041. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.046>

Rodríguez, P. y Behrentz, E. (2009). Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá, a través de mediciones directas. Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

Rojas, A.L. (2015). Estimación de emisiones de contaminantes provenientes de fuentes móviles en la jurisdicción CAR. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Bogotá D.C., Colombia.

Saikia, B. K., Saikia, J., Rabha, S., Silva, L. F. O., Finkelman, R. (2018). Ambient nanoparticles/nanominerals and hazardous elements from coal combustion activity: Implications on energy challenges and health hazards. *Geoscience Frontiers* 9 (3), 863–875. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.11.013>

Saikia, B. K., Saikia, J., Rabha, S., Silva, L. F. O., Finkelman, R. (2018). Ambient nanoparticles/nanominerals and hazardous elements from coal combustion activity: Implications on energy challenges and health hazards. *Geoscience Frontiers* 9 (3), 863–875. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.11.013>

SDA – Secretaria Distrital de Ambiente. (2019). Inventario de emisiones de fuentes móviles y fuentes fijas industriales año 2018. Subdirección de Calidad del Aire, Auditiva y Visual. Bogotá D.C.

Shahab, A., Zhang, H., Ullah, H., Rashid, a., Rad, S., Li, Xiao H. (2020). Pollution characteristics and toxicity of potentially toxic elements in road dust of a tourist city, Guilin, China: Ecological and health risk assessment. *Environmental Pollution* 266 (115419). 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115419>

Schauer, J., Lough, G., Shafer, M., Christensen, W., Arndt, M., Deminter, J., Park, J. (2006). Characterization of metals emitted from motor vehicles. Research Report 133. Boton, Health Effects Institute.

Schifter, I., L. Díaz, J. Durán, E. Guzmán, O. Chávez, E. López-Salinas. (2003). Remote sensing of emissions from motor vehicles in the metropolitan area of Mexico City. *Environ. Sci. Technol* – 37, 395-401.

Shi, G., Chen, Z., Bi, C., Wang, L., Teng, J., Li, Y., Xu, S. (2011). A comparative study of health risk of potentially toxic metals in urban and suburban road dust in the most populated city of China. *Atmospheric Environment* 45, 764-771. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.08.039

Silva, L. F.O., Crissien, T. J., Sampaio, C. H., Hower, J. C., Dai, Shifeng. (2020). Occurrence of carbon nanotubes and implication for the siting of elements in selected anthracites. *FUEL* 263. 116740.

SMARN – Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, INE – Instituto Nacional de Ecología, WGA – Western Governors’ Association. (2009). Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares. 1ra edición. México D.F. ISBN: 978-607-7908-01-2

Spiteri, C., Kalinski, V., Rosler, W., Hoffmann, V., Appel, E., Team, M. (2005). Magnetic screening of a pollution hotspot in the Lausitz area, eastern Germany: correlation analysis between magnetic proxies and heavy metal contamination in soils. *Environ Geol* 49, 1–9.

Stafoggia, M., Faustini, A., 2018. Chapter 3 - Impact on Public Health—Epidemiological Studies: A Review of Epidemiological Studies on Non-Exhaust Particles: Identification of Gaps and Future Needs. In: Amato, F. (Ed.), *Non-Exhaust Emissions*. Academic Press, London, 67–88. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811770-5.00003-0>

Tian, S., Liang, T., Li, K. (2019). Fine road dust contamination in a mining area presents a likely air pollution hotspot and threat to human health. *Environment International* 128, 201–209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.050>

Tolvett, S.A. (2009). Análisis de emisiones en ruta de vehículos diésel en ciudad de Mexico, Santiago y Sao Paulo. Tesis de maestría. Universidad de Chile.

Toro, M.V., Molina, E., Roldán, J.C., González, M.I., Jaramillo, M.L., Arcos, O.F, Villegas, A.O., Ruiz, S. (2017). Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá, actualización 2015. Convenio de Asociación No. CA 335 de 2016. Medellín, Colombia.

Transmetano. (2020). COMPOSICIÓN DEL GAS. Disponible en: <http://www.transmetano.co/Es/BEO/Paginas/InformacionOperacional/ComposicionGasVigente.aspx> (Consultado el 1 de mayo de 2020).

