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 FINAL

PRESENTADO A:

CORPOCALDAS

POR:

GRUPO DE TRABAJO ACADÉMICO EN INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL

BEATRIZ HELENA ARSITIZÁBAL ZULUAGA – COORDINADORA PROYECTO

CARLOS MARIO GONZÁLEZ DUQUE

ANDREA PATRICIA CUESTA MOSQUERA

CARLOS DAVID GÓMEZ ORTIZ

JADE ALEXANDRA LI RAMIREZ

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES

MANIZALES, JUNIO 09 DE 2016

CONTENIDO

1. PRESENTACIÓN 3

2. ALCANCES DEL PROYECTO 5

3. METODOLOGÍA GENERAL 7

4. COMPONENTE INVENTARIO DE EMISIONES POR FUENTES MÓVILES 10

5. COMPONENTE INVENTARIO DE EMISIONES POR FUENTES FIJAS PUNTUALES. AÑO BASE 2014. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

6. COMPONENTE MONITOREO Y APOYO AL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE ..... **¡Error! Marcador no definido.**

7. RECOMENDACIONES PARA LA CORPORACIÓN AMBIENTAL PRODUCTO DEL TRABAJO DESARROLLADO DURANTE EL CONVENIO ..... **¡Error! Marcador no definido.**

8. CONCLUSIONES GENERALES ..... **¡Error! Marcador no definido.**

9. REFERENCIAS ..... **¡Error! Marcador no definido.**

ANEXOS ..... **¡Error! Marcador no definido.**

1. PRESENTACIÓN

Se presenta en este documento el informe final de actividades correspondientes al desarrollo del Convenio Interadministrativo de Asociación No. 130-2014, establecido entre la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales (Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental GTAIHA) y la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS).

El proyecto de investigación planteado en desarrollo del Convenio se centró en dos componentes fundamentales: la estimación de las emisiones atmosféricas provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Manizales, y el apoyo y fortalecimiento del sistema de vigilancia calidad del aire de Manizales (SVCA). El sistema es operado actualmente por CORPOCALDAS y la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, a través de éste se realiza el seguimiento de material particulado (PST en 2 estaciones, PM_{10} en 3 estaciones y $PM_{2.5}$ en 1 estación). Adicionalmente, el 23 de julio de 2015 se llevó a cabo la firma de un otrosí del Convenio, en el que se amplió el alcance del proyecto para incluir la actualización del inventario de emisiones por fuentes fijas (industriales) en la ciudad de Manizales.

Considerando lo anterior, el objetivo de este informe final es consolidar las metodologías y los resultados producto de la ejecución del Convenio 130-2014, abordado desde tres componentes:

- Estimación del inventario de emisiones por fuentes móviles (vehículos) en Manizales para el año base 2014 y su desagregación espacial y temporal.
- Estimación de emisiones por fuentes fijas puntuales de Manizales para el año base 2014.
- Apoyo al monitoreo de material particulado (PM_{10}) y gases (SO_2, O_3 y CO) en Manizales, análisis y actualización de bases de datos de calidad del aire, y medición de contaminantes SO_2, O_3, NO_X aplicando técnicas de monitoreo pasivo.

Respecto al inventario de fuentes móviles, éste se desarrolló en tres etapas. La primera se centró en la realización de la campaña de campo para la recopilación de información primaria y secundaria, proveniente de entidades como CORPOCALDAS, Secretaría de Tránsito, Centros de Diagnóstico Automotor (CDAs), entre otros. Esta información fue depurada en una segunda etapa para construir los ficheros de entrada necesarios para el cálculo de las emisiones utilizando el Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE, por sus siglas en inglés). Como resultado se obtuvieron las emisiones totales diarias y anuales de contaminantes criterio y efecto invernadero, y su desagregación temporal. Finalmente, en la tercera etapa, se realizó la distribución espacial de las emisiones totales obtenidas previamente, utilizando metodologías simplificadas, a partir de una aproximación “top-down”.

En cuanto al componente incorporado en el otrosí del convenio, relacionado con la estimación de emisiones provenientes de fuentes fijas puntuales en Manizales, se tuvieron en cuenta emisiones de las empresas locales, consultadas en los expedientes que reposan en la Corporación ambiental y el Registro Único Ambiental (RUA). Se muestran los aspectos metodológicos para el cálculo del inventario de fuentes fijas, y los resultados totales en una base de datos detallada. De la misma forma, se incluyen conclusiones y recomendaciones que se deberían tener en cuenta para futuros análisis de emisiones provenientes de fuentes fijas en la ciudad.

Con relación al componente de apoyo al sistema de monitoreo de calidad del aire, las actividades ejecutadas se enfocaron en el apoyo al monitoreo de los contaminantes PM_{10} (material particulado menor a 10 micras), y los gases SO_2 (dióxido de azufre), O_3 (ozono troposférico) y CO (monóxido de carbono). Se realizó también la actualización de las bases de datos de concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ (periodo 2009 a abril de 2016), de gases SO_2, O_3 y CO (periodo julio 2014 a abril de 2016), y de meteorología. El análisis de estos datos se realizó mediante el uso de técnicas de visualización, estadística descriptiva, cálculos de índices de calidad del aire y comparación de las concentraciones con los límites establecidos en la normatividad colombiana, para el caso de los contaminantes del aire. Se usó también la técnica de monitoreo pasivo para establecer la distribución espacial y temporal de las concentraciones de los contaminantes SO_2, O_3 y NO_X, y el respectivo análisis de resultados, considerando la influencia de fuentes de emisión de origen antropogénico y natural, así como las condiciones meteorológicas predominantes en las campañas de monitoreo pasivo.

En esta última sección se describen las dificultades técnicas que impidieron el continuo y adecuado funcionamiento de algunas estaciones que conforman el sistema de vigilancia de calidad del aire de Manizales (SVCA), empleadas para el monitoreo de gases (SO_2, O_3 y CO) y material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$). Se hace entrega además de una metodología de análisis de datos de calidad del aire y meteorología, generada como algoritmo en el software R, para uso en la Corporación.

En el Anexo 7 se presenta un cuadro resumen de las reuniones realizadas entre CORPOCALDAS y la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, así como las reuniones internas de la Universidad, durante la ejecución del Convenio. En el Anexo 8 se entrega un cuadro resumen de resultados totales de los tres componentes: inventario de emisiones por fuentes móviles, inventario de emisiones provenientes de fuentes fijas puntuales y componente de monitoreo y apoyo al sistema de vigilancia de calidad del aire.

2. ALCANCES DEL PROYECTO

Para el desarrollo del proyecto se establecieron inicialmente los siguientes alcances:

- Análisis de las zonas estudiadas en la ciudad de Manizales en lo que respecta a los niveles de contaminación encontrados y la influencia directa de fuentes de contaminación, zonas influenciadas por fenómenos de dispersión de contaminantes, influencia del Volcán Nevado del Ruíz, entre otros.
- Distribución espacial de los niveles de contaminación por contaminantes dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y ozono troposférico en el aire ambiente de la ciudad de Manizales.
- Relación entre las concentraciones de contaminantes dióxido de azufre, monóxido de carbono y ozono troposférico y las variables meteorológicas de la ciudad de Manizales.
- Línea base del inventario de emisiones por fuentes móviles en la ciudad.
- Distribución espacial y horaria de las emisiones por fuentes móviles de la ciudad de Manizales.
- Socialización de la información con la autoridad ambiental (CORPOCALDAS).

Con el fin de dar continuidad al inventario de emisiones de contaminantes del recurso aire en la ciudad de Manizales, se amplió el contrato del presente convenio para incluir la estimación del inventario de emisiones de fuentes fijas (industrias) y darle continuidad al fortalecimiento del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de CORPOCALDAS, con lo cual se adicionaron los siguientes productos:

- Actualización del inventario de emisiones por fuentes fijas en la ciudad de Manizales, para el año base 2014.
- Continuación del monitoreo de contaminantes atmosféricos como SO_2, O_3 y CO en la estación Gobernación.

La descripción del avance porcentual según cada producto propuesto en el Convenio, es resumida en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Porcentaje de ejecución con respecto al total del contrato.

PRODUCTO	PESO	Informe Final		
		Programado	Ejecutado	Acumulado
Análisis de las zonas estudiadas en la ciudad de Manizales en lo que respecta a los niveles de contaminación encontrados y la influencia directa de fuentes de contaminación, zonas influenciadas por fenómenos de dispersión de contaminantes, influencia del Volcán Nevado del Ruíz, entre otros.	14%	100%	100%	14%
Distribución espacial de los niveles de contaminación por contaminantes dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y ozono troposférico en el aire ambiente de la ciudad de Manizales.	7%	100%	100%	7%
Relación entre las concentraciones de contaminantes dióxido de azufre, monóxido de carbono y ozono troposférico y las variables meteorológicas en la ciudad de Manizales.	14%	100%	100%	14%
Línea base del inventario de emisiones por fuentes móviles en la ciudad.	17%	100%	100%	17%
Distribución espacial y horaria de las emisiones de fuentes móviles de la ciudad de Manizales.	14%	100%	100%	14%

PRODUCTO	PESO	Informe Final		
		Programado	Ejecutado	Acumulado
Socialización de la información con la autoridad ambiental (CORPOCALDAS).	4%	100%	100%	4%
Actualización del inventario de emisiones por fuentes fijas en la ciudad de Manizales, para el año base 2014.	25	100%	100%	25%
Continuación del monitoreo de contaminantes atmosféricos como SO_2, O_3 y CO en la estación Gobernación.	5	100%	100%	5%
TOTAL	**100%**	--	--	**100%**

3. METODOLOGÍA GENERAL

Para el componente de estimación del inventario de emisiones provenientes de fuentes móviles, se aplicó la metodología IVE en el área urbana de Manizales. Esta metodología fue desarrollada por la ISSRC (International Sustainable System Research Center). Incluye la realización de una campaña de campo que permite la generación de información local para su posterior implementación en el modelo IVE, el cual estima las emisiones vehiculares en ruta y por proceso de encendido del motor (partidas). De esta campaña se obtuvo información primaria, relacionada con patrones de conducción y de partidas, composición dinámica y distribución tecnológica de la flota vehicular. También información secundaria, relacionada con la composición del parque automotor, edad de la flota vehicular y conteos vehiculares. A través del análisis de esta información, se realizó el cálculo de las emisiones totales de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero utilizando el modelo IVE. Con la información de conteos vehiculares se realizó la distribución temporal de las emisiones vehiculares. Parte de esta información se levantó en la campaña de campo y también fue suministrada por CORPOCALDAS, a través de dos estudios de niveles de ruido ambiental realizados en Manizales y Villamaría en los años 2014 y 2015, respectivamente (CORPOCALDAS, 2014; 2015). Finalmente, se desarrolló la metodología para la desagregación espacial de las emisiones, en la cual se aplicó una aproximación “top-down”, utilizando información de conteos vehiculares y longitud de arcos de vía. En la sección 4 se muestra el consolidado de la metodología de cálculo y resultados de la distribución espacial y temporal del inventario de emisiones por fuentes móviles año base 2014.

En lo que respecta al componente de inventario de emisiones por fuentes fijas puntuales para Manizales, las actividades se centraron en la actualización de dicho inventario, tomando el año 2014 como año base para el cálculo. La actualización se realizó mediante la recopilación de información correspondiente a muestreos isocinéticos de las principales industrias generadoras de emisiones en Manizales y aquellas de importancia en el departamento de Caldas. Las fuentes de información constituyen los expedientes disponibles en CORPOCALDAS (para empresas que deben tramitar permiso de emisión), y el Registro Único Ambiental (RUA) (para las empresas que no están obligadas a tramitar permiso de emisión). Posteriormente se procedió a estimar el inventario de emisiones según los reportes isocinéticos y aplicando la metodología de factores de emisión. La metodología detallada y los resultados del inventario de fuentes fijas se presentan en la sección 5.

En términos del apoyo y fortalecimiento del sistema de vigilancia de calidad del aire de Manizales, las actividades realizadas se centraron en el monitoreo de PM_{10} en las estaciones Nubia y Palogrande, y de los gases SO_2, O_3 y CO en la estación automática de Gobernación. Así mismo, se llevó a cabo la actualización y análisis de las bases de datos correspondientes al monitoreo de los contaminantes PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, O_3 y CO, empleando el software R y su librería Openair. En este caso se consideró toda la red de estaciones de PM_{10}. Se actualizaron también los datos de variables meteorológicas de las estaciones Enea, Hospital, Ingeominas, Niza, Posgrados, y Gobernación (esta última instalada en febrero de 2015 por el GTAIHA de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales). Las concentraciones de los gases SO_2 y O_3 se correlacionaron con variables meteorológicas. Se incorporaron los Índices de Calidad del Aire de 2014 y 2015, calculados para los contaminantes PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2 y O_3, obtenidos desde el Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC). Paralelamente, se realizó un estudio para evaluar la relación entre las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, medidos en la estación Gobernación, que permitió identificar tendencias de correlación entre ambos contaminantes y posibles fuentes de contaminación. En la Tabla 3.1

se muestra el conjunto de estaciones del sistema de vigilancia, y el contaminante que se mide en cada estación.

Tabla 3.1. Estaciones del sistema de vigilancia de calidad del aire de Manizales. Monitoreo activo. CORPOCALDAS-Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.

Estación	Propietario	Ubicación	Año Instalación	Latitud	Longitud	Altitud m.s.n.m.
Gobernación $PM_{2,5}$	CORPOCALDAS	Gobernación, Manizales	2009	N 5° 4' 6.5"	W 75° 31' 1,7"	2161
Gobernación PM_{10}	CORPOCALDAS	Gobernación, Manizales	2009	N 5° 4' 6.5"	W 75° 31' 1,7"	2161
Gobernación CO	CORPOCALDAS	Gobernación, Manizales	2014	N 5° 4' 6.5"	W 75° 31' 1,7"	2161
Gobernación SO_2	UN	Gobernación, Manizales	2014	N 5° 4' 6.5"	W 75° 31' 1,7"	2161
Gobernación O_3	UN	Gobernación, Manizales	2014	N 5° 4' 6.5"	W 75° 31' 1,7"	2161
UN Palogrande PM_{10}	UN	UN sede Palogrande, Manizales	2009	N 5° 3' 22.4"	W 75° 29' 31.3"	2154
UN Nubia PM_{10}	UN	UN sede Nubia, Manizales	2009	N 5° 1' 47.0"	W 75° 28' 18"	2091
Liceo PM_{10}	CORPOCALDAS	Colegio Liceo Isabel la Católica, Manizales	2010	N 5° 4' 15,8"	W 75° 30' 51,7"	2156
Milán PM_{10}	CORPOCALDAS	Barrio Milán, Manizales	2012	N 5° 2' 58.57"	W 75° 29.2' 12"	2256
Liceo PST	CORPOCALDAS	Colegio Liceo Isabel la Católica, Manizales	2003	N 5° 4' 15,8"	W 75° 30' 51,7"	2156
Maltería PST	CORPOCALDAS	Sector industrial de Manizales	2003	N 5° 2' 31,4"	W 75° 25' 53,1"	2343

Contribuyendo al apoyo y fortalecimiento del sistema de vigilancia de calidad del aire, se ejecutaron tres campañas de monitoreo pasivo de los gases SO_2, O_3 y NO_X, con el fin de establecer una línea base de la distribución espacial y temporal de dichos contaminantes en el área urbana de Manizales, y parte de la zona rural de Villamaría, Caldas. Se analizó la variación espacial y temporal de las concentraciones de las tres especies monitoreadas, considerando la cercanía de fuentes de emisiones antropogénicas (fuentes móviles y fuentes fijas puntuales) y naturales (volcán Nevado del Ruíz), así como la variación de las condiciones meteorológicas entre campañas.

Al final del informe se presenta una sección de conclusiones y recomendaciones para la Corporación con base en el trabajo desarrollado y los resultados obtenidos. Estas recomendaciones están enfocadas hacia la revisión de información, y la continuidad de los estudios por ejemplo, una futura actualización de los inventarios de emisiones.

4. COMPONENTE INVENTARIO DE EMISIONES POR FUENTES MÓVILES

4.1. Presentación

La realización de inventarios de emisiones en los centros urbanos es uno de los componentes clave en la elaboración de estudios relacionados con la calidad del aire y la posterior conformación de Planes de Gestión de Calidad del Aire (MAVDT, 2009; 2010). Para el caso de la ciudad de Manizales, la elaboración de inventarios de emisión es un tema en el que se carece de estudios que permitan construir un inventario dinámico que sea útil para los sectores involucrados en toma de decisiones ambientales.

En términos de la cuantificación de emisiones provenientes de fuentes móviles, se destaca el estudio de Buitrago (2003) como uno de los mayores aportes que se han realizado en la ciudad. En este estudio se cuantificaron las emisiones de CO, HC y CO_2, de vehículos en la carrera 21 entre calles 17 y 28 (aplicando factores de emisión) para aplicar un modelo de dispersión gaussiano. Sin embargo, los estudios son escasos y no se ha realizado en la ciudad un inventario de emisiones que tenga en cuenta la totalidad del área urbana y que permita desagregar en tiempo y espacio las emisiones de contaminantes criterio y de efecto invernadero generadas por los diferentes tipos de vehículos que transitan diariamente en la ciudad.

Debido a la problemática que generan las emisiones vehiculares en los distintos centros urbanos, varios países desarrollados han generado complejos modelos de emisiones los cuales requieren gran cantidad de datos específicos de entrada. La adquisición de esta información es una tarea que demanda tiempo y recursos (humanos, económicos, logísticos), dificultando su implementación en ciudades de países en vías de desarrollo (Henríquez, 2007). Con el fin de generar una metodología con aplicación en los países en vías de desarrollo, el ISSRC (International Sustainable System Research Center) desarrolló el modelo IVE (International Vehicle Emissions). Éste es un modelo basado en lenguaje Java, capaz de estimar emisiones vehiculares para una determinada área, a partir de datos de entrada relacionados con la información sobre la tecnología vehicular, los patrones de conducción y factores de emisión específicos según el tipo de vehículo (Davis et al., 2005). El modelo se caracteriza por asignar un nivel de emisión según la potencia específica del motor, y no de acuerdo a parámetros únicos como la velocidad media. Esta característica genera una representación más real en geografías de montaña ya que el término potencia específica del motor (VSP por sus siglas en inglés) tiene en cuenta el producto de la velocidad por la aceleración equivalente, este último término función de la pendiente de la vía y la resistencia generada según el tipo de vehículo asociado al rodamiento y la aerodinámica (altura y área frontal del vehículo) (Jiménez-Palacios, 1999).

Tanto el modelo como la metodología IVE han sido aplicados con éxito en diferentes partes del mundo (Shanghái, Ciudad de México, Sao Paulo, entre otros), demostrando alta eficiencia en la estimación de emisiones vehiculares de centros urbanos. Para Colombia, se han obtenido resultados importantes en la ciudad de Bogotá (Giraldo et al., 2005; Rodríguez y Beherentz, 2009) y recientemente en zonas intermedias como es el caso de Envigado (Londoño et al., 2011).

El inventario de emisiones vehiculares realizado en el marco del Convenio 130-2014, fue estimado mediante la aplicación del modelo de emisiones IVE para la ciudad de Manizales. Es importante resaltar que el trabajo de campo llevado a cabo aplicando la metodología IVE, contó con el apoyo del Grupo de Calidad del Aire de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, liderado por el profesor Néstor Yesid Rojas R.

4.2. Metodología inventario de emisiones por fuentes móviles

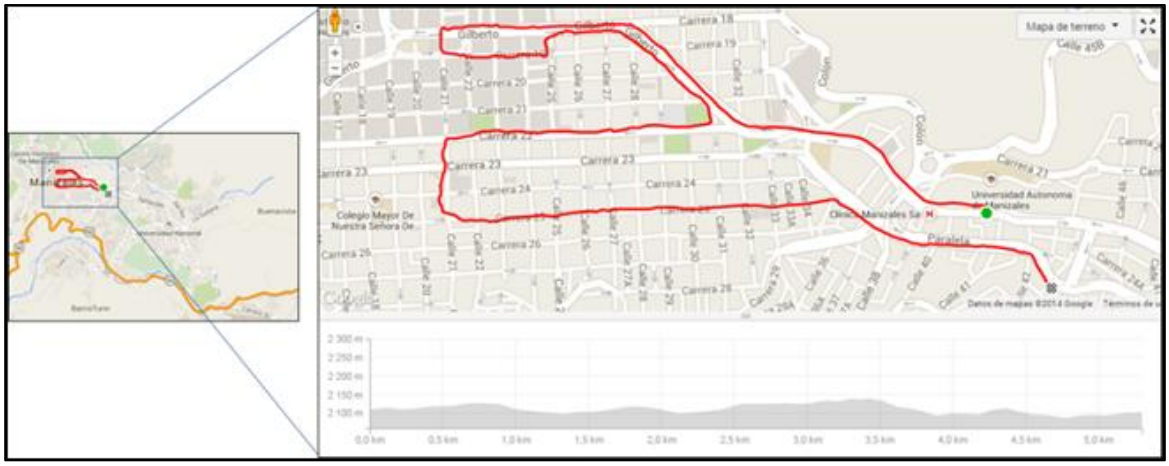
La metodología IVE permite reunir cuatro tipos de información que son utilizados posteriormente en el modelo de emisiones IVE (Henríquez, 2007):

- Patrones de conducción
- Composición dinámica de la flota vehicular
- Distribución de las tecnologías vehiculares
- Distribución de las partidas en frío del motor

Para la recolección de información asociada a los componentes de patrones de conducción se realizaron diferentes campañas de campo durante los días del 10 de noviembre al 6 de diciembre de 2014. El objetivo de dichas campañas fue obtener información de patrones de conducción (perfiles de velocidad) de diferentes categorías vehiculares: Automóvil (particular), taxi, moto, bus y vehículo pesado (caracterizado por un peso bruto vehicular superior a 4.1 toneladas). Además, las campañas de campo complementaron la información para determinar la composición dinámica de la flota vehicular, estimando los flujos vehiculares circulantes en cada zona establecida mediante cámaras de video. Los patrones de conducción obtenidos y los perfiles de flujos vehiculares, cuantificados hora a hora, son el insumo base para calcular tanto los flujos anuales de contaminantes emitidos por los vehículos, así como como los flujos horarios (desagregados en tiempo y espacio).

Jornadas de monitoreo en Manizales: Se dividió la ciudad en tres zonas de estudio (circuitos), cada circuito fue monitoreado durante tres días (dos días laborales y un sábado). En lo posible se incluyó dentro de los dos días laborales un recorrido el viernes, teniendo en cuenta que es un día que registra flujos vehiculares diferentes a los días laborales comprendidos entre lunes y jueves. Los circuitos seleccionados fueron:

- ***Circuito 1: Centro histórico*.** El circuito 1 (Figura 4.1a) se diseñó con el objetivo de estimar las condiciones asociadas al comportamiento vehicular en la zona del centro histórico. Se ubicaron dos puntos de filmación en el circuito descritos en la Figura 4.1b.