Trejos, E.M., Silva, L.F.O., Hower, J.C., Flores, E.M.M., González, C.M., Pachón, J.P., Aristizábal, B.H. (2021). Volcanic emissions and atmospheric pollution: A study of nanoparticles. *Geoscience Frontiers* 12-2, 746-755. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.013>

Unal-Corpocaldas. (2016). Apoyo y fortalecimiento de la red de monitoreo de calidad del aire en la ciudad de Manizales y cuantificación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles. Informe – Convenio 130-2014. Corporación Autónoma Regional de Caldas. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales Caldas, Colombia

Unal-Corpocaldas. (2019). Aplicación de herramientas de simulación atmosférica en el estudio de la calidad del aire en Manizales. Informe – Convenio 107-2018. Corporación Autónoma Regional de Caldas. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales Caldas, Colombia.

UPB- Universidad Pontificia Bolivariana. AMVA – Área Metropolitana del Balle de Aburra. (2020). Actualización del inventario de emisiones atmosféricas del balle de Aburrá – año 2018. Contrato de ciencia y tecnología No. 1179 de 2018.

Valencia, M. (2019). Estimación de las emisiones atmosféricas por resuspensión, distribución y almacenamiento de combustible en la ciudad de Manizales. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales, Colombia.

Velasco, M. (2015). Evaluación de la concentración y caracterización preliminar del PM10 en la ciudad de Manizales. Tesis de maestría. Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia.

Wang-Li, L. (2015). Insights to the formation of secondary inorganic PM<sub>2.5</sub>: current knowledge and future needs. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.* 8 (2), 1–13.

WHO - World Health Organization. (2016). Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden disease. Ginebra, Suiza. Obtenido de: <https://www.who.int/phe/publications/air-pollution-global-assessment/en/>

Widory, D., Liu, X., Dong, S. (2010). Isotopes as tracers of sources of lead and strontium in aerosols (TSP & PM<sub>2.5</sub>) in Beijing. *Atmos. Environ.* 44, 3679–3687.

Wilcox, J., Wang, B., Rupp, E., Taggart, R., Hsu-Kim, H., Oliveira, Marcos M.L.S., Cutruneo, C.M.N.L., Taffarel, S.R., Silva, L.F.O., Hopps, S.D., Thomas, G.A., Hower, J.C. (2015). Observations and assessment of fly ashes from high-sulfur bituminous coals and blends of high-sulfur bituminous and subbituminous coals: environmental processes recorded at the macro and nanometer scale. *Energ. Fuel.* 29.

Wiseman, C.L.S.; Levesque, C.; Rasmussen, P.E. (2021). Science of the Total Environment Characterizing the Sources, Concentrations and Resuspension Potential of Metals and Metalloids in the Thoracic Fraction of Urban Road Dust. *Science of the Total Environment* 786, 147467, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147467

Zapata, C. (2020). Hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente de Manizales. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales Caldas, Colombia.

# ANEXOS

---

**ANEXO A (FORMATO .XLSX - EXCEL)  
BASE DE DATOS DEL PARQUE AUTOMOTOR DE LA CIUDAD DE  
MANIZALES, AÑO BASE 2017**

**ANEXO B**  
**INFORMACIÓN DE ACTIVIDAD VEHICULAR**

**Tabla 1B. Aforos vehiculares por categoría vehicular de las avenidas principales (Av. Santander, Av. Kevin Ángel, Av. Panamericana, Av. Gilberto Álzate) de Manizales reportados en el PMM-2017.**

<b>HORA</b>	<b>PC</b>	<b>MOTOS</b>	<b>TAXI</b>	<b>BUS</b>	<b>PESADO</b>
0:00	3317	1116	1274	0	227
1:00	2861	751	1095	0	180
2:00	2687	476	953	0	153
3:00	1883	545	683	0	292
4:00	2351	3386	867	0	319
5:00	8348	12939	3291	2839	1004
6:00	19210	20881	5112	3818	1463
7:00	18143	16995	6111	3787	1478
8:00	14354	12364	5736	3640	1742
9:00	14669	12709	6008	3230	1808
10:00	15541	12571	6572	3345	1959
11:00	20363	18465	7074	3526	1844
12:00	19863	21042	7531	3713	1649
13:00	20034	21228	7340	3621	1774
14:00	16546	18343	7182	3802	1870
15:00	16819	18442	6895	3444	1575
16:00	18613	20537	6891	3426	1657
17:00	24237	27420	7348	3792	1487
18:00	21952	21742	6958	3841	1605
19:00	14361	15076	6450	3458	1262
20:00	9667	11942	5463	2978	960
21:00	6778	9759	4307	1771	646
22:00	4640	7936	3752	1108	608
23:00	4984	1942	1700	0	499
<b>Total</b>	<b>302220</b>	<b>308608</b>	<b>116592</b>	<b>59139</b>	<b>28061</b>