(a)

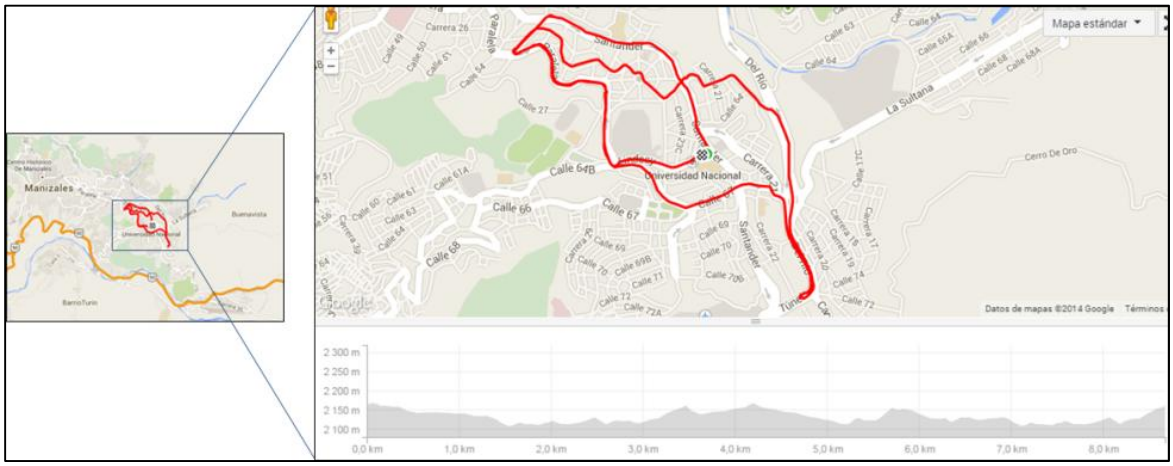
Punto C1-P1: Al frente de la entrada del Centro Comercial Parque Caldas (Se ubicó la cámara para filmación de los vehículos que circulan por la Cra. 22)

Punto C1-P2: Comando de Policía de Caldas (Se ubicó la cámara para filmación de los vehículos que circulan por la Cra. 25)

(b)

Figura 4.1. Circuito 1-Centro histórico. a) Vista detallada del recorrido. b) Puntos de filmación.

- ***Circuito 2: Manizales general.*** El circuito 2 (Figura 4.2a) se diseñó con el objetivo estimar las condiciones asociadas al comportamiento vehicular en el área urbana de Manizales asociado a vías que no hacen parte ni del centro histórico ni de la zona industrial. Se ubicaron dos puntos de filmación en el circuito descritos en la Figura 4.2b.



(a)

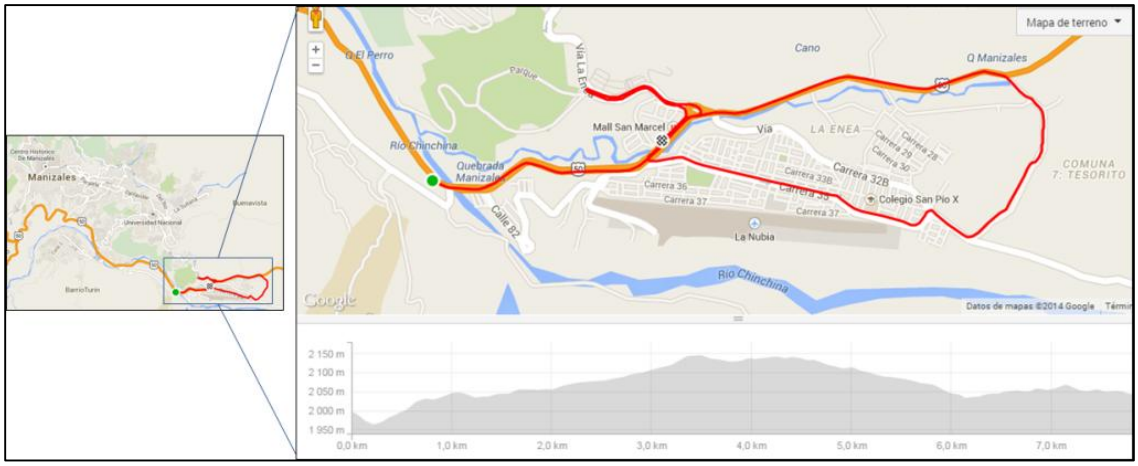
Punto C2-P1: UN-Manizales sede Palogrande. (Se ubicó la cámara para filmación de los vehículos que circulan por Av. Paralela)

Punto C2-P2: Al frente del CAI del edificio Cervantes. (Se ubicó la cámara para filmación de los vehículos que circulan por la Av. Santander)

(b)

Figura 4.2. Circuito 2 – Manizales General. a) Vista detallada del recorrido. b) Puntos de filmación.

- ***Circuito 3: Zona industrial.*** El circuito 3 (Figura 4.3a) se diseñó con el objetivo de estimar las condiciones asociadas al comportamiento vehicular en la zona industrial ubicada al oriente de la ciudad. Se ubicaron dos puntos de filmación en el circuito descritos en la Figura 4.3b.



(a)

Punto C3-P1: Entrada conjunto habitacional La Alhambra. (Se ubicó la cámara para filmación de los vehículos que circulan por Vía al Magdalena)

Punto C3-P2: Al frente del CAI de la Enea. (Se ubicó la cámara para filmación de los vehículos que circulan por la Av. Cumanday)

(b)

Figura 1.3. Circuito 3 – Zona industrial. a) Vista detallada del recorrido. b) Puntos de filmación.

Duración de cada jornada: Cada día de monitoreo tuvo una duración de 14 horas, iniciando a las 06:00 de la mañana. Las jornadas se realizaron de forma continua de 06:00 a 12:45 con descanso de 45 minutos (de 12:45 a 13:30), y continuando de 13:30 hasta las 22:00 horas (08:00pm).

Materiales y equipos necesarios:

- Vehículo de pasajeros (Figura 4.4): Formato para toma de datos, VAM, reloj, lapicero. En el vehículo estuvo el conductor y un acompañante quien registró los tiempos durante el recorrido.

Figura 4.4. Vehículo de pasajeros (particular) utilizado en la campaña de campo.

- Moto (Figura 4.5): Formato para toma de datos, VAM, reloj, lapicero, maletín para transporte de VAM. Un acompañante en la motocicleta fue el encargado de registrar los tiempos.

Figura 4.5. Vehículo tipo moto utilizado en la campaña de campo.

- Bus rider: Formato para toma de datos, VAM, reloj, lapicero, maletín para transporte de VAM.

- Equipo de filmación (Figura 4.6): Cámara, formato para toma de datos, reloj, lapicero. Dos personas por punto de filmación.

Figura 4.6. Ejemplo de jornada de filmación realizada durante la campaña de campo.

- Equipo para encuestas de campo: Formato para realización de encuestas, reloj, lapicero. Una persona en diferentes sectores de la ciudad realizando encuestas aleatorias a vehículos particulares, motos y buses.

4.2.1. Determinación de patrones de conducción

Para el seguimiento de patrones vehiculares, se utilizaron dispositivos GPS (Global Positioning Satellite) denominados VAM, los cuales fueron facilitados por parte del Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía y Protección del Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. Estos equipos fueron transportados en motocicletas, carros particulares, taxis, vehículos de carga (peso bruto vehicular entre 4.1 y 15 toneladas). Para vehículos pesados superiores a 15 toneladas se realizaron persecuciones con un vehículo particular que permitieran aproximar los patrones de conducción. En el caso de buses, integrantes del equipo de trabajo realizaron recorridos en diferentes buses en los circuitos delimitados, transportando los dispositivos en sus mochilas. Los dispositivos GPS reportan la posición del vehículo, su velocidad, aceleración y altitud cada segundo, además de otras variables de importancia en el análisis.

La información obtenida por medio de los dispositivos VAM fue depurada con los formatos de campo en los cuales se relacionan: horas en las que se cambia de tipo de vía, periodos de inactividad causados por trancones, fallas mecánicas, condiciones del clima, entre otros. La información recopilada junto con el análisis de los parámetros que definen la calidad de la información obtenida por el GPS, como son la señal de satélite (#sv) y la incertidumbre (hdop – Horizontal Dilution of Precision), fue la base para la depuración de los registros de patrones de conducción.

De los dispositivos VAM se obtiene información cada segundo de la posición geográfica (coordenadas), velocidad del vehículo, altitud (msnm), temperatura y presión barométrica. Debido a que el modelo IVE utiliza la metodología de Potencia Específica Vehicular (VSP – Vehicle Specific Power), esta información depurada debe ser analizada utilizando el software SpeedAnalysis para obtener los parámetros denominados bin de potencia, que son utilizados en el modelo de emisiones IVE.

Con la información depurada y analizada se creó una base de datos, la cual está dividida en tres partes correspondientes a los tres circuitos que se definieron para realizar las campañas de campo. Las características generales de la campaña de campo realizada para obtener los patrones de conducción se resumen en la Tabla 4.1. El Anexo 4.1 muestra los formatos de campo diseñados para la recolección de información de patrones de conducción.

Tabla 4.1. Características generales de campaña de campo para obtener patrones de conducción vehicular.

Tipo de Vehículo	Zonas o circuitos recorrido	No. de días de monitoreo	No. recorridos o rutas	Encargado o empresa de apoyo	Vehículos usados en los recorridos
Particular	Circuito1, 2 y 3	9 (3 días /circuito)	28 recorridos/circuito/día. 2 recorridos/hora.	Vehículo particular del grupo de trabajo	1 Vehículo /circuito/día. 9 vehículos particulares en total.

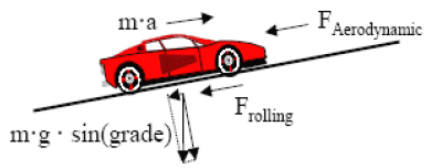
Tipo de Vehículo	Zonas o circuitos recorrido	No. de días de monitoreo	No. recorridos o rutas	Encargado o empresa de apoyo	Vehículos usados en los recorridos
Moto	Circuito1, 2 y 3	9 (3 días/circuito)	28 recorridos/circuito/día. 2 recorridos/hora.	Moto del grupo de trabajo	1 Vehículo /circuito/día. 9 motos en total.
Bus	Circuito1	3	52 rutas/circuito/día. 4 rutas/hora. (1 Bus/ruta)	Integrante grupo de trabajo (Bus rider)	52 Buses/circuito/día. 468 buses en total
	Circuito2	3	52 rutas/circuito/día. 4 rutas/hora.		52 Buses/circuito/día. 468 buses en total
	Circuito3	3	28 rutas/circuito/día. 2 rutas/hora.		28 Buses/circuito/día. 468 buses en total
Taxi	Zona urbana de Manizales	2	2 jornadas completas de 24 horas	Taxista particular	2 taxis en total
Pesado tipo liviano	Zona urbana de Manizales	3	3 jornadas de trabajo completas – Transporte de alimentos y mercancía	Envía. La Victoria. Normandy	3 Pesados tipo livianos en total
Pesado	Zona sur y occidental (sector industrial y terminal de transporte)	1	Persecución aleatoria de pesados durante jornada de 12 horas	Vehículo particular del grupo de trabajo	13 Pesados perseguidos

Generalidades sobre la teoría de Potencia Específica Vehicular (VSP – Vehicle Specific Power):

La potencia específica vehicular se define como la energía requerida para desplazar un vehículo por unidad de peso en unidades de KW/Ton. La VSP tiene incluido en su desarrollo fenomenológico la resistencia a la rodadura, la resistencia del aire, la energía cinética para acelerar el vehículo y el efecto de la pendiente por la cual se desplaza el vehículo (Jiménez-Palacios, 1999).

La metodología de Potencia Especifica Vehicular permite estandarizar las emisiones obtenidas bajo diferentes patrones de conducción, llevándolos a un ciclo único en el cual es posible realizar una comparación de las emisiones. Esta metodología fue desarrollada y explicada en su totalidad por Luis Jiménez en su trabajo de tesis (Jiménez-Palacios, 1999). La VSP se ha considerado como un variable que permite una estimación realista de las emisiones vehiculares y es utilizada en el modelo IVE (ISSRC, 2008).

En la Figura 4.7, se observa de manera general los términos considerados por Jiménez-Palacios (1999) en la determinación del VSP. Se puede ver el efecto de la energía cinética, potencial, de rodadura, aerodinámica y la fricción interna del vehículo durante su trayectoria.



$$VSP = \frac{Power}{Mass} = \frac{\frac{d}{dt}(E_{Kinetic} + E_{Potential}) + F_{Rolling} \cdot v + F_{Aerodynamic} \cdot v + F_{internal\ friction} \cdot v}{m} =$$

$$\approx v \cdot a \cdot (1+\varepsilon_i) + g \cdot grade \cdot v + g \cdot C_R \cdot v + \frac{1}{2}\rho_a C_D \frac{A}{m}(v+v_w)^2 \cdot v + C_{if} \cdot v$$

Figura 4.7. Ecuación de VSP. Tomada de (Tolvett, 2009)

El modelo IVE organiza los VSP utilizando una segunda variable para mejorar la correlación entre las emisiones y las variables dinámicas denominadas “estrés” o “carga del motor” y se asocia con el estado en el que se encontraba sometido el motor en los últimos segundos. El modelo IVE clasifica los niveles energéticos teniendo en cuenta el VSP y el Stress en “bins”. Se pueden presentar 3 grupos de Stress y por cada uno de ellos 20 niveles de VSP, con lo cual se tienen 60 bins de potencia, (Araya Csaszar, 2008). Los bins de potencia representan distintos estados de exigencia del motor de la siguiente forma (Jiménez-Palacios, 1999):

- Los bin de potencia que se encuentran entre: 1-11, 21-31 y 41-51 representan el caso de potencia negativa. Ejemplo: cuando el vehículo desacelera o está en una calle en descenso.
- Los bin de potencia 12, 32 y 51 representan una situación de potencia nula, o muy baja. Ejemplo: estar pausado momentáneamente en un semáforo.
- Los bin de potencia restantes representan la situación en la cual el vehículo tiene una potencia positiva. Ejemplo: Conducir a velocidad uniforme, acelerar, estar ascendiendo en una calle.

Las ecuaciones 4.1 y 4.2 muestran cómo se obtienen la Potencia Específica Vehicular (VSP) y el estrés del motor (bin):

$$VSP = v[1.1a + 9.81\,(\tan^{-1}(\sin(pendiente))) + 0.132] + 0.000302v^3 \quad (4.1)$$

Donde:

$pendiente = (h_{t=0} - h_{t=-1})/v_{t=-1\ a\ 0\ segundos}$
$v = velocidad\ (m/s)$
$a = aceleración\ (m/s^2)$
$h = altitud\ (m)$

$$Estrés\ del\ Motor\ (sin\ unidades) = Índice\ RPM + (0.08\ ton/kW) * Potencia\ Prepromedio \quad (4.2)$$

Donde:

$$Potencia\ Prepromedio\ =\ Promedio(VSP_{t=-5seg\ a\ -25\ seg})\ (kW/ton)$$
$$Índice\ RPM = Velocidad_{t=0}/Divisor\ Velocidad\ (sin\ unidades)$$
$$Mínimo\ índice\ RPM\ =\ 0.9$$

Otro factor importante a tener en cuenta es la carga asociada a la VSP, para analizar este aspecto es útil la descripción presentada por Henríquez (2007):

- Una carga baja se asocia a condiciones en las cuales el vehículo transitaba con velocidades bajas, aceleración baja y una velocidad angular del motor baja (rpm del motor) durante los últimos 20 segundos de funcionamiento. Esta se presenta en los bins entre 0 y 20.
- Una carga alta se presenta cuando los vehículos transitan con velocidades altas, aceleraciones y velocidad angular del motor alta (rpm del motor) durante los últimos 20 segundos de funcionamiento. Esta se asocia con el rango de bins comprendido entre 40 y 60.
- Una carga moderada ocurre con condiciones intermedias entre las descritas para carga baja y carga alta. Esta carga se observa con condiciones de bins entre 20 y 40.

4.2.2. Determinación de dinámica de la flota vehicular

El componente de dinámica de la flota vehicular se analizó a través de tres acciones:

- Los conteos realizados durante las campañas de campo en los tres circuitos definidos, en los cuales se realizaron conteos durante 3 días no consecutivos para cada uno de los 6 puntos distribuidos de la siguiente forma: un día aleatorio entre lunes y jueves, un día viernes y un día sábado. La Tabla 4.2 resume las características generales de la campaña de campo realizada para obtener la composición dinámica de la flota vehicular (conteos vehiculares).

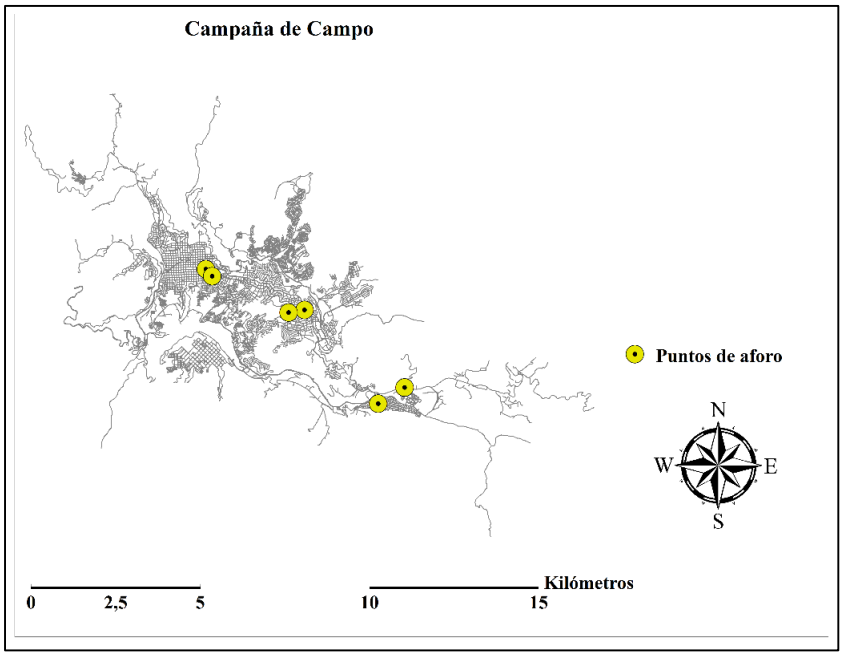
Tabla 4.2. Características generales de campaña de campo para obtener dinámica de la flota vehicular.

Circuito	No. días de filmación /circuito	Puntos de filmación	Filmaciones /circuito /día	Duración de cada filmación por punto (min)
Centro histórico (C1)	3	C1-P1: Carrera 22. C1-P2: Carrera 25.	24 2 filmaciones /hora	15
Manizales general (C2)	3	C2-P1: Av. Paralela. C2-P2: Av. Santander.	24 2 filmaciones /hora	15
Zona Industrial (C3)	3	C3-P1: Vía al Magdalena C3-P2: Av. Cumanday	24 2 filmaciones /hora	15

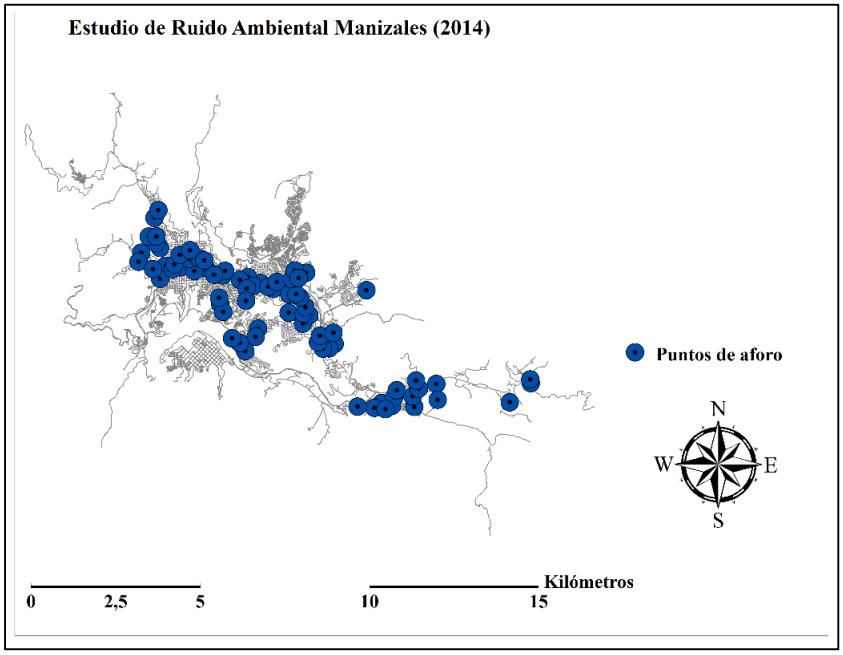
- El análisis de la información del estudio de Ruido Ambiental en la Ciudad de Manizales (CORPOCALDAS, 2014), realizado por CORPOCALDAS durante diciembre de 2013 y abril de 2014, en el cual se ejecutaron conteos vehiculares en las vías asociadas a cada punto de muestreo de emisión de ruido. En total, en el estudio de ruido se definieron 10 sectores distribuidos por toda la ciudad, cada uno de los cuales cuenta con 8 puntos de monitoreo y en cada punto se realizaron mediciones de 24 horas por dos días escogidos sin un patrón definido.
- El análisis de la información del documento Mediciones de Ruido Ambiental y Elaboración del Plan de Descontaminación por Ruido de Villamaría (CORPOCALDAS, 2015), realizado en

noviembre de 2015, en el cual se realizaron conteos vehiculares en las vías asociadas a cada punto de muestreo de emisión de ruido. En este estudio se ubicaron 19 puntos de monitoreo del cual se obtuvieron los consolidados diurnos y nocturnos.

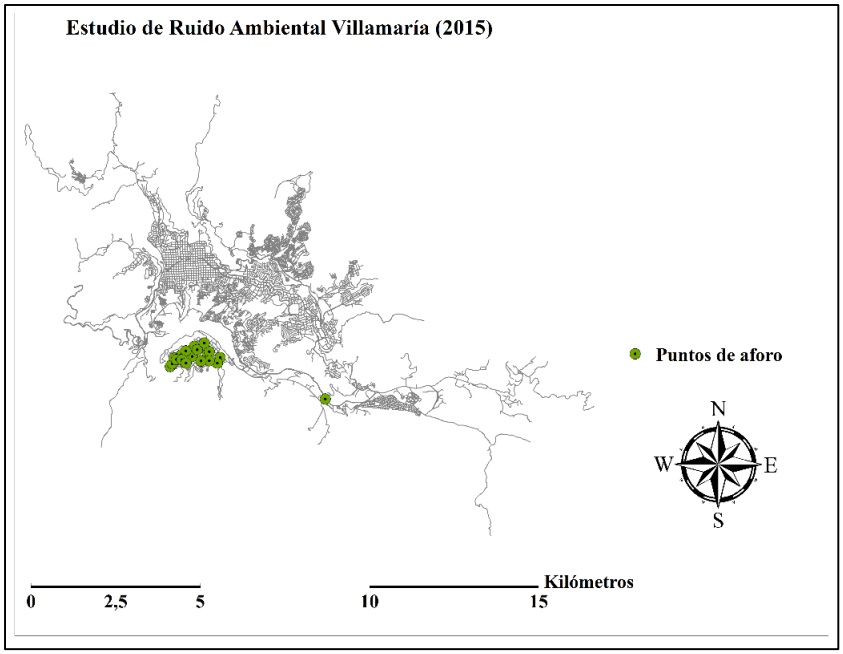
En la Figura 4.8 se muestra la ubicación de los puntos de conteo vehicular de la campaña de campo realizada en desarrollo del presente Convenio y de los estudios mencionados.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8. Ubicación de los puntos de conteo vehicular analizados. a) Campaña de campo Inventario Fuentes Móviles (CFM). b) Estudio de ruido ambiental de Manizales CORPOCALDAS (2014) (ERAM). c) Mediciones de Ruido Ambiental y Elaboración del Plan de Descontaminación por Ruido de Villamaría (2015) (ERAVM).

Debido a que los conteos realizados en las campañas de campo no se hicieron durante 24 horas, sólo durante 13 horas, la primera parte del análisis de las bases de datos consistió en encontrar los puntos de la campaña de fuentes móviles que coincidían con el estudio de ruido ambiental. Ya que en los conteos del estudio de ruido ambiental se estableció una categorización vehicular distinta y resumida con respecto a la establecida por la metodología de las campañas de campo (Tabla 4.3), a partir de los conteos de esta última se determinaron los porcentajes correspondientes a cada categoría vehicular y se llevaron los conteos del estudio de ruido a los mismos términos de los conteos de la campaña propia. En la Tabla 4.3 se muestra las categorías contabilizadas en cada estudio y como estas se encuentran agrupadas dentro de la categorización del estudio de ruido ambiental, el cual es el que tiene el menor número de categorías.

Tabla 4.3. Categorías vehiculares agrupadas y analizadas para determinar la dinámica de la flota vehicular.

Tipo de estudio	Categorías vehiculares			
Estudio de Ruido Ambiental	***Autos***	***Motos***	***Livianos***	***Pesados***
Campaña Fuentes Móviles	Particular. Camioneta. Taxi. Van (Escolar y carga).	Moto.	Livianos 2 ejes. Buses	Pesado 2 ejes. Pesado 3 o más ejes.

Tipo de estudio	Categorías vehiculares			
Modelo IVE	PC (Particular). Taxi.	2w.	Truck (GVWR > 4.1 ton. & < 15 ton). Bus	Truck (GVWR > 15 ton)

PC: Particulares. 2w: Motos. Truck: Vehículos pesados.
GVWR: Peso bruto vehicular.

Obteniendo la distribución porcentual horaria para cada categoría vehicular, y haciendo una extrapolación lineal para encontrar el total de vehículos por categoría en un día de los conteos de la campaña de campo, se completó la información de las horas faltantes, incluyendo las horas intermedias faltantes.

Teniendo todos los conteos en 24 horas, el paso a seguir fue consolidar los conteos en las categorías vehiculares que se encuentran en el modelo IVE. Para esto se realizó una comparación de las fracciones de vehículos entre los distintos conteos vehiculares usados según el tipo de vía y los flujos vehiculares. Además, se definió una nueva fracción denominada "Residencial", para las vías terciarias residenciales por las que el flujo vehicular es bajo y no hay rutas de buses que transiten por allí.

Una vez se tuvieron los conteos consolidados y estandarizados en las categorías vehiculares del modelo IVE, el siguiente paso fue la identificación de los puntos de conteos que se encontraban cercanos sobre la misma vía y determinar su coeficiente de correlación para establecer su similitud. Los puntos con un coeficiente de correlación mayor al 80% fueron promediados entre sí para evitar sobreestimaciones al momento de realizar la sumatoria de vehículos por cada sector y fracción de la semana.

Fue así como se conformaron las bases de datos de actividad vehicular para alimentar el modelo IVE. El Anexo 4.2 corresponde a un libro de Excel llamado "Conteos vehiculares consolidados" donde se encuentra la base de datos de los conteos con la desagregación espaciotemporal planteada. En la hoja "Notas" de este libro, se encuentra la descripción detallada de la metodología utilizada para el procesamiento de la información.

4.2.3. Determinación de distribución tecnológica de la flota

Este componente de la metodología IVE se basa en la clasificación tecnológica del parque automotor de la ciudad. Se requiere conocer información específica de los vehículos que hacen parte de la flota vehicular en términos de: tipo y marca de vehículo, año modelo, kilometraje acumulado, peso bruto vehicular, tipo de combustible, cilindraje, tipo de motor (para el caso de motos 2 tiempos o 4 tiempos), entre otros.

Esta caracterización se realizó a partir del análisis de la información secundaria proporcionada por entidades como la Secretaría de Tránsito, CORPOCALDAS (información de los Centros de Diagnóstico Automotor (CDAs) de la ciudad entre los años 2010 y 2014), empresas de buses (Socobuses, Autolegal, Unitrans, Serviturismo), entre otros. Además, se obtuvo información primaria de vehículos de pasajeros, motos y taxis a través de la realización de encuestas aleatorias en la ciudad de Manizales. El Anexo 4.1 muestra el formato de encuesta utilizado para complementar información de particulares, motos y taxis.

La Tabla 4.4 resume las características y número de encuestas realizadas en el área urbana de Manizales para complementar la información de distribución tecnológica de la flota vehicular. El Anexo 4.1 muestra los formatos de encuesta utilizados para obtener información de patrones de partidas y distribución tecnológica.

Tabla 1.4. Características de encuestas realizadas en campo.

Componente	Sector encuestado	No. de encuestas realizadas	Zona aplicación de encuesta	Objetivo / Observaciones
Distribución tecnológica de la flota vehicular	Vehículos particulares	450	Área urbana de Manizales	Obtener datos de tecnologías vehiculares de vehículos con año modelo superior a 2012 (Que no se encuentran en registros de CDAs) Complementar información para cálculo de VKT (km recorridos por día)
	Motos	450		
	Taxis	30		Complementar información para cálculo de VKT (km recorridos /día /vehículo)
	Buses	Bases de datos de empresas de transporte	Empresa Socobuses Empresa Autolegal Empresa Serviturismo Empresa Unitrans	Obtener datos de tecnologías vehiculares. Complementar información para cálculo de VKT (km recorridos /día /vehículo).
TOTAL	**Vehíc. particulares Motos Taxis Buses**	**930 encuestas y bases de datos empresas servicio público**	**Área urbana de Manizales**	**Complementar resultados distribución tecnológica de la flota vehicular de Manizales. Obtener comportamiento de patrones de partidas en Manizales**

Con la información secundaria de los centros de diagnóstico automotor y la información recopilada en campo, se conformaron bases de datos (muestras aleatorias) para cada categoría vehicular objeto de análisis. Los registros de las bases de datos obtenidas fueron analizados complementando información clave en la definición de la distribución tecnológica como lo es: peso bruto vehicular, dispositivo control de mezcla aire/combustible, tecnología de control de emisiones por tubo de escape y tecnología de control de emisiones evaporativas.

La información se complementó utilizando como base el estudio de inventarios de emisión realizado por el área metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA, 2013), y el trabajo realizado por el Grupo de Investigación en Calidad del Aire de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá durante la realización del inventario de emisiones por fuentes móviles para la jurisdicción CAR en Cundinamarca. El Anexo 4.3 resume la información de soporte utilizada en el análisis para consolidar las bases de datos de tecnología vehicular utilizadas en el modelo IVE.

La Tabla 4.5 resume las características de las bases de datos conformadas, a partir de información secundaria y primaria, para la determinación de la distribución tecnológica de la flota vehicular de Manizales.

Tabla 2.5. Características de las bases de datos conformadas para la determinación de la distribución tecnológica de la flota vehicular de Manizales.

Categoría Vehicular (Notación en IVE)	Tamaño de la muestra analizada	Tipo de información que conforma la muestra
Vehículos particulares (PC)	2996 registros	Secundaria: CDAs Primaria: Encuestas campo
Motos (2w)	1027 registros	
Taxis (Taxi)	290 registros	
Buses (Bus)	678 registros	Secundaria: CDAs y bases de datos empresas de transporte
Pesados (Truck)	484 registros	Secundaria: CDAs
TOTAL	**5476 registros**	

Durante el proceso de análisis se determinó que hay información de suma importancia para futuras actualizaciones del inventario de emisión, la cual puede ser obtenida directamente de los CDAs, con previa solicitud formal por parte de la Autoridad Ambiental para que estos centros incluyan la información en las bases de datos que son entregadas a la Corporación. En la sección 7 se describe de forma detallada la información que se recomienda solicitar para futuros estudios.

4.2.4. Determinación de patrones de partidas

Esta actividad se basa en el conocimiento de los patrones de encendido de los vehículos (particulares y motos principalmente). La información base utilizada en la distribución de patrones de partidas se obtuvo del estudio de Giraldo et al. (2005) en desarrollo del inventario de emisiones por fuentes móviles en la ciudad del Bogotá, aplicando la metodología IVE. Con el fin de ajustar la información de partidas a condiciones locales, se realizaron 50 encuestas aleatorias en diferentes sectores de Manizales por periodos de una semana a vehículos tipo pasajeros y moto. El Anexo 4.1 muestra el formato de encuesta empleado en la determinación de partidas.

4.2.5. Procedimientos generales:

La Tabla resume los procedimientos llevados a cabo durante la campaña de monitoreo de fuentes móviles, explicando el objetivo de la actividad programada.

Tabla 4.6. Procedimientos generales para la campaña de campo del inventario de fuentes móviles de Manizales

Datos a recolectar	Método de recolección	Tipo de vehículo	Ejecutado por	Actividades
Patrones de conducción vehicular	Instrumentación con GPS (VAM)	Motocicleta	Vehículo particular del Grupo de Investigación	Realizar recorridos determinados previamente. El objetivo principal es simular las condiciones reales de las motocicletas

Datos a recolectar	Método de recolección	Tipo de vehículo	Ejecutado por	Actividades
				circulantes por las diferentes zonas de análisis. Diligenciar formato destinado para la captura de información en campo.
		Vehículo de Pasajeros	Vehículo particular del Grupo de Investigación	Realizar recorridos determinados previamente. El objetivo principal es simular las condiciones reales de los vehículos particulares circulantes por las diferentes zonas de análisis. Diligenciar formato destinado para la captura de información en campo
		Bus	Personal del grupo	Subir y bajar de buses de transportes público, abarcando la mayor cantidad de rutas posibles. Diligenciar el formato para la toma de datos, verificar que la VAM se encuentra encendida y en funcionamiento.
		Taxis	Taxista	Llevar la VAM durante el desarrollo de actividades diarias, diligenciar el formato de información que se entregará los días de campaña de campo. Entregar la VAM en la noche o al finalizar sus actividades diarias.
		Pesado livianos	Distribuidor dentro de la ciudad.	Contactar a empresas distribuidoras de productos dentro de los municipios seleccionados. Entregar la VAM al conductor para seguimiento de los recorridos habituales de los vehículos.
		Pesados	Persecución con vehículo particular del Grupo de Investigación	Llevar la VAM en un vehículo particular y realizar persecución aleatoria de vehículos pesados que transitan por la vía.
Distribución de Tecnología Vehicular	Información secundaria	Motocicleta	Personal del grupo	Realizar análisis de la información secundaria entregada por los CDAs, Sec. De Tránsito, CORPOCALDAS, empresas de transporte público. Realización de encuestas a vehículos particulares, motos y taxis.
		Vehículo de Pasajeros		
		Bus		
		Pesados		
Conteos vehiculares en zonas seleccionadas	- Grabación de video - Análisis de conteos estudio de ruido ambiental 2014	Todas las categorías	Equipo de filmación. Personal del grupo.	Realizar grabaciones durante 15 minutos de cada hora, en cada punto seleccionado. Ubicar la cámara de tal manera que capture la información de ambos sentidos de la vía. Realizar conteos de cada categoría que transitó por la vía. Recopilar y analizar conteos vehiculares del estudio de ruido ambiental 2014

4.2.6. Metodología para la desagregación temporal del inventario de emisiones por fuentes móviles

A partir de los conteos vehiculares obtenidos, se calculó la distribución porcentual horaria para cada categoría vehicular. Al modelo IVE se ingresa la cantidad de vehículos por categoría vehicular del parque automotor, los kilómetros recorridos en un día por un vehículo de cada categoría (actividad vehicular). Con esta información, se calculan los kilómetros recorridos en un día por toda la flota. El resultado del cálculo anterior y la distribución porcentual horaria de vehículos, son utilizadas para calcular los kilómetros recorridos por la flota en cada hora del día, en función de los cuales se encuentran los factores de emisión ajustados del modelo. De esta forma el modelo IVE permite calcular las emisiones totales de un día o las emisiones desagregadas temporalmente en escala horaria.

4.2.7. Metodología para desagregación espacial del inventario de emisiones por fuentes móviles

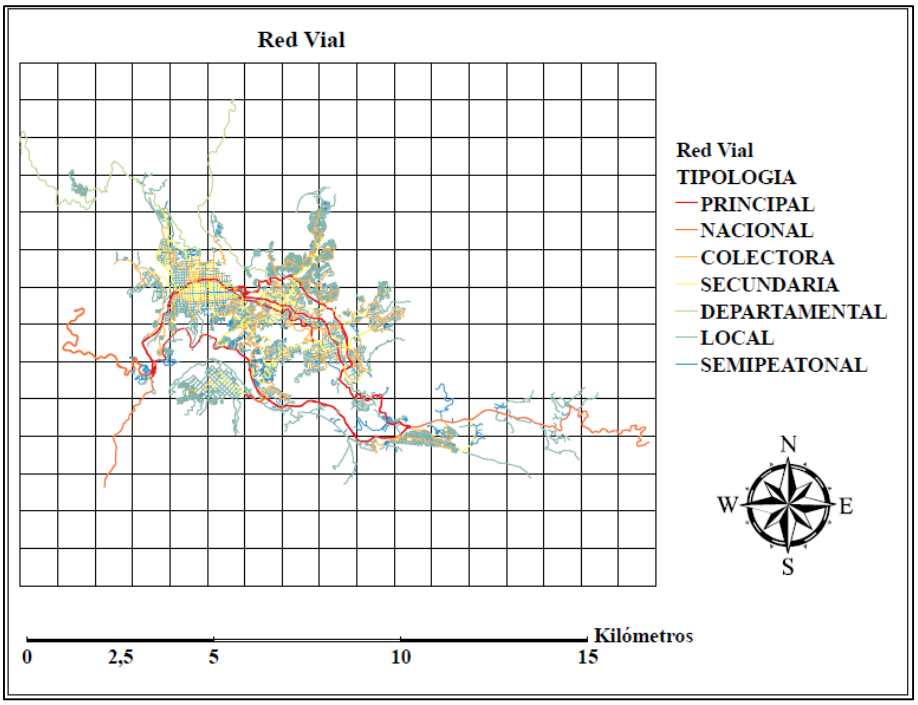
Para la distribución espacial de las emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero provenientes de fuentes móviles se utilizó inicialmente el mapa de la red vial de la ciudad de Manizales y el municipio de Villamaría para el año 2010. Este se obtuvo de la formulación del Plan de Movilidad para el Municipio de Manizales (UNAL, 2010), el cual fue desarrollado por el Grupo de Trabajo Académico en Vías, Transportes y Geotecnia. Posteriormente, el mapa fue actualizado para el año 2015 por el Grupo de Trabajo Académico Engineering, Energy and Education Policy - E3P. Este último fue el utilizado para realizar los cálculos en este proyecto. El mapa fue construido por “arcos” o segmentos de vía, y contiene información para cada uno de estos acerca de longitud, velocidad promedio, tiempo de viaje, pendiente media, entre otras. Además, cuenta con una clasificación vial definida a partir de su capacidad y administración. Esta clasificación fue homologada a la clasificación utilizada por el Modelo IVE, la cual se divide en tres tipos de vías: vías “Primarias”, categoría a la que pertenecen avenidas y autopistas, como las vías nacionales, vías “Secundarias”, en la cual se encuentran las vías que conectan la red vial principal con las zonas residenciales, y vías “Terciarias”, que corresponde a vías locales y semipeatonales. Esta homologación se encuentra descrita en la Tabla 4.7 y se representa en la Figura 4.9.

Tabla 4.7. Comparación entre la clasificación vial del mapa original y el usado en este trabajo.

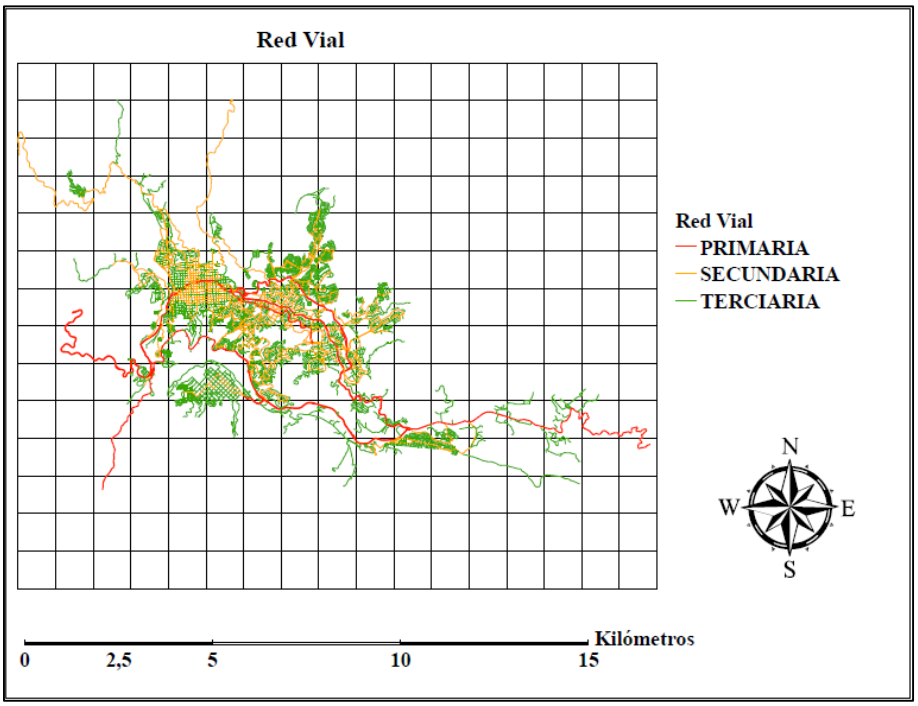
Clasificación Mapa Original	Clasificación Inventario Fuentes Móviles
Nacional	Primaria
Principal	
Departamental	Secundaria
Secundaria	
Colectora	
Local	Terciaria
Semipeatonal	

A partir de las emisiones totales anuales calculadas y la desagregación temporal para cada contaminante, se calculó la distribución espacial de las emisiones utilizando el software ArcGIS®. El área de estudio fue la zona urbana de la ciudad de Manizales y el municipio de Villamaría, en un dominio de 17kmx14km. El inventario de emisiones tuvo una resolución espacial de 1kmx1km. Esta resolución espacial es escogida con base en estudios similares (Clarke and Ko, 1996; Costa and Baldasano, 1996; Loibl et al., 1993; Tuia et al., 2007), es suficientemente alta para la localización de zonas críticas de contaminación (Clarke and Ko, 1996; Parra et al., 2006). Además, permite que el

inventario de emisiones sea utilizado como información de entrada en modelos de dispersión (Ossés de Eicker et al., 2008). Esta resolución se observa en la Figura 4.9. La resolución temporal fue definida en 1 hora, como se mencionó en la sección 4.2.6, la cual permitirá determinar las horas pico de emisión, factor importante en el análisis de las fuentes móviles (Costa and Baldasano, 1996).



(a)



(b)

Figura 4.9. Dominio para estimación y desagregación del inventario de emisiones por fuentes móviles en Manizales. Se muestra Red vial de la zona urbana de Manizales y Villamaría y su clasificación. a) Clasificación original. b) Clasificación homologada.

La desagregación espacial del inventario de emisiones por fuentes móviles se realizó aplicando la ecuación 4.3.

$$E_{(i,j,t,k)} = E_{(i,j,t)} * FD_{(j,k)} \qquad (4.3)$$

Donde,

E: Emisión de contaminante (kg/h)
FD: Factor de Desagregación
i: Contaminante
j: Categoría vehicular
k: Identificación de la celda (FID)
t: Hora de la emisión

El cálculo del factor de desagregación se realizó mediante la metodología de clasificación de conteos vehiculares (CCV) propuesta por Saide et al (2009). Esta metodología fue utilizada para realizar la desagregación espacial de las emisiones vehiculares en la ciudad de Santiago de Chile, presentando los mejores resultados al ser comparados con los obtenidos por el Modelo de Cálculo de Emisiones Vehiculares (MODEM) (Saide et al., 2009). Además, fue aplicada en el inventario de emisiones por fuentes móviles realizado por Peñaloza (2010) para la ciudad de Bogotá, a partir de emisiones totales obtenidas por el modelo EMISSENS.

Usando esta metodología, se pueden obtener muy buenos resultados a partir de la información de conteos vehiculares y longitudes de arco. Esta fue seleccionada como metodología de referencia. Este método elimina la necesidad de un modelo de tráfico para obtener flujos vehiculares por cada arco de vía, en este caso se utilizan conteos vehiculares obtenidos en campo. Los flujos vehiculares obtenidos se clasifican en alto, medio y bajo, asignando un factor de clasificación a cada clase. Esta clasificación se realiza aplicando el método de optimización de cortes naturales (Jenks, 1963) que se explicará más adelante.

El factor de desagregación corresponde a la normalización de las características que están directamente relacionadas con las emisiones, en este caso el flujo vehicular y la longitud de las vías, en una escala de 0 a 1. Con la información de clasificación de flujo vehicular y longitud por arco, se calcula el factor de desagregación como se muestra en la ecuación 4.4.

$$FD_{j,k} = \frac{\sum_0^i f_{i,j,k} * l_{i,j}}{\sum_0^j \sum_0^i f_{i,j,k} * l_{i,j}} \qquad (4.4)$$

Donde,

FD: Factor de Desagregación
f: Factor de clasificación de flujo vehicular
l: Longitud de arco de vía (km)
i: Arco

j: Celda
k: Categoría vehicular

Para obtener las longitudes de cada arco, se tomó el mapa de la red vial Plan de Movilidad para el Municipio de Manizales (UNAL, 2010), con la información actualizada para el año 2015. Este mapa cuenta con más de 10500 arcos los cuales conforman la red vial de la ciudad de Manizales y el municipio de Villamaría. La información de longitudes de arco por tipo de vía se resume en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Información de arcos de vía.