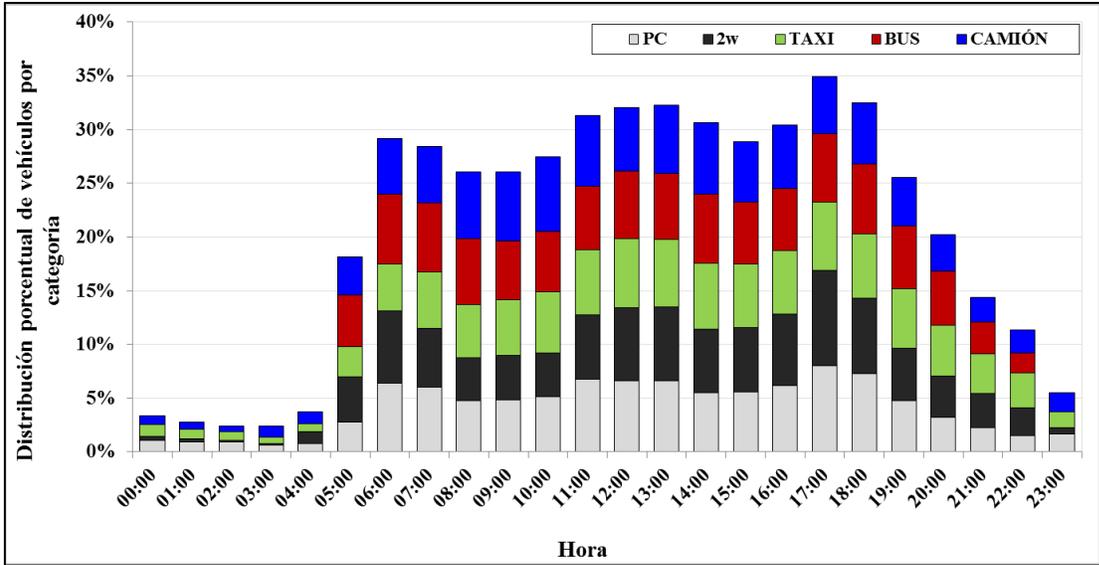


Figura 1B. Perfiles de tráfico vehicular de la ciudad de Manizales obtenidos en el PMM - 2017 (Tomado de: Findeter, 2017; Steer Davies Gleave; 2017).

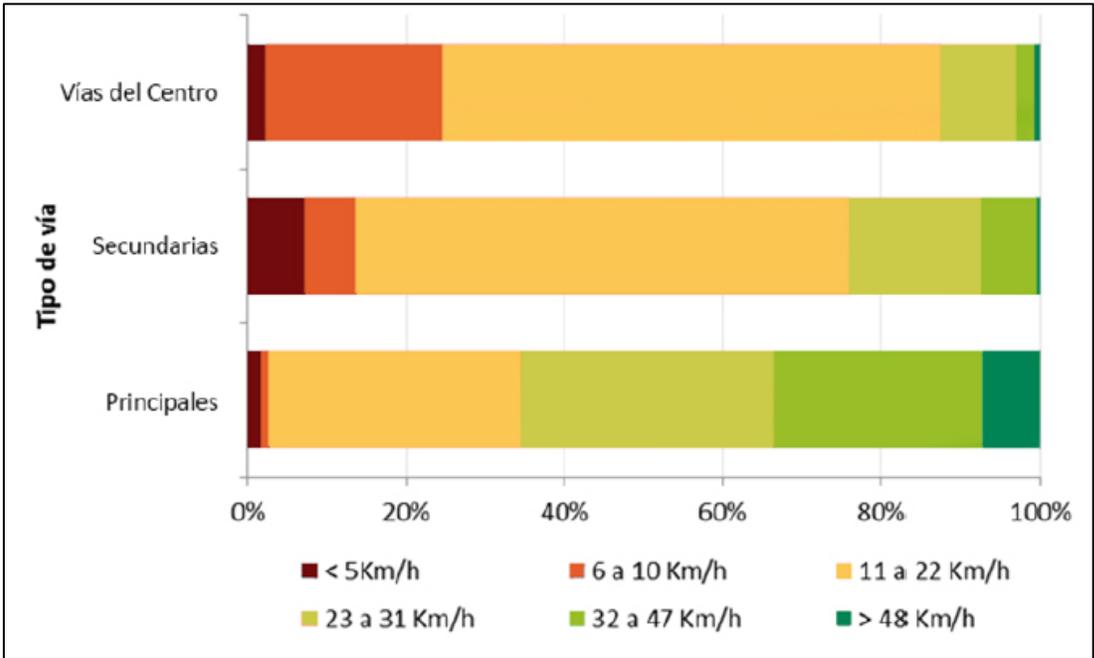


Figura 2B. Distribución de velocidad por tipo de vía en la ciudad de Manizales obtenidos en el PMM - 2017 (Tomado de: Findeter, 2017; Steer Davies Gleave; 2017).

**Tabla 1B. Conteos vehiculares reportados por el PMM-2017 (Findeter, 2017).**

Avenida	Sentido	Conteos vehiculares 2017 (5am-10pm)				
		Veh. Particular	Moto	Taxi	Bus	Camión
Gilberto Álzate	Occidente-Oriente	9973	8718	3254	3908	807
Gilberto Álzate	Oriente - Occidente	12638	8788	3493	194	580
<b>Total</b>		<b>22611</b>	<b>17506</b>	<b>6747</b>	<b>4102</b>	<b>1387</b>
Panamericana	Occidente-Oriente	8380	8762	1190	2046	1494
Panamericana	Oriente - Occidente	7705	17678	2897	2487	1971
<b>Total</b>		<b>16085</b>	<b>26440</b>	<b>4087</b>	<b>4533</b>	<b>3465</b>
Santander	Occidente-Oriente	7248	6663	4587	2051	176
Santander	Oriente - Occidente	9464	8359	4785	1977	254
<b>Total</b>		<b>16712</b>	<b>15022</b>	<b>9372</b>	<b>4028</b>	<b>430</b>
Kevin Ángel	Occidente-Oriente	6453	6280	2389	1189	715
Kevin Ángel	Oriente - Occidente	8942	9679	4706	974	584
<b>Total</b>		<b>15395</b>	<b>15959</b>	<b>7095</b>	<b>2163</b>	<b>1299</b>

**ANEXO C (FORMATO .XLSX - EXCEL)**  
**BASE DE DATOS DE FACTORES DE EMISIÓN AJUSTADOS PARA**  
**MANIZALES – 2017 ESTIMADOS MEDIANTE COPERT 5.4**

**ANEXO D - CORRESPONDENCIA DE TECNOLOGÍAS VEHICULARES DEL  
MODELO COPERT 5.4 E IVE Y INFORMACIÓN DE PRECISIÓN DE LAS  
ESTIMACIONES**

**Tabla 1D. Correspondencia de tecnologías vehiculares de IVE a COPERT 5.4.**

<b>Categoría vehicular</b>	<b>Tipo de combustible</b>	<b>IVE</b>	<b>Año IVE</b>	<b>COPERT 5.4</b>	<b>Año COPERT</b>
<b>Vehículos particular (PC)</b>	Gasolina	None	<1990-1997	ECE 15/04	1985-1992
		2-Way	1998-2003	Open Loop	1985-1990
		3-Way	2004-2011	Euro I	1992-1996
		3-Way/EGR	2004-2011		
		Euro II	2012-2013	Euro II	1996-1999
		Euro III	2014	Euro III	2000-2004
		Euro IV	-	Euro IV	2005-2009
		EGR+Improv	-		
	Diésel	None	1990-1999	Convencional	<1992
		Euro I	2000-2010	Euro I	1992-1996
		Euro II	2011-2012	Euro II	1996-1999
		Euro III	2011-2012	Euro III	2000-2004
		Euro IV	2013-2014	Euro IV	2005-2009
	Gas natural Comprimido	None	<1990-1997	Euro IV	2005-2009
		2-Way	1998-2003		
3-Way/EGR		2004-2011			
<b>Motos</b>	Gasolina	None	1994-2009	Convencional 4T	< 1999
		Catalyst	2006-2017	Euro I 4T	1999-2003
		None	1977-2016	Convencional 2T	< 1999
<b>Buses</b>	Diésel	None	1969-1988	Conventional	< 1992
		Improved	1991-2010	Euro I	1992-1995
		Euro II	2011-2012	Euro II	1996-2000
		Euro III	2013-2016	Euro III	2000-2005
<b>Camiones</b>	Diésel	Improved	1991-2010	Conventional	1992-1995
		Euro I	1991-2010	Euro I	1992-1995
		Euro II	2011	Euro II	1996-2000
		Euro III	2012	Euro III	2000-2005