Clasificación vial	Longitud total de arcos (km)	Número de arcos
Primaria	89.5	936
Secundaria	175.3	3056
Terciaria	385.1	6586
Total	649.8	10578

Para la clasificación de flujos vehiculares, se usaron los conteos vehiculares obtenidos en la campaña de campo realizada en este proyecto, y los suministrados por CORPOCALDAS provenientes de los estudios de ruido ambiental para Manizales (2014) y Villamaría (2015). Estos conteos fueron depurados, como se mostró en la sección 4.2.2, y geolocalizados usando el software ArcGIS®, obteniendo finalmente 81 puntos de aforo vehicular, de los 120 que se tenían inicialmente. La depuración se basó en la representatividad de los sectores y la cercanía con puntos de aforo de otros estudios. Estos se catalogaron según el tipo de vía (primaria, secundaria y terciaria) para los análisis posteriores como se muestra en la Figura 4.10.

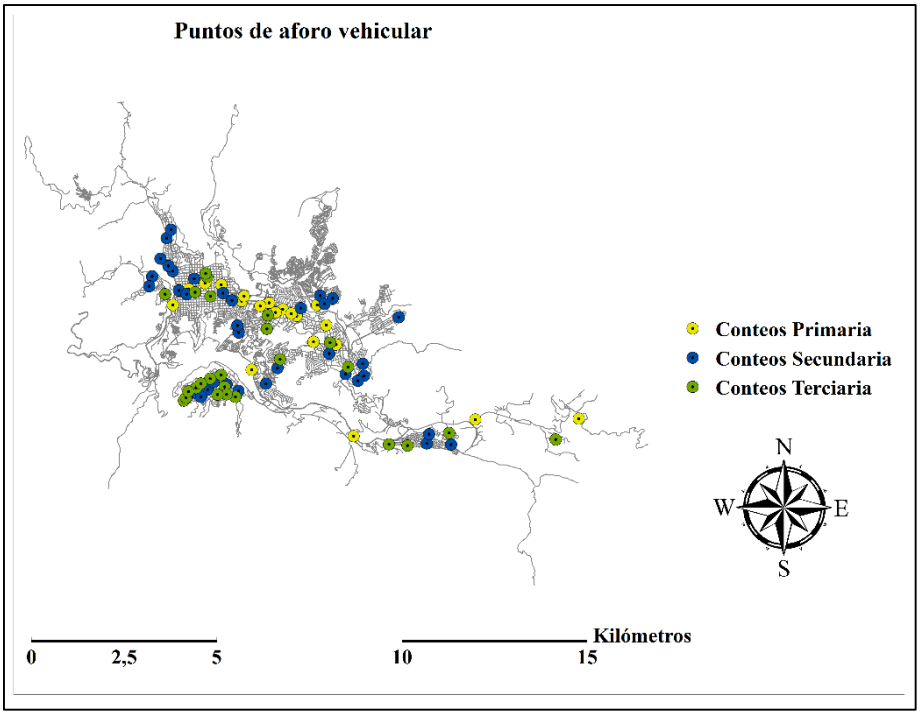


Figura 4.10. Puntos de conteo vehicular utilizados en la desagregación espacial del inventario de emisiones.

Los Polígonos de Thiessen se utilizaron para asignar un valor de flujo vehicular a los arcos que no disponían de esta información (Peñaloza, 2010). Los polígonos permiten encontrar las zonas más cercanas a cada punto, por lo cual se asume que estas zonas tendrán características viales y de flujo vehicular similares. Este es un método de interpolación simple que se crea al unir los puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designan su área de influencia. Al área cubierta por cada polígono se le asignó el flujo vehicular del punto de aforo que sirvió para generar dicho polígono.

Los resultados del Modelo IVE se obtienen por tipo de vía para las categorías vehículos particulares y motos, por lo tanto, se construyeron Polígonos de Thiessen para los conteos vehiculares de estas dos categorías por cada tipo de vía. En la Figura 4.11 se muestran los polígonos creados para vehículos particulares y motocicletas que transitan por vías primarias. Para las categorías taxis y pesados, se utilizó la red vial sin clasificar. Para la categoría buses se entrega un resultado total, similar al de taxis y pesados. Sin embargo, en este proyecto se estudiaron los buses de servicio público, los cuales transitan por vías específicas de la ciudad, como se muestra en la Figura 4.12. Los Polígonos de Thiessen para las demás categorías vehiculares y tipos de vías se encuentran en el Anexo 4.4.

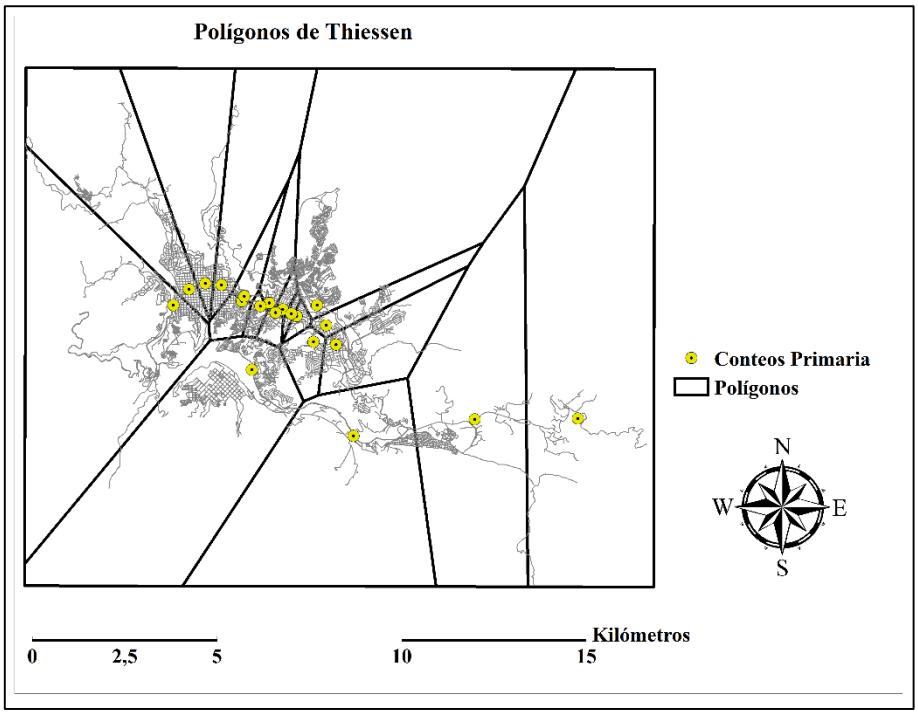


Figura 4.11. Polígonos de Thiessen construidos a partir de los puntos de conteo vehicular ubicados sobre vías primarias.

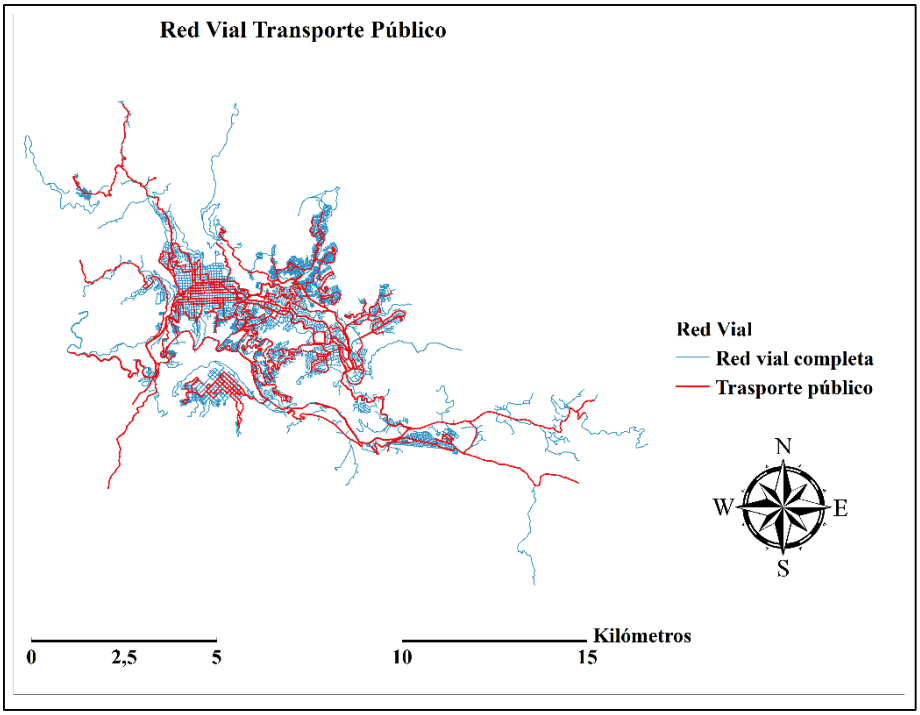


Figura 4.12. Red vial para el tránsito de buses de servicio público en la ciudad de Manizales.

La información de flujo vehicular, de cada arco para cada categoría vehicular, se clasificó en tres intervalos correspondientes a flujos altos, medios y bajos. Esta clasificación permite reducir el error de escala al asignar conteos de un arco con alto flujo vehicular a arcos de zonas con menor tráfico vehicular. Los intervalos de flujo vehicular de cada clase se encontraron aplicando el método de optimización de cortes naturales (Jenks, 1963). Para obtener los intervalos se usó la función "getJenksBreaks" de la librería "BAMMtools" perteneciente al software estadístico R. Este es un método de agrupamiento de datos diseñado para determinar el mejor arreglo de valores en diferentes clases. El método busca reducir la varianza de los datos de cada clase aumentando la varianza entre clases. Para cada clase se calculó el valor promedio de los datos que se encontraban dentro del intervalo definido por los cortes naturales. El factor de clasificación corresponde al valor promedio de cada clase, normalizado por el valor promedio de la clase "Bajo". Este valor se redondeó al entero más cercano. En este sentido, la clase "Bajo" siempre tendrá un valor de 1. La clasificación obtenida para cada categoría vehicular se encuentra descrita en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Clasificación de conteos vehiculares

Categoría vehicular	Intervalos de flujo vehicular por clase (veh./día)			Factor de clasificación	Clase (Flujo vehicular)
	Mínimo	Máximo	Promedio		
PC-P	827	10295	5016	1	Bajo
	10295	24519	17012	3	Medio
	24519	38029	38029	8	Alto
PC-S	464	5054	2295	1	Bajo
	5054	10376	8614	4	Medio
	10376	19294	15159	7	Alto
PC-T	156	3729	1822	1	Bajo
	3729	13197	13197	7	Medio

Categoría vehicular	Intervalos de flujo vehicular por clase (veh./día)			Factor de clasificación	Clase (Flujo vehicular)
	Mínimo	Máximo	Promedio		
	13197	25655	25655	14	Alto
2w-P	492	3818	2350	1	Bajo
	3818	7668	5980	3	Medio
	7668	14606	11286	5	Alto
2w-S	357	3636	1572	1	Bajo
	3636	7033	5730	4	Medio
	7033	12944	9455	6	Alto
2w-T	170	1338	819	1	Bajo
	1338	3656	2718	3	Medio
	3656	10578	10297	13	Alto
Taxi	34	3366	1054	1	Bajo
	3366	7110	6277	6	Medio
	7110	25655	9445	9	Alto
Bus	31	1534	145	1	Bajo
	1534	4045	401	3	Medio
	4045	8817	858	6	Alto
Pesados	19	226	499	1	Bajo
	226	562	3087	6	Medio
	562	1508	5843	12	Alto

PC: Passenger cars (Vehículos particulares). 2w: Two wheeled vehicles (Motocicletas). P: Vías primarias. S: Vías secundarias. T: Vías terciarias.

4.2.8. Metodologías alternativas aplicadas al inventario de emisiones

La metodología de clasificación de conteos vehiculares (CCV) pudo ser aplicada gracias a la gran cantidad de información de conteos vehiculares y la información de la red vial. Sin embargo, además de requerir gran cantidad de información, esta metodología demanda mucho tiempo de cálculo. A continuación, se presentan metodologías alternativas para la distribución espacial de las emisiones. Estas metodologías requieren menos información y demandan menos tiempo de cálculo, presentando una herramienta eficiente para la distribución de las emisiones en áreas donde no haya información de conteos disponible, o en caso de requerir una actualización rápida del inventario de emisiones. En la Tabla 4.10 se resumen las principales características de la metodología de referencia (CCV) y las metodologías alternativas propuestas.

Clasificación de conteos vehiculares (CCVT)

En el inventario de referencia, la clasificación de conteos vehiculares se aplicó a cada categoría vehicular y tipo de vía (CCV). En la metodología alternativa propuesta, denominada clasificación de conteos vehiculares totales (CCVT), no se tuvieron en cuenta las categorías vehiculares ni los tipos de vía. En lugar de esto, se sumaron los conteos vehiculares de todas las categorías vehiculares y se construyeron Polígonos de Thiessen para todos los puntos de aforo sin tener en cuenta el tipo de vía en donde se encontraban ubicados, como se muestra en la Figura 4.13. La clasificación de los conteos vehiculares resultantes se muestra en la Tabla 4.10. Se aplicó la ecuación 4.5 para calcular el factor de desagregación.

$$FD_j = \frac{\sum_0^i f_{i,j} * l_{i,j}}{\sum_0^j \sum_0^i f_{i,j} * l_{i,j}} \qquad (4.5)$$

Donde,

FD: Factor de Desagregación
f: Factor de clasificación de flujo vehicular
l: Longitud de arco de vía (km)
i: Arco
j: Celda

Tabla 4.10. Clasificación de conteos vehiculares

Categoría vehicular	Intervalos de flujo vehicular por clase (veh./día)			Factor de clasificación	Clase (Flujo vehicular)
	Mínimo	Máximo	Promedio		
Total	640	14553	5314	1	Bajo
	14553	36436	26675	5	Medio
	36436	77466	46563	9	Alto

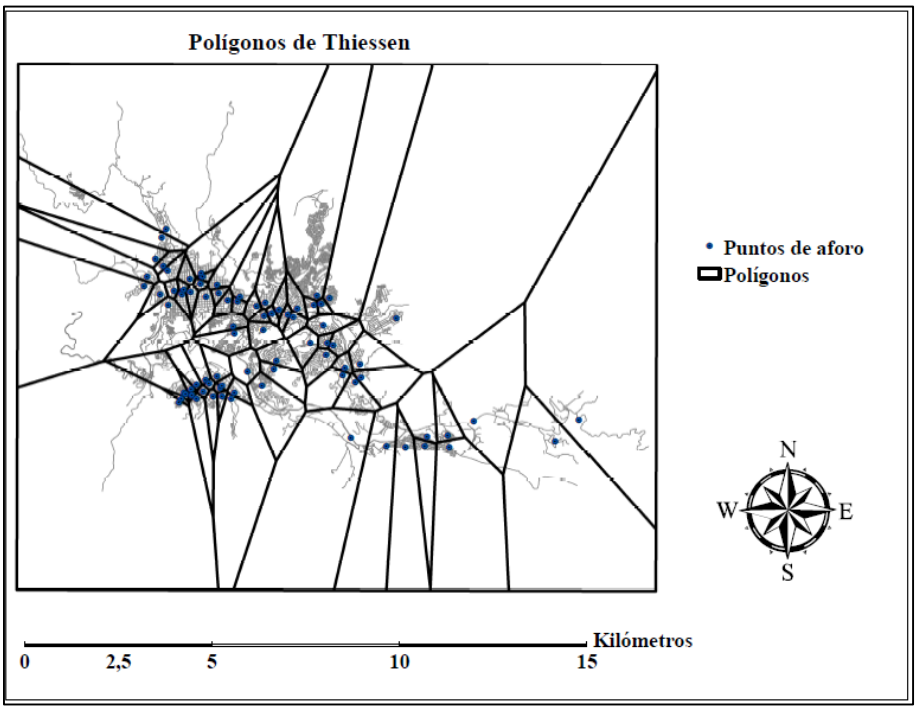


Figura 4.13. Polígonos de Thiessen construidos para la metodología de clasificación de conteos vehiculares totales (CCVT).

Conteos vehiculares (CV y CVT)

De manera similar al inventario de referencia, se utilizaron los conteos vehiculares por cada categoría y tipo de vía (CV). Del mismo modo, los Polígonos de Thiessen se utilizaron para asignar el valor del conteo vehicular de cada punto de aforo a los arcos de vía cubiertos por cada polígono. Para calcular el factor de desagregación se utilizó la ecuación 4.6, la cual es una adaptación de la ecuación 4.4. Se aplicó una segunda metodología utilizando conteos vehiculares totales (CVT), sumando los conteos vehiculares de todas las categorías para cada punto de aforo. Se construyeron Polígonos de Thiessen para todos los puntos de aforo sin tener en cuenta el tipo de vía en donde se encontraban ubicados,

como se muestra en la Figura 4.13. Esta metodología es similar a la metodología de clasificación de conteos vehiculares totales (CCVT). Se calculó el factor de desagregación con la ecuación 4.7.

$$FD_{j,k} = \frac{\sum_0^i F_{i,j,k} * l_{i,j}}{\sum_0^j \sum_0^i F_{i,j,k} * l_{i,j}} \qquad (4.6) \qquad FD_j = \frac{\sum_0^i F_{i,j} * l_{i,j}}{\sum_0^j \sum_0^i F_{i,j} * l_{i,j}} \qquad (4.7)$$

Donde,

FD: Factor de Desagregación
F: Flujo vehicular
l: Longitud de arco de vía (km)
i: Arco
j: Celda
k: Categoría vehicular

Densidad de vías (DVC y DVS)

La densidad de vías es la metodología de desagregación espacial más sencilla. En esta, sólo se utiliza la información de longitudes de arco de vía obtenidas del mapa de la red vial del año 2015 sin considerar conteos vehiculares (Ossés de Eicker et al., 2008). Para calcular el factor de desagregación se utilizó la ecuación 4.7. Esta metodología es muy útil cuando no se tiene información de flujos vehiculares, sin embargo, se ha reportado que, en ciudades intermedias, se subestiman las emisiones en los centros urbanos y zonas con mayor flujo vehicular y se sobreestiman las emisiones de las zonas industriales (Ossés de Eicker et al., 2008; Tuia et al., 2007). Se aplicaron dos aproximaciones diferentes. En la primera, se utilizó la densidad vial de la red completa construida para el año 2015 (DVC). En la otra, se utilizó una simplificación de la misma red (DVS), eliminando los arcos correspondientes a vías terciarias. Esto reduce el error en la distribución espacial. Aunque las vías terciarias representan el 62% de la longitud total de la red vial, sólo transita el 10% del tráfico de la ciudad.

$$FD_j = \frac{\sum_0^i l_{i,j}}{\sum_0^j \sum_0^i l_{i,j}} \qquad (4.7)$$

Donde,

FD: Factor de Desagregación
l: Longitud de arco de vía (km)
i: Arco
j: Celda

Tabla 4.10. Metodologías aplicadas al inventario de emisiones por fuentes móviles.

Metodología	ID	Características principales
Clasificación de conteos vehiculares (Referencia)	CCV	▪ Considera categorías vehiculares (PC, 2w, Taxis, Bus, Pesados) ▪ Considera tipos de vía (primaria, secundaria, terciaria)

		▪ Conteos vehiculares por categoría clasificados (alto, medio, bajo) ▪ Longitudes de arco
Clasificación de conteos vehiculares totales	CCVT	▪ No considera categorías vehiculares ▪ No considera tipos de vía ▪ Conteos vehiculares totales clasificados ▪ Longitudes de arco
Conteos vehiculares	CV	▪ Considera categorías vehiculares ▪ Considera tipos de vía ▪ Conteos vehiculares por categoría sin clasificar ▪ Longitudes de arco
Conteos vehiculares totales	CVT	▪ No considera categorías vehiculares ▪ No considera tipos de vía ▪ Conteos vehiculares totales sin clasificar ▪ Longitudes de arco
Densidad de vías (Red vial completa)	DVC	▪ No considera categorías vehiculares ▪ No considera tipos de vía ▪ No considera conteos vehiculares ▪ Longitudes de arco
Densidad de vías (Red vial simplificada)	DVS	▪ No considera categorías vehiculares ▪ No considera tipos de vía ▪ No considera conteos vehiculares ▪ Longitudes de arco sin considerar arcos de vías terciarias

4.2.9. Metodologías para la comparación de inventarios de emisiones distribuidos espacialmente

Para comparar los resultados de las metodologías alternativas de distribución espacial con los resultados obtenidos por la metodología de referencia, se utilizaron tres metodologías de comparación de inventarios de emisiones distribuidos espacialmente, propuestos por Winiwarter et al. (2003).

Diagramas de dispersión y coeficiente de determinación

En esta metodología se comparan los valores por celda de factores de desagregación de cada metodología alternativa con los valores obtenidos con la metodología de referencia. Con estos datos se construye un diagrama de dispersión donde la metodología de referencia es la variable independiente y se grafica en el eje *x*. Adicionalmente, se grafica la regresión lineal y se incluye el coeficiente de determinación (R^2). Con esta metodología se establece la diferencia estadística de las dos series de datos.

Mapas de factores de desagregación y de diferencias

En esta metodología se construyen mapas con los factores de desagregación de cada metodología de distribución espacial en una escala de color que permita identificar los puntos críticos y las zonas de alta emisión. Estos mapas se comparan con el mapa de la metodología de referencia, restando los valores de cada celda correspondiente con el fin de encontrar similitudes, subestimaciones o sobreestimaciones de las metodologías alternativas. Como resultado, se genera un segundo mapa con una escala de color donde se indica cuando la resta fue negativa (sobreestimación) y cuando positiva (subestimación). De este modo, se puede hacer una verificación visual de los resultados.

Exploración de series de datos

El objetivo de esta metodología es representar visualmente los factores de emisión por una magnitud escalable en lugar de una escala de color, manteniendo la relación entre las celdas vecinas. En este sentido, se toman los valores de cada fila del dominio y se crea una sola fila de datos con su celda correspondiente. El primer dato corresponde a la esquina inferior izquierda del dominio y el último será la esquina superior derecha, esto es, de occidente a oriente, fila por fila desde el sur hasta el norte. Estos datos se grafican siendo el eje *x* el número de la celda y el eje *y* el valor del factor de desagregación. Estas gráficas permiten comparar de manera directa los patrones presentados en las zonas de máxima emisión (picos).

4.3. Resultados

4.3.1. Estimación de las emisiones totales anuales por fuentes móviles en la ciudad de Manizales año base 2014

La depuración y revisión completa de la información de soporte para el cálculo del inventario, tuvo como fin establecer de forma definitiva la línea base de emisiones totales anuales (ton/año) provenientes del parque automotor de la ciudad de Manizales para el año base 2014. Uno de los aspectos que requirió una revisión más rigurosa fue los análisis de conteos vehiculares, información que es crítica tanto para el cálculo de emisiones totales como para la desagregación espaciotemporal.

4.3.1.1. Contribución de la categoría vehicular a las emisiones totales

En la Tabla 4.11 se muestran los resultados consolidados obtenidos por el modelo IVE para las emisiones totales anuales de contaminantes criterio y gases efecto invernadero por categoría vehicular, año base 2014. La composición del parque automotor de la ciudad de Manizales para el año 2014 (Figura 4.14) se calculó a partir de la información suministrada por la Secretaría de Tránsito y Transporte de Manizales. Se aclara que la emisión reportada como material particulado (PM) hace referencia a material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 µm (PM_{10}).