<b>Categoría vehicular</b>	<b>Tipo de combustible</b>	<b>IVE</b>	<b>Año IVE</b>	<b>COPERT 5.4</b>	<b>Año COPERT</b>
		Euro IV	2013-2016	Euro IV	2008-2013
<b>Taxis (PC)</b>	Gasolina	None	<1990-1997	ECE 15/04	1985-1992
		2-Way	1998-2003	Open Loop	1985-1990
		3-Way	2004-2011	Euro I	1992-1996
		3-Way/EGR	2004-2011		
		Euro II	2012-2013	Euro II	1996-1999
		Euro III	2014	Euro III	2000-2004
		Euro IV	-	Euro IV	2005-2009
		EGR+Improv	-		
	Diésel	None	1990-1999	Convencional	<1992
		Euro I	2000-2010	Euro I	1992-1996
		Euro II	2011-2012	Euro II	1996-1999
		Euro III	2011-2012	Euro III	2000-2004
		Euro IV	2013-2014	Euro IV	2005-2009
	Gas natural Comprimido	None	<1990-1997	Euro IV	2005-2009
		2-Way	1998-2003		
3-Way/EGR		2004-2011			

### ***Precisión de la estimación de emisiones***

Los niveles de incertidumbre de los inventarios de emisiones atmosféricas generalmente están ligados a dos grupos: (1) los factores de emisión y (2) los datos del parque automotor. Es común que se realicen estimaciones de incertidumbre de inventarios de naturaleza cualitativas, ya que cuantitativamente es un proceso estadístico complejo y dispendioso, y no siempre se cuenta con los datos de información necesarios.

En el caso de estudio no se estimó la incertidumbre, no se disponen el nivel de incertidumbre de los datos relacionados al parque automotor y en el caso de los factores de emisión la guía metodológica reporta en síntesis rangos de precisión cualitativos como se muestra a continuación.

**Tabla 2D. Indicadores de precisión de la estimación de factores de emisión para diferentes contaminantes según categoría y tecnología vehicular (Fuente: EEA, 2020).**

<b>Categoría vehicular</b>	<b>Tecnología vehicular</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>CO</b>	<b>COVNM</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>PM</b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
Vehículo particular - Gasolina	Con catalizador	A	A	A	A	-	C	A
Vehículo particular - Gasolina	Sin catalizador	A	A	A	A	-	A	A
Vehículo particular - Diesel	Todas las tecnologías	A	A	A	A	A	B	A
Motocicletas - 2T	> 50 cm <sup>3</sup>	A	A	A	B	-	B	A
Motocicletas - 4T	> 50 cm <sup>3</sup>	A	A	A	B	-	B	A
Camión	Todas las tecnologías	A	A	A	B	A	B	A
<b>- Emisiones en frío</b>								
Vehículo particular	Convencional	B	B	B	-	-	-	B
Vehículo particular - Gasolina	Euro 1 y posteriores	B	B	B	A	-	-	A
Vehículo particular - Diésel	Convencional	C	C	C	-	C	-	B
Vehículo particular - Diésel	Euro I	A	A	A	A	A	-	A

Nota:

A, corresponde a factores de emisión estadísticamente significativos basados en un conjunto suficientemente grande de datos medidos y evaluados. B, corresponde a factores de emisión no estadísticamente significativos basados en un pequeño conjunto de datos medidos reevaluados. C, corresponde a factores de emisión estimados sobre la base de la literatura disponible. D, corresponde a factores de emisión estimados aplicando consideraciones de similitud y / o extrapolación.

### ***Balance energético***

Cabe destacar que se realizó un balance energético manual en el que solo se consideró las ventas de los combustibles de gasolina y diésel (no se disponía de datos de gas natural vehicular) reportadas por Valencia (2019) y las emisiones de dichos combustibles obtenidas en el presente estudio. Se obtuvo una diferencia de emisiones de CO<sub>2</sub> de 20.33%, esta diferencia se asocia al supuesto de que todas las tecnologías vehiculares de una misma categoría recorrieran igual cantidad de kilómetros anuales y que falta por incluir las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el gas natural vehicular.