Tabla 4.11. Resultados de emisiones totales anuales de contaminantes criterio y gases efecto invernadero por categoría vehicular.

Categoría	Parque automotor año 2014	Emisión de contaminante (ton/año)							
		CO	VOC	NO_X	SO_X	PM_{10}	CO_2	N_2O	CH_4
Vehículo de pasajeros (PC)	64090	15902	1340	1023	18	21	191902	6.6	881
Motos (2w)	60625	21542	7841	141	5.1	184	44208	0.1	1444
Taxi	2402	4470	144	249	1.2	6	48617	2.6	535
Bus	2367	755	177	2371	1.2	362	118930	0.9	0
Pesados (Truck)	2528	727	144	1107	0.5	192	50783	0.4	0
TOTAL	**132012**	**43396**	**9646**	**4890**	**26**	**765**	**454441**	**11**	**2860**

Como era de esperarse, las mayores emisiones en el grupo de contaminiantes criterio corrsponden al contaminante monóxido de carbono (CO) con 43396 ton/año, mientras que el grupo de GEI tiene

como principal contaminante al dióxido de carbono (CO_2) con una emisión de 454441 ton/año. Ambos contaminantes generados como subproducto en la quema de combustibles fósiles.

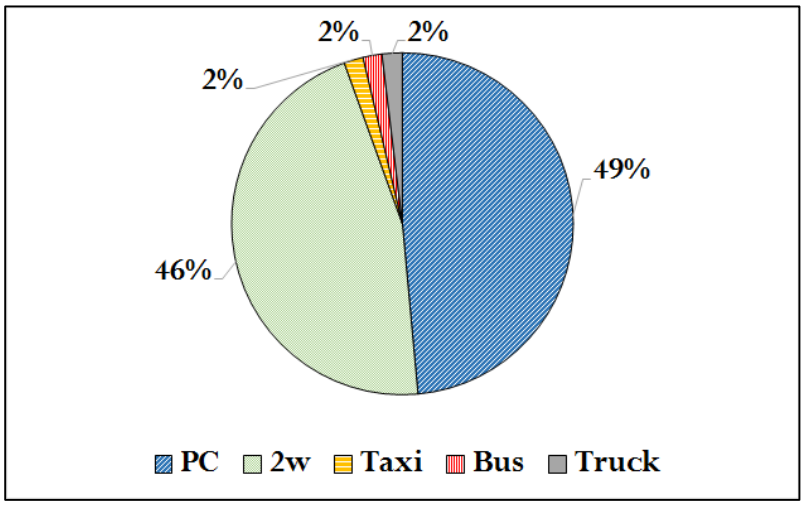


Figura 4.14. Distribución porcentual del parque automotor de Manizales año 2014.
PC: Vehículo de pasajeros - Automóvil; 2w: Moto; Truck: Vehículo pesado.
Fuente: Secretaría de Tránsito Manizales

En la Figura 4.15 y Figura 4.16 se muestra la contribución que tiene cada una de las categorías vehiculares a las emisiones de contaminantes criterio y gases efecto invernadero, respectivamente. Se puede observar que la categoría motos tiene el mayor aporte a las emisiones de CO y VOC (52% y 81%, respectivamente), seguida de la categoría vehículos de pasajeros - automóviles (37% y 14%, respectivamente). A pesar que los automóviles superan a las motos en cantidad de vehículos, las motos en su totalidad utilizan gasolina como combustible, mientras que en los automóviles se encuentran vehículos que utilizan una tecnología de reconversión a gas natural (8% de la flota) y diésel (6% de la flota), lo cual incide directamente en las emisiones de estos dos contaminantes. Además, en Manizales las motos con motores de tipo 2 tiempos tienen un alto porcentaje en la flota de motos (54%); tecnología caracterizada por una combustión con una eficiencia menor que los motores de 4 tiempos, y aumentando significativamente la contribución de la categoría motos a las emisiones de contaminantes criterio.

Las categorías que más contribuyen a las emisiones de NO_X son los buses y los vehículos pesados con una contribución del 48% y 23% respectivamente. El uso de diésel como combustible en la totalidad de la flota de buses es un factor importante en la emisión de NO_X.

Comportamiento similar al NO_X se observa en las emisiones de PM_{10}; donde los buses son los mayores contribuyentes con un 47% del total de las emisiones. Estos vehículos se caracterizan por el uso de diésel, por lo tanto, emiten una cantidad mucho mayor de este contaminante que los vehículos que utilizan gasolina y que poseen catalizador. La segunda categoría con mayor aporte a las emisiones de PM_{10} son los vehículos pesados y las motos con un 25% y 24% respectivamente. A pesar que las motos emplean gasolina, factores como las tecnologías de control de emisiones y un gran porcentaje de motos de tipo 2 tiempos (54% en la flota de motos) influyen en el aporte de esta categoría.

Las contribuciones de SO_X por categoría vehicular son directamente proporcionales a la cantidad de vehículos de la categoría y al uso de gasolina como combustible, como se muestra en la Figura 4.14, debido a que el contenido de azufre de este combustible en el país es mucho mayor al del diésel, 300 ppm frente a 50 ppm. Es así como los automóviles son la categoría de mayor contribución (69%), seguida de las motos (20%).

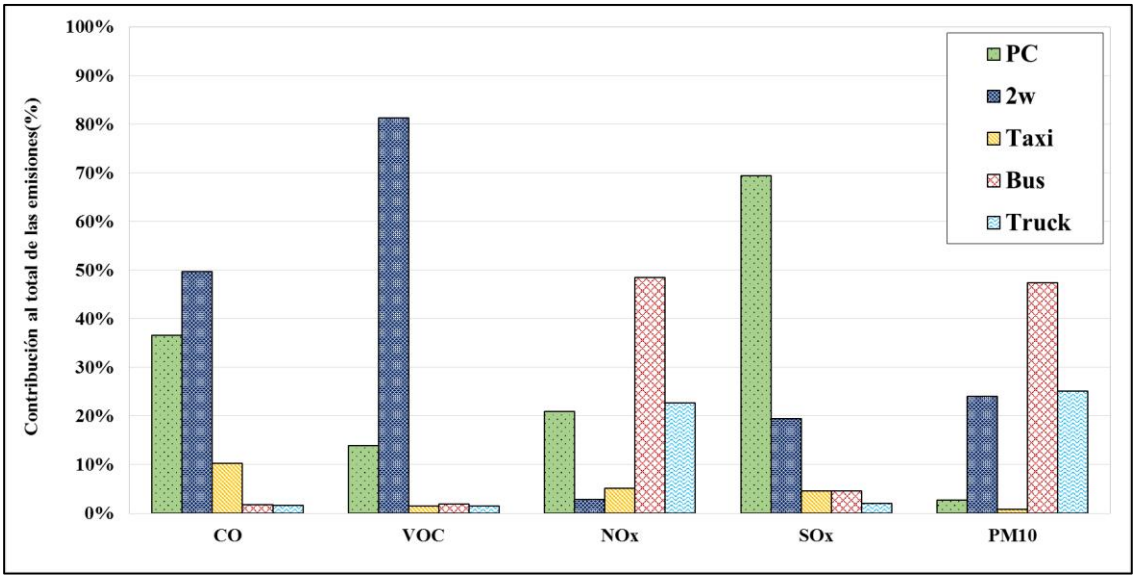


Figura 4.15. Porcentaje de contribución por categoría vehicular a las emisiones de contaminantes criterio.

Para el caso de emisiones de gases efecto invernadero, la Figura 4.16 muestra la contribución que tiene cada una de las categorías vehiculares a las emisiones. El dióxido de carbono es uno de los productos principales de la combustión, lo cual se ve reflejado en los altos flujos de emisión con respecto a los contaminantes criterio. La eficiencia en la combustión se ve reflejada en estos resultados. La categoría motos, la cual tiene el mayor aporte en las emisiones de CO debido a la baja eficiencia en la combustión de los motores de dos tiempos, tiene uno de los aportes más bajos en las emisiones de CO_2 siendo esta del 10%. Los automóviles particulares son la categoría con el mayor aporte a las emisiones de CO_2 con un 42%, seguida de la categoría bus con un 26%. Esta última, reportó las menores emisiones de CO, debido principalmente al menor número de vehículos en comparación con la flota de particulares, y al uso de motores diésel y su eficiencia en la combustión reflejada en menor emisión de CO.

El óxido nitroso es un subproducto de la reacción de reducción del óxido nítrico (NO) y la oxidación de monóxido de carbono/hidrocarburos sin quemar (CO/HC) sobre catalizadores de tres vías utilizados para reducir las emisiones de tubo de escape de los vehículos (Cant et al., 1998). Es así como los vehículos particulares y los taxis, categorías en las cuales se tienen vehículos con este tipo de sistemas de control, son las categorías con mayor aporte a las emisiones de óxido nitroso, siendo este del 62% y 25%, respectivamente.

Las emisiones de metano corresponden a emisiones evaporativas, siendo estas, parte de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles. Por lo tanto, las categorías vehiculares tendrán aportes similares

a las emisiones de VOC y CH_4. Sin embargo, se considera que en los vehículos con motores diésel, como es el caso de las categorías buses y vehículos pesados, sólo existen emisiones de compuestos orgánicos volátiles diferentes al metano. Es así como la categoría motos tiene el mayor aporte a las emisiones de metano, 50%, seguido de los vehículos particulares (automóviles) y los taxis, 31% y 19%, respectivamente.

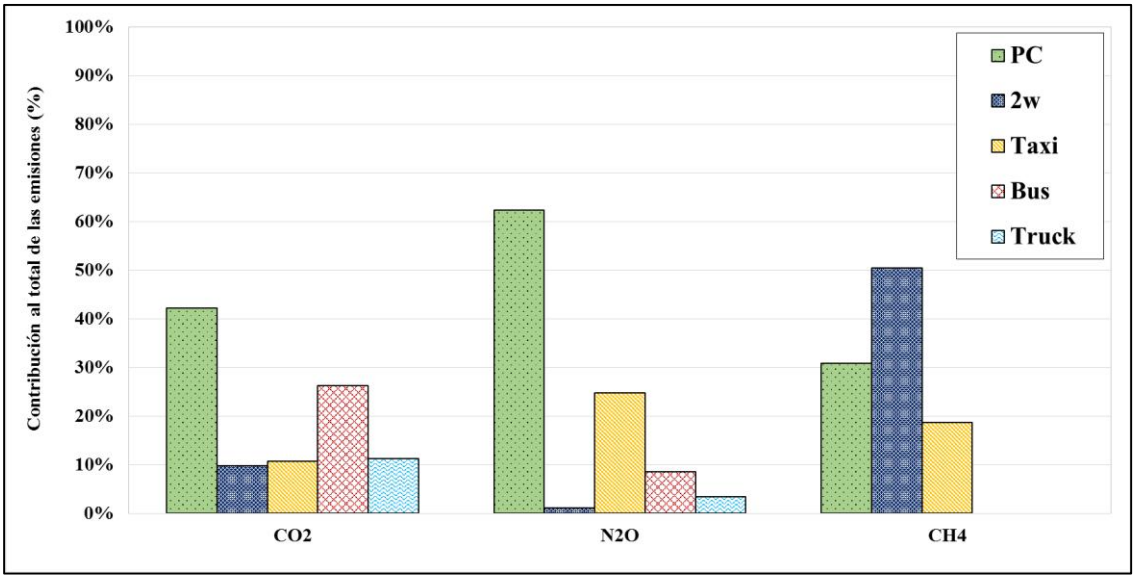
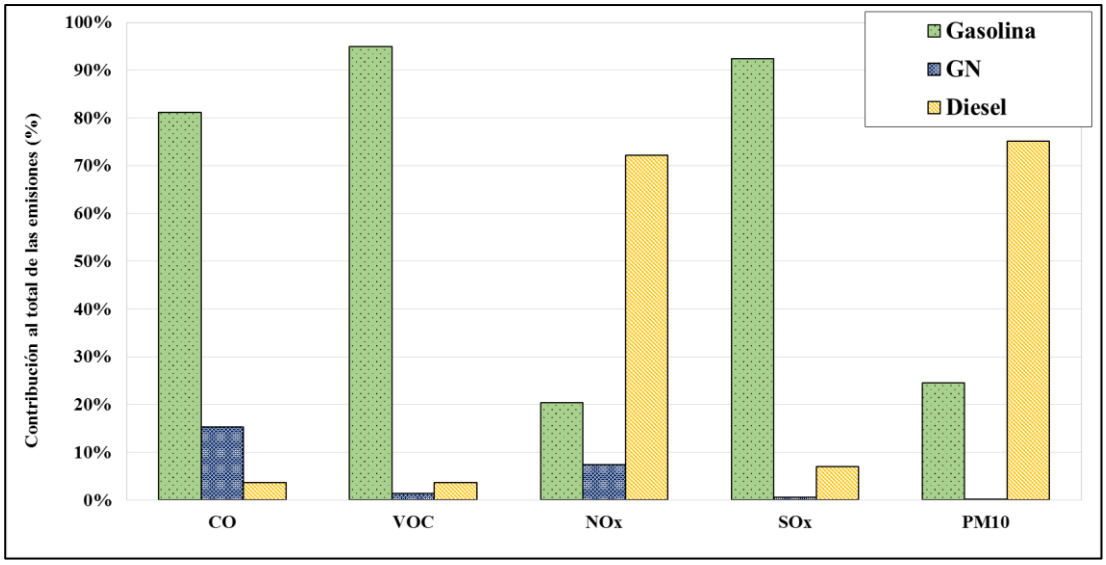


Figura 4.16. Porcentaje de contribución por categoría vehicular a las emisiones de gases de efecto invernadero.

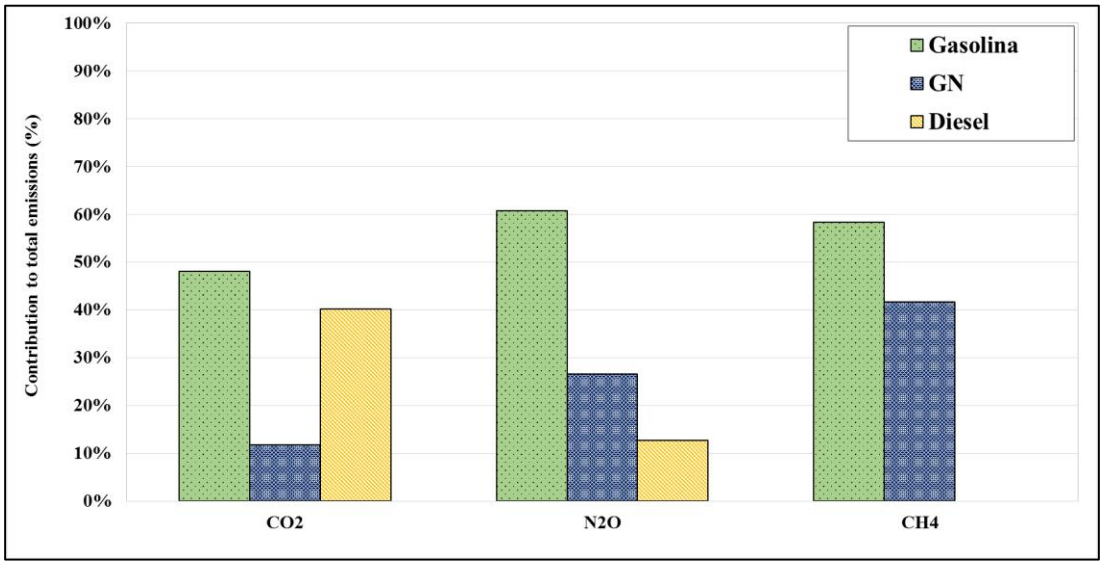
4.3.1.2. Contribución del tipo de combustible a las emisiones totales anuales

La contribución a las emisiones totales de contaminantes criterio según el tipo de combustible de la flota vehicular en Manizales se muestra en la Figura 4.17. En el grupo de contaminantes criterio (Figura 4.17a), se observa como vehículos a gasolina son los principales precursores de VOCs, SO_X y CO, mientras que los vehículos a diésel (en el caso principalmente de buses, pesados y 6% de la flota de particulares) son la principal fuente de PM_{10} y NO_X.

En el caso de contribución a las emisiones de gases efecto invernadero (Figura 4.17b), vehículos a gasolina predominan en la emisión de tres contaminantes estimados (CO_2, NO_2 y CH_4). Se destaca la contribución del gas natural con un 42% de las emisiones de CH_4 y un 27% en las emisiones de N_2O.



(a)



(b)

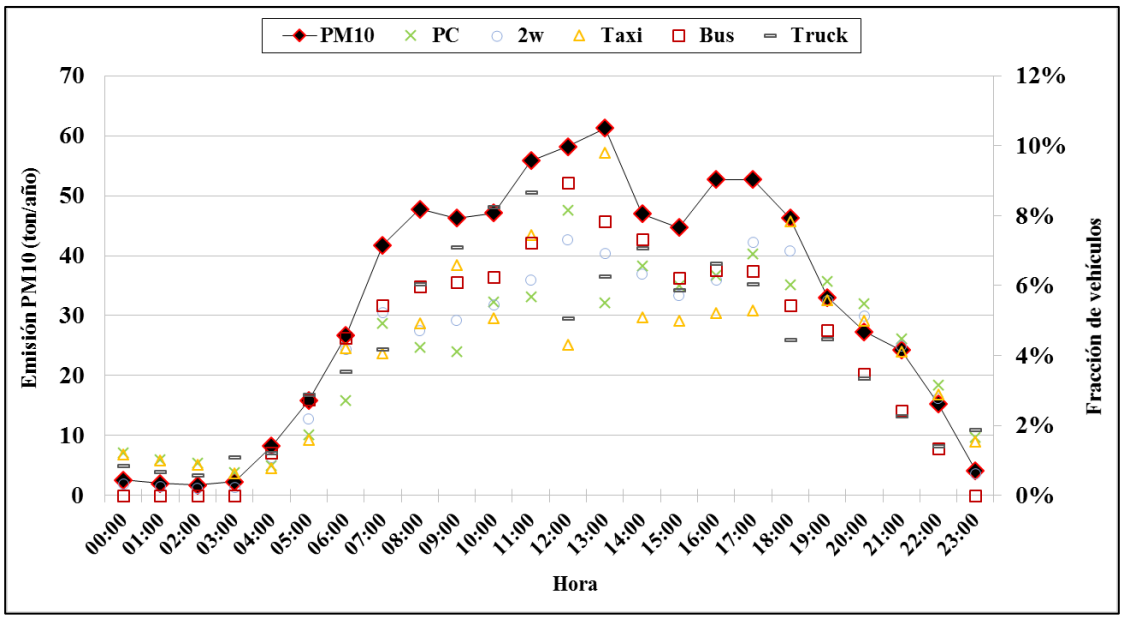
Figura 4.17. Porcentaje de contribución por tipo de combustible a las emisiones. a) Contaminantes criterio. b) Gases de efecto invernadero.

4.3.2. Desagregación temporal del inventario de emisiones

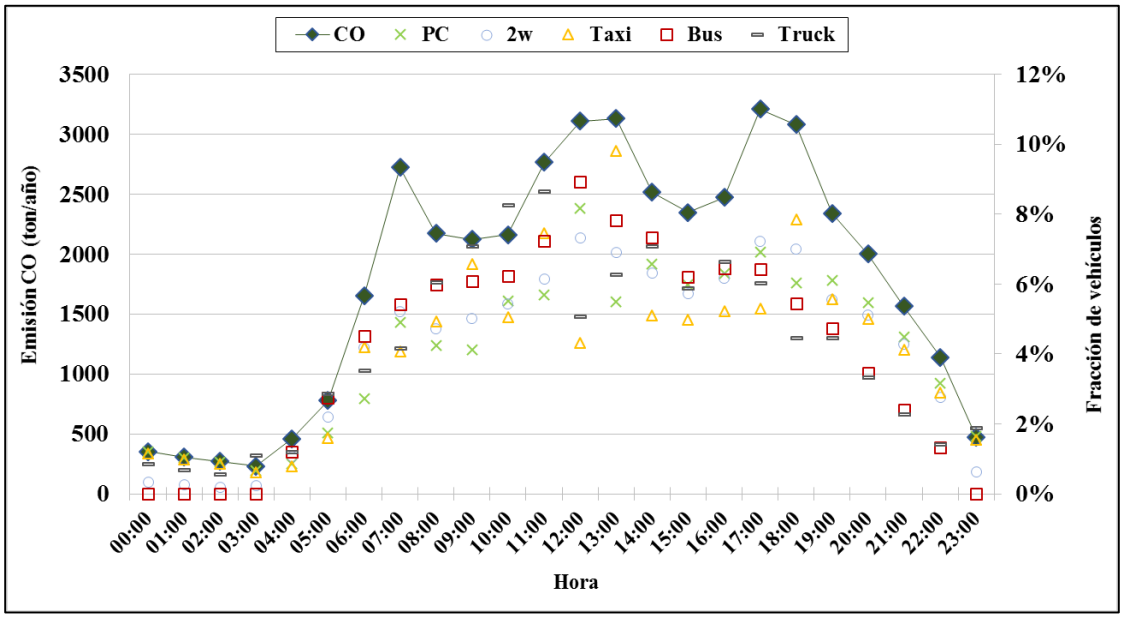
A partir de la distribución horaria de vehículos calculada para la ciudad de Manizales, se calculó con el modelo IVE la emisión horaria de contaminantes criterio y gases efecto invernadero. En la Figura 4.18 se presenta el comportamiento horario de las emisiones diarias de contaminantes criterio y su relación con la dinámica vehicular de las distintas categorías. Sólo se muestran algunos gráficos obtenidos para contaminantes criterio de importancia (PM_{10}, CO y VOC). Todos los gráficos obtenidos se encuentran en el Anexo 4.5.