**Tabla 3D. Balance de emisiones de CO<sub>2</sub> de diésel y gasolina.**

<b>Variable</b>	<b>Gasolina Corriente</b>	<b>Gasolina Extra</b>	<b>ACPM / DIESEL</b>
Consumo (gal) <sup>a</sup>	16893136.43	633037.37	12010024
Emisión total CO <sub>2</sub> (Kg) <sup>b</sup>	148803192	5576110	121889734
<b>Emisión total CO<sub>2</sub> (ton)<sup>b</sup></b>	<b>276269</b>		
<b>Emisión total CO<sub>2</sub> (ton) - Presente estudio</b>	<b>346812</b>		
<b>% Diferencia CO<sub>2</sub></b>	<b>20.34%</b>		

Nota:

<sup>a</sup> Ventas de combustibles reportadas por Valencia (2019).

<sup>b</sup> Factor de emisión - FE (Kg CO<sub>2</sub>/gal): gasolina, 8.81; diésel: 10.15. Unidad de Planeación Mineroenergética – UPME. Calculados en línea – Fecoc (2016). Combustibles líquidos: Gasolina motor y Diesel B2.

[http://www.upme.gov.co/calculadora\\_emisiones/aplicacion/calculadora.html](http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html)

**Tabla 4D. Cronograma de introducción de tecnologías a Colombia (Unal-Corpocaldas, 2019).**

Tecnología vehicular según tipo de combustible		Año																											
		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Gasolina	Distribución Aire/Combustible	Carburador						SPFI		MPFI (indirecto)												MPFI (directo)							
	Control de emisiones evaporativas	Ninguno						Canister		PCV/Canister																			
	Control de emisiones por tubo de escape	Ninguno						2 vías				3 vías								EURO II		EURO III							
Gasolina (motos)	Tipo de motor	2 tiempos														4 tiempos													
	Distribución Aire/Combustible	Ninguno														Carburador													
	Control de emisiones evaporativas	Ninguno												PCV															
	Control de emisiones por tubo de escape	Ninguno												1 vía															
Diésel	Distribución Aire/Combustible	Inyección pre cámara	Inyección directa (bombas lineales y rotatorias)																			Common Rail (FI)							
	Control de emisiones por tubo de escape	Pre EURO – EPA 1998 (1990-2000)										EURO I										EURO II / EURO III		EURO IV					