Se puede observar una relación directa entre las emisiones horarias y la dinámica de la flota vehicular, teniendo ambas series las mismas horas pico. La primera hora de emisión importante se presenta entre las 07:00 y 8:00am, flujos asociados al incremento de vehículos por el comienzo de la jornada laboral

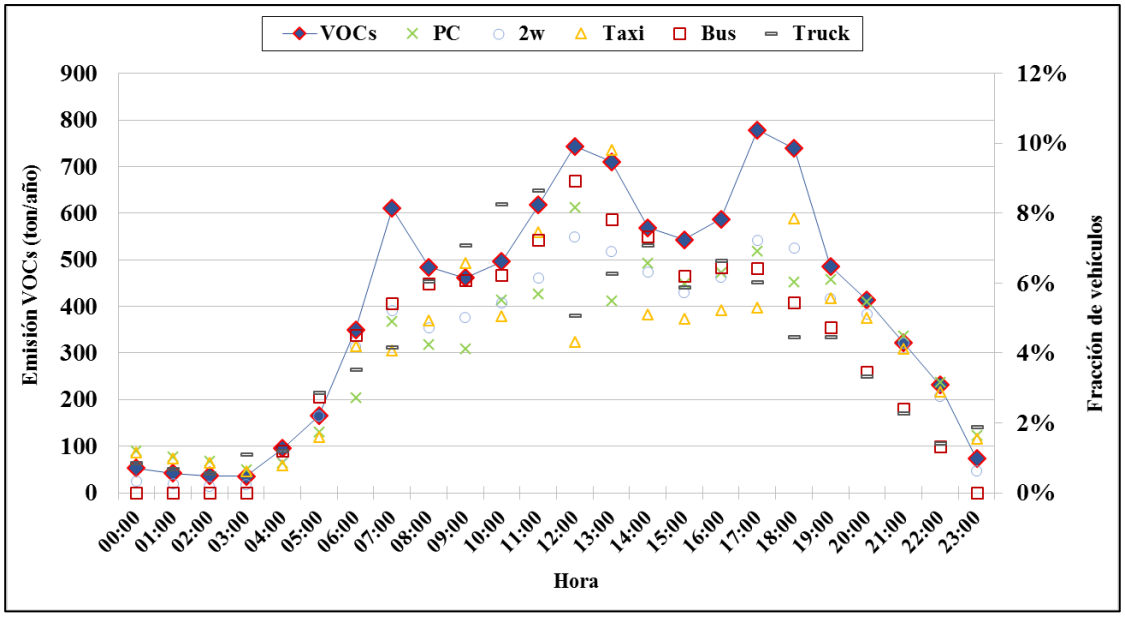
en Manizales. El siguiente periodo importante de emisión se presenta al medio día entre las 12:00 y las 13:00 horas y el último en horas de la tarde entre las 17:00 y las 18:00 horas. Estas horas pico son similares a los incrementos en flujo vehicular de las categorías vehículo particular, moto y taxi. En el caso de las categorías bus y vehículo pesado se tiene un comportamiento aproximadamente constante durante el día debido a que no responden a ningún tipo de demanda.



(a)



(b)



(c)

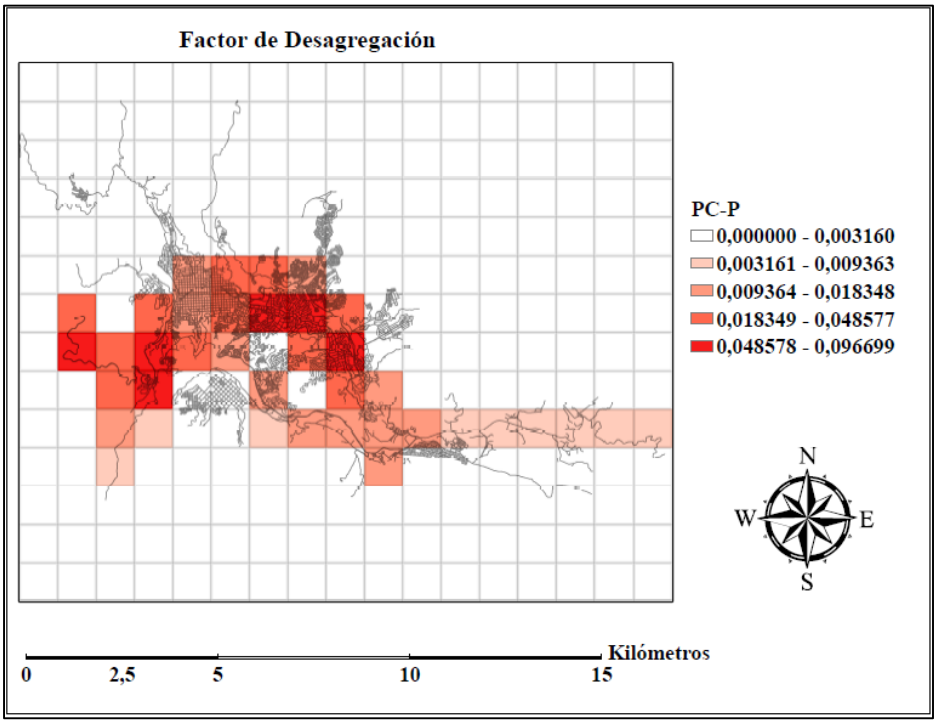
Figura 4.18. Distribución horaria de emisiones vehiculares (ton/año) y su relación con la fracción horaria de vehículos en Manizales. a) Emisión de PM_{10}. b) Emisión de CO. c) Emisión de VOC.

4.3.3. Desagregación espacial del inventario de emisiones

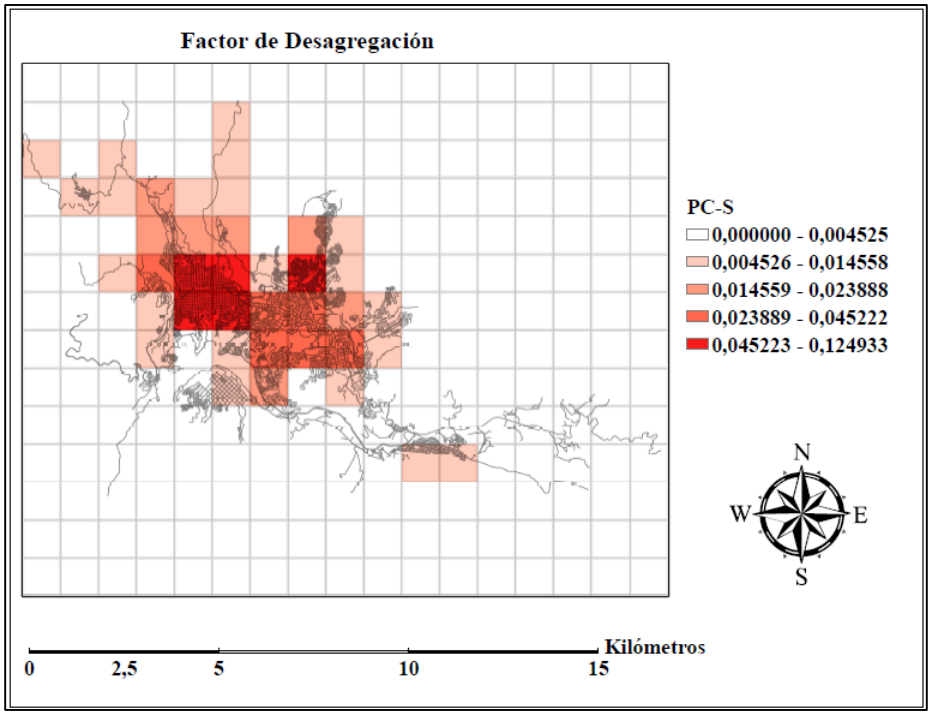
Un primer acercamiento a la desagregación espacial del inventario de emisiones es el cálculo de los factores de desagregación. Estos factores, como se muestra en la ecuación 4.4, son constantes para cada categoría vehicular y tipo de vía, como es el caso de los vehículos particulares y las motos. El factor de desagregación de cada categoría será el mismo para todas las horas y todos los contaminantes, ya que solo depende de las longitudes de vía y de los conteos vehiculares totales de un día. Del mismo modo, debido a la falta de conteos vehiculares en fines de semana, no se logró establecer una diferencia de flujo vehicular para días hábiles y fines de semana, por lo tanto, el factor de desagregación es representativo para días hábiles. En la Figura 4.19 se muestran los valores de los factores de desagregación calculados por la metodología de clasificación de conteos vehiculares para vehículos particulares por cada tipo de vía y los buses, los cuales circulan por vías específicas. Estos factores se calcularon usando la metodología de clasificación de conteos vehiculares, la cual fue escogida como la metodología de referencia. Este tipo de mapas permiten hacer una validación visual de los resultados.

En la Figura 4.19a, la cual representa los factores de desagregación para vehículos particulares que transitan por vías primarias, los valores máximos se observan en la zona central (comercio y centro histórico), sobre las avenidas Santander, Paralela, Av. del Río y del Centro, donde se concentra el 42% de las emisiones y en la zona suroccidental sobre la avenida Centenario y las vías que conducen al departamento de Risaralda, donde se contra el 32% de las emisiones. En la Figura 4.19b, vehículos particulares que transitan por vías secundarias, los valores máximos se presentan en la zona central y comercial, donde se encuentran las vías que conectan las principales avenidas de la ciudad, y donde se concentra el 61% de las emisiones provenientes de esta categoría. En la Figura 4.19c, vehículos particulares que transitan por vías terciarias, los valores máximos se observan en las zonas residenciales de la ciudad que se encuentran al norte y en el centro-sur, donde se concentra el 57% de

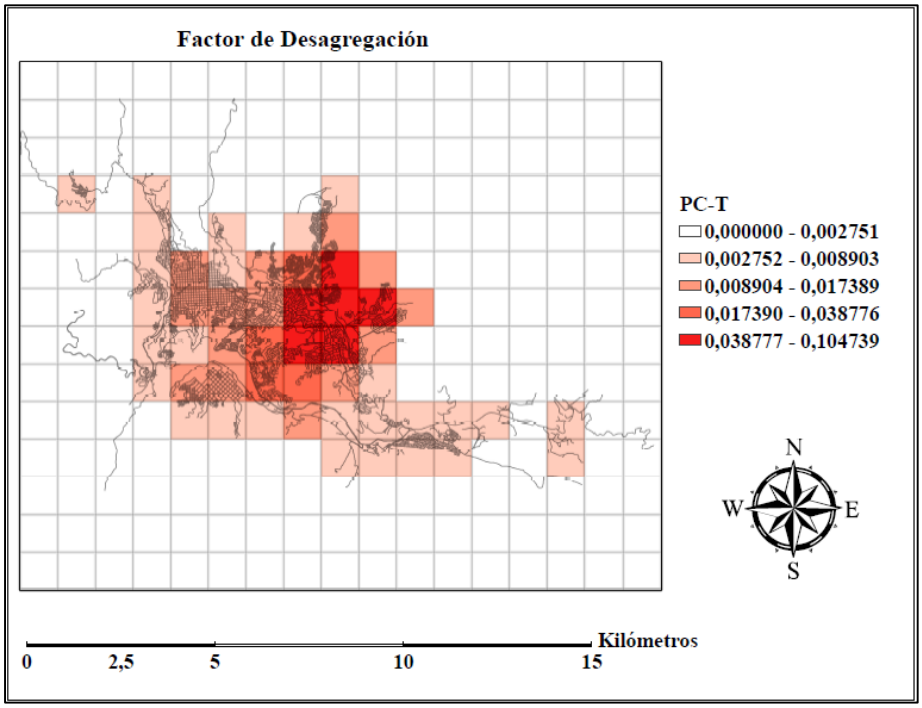
las emisiones provenientes de esta categoría. En la Figura 4.19d se muestran los factores de desagregación para buses de servicio público, con los valores máximos sobre el centro histórico de la ciudad, zonas comerciales y residenciales. Para esta categoría, la mayoría de rutas se encuentran y se distribuyen hacia los distintos sectores de la ciudad incluyendo el 52% de las emisiones. Para las categorías motocicletas, taxis y pesados, se obtuvieron resultados similares a los descritos en esta sección. Estos resultados se incluyeron en el Anexo 4.6.



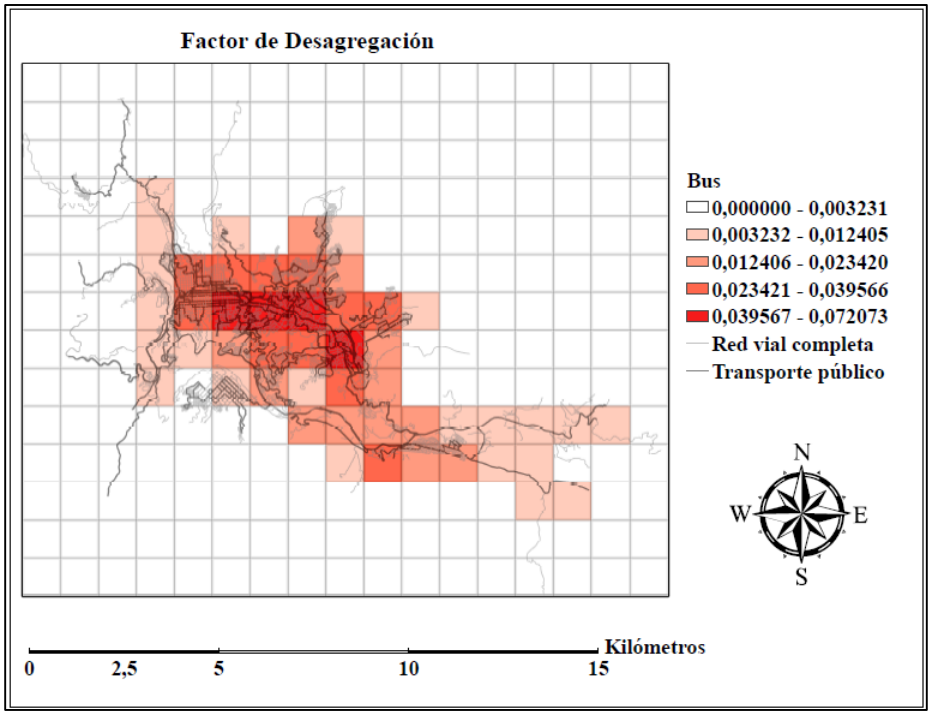
(a)


Factor de Desagregación
PC-S
0,000000 - 0,004525
0,004526 - 0,014558
0,014559 - 0,023888
0,023889 - 0,045222
0,045223 - 0,124933
N
W
E
S
Kilómetros
0
2,5
5
10
15

(b)


Factor de Desagregación
PC-T
0,000000 - 0,002751
0,002752 - 0,008903
0,008904 - 0,017389
0,017390 - 0,038776
0,038777 - 0,104739
N
W
E
S
Kilómetros
0
2,5
5
10
15

(c)



(d)

Figura 4.19. Factores para definir la desagregación espacial del inventario de emisiones. a) Vehículos particulares que circulan por vías primarias (PCHwy). b) Vehículos particulares que circulan por vías secundarias (PCArt). c) Vehículos particulares que circulan por vías terciarias (PCRes). d) Buses de servicio público.

De la misma forma, se puede realizar el análisis del comportamiento espacial de las emisiones a partir de la emisión total de CO para un día hábil. La emisión total de CO se muestra en la Figura 4.20. Este mapa se construye sumando la emisión por celda de cada categoría vehicular y cada hora del día. Como se observó en la Figura 4.19, las emisiones se concentrarán en la zona centro, comercial y parte de la zona residencial de la ciudad, en un 50%.

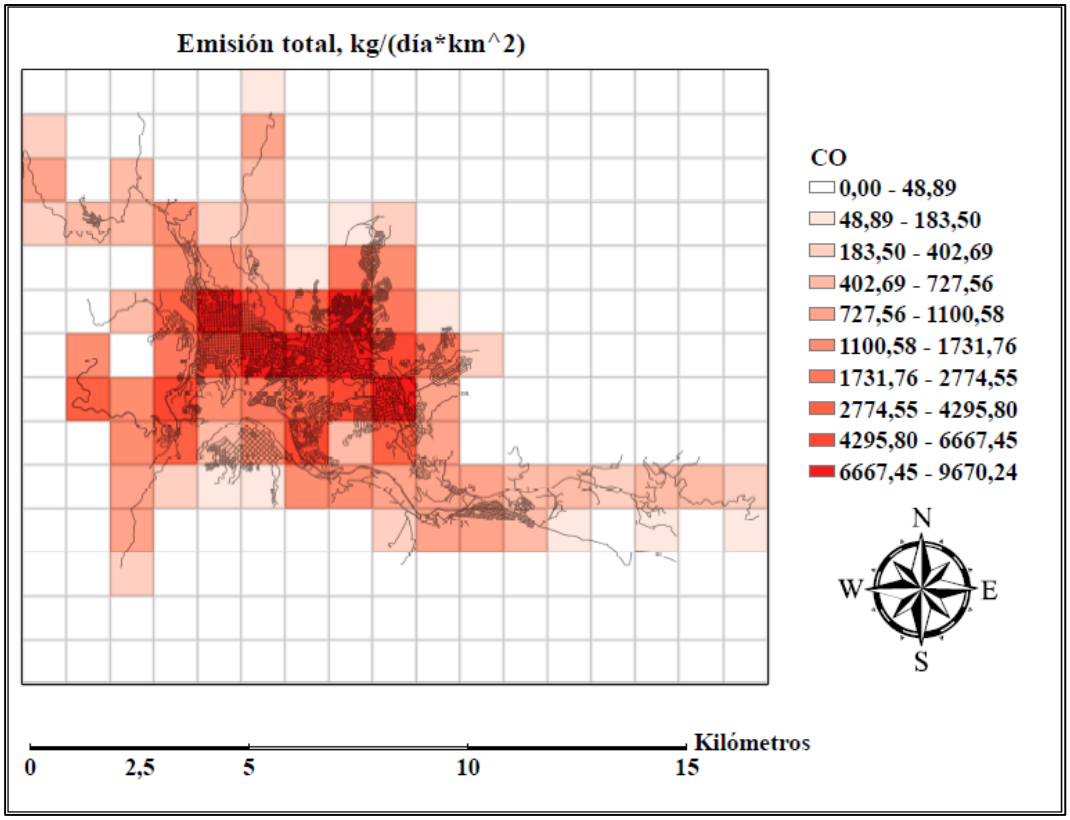
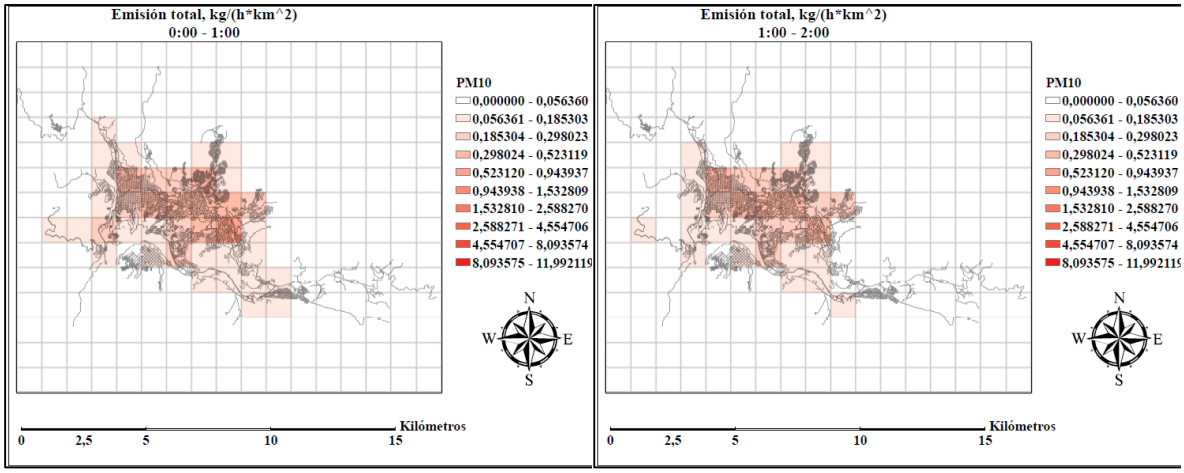
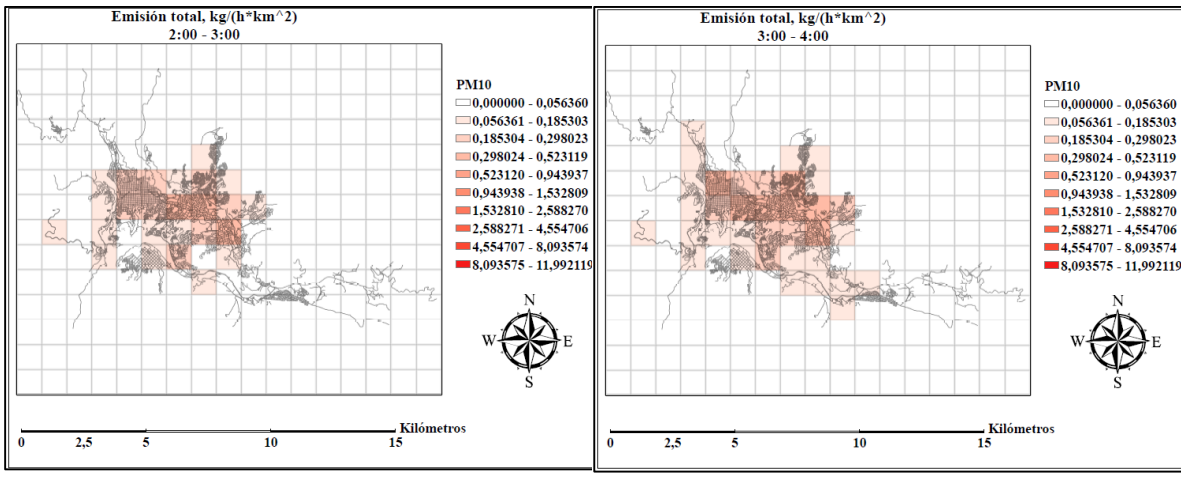


Figura 4.20. Emisión diaria total de CO para un día hábil.

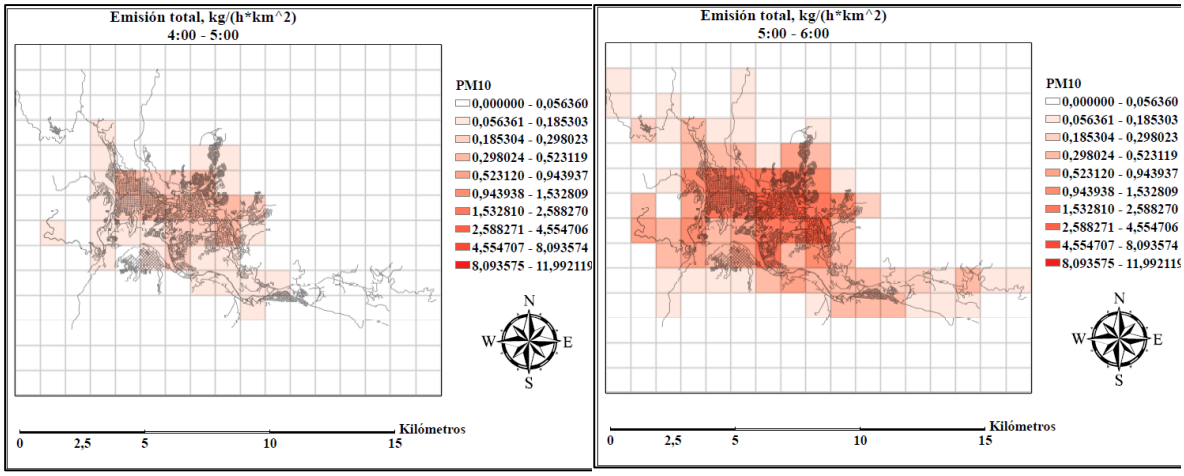
Los factores de desagregación se utilizaron para calcular las emisiones horarias de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero para todas las categorías y horas del día. De esta forma se construyó la Figura 4.21, en la cual se muestra la desagregación espacial y temporal de las emisiones totales de material particulado menor o igual a 10 micras (PM_{10}). Esta figura contiene un mapa para cada hora de un día hábil. Por medio de una escala de color estandarizada, además de localizar las zonas de mayor emisión, se observa la magnitud de las emisiones en las diferentes horas del día, correspondientes a los picos de emisión hallados con el análisis de la distribución temporal. Como se mencionó en secciones anteriores, los factores de desagregación son constantes para todas las horas y contaminantes evaluados, puesto que solo dependen de la sumatoria de los conteos vehiculares del día en cada punto de aforo y de las longitudes de arco, por lo tanto, las zonas de mayor emisión serán las mismas para todas las horas. Similar a la Figura 4.19, las zonas de mayor emisión son la zona centro, comercial y la zona residencial al norte de la ciudad. Los picos horarios de emisión se presentaron entre las 7:00 y 8:00, 12:00 y 13:00 y, al finalizar el día, entre las 17:00 y 18:00 horas.