**ANEXO E**  
**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO COPERT 5.4**

**Tabla 1E. Análisis de sensibilidad en los FE (Relación de cambio: % Cambio del FE / % Cambio en la variable).**

Variable	Categoría vehicular	Combustible	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO
Viaje promedio – veh. particular	Autos	Gasolina	0.00	-0.10	-0.05	-0.05	-0.21
Viaje promedio – veh. particular	Autos	Diesel	-0.03	-0.01	-0.03	-0.03	-0.07
Viaje promedio – veh. particular	Autos	GNV	0.00	-0.22	-2.00	-0.05	-0.35
Viaje promedio – veh. particular	Taxi	Gasolina	0.00	-0.12	-0.05	-0.05	-0.26
Viaje promedio – veh. particular	Taxi	Diesel	-0.03	-0.01	-0.03	-0.03	-0.07
Viaje promedio – veh. particular	Taxi	GNV	0.00	-0.21	-2.00	-0.05	-0.37
% kilómetros en hora pico	Autos	Gasolina	0.01	0.00	0.05	0.05	0.05
% kilómetros en hora pico	Autos	Diesel	0.05	0.07	0.04	0.04	0.04
% kilómetros en hora pico	Autos	GNV	0.02	0.01	0.04	0.04	0.04
% kilómetros en hora pico	Motos 2T	Gasolina	0.00	-0.04	0.05	0.05	0.05
% kilómetros en hora pico	Motos 4T	Gasolina	0.00	-0.06	0.02	0.02	0.02
% kilómetros en hora pico	Taxi	Gasolina	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05
% kilómetros en hora pico	Taxi	Diesel	0.04	0.07	0.05	0.04	0.04
% kilómetros en hora pico	Taxi	GNV	0.00	0.01	0.05	0.05	0.05
% kilómetros en hora pico	Camiones	Diesel	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
% kilómetros en hora pico	Buses	Diesel	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Velocidad en hora pico y valle <sup>a</sup>	Autos	Gasolina	-0.07	-0.05	-0.73	-0.73	-0.98
Velocidad en hora pico y valle <sup>a</sup>	Autos	Diesel	-0.54	-0.79	-0.63	-0.63	-1.52
Velocidad en hora pico y valle <sup>a</sup>	Autos	GNV	-0.08	-0.15	2.00	-0.65	0.08
Velocidad en hora pico y valle <sup>a</sup>	Motos 2T	Gasolina	0.00	0.26	-0.80	-0.77	-0.31
Velocidad en hora pico y valle <sup>a</sup>	Motos 4T	Gasolina	-0.02	0.45	-0.43	-0.43	-0.39
Velocidad en hora pico y valle <sup>a</sup>	Taxi	Gasolina	-0.01	-0.06	-0.74	-0.73	-0.71
Velocidad en hora pico y valle <sup>a</sup>	Taxi	Diesel	-0.45	-0.71	-0.60	-0.60	-1.48
Velocidad en hora pico y valle <sup>a</sup>	Taxi	GNV	-0.01	-0.10	-0.66	-0.66	0.04
Velocidad en hora pico y valle <sup>a</sup>	Camiones	Diesel	-1.00	-0.81	-0.87	-0.87	-1.22
Velocidad en hora pico y valle <sup>a</sup>	Buses	Diesel	-1.01	-0.97	-0.95	-0.94	-1.44
Velocidad en hora pico y valle <sup>b</sup>	Autos	Gasolina	-0.27	-0.25	-0.23	-0.22	-0.89
Velocidad en hora pico y valle <sup>b</sup>	Autos	Diesel	-0.33	-0.29	-0.21	-0.21	-0.80
Velocidad en hora pico y valle <sup>b</sup>	Autos	GNV	-0.30	-1.20	-2.00	-0.21	-0.99
Velocidad en hora pico y valle <sup>b</sup>	Motos 2T	Gasolina	-0.01	0.34	0.04	0.03	0.33

Variable	Categoría vehicular	Combustible	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO
Velocidad en hora pico y valle <sup>b</sup>	Motos 4T	Gasolina	-0.08	0.57	0.16	0.16	0.45
Velocidad en hora pico y valle <sup>b</sup>	Taxi	Gasolina	-0.23	-0.50	-0.26	-0.26	-1.05
Velocidad en hora pico y valle <sup>b</sup>	Taxi	Diesel	-0.34	-0.38	-0.24	-0.24	-0.70
Velocidad en hora pico y valle <sup>b</sup>	Taxi	GNV	-0.24	-1.11	-0.26	-0.25	-1.12
Velocidad en hora pico y valle <sup>b</sup>	Camiones	Diesel	-0.40	-0.28	-0.34	-0.34	-0.50
Velocidad en hora pico y valle <sup>b</sup>	Buses	Diesel	-0.36	-0.36	-0.34	-0.33	-0.52
% Carga en hora pico	Camiones	Diesel	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
% Carga en hora pico	Buses	Diesel	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
% Carga en hora pico	Camiones	Diesel	0.05	0.07	0.07	0.07	0.05
% Carga en hora pico	Buses	Diesel	0.07	0.06	0.07	0.07	0.08
Pendiente <sup>a</sup>	Camiones	Diesel	0.25	0.83	0.75	0.75	0.34
Pendiente <sup>a</sup>	Buses	Diesel	0.23	0.57	0.55	0.55	0.33
Pendiente <sup>b</sup>	Camiones	Diesel	0.25	0.65	0.62	0.62	0.45
Pendiente <sup>b</sup>	Buses	Diesel	0.23	0.56	0.55	0.55	0.41
Contenido de azufre	Todas	Gasolina			-1.00		
Contenido de azufre	Todas	Diesel			-1.00		

Nota:

<sup>a</sup> Cambio negativo en la variable.

<sup>b</sup> Cambio positivo en la variable.

**ANEXO F – DIGITAL (FORMATO .XLSX – EXCEL)  
FICHAS DE CAMPO DEL MUESTREO DE MATERIAL PARTICULADO  
RESUSPENDIDO**

**ANEXO G – DIGITAL (FORMATO .XLSX – EXCEL)  
CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE MATERIAL PARTICULADO  
SUSCEPTIBLE DE RESUSPENSIÓN**