Emisión total, kg/(h*km^2)
0:00 - 1:00
PM10
0,000000 - 0,056360
0,056361 - 0,185303
0,185304 - 0,298023
0,298024 - 0,523119
0,523120 - 0,943937
0,943938 - 1,532809
1,532810 - 2,588270
2,588271 - 4,554706
4,554707 - 8,093574
8,093575 - 11,992119
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros

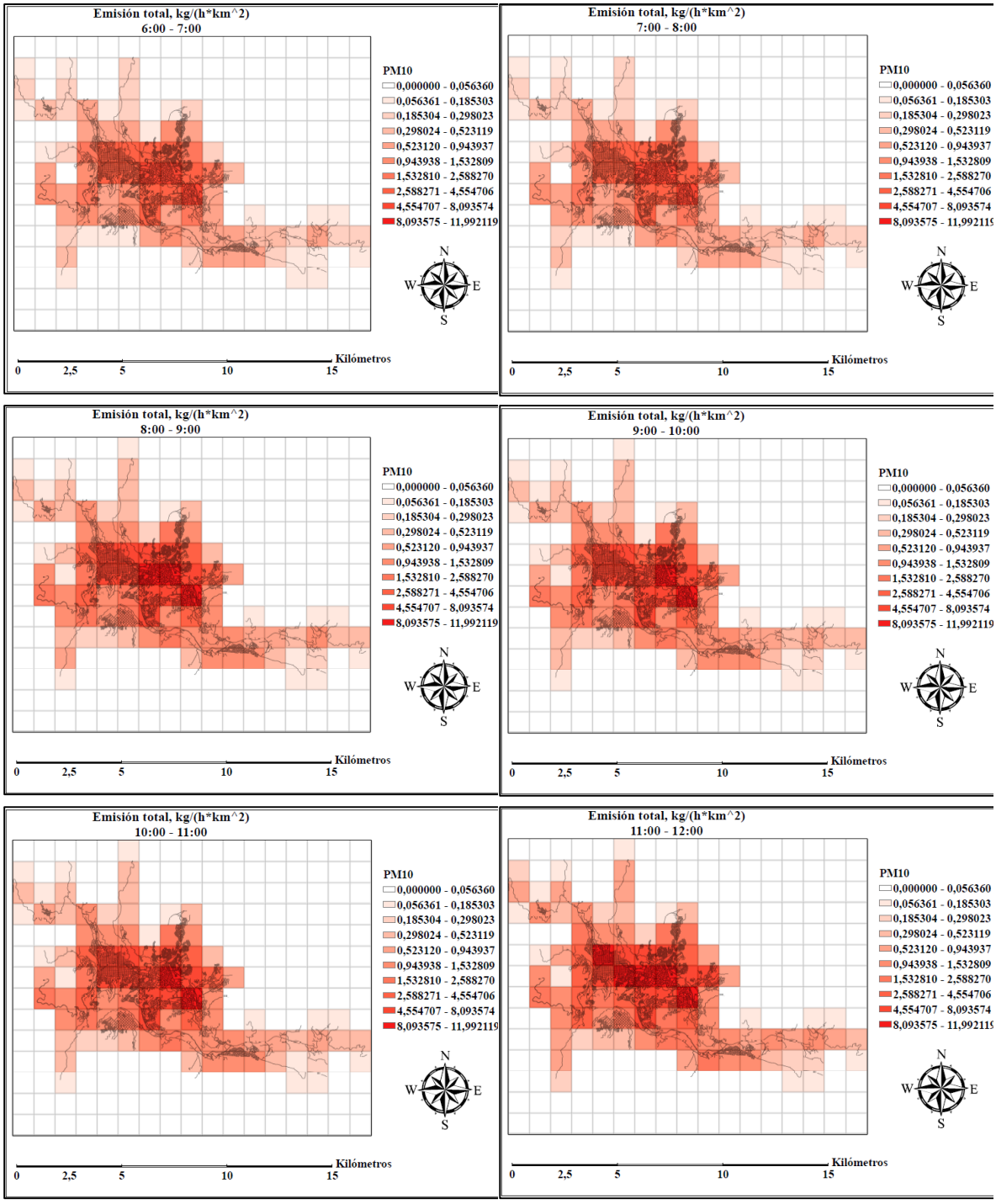

Emisión total, kg/(h*km^2)
1:00 - 2:00
PM10
0,000000 - 0,056360
0,056361 - 0,185303
0,185304 - 0,298023
0,298024 - 0,523119
0,523120 - 0,943937
0,943938 - 1,532809
1,532810 - 2,588270
2,588271 - 4,554706
4,554707 - 8,093574
8,093575 - 11,992119
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros

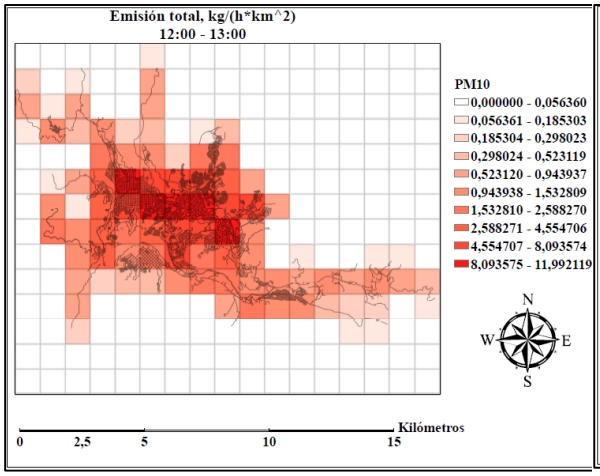
Emisión total, kg/(h*km^2)
2:00 - 3:00
PM10
0,000000 - 0,056360
0,056361 - 0,185303
0,185304 - 0,298023
0,298024 - 0,523119
0,523120 - 0,943937
0,943938 - 1,532809
1,532810 - 2,588270
2,588271 - 4,554706
4,554707 - 8,093574
8,093575 - 11,992119
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros

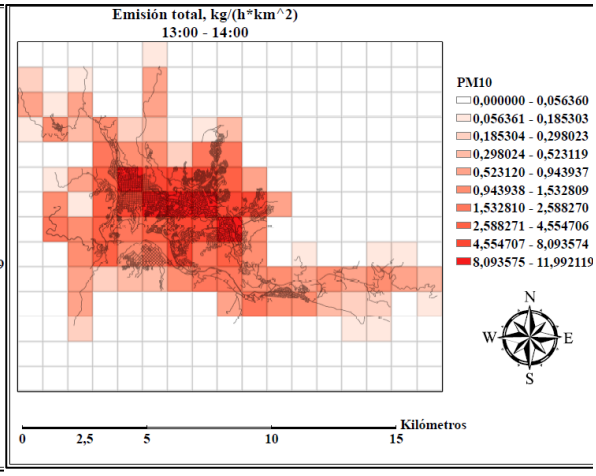
Emisión total, kg/(h*km^2)
3:00 - 4:00
PM10
0,000000 - 0,056360
0,056361 - 0,185303
0,185304 - 0,298023
0,298024 - 0,523119
0,523120 - 0,943937
0,943938 - 1,532809
1,532810 - 2,588270
2,588271 - 4,554706
4,554707 - 8,093574
8,093575 - 11,992119
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros

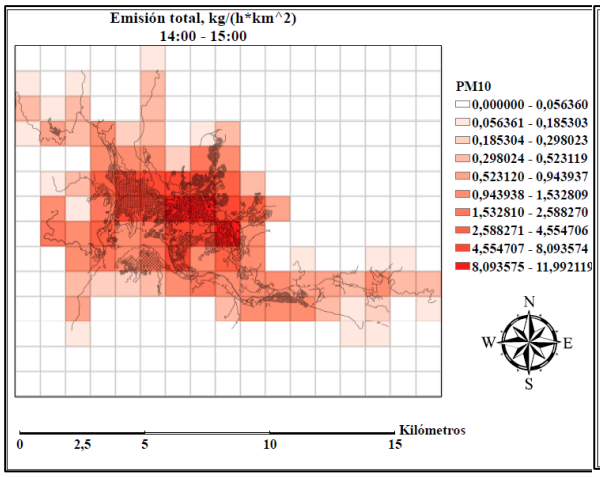

Emisión total, kg/(h*km^2)
4:00 - 5:00
PM10
0,000000 - 0,056360
0,056361 - 0,185303
0,185304 - 0,298023
0,298024 - 0,523119
0,523120 - 0,943937
0,943938 - 1,532809
1,532810 - 2,588270
2,588271 - 4,554706
4,554707 - 8,093574
8,093575 - 11,992119
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros

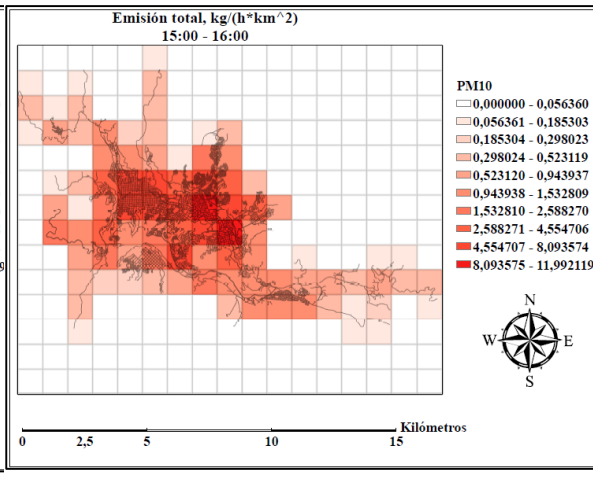
Emisión total, kg/(h*km^2)
5:00 - 6:00
PM10
0,000000 - 0,056360
0,056361 - 0,185303
0,185304 - 0,298023
0,298024 - 0,523119
0,523120 - 0,943937
0,943938 - 1,532809
1,532810 - 2,588270
2,588271 - 4,554706
4,554707 - 8,093574
8,093575 - 11,992119
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros

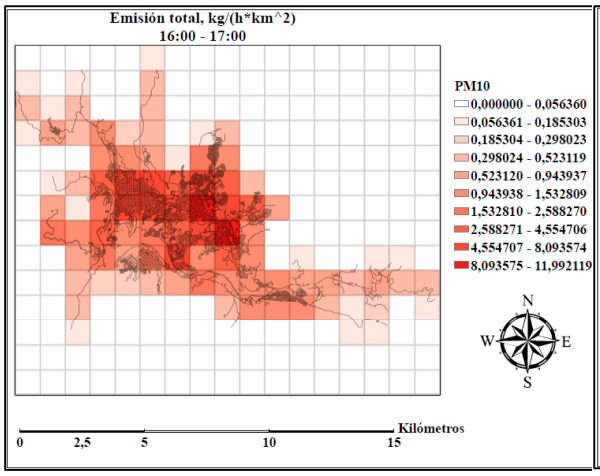

Emisión total, kg/(h*km^2)
6:00 - 7:00
Emisión total, kg/(h*km^2)
7:00 - 8:00
Emisión total, kg/(h*km^2)
8:00 - 9:00
Emisión total, kg/(h*km^2)
9:00 - 10:00
Emisión total, kg/(h*km^2)
10:00 - 11:00
Emisión total, kg/(h*km^2)
11:00 - 12:00
PM10
0,000000 - 0,056360
0,056361 - 0,185303
0,185304 - 0,298023
0,298024 - 0,523119
0,523120 - 0,943937
0,943938 - 1,532809
1,532810 - 2,588270
2,588271 - 4,554706
4,554707 - 8,093574
8,093575 - 11,992119
N
W
E
S
Kilómetros
0
2,5
5
10
15

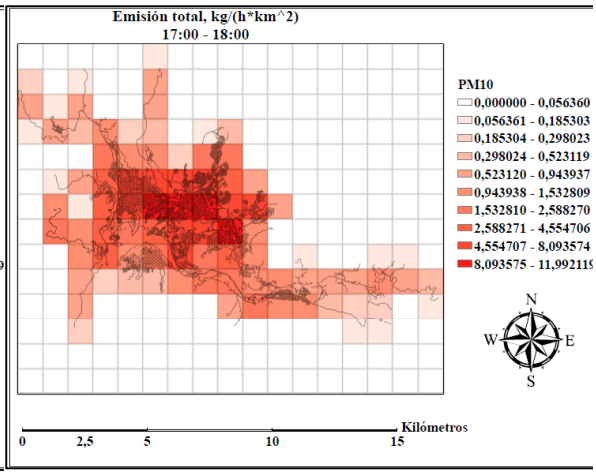

Emisión total, kg/(h*km^2)
12:00 - 13:00
PM10
0,000000 - 0,056360
0,056361 - 0,185303
0,185304 - 0,298023
0,298024 - 0,523119
0,523120 - 0,943937
0,943938 - 1,532809
1,532810 - 2,588270
2,588271 - 4,554706
4,554707 - 8,093574
8,093575 - 11,992119
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros


Emisión total, kg/(h*km^2)
13:00 - 14:00
PM10
0,000000 - 0,056360
0,056361 - 0,185303
0,185304 - 0,298023
0,298024 - 0,523119
0,523120 - 0,943937
0,943938 - 1,532809
1,532810 - 2,588270
2,588271 - 4,554706
4,554707 - 8,093574
8,093575 - 11,992119
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros


Emisión total, kg/(h*km^2)
14:00 - 15:00
PM10
0,000000 - 0,056360
0,056361 - 0,185303
0,185304 - 0,298023
0,298024 - 0,523119
0,523120 - 0,943937
0,943938 - 1,532809
1,532810 - 2,588270
2,588271 - 4,554706
4,554707 - 8,093574
8,093575 - 11,992119
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros


Emisión total, kg/(h*km^2)
15:00 - 16:00
PM10
0,000000 - 0,056360
0,056361 - 0,185303
0,185304 - 0,298023
0,298024 - 0,523119
0,523120 - 0,943937
0,943938 - 1,532809
1,532810 - 2,588270
2,588271 - 4,554706
4,554707 - 8,093574
8,093575 - 11,992119
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros


Emisión total, kg/(h*km^2)
16:00 - 17:00
PM10
0,000000 - 0,056360
0,056361 - 0,185303
0,185304 - 0,298023
0,298024 - 0,523119
0,523120 - 0,943937
0,943938 - 1,532809
1,532810 - 2,588270
2,588271 - 4,554706
4,554707 - 8,093574
8,093575 - 11,992119
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros


Emisión total, kg/(h*km^2)
17:00 - 18:00
PM10
0,000000 - 0,056360
0,056361 - 0,185303
0,185304 - 0,298023
0,298024 - 0,523119
0,523120 - 0,943937
0,943938 - 1,532809
1,532810 - 2,588270
2,588271 - 4,554706
4,554707 - 8,093574
8,093575 - 11,992119
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros

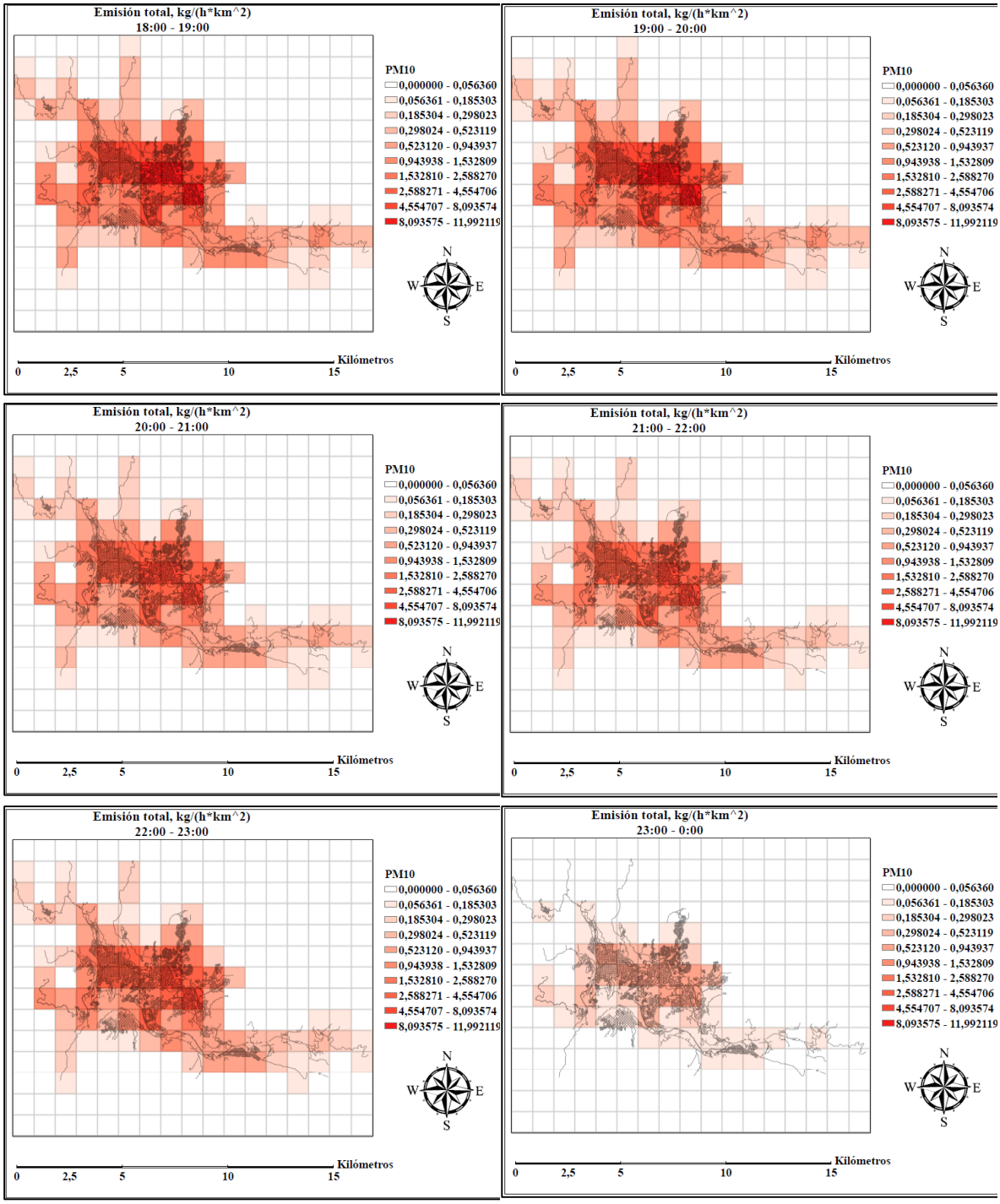


Figura 4.21. Inventario de emisiones totales de material particulado (PM_{10}) para un día hábil.

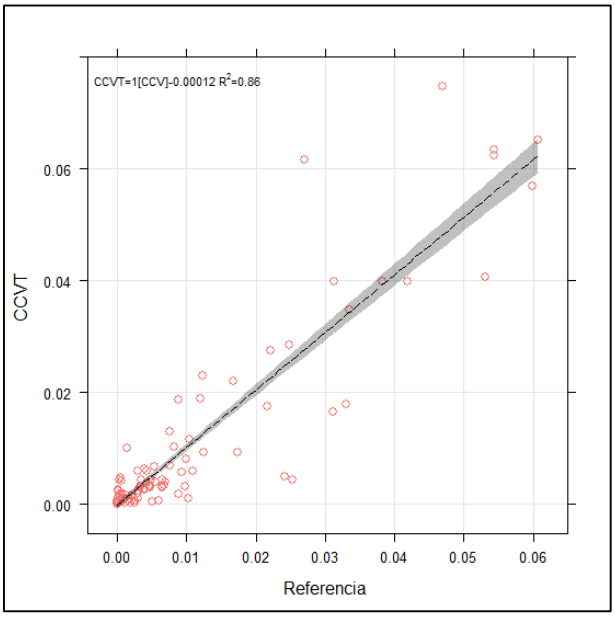
En la Tabla 4.11, se resumen los resultados que se obtuvieron para las distintas categorías vehiculares, contaminantes criterio, gases de efecto invernadero y las resoluciones temporales utilizadas, 1 hora y 1 año. Como resultado final se obtuvieron cerca de 2000 mapas. Los mapas correspondientes a la emisión total de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero se presentan en el Anexo 4.7.

Tabla 4.11. Combinaciones de mapas que se pueden obtener.

Categoría vehicular	Contaminantes y GEI	Temporalidad	Mapas posibles
PCHwy PCArt PCRes 2wHwy 2wArt 2wRes Taxi Bus Pesados Total	CO VOC NO_x SO_X PM_{10} CO_2 N_2O CH_4	24h 1 año	2000

4.3.4. Comparación de las metodologías de distribución espacial aplicadas

Los diagramas de dispersión revelaron que todas las metodologías presentaron una buena correlación con la metodología de referencia, con coeficientes de determinación mayores a 0.8. Sin embargo, la metodología con mayor exactitud con respecto al inventario de emisiones de referencia, fue en la que se utilizó la densidad vial de la red simplificada (DVS), en donde no se tuvieron en cuenta las vías terciarias. El coeficiente de determinación fue 0.96. La siguiente metodología con mayor exactitud, fue en la que se usó la clasificación de conteos vehiculares totales (CCVT), obteniéndose un coeficiente de determinación de 0.86. La metodología con menor exactitud fue en la que se usaron los conteos vehiculares por cada categoría vehicular y tipo de vía (CV), en la cual se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.81. La Figura 4.22 muestra los diagramas de dispersión realizados en donde se comparan las metodologías alternativas con la metodología de referencia. Estos diagramas incluyen la línea de regresión, la ecuación de la recta resultante y el coeficiente de determinación.



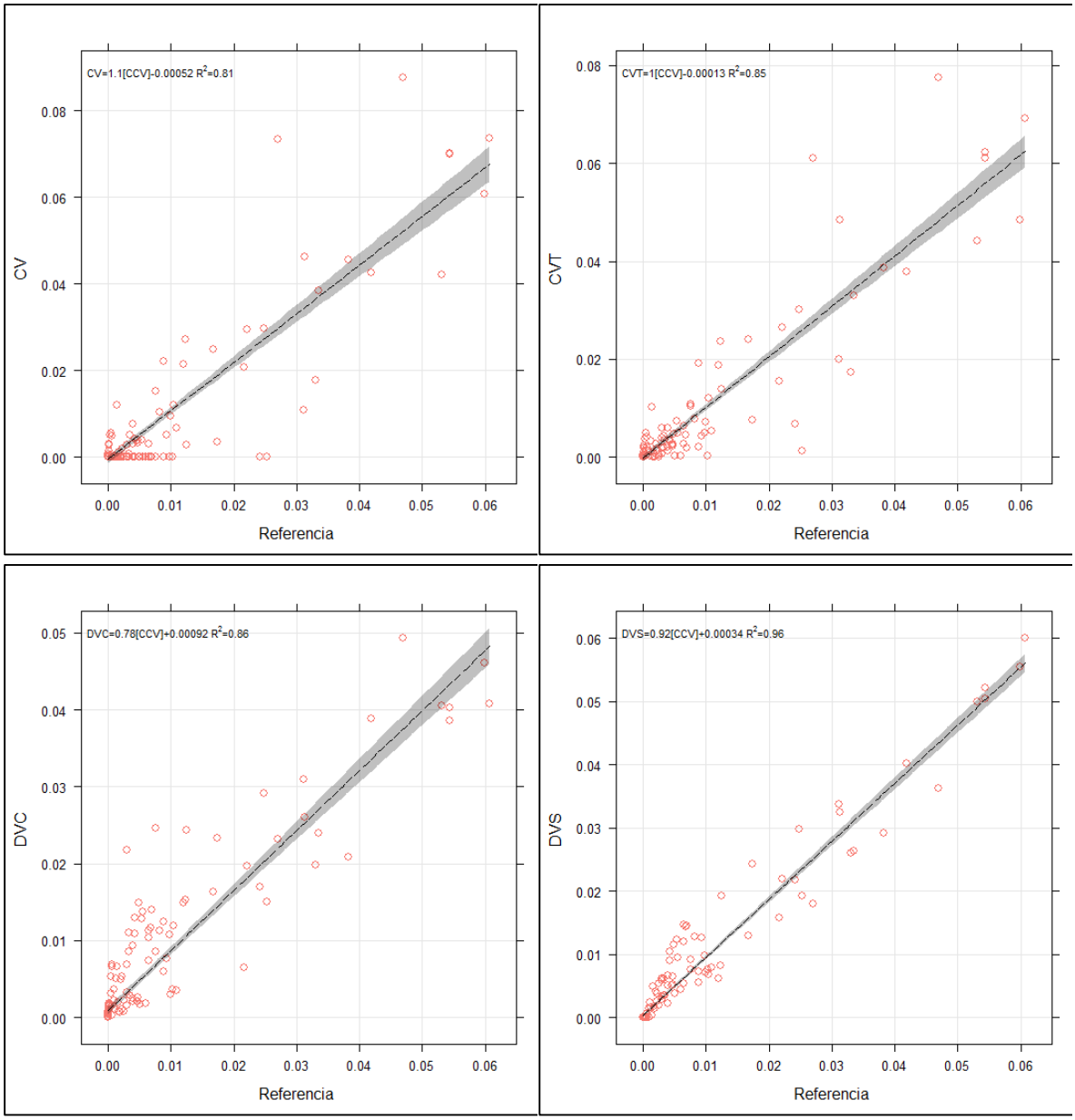
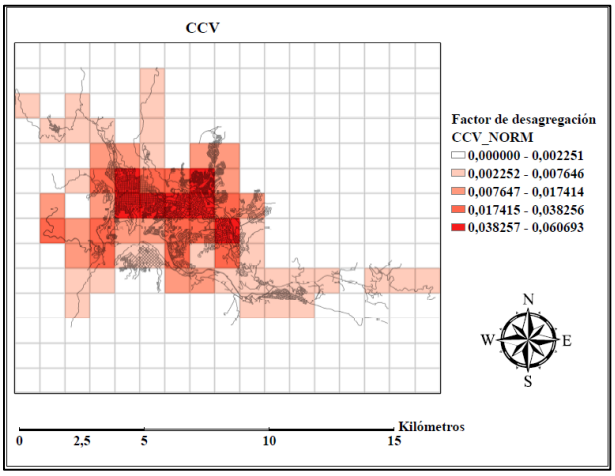
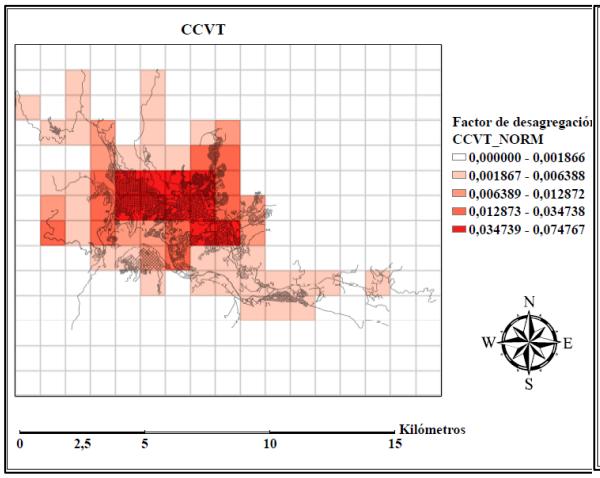
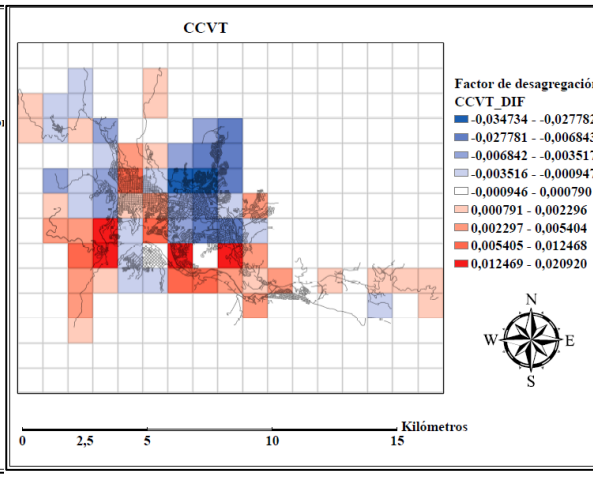


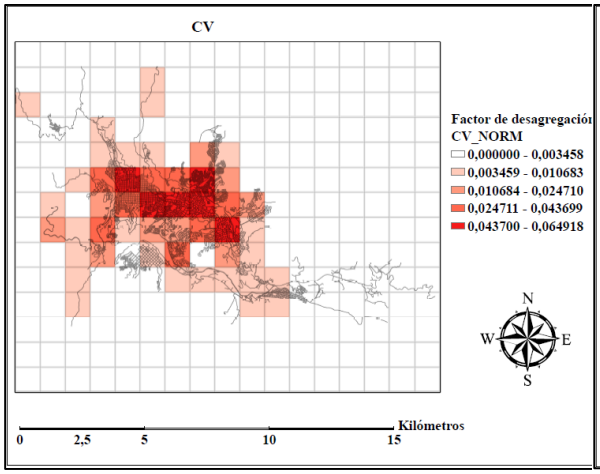
Figura 4.22. Diagrama de dispersión comparando los factores de emisión del inventario de emisiones de referencia y las metodologías aplicadas. *CCVT: Clasificación de conteos vehiculares totales; CV: Conteos vehiculares; CVT: Conteos vehiculares totales; DVC: Densidad vial de la red completa; DVS: Densidad vial de la red simplificada.*

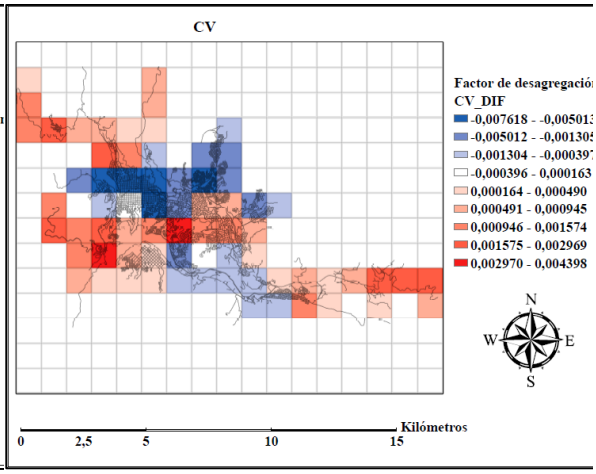
A pesar de que la metodología con mayor exactitud fue en la que se usó la densidad vial de la red simplificada (DVS), en la Figura 4.23 se puede ver que en esta metodología se subestiman las emisiones en el centro urbano, caracterizado por un alto flujo vehicular y se sobreestiman las emisiones en la zona industrial, como lo reporta Ossés de Eicker et al. (2008). De manera similar, ocurre al usar la densidad vial de la red completa (DVC). El fenómeno contrario se presenta al usar conteos vehiculares (CV), en el cual se sobreestiman las emisiones en el centro urbano y se subestiman las emisiones en la zona residencial. En el caso del uso de conteos vehiculares completos (CCVT y CVT), se encuentra una sobreestimación de las emisiones en las zonas residenciales.


CCV
Factor de desagregación
CCV_NORM
0,000000 - 0,002251
0,002252 - 0,007646
0,007647 - 0,017414
0,017415 - 0,038256
0,038257 - 0,060693
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros


CCVT
Factor de desagregación
CCVT_NORM
0,000000 - 0,001866
0,001867 - 0,006388
0,006389 - 0,012872
0,012873 - 0,034738
0,034739 - 0,074767
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros


CCVT
Factor de desagregación
CCVT_DIF
-0,034734 - -0,02778
-0,027781 - -0,00684
-0,006842 - -0,00351
-0,003516 - -0,00094
-0,000946 - 0,00079
0,000791 - 0,002296
0,002297 - 0,005404
0,005405 - 0,012468
0,012469 - 0,020920
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros


CV
Factor de desagregación
CV_NORM
0,000000 - 0,003458
0,003459 - 0,010683
0,010684 - 0,024710
0,024711 - 0,043699
0,043700 - 0,064918
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros


CV
Factor de desagregación
CV_DIF
-0,007618 - -0,00501
-0,005012 - -0,00130
-0,001304 - -0,00039
-0,000396 - 0,00016
0,000164 - 0,000490
0,000491 - 0,000945
0,000946 - 0,001574
0,001575 - 0,002969
0,002970 - 0,004398
N
W
E
S
0
2,5
5
10
15
Kilómetros

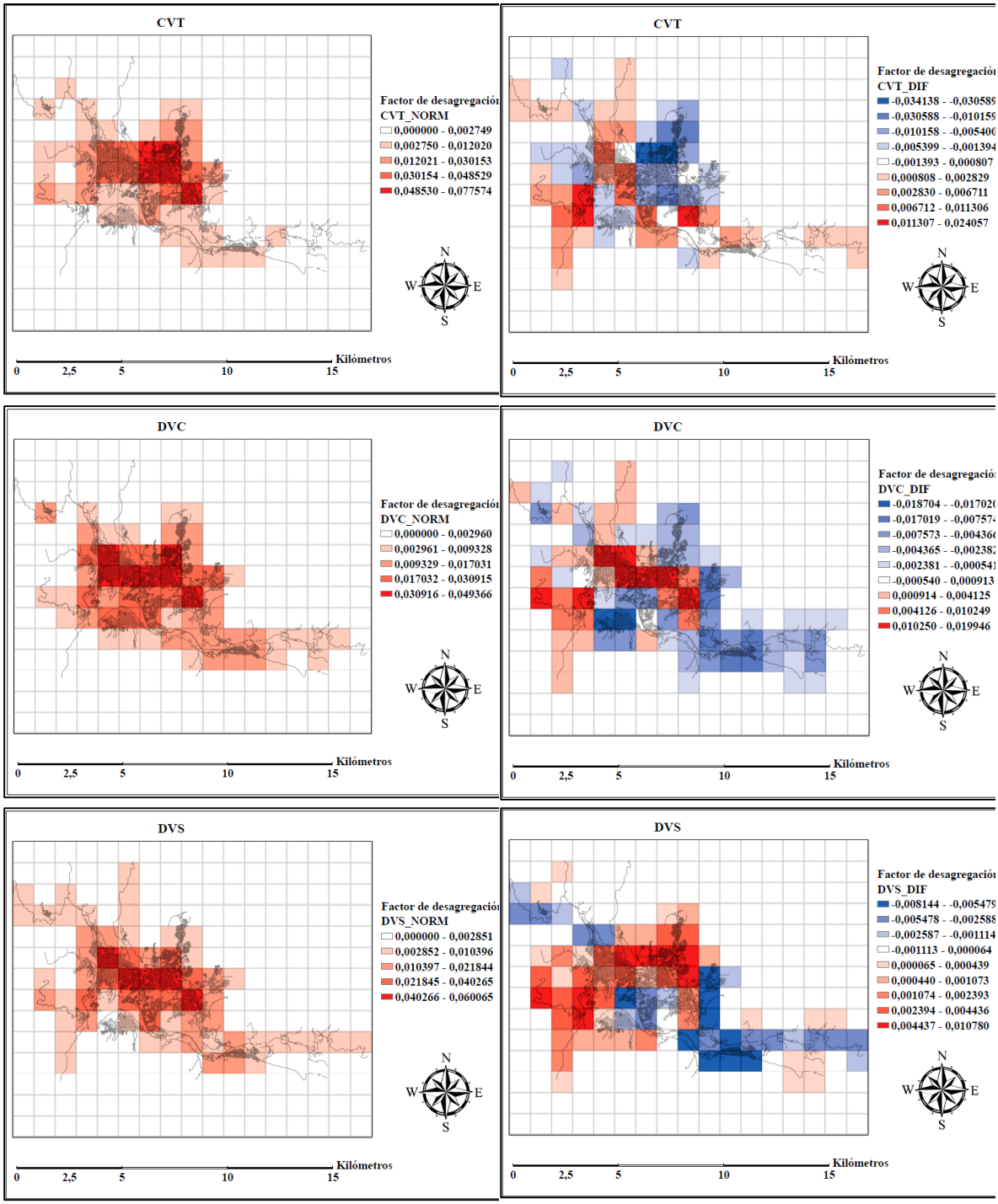


Figura 4.23. Mapas de factores de emisión y diferencias.

Finalmente, se realizó la exploración de las series de factores de desagregación, como se observa en la Figura 4.24. Como se mencionó anteriormente, estas gráficas tienen como objetivo comparar los patrones presentados en las zonas de máxima emisión. Comparando la figura para la metodología de referencia (CCV) con la de metodología que presentó el mejor coeficiente de determinación, la densidad vial de la red simplificada (DVS), se puede observar que los tres picos centrales son similares en magnitud y forma. Las diferencias se presentan en el margen izquierdo de la gráfica,

donde los valores son más altos para la metodología DVS. Comparando la figura para la metodología de referencia (CCV) con la de metodología que presentó el peor coeficiente de determinación, los conteos vehiculares por categoría vehicular y tipo de vía (CV), se puede observar que los tres picos centrales difieren en magnitud, siendo mayores para la metodología CV, es decir, existe sobreestimación de las emisiones en las áreas de mayor influencia. Estas áreas corresponden a las zonas centro y comercial. El pico máximo para la metodología de referencia es el central y para la metodología de conteos vehiculares (CV) el pico máximo es el de la derecha. Además, para la metodología de conteos vehiculares (CV), el margen izquierdo presenta valores constantes, cercanos a cero, es decir, se presenta subestimación de las emisiones, sin embargo, esta metodología hace que la información espacial se pierda y no es posible identificar a qué zona pertenecen estos picos (Winiwarter et al., 2003).

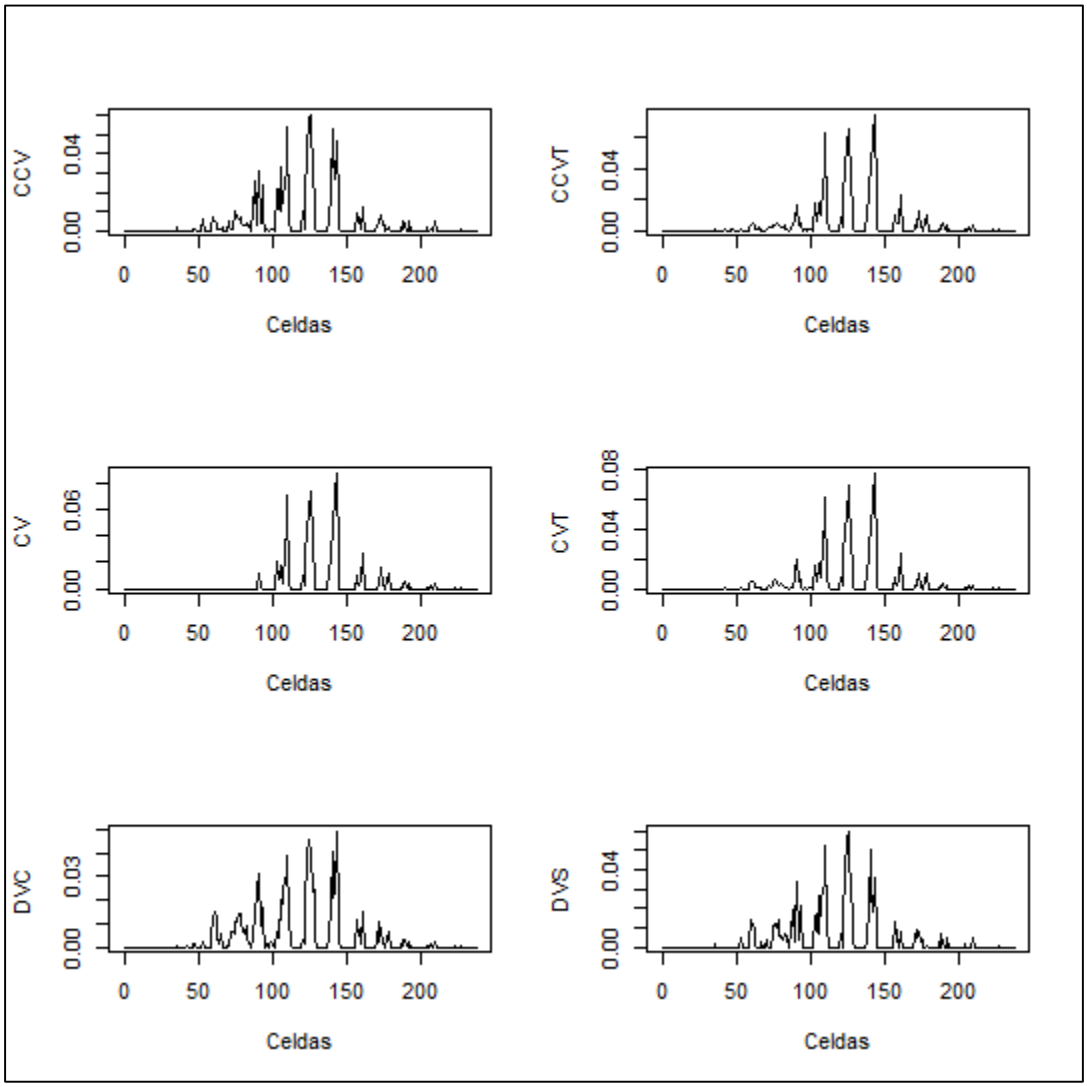


Figura 4.24. Exploración de las series de factores de desagregación de todas las metodologías aplicadas. El eje *x* corresponde a la identificación de las celdas.

4.4. Conclusiones

El inventario de emisiones por fuentes móviles estimado a través del modelo IVE para la ciudad de Manizales (año base 2014) reveló que el monóxido de carbono es el contaminante de mayor contribución a las emisiones con 43396 ton/año (74%). Los óxidos de azufre son los contaminantes de menor contribución con 26 ton/año (0.04%). El material particulado PM_{10}, contaminante monitoreado en el SVCA de CORPOCALDAS es emitido por los vehículos a un flujo anual de 765 ton/año, contribuyendo con un 1.3% de las emisiones vehiculares. Por parte de los gases de efecto invernadero, el gas de mayor contribución es el dióxido de carbono con 454441 ton/año (99%) y el de menor contribución, el óxido nitroso con 11 ton/año (0.002%).

El inventario de emisiones muestra que los vehículos de pasajeros - automóviles y las motocicletas son las categorías que más contribuyen a las emisiones de CO y VOC. Esta situación se presenta debido a que estas categorías son las dos más representativas del área de estudio (95%) y en su mayor proporción utilizan gasolina como combustible. La mayor emisión de CO y VOC se encuentra asociada con el uso de gasolina. La categoría que más contribuye a las emisiones de NO_X y PM_{10} es la de buses, 48% y 47%, respectivamente, asociado al uso de diésel. Es importante destacar que la categoría de buses corresponde tan solo al 1.8% del parque automotor de la ciudad. Por último, la categoría con mayor influencia en las emisiones de SO_X son los automóviles, debido a la gran cantidad de vehículos, 49% del parque automotor de la ciudad, y al contenido de azufre de la gasolina con respecto al diésel, 300 ppm frente a 50 ppm.

Existe una correlación positiva entre las emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero y la dinámica de la flota vehicular, en el cual se encuentra un coeficiente de correlación promedio de 93%, presentándose comportamientos similares como horas pico de emisión y de flujo vehicular entre las 7:00 y las 9:00, 12:00 y 13:00 y 17:00 y 18:00 horas. De forma similar, tanto las emisiones como el flujo vehicular se mantienen constantes entre las 00:00 y las 3:00, hora en la que aumentan hasta alcanzar el pico de la mañana, mencionado anteriormente, y decaen después de las 18:00 horas hasta llegar al comportamiento constante de la madrugada. Es decir, existen tres horas pico de emisión y tres periodos valle durante el día.

Mediante revisión bibliográfica, se adaptó y aplicó una metodología de desagregación espacial de las emisiones por fuentes móviles, la cual se ajustaba mejor a la información disponible. Esta metodología se denomina “Clasificación de conteos vehiculares” y fue seleccionada como metodología de referencia. Con la desagregación espacial del inventario de emisiones, fue posible encontrar las zonas de la ciudad que se encuentran más afectadas por las emisiones vehiculares. Se encontró una fuerte influencia de las emisiones en la zona centro y comercial de la ciudad, donde las emisiones se concentran en un 50%. La mayor influencia en estas zonas está dada por los vehículos particulares, motocicletas y buses de transporte público. Se aplicaron metodologías alternativas que requerían menos información y tiempo de cálculo y se compararon con la metodología de referencia. En estas metodologías se realizaron simplificaciones de la red vial y de los conteos vehiculares. La metodología que presentó una mayor correlación con la metodología de referencia fue en la que se utilizó la red vial simplificada, eliminando las vías terciarias. Para esta metodología se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.96. No obstante, se encontró que en esta metodología se subestiman

las emisiones en la zona centro de la ciudad, caracterizada por un alto flujo vehicular y se sobreestiman las emisiones en la zona industrial.