INVENTARIO PRELIMINAR DE EMISIONES POR FUENTES MÓVILES EN RUTA PARA LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO

NERY FABIÁN ORTIZ GONZÁLEZ
JULIÁN ANDRÉS RÍOS MORENO

CC BY NC

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO
2019

INVENTARIO PRELIMINAR DE EMISIONES POR FUENTES MÓVILES EN RUTA PARA LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO

NERY FABIÁN ORTIZ GONZÁLEZ
JULIÁN ANDRÉS RÍOS MORENO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesor
CARLOS DAVID GÓMEZ ORTIZ
Magíster, Ingeniero químico

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO
2019

Autoridades Académicas

P. José Gabriel MESA ANGULO, OP
Rector General

P. Eduardo GONZALEZ GIL, O.P.
Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.
Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo, GARCIA JARA, O.P.
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg.JULIETH ANDREA SIERRA TABÓN
Secretaria de División Sede Villavicencio

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN
Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota De Aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de la Facultad

_____

CARLOS DAVID GÓMEZ ORTIZ

Director Trabajo de Grado

_____

KIMBERLY PATRICIA MONTAÑEZ MEDINA

jurado

_____

ANGELICA MARIA BUSTAMANTE ZAPATA

jurado

Villavicencio, 12 de Agosto de 2019

A la memoria de Julián Andrés Ríos Moreno

"Quédate donde estás, en el puro equilibrio de la noche y el día, en la nada de tu sueño feliz que es la otra cara del cielo, ese cielo invisible a todos, menos a mí." Gonzalo Arango.

Agradecimientos

Agradecemos a dios por acompañarnos en este proceso de formación, por permitirnos llevar a cabo este proyecto y bendecirnos a lo largo de la carrera universitaria.

Asimismo, agradecemos a nuestros padres, hermanos y demás familiares que nos apoyaron y motivaron durante momentos difíciles de ésta etapa, también queremos agradecerle a nuestros compañeros y amigos que de una u otra manera estuvieron presentes brindando conocimiento, apoyo y cariño para superar cada obstáculo.

Por último y no menos importante, a nuestro director Carlos David Gómez Ortiz, quien estuvo presente guiándonos, apoyándonos y sobre todo brindándonos sus conocimientos durante este camino**.**

Contenido

Pág.

Resumen 13
Abstract 14
Introducción 15
1. Planteamiento del problema 17
2. Objetivos 22
2.1 Objetivo General 22
2.2 Objetivos Específicos 22
3. Antecedentes 23
4. Generalidades 25
Inventarios de Emisiones de Fuentes Móviles 25
Fuente Móvil 26
4.1 Marco Legal 30
5. Metodología 33
5.1 Fase 1: Campaña de Campo 33
5.1.1 Circuitos de conducción 34
5.1.2 Actividad 1: Patrones de conducción 36
5.1.3 Actividad 2: Composición Dinámica de la flota vehicular 37
5.1.4 Actividad 3: Distribución de las tecnologías vehiculares 37
5.1.5 Actividad 4: Distribución de las partidas en frío del motor 38
5.2 Fase 2: Cálculo de las emisiones 39
5.3 Fase 3: Proyección de escenarios 40
6. Resultados y Análisis 43
6.1 Fase 1: Campaña de Campo 43
6.1.1 información primaria 43

6.1.2 información secundaria 47
6.1.3 composición estática de la flota 51
6.2 Fase 2: cálculo de las emisiones 53
6.2.1 Estimación de emisiones por contaminantes 53
6.3 Fase 3: Proyección de escenarios 62
6.3.1 Escenario Base 63
6.3.2 Escenario 1: Flota de buses con conversión a gas natural vehicular 63
6.3.3 Escenario 2: Inserción de movilidad eléctrica en motocicletas 66
7. Conclusiones 69
8. Recomendaciones 71
9. Referencias Bibliográficas 73
10. Anexos 77

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Marco legal 30
Tabla 2. Conteo vehicular según la categoría..... 46
Tabla 3 Promedio de kilometros recorridos por día según categoria 48
Tabla 4 Resultado final de VKT y kilómetros diarios para cada una de las categorías 50
Tabla 5 Uso de combustible según su categoría..... 52
Tabla 6 Total de emisiones contaminantes en partida según la categoría 54
Tabla 7 Total de emisiones contaminantes en ruta según la categoría 57
Tabla 8 Distribución de las emisiones en kg/día según su tipo de combustible..... 59

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1.Emisiones evaporativas 27
Figura 2.Ecuación de VPS (Salguero, 2014) 30
Figura 3.Las 3 vías de la zona urbana de Villavicencio. Por Ortiz & Ríos..... 33
Figura 4.Vía primaria (avenida 40), adaptado de ArcGIS por Ortiz & Ríos 34
Figura 5.Vía secundaria (calle 15), adaptado de ArcGIS por Ortiz & Ríos..... 35
Figura 6. Vía terciaria (carrera 11), adaptado de ArcGIS por Ortiz & Ríos 36
Figura 7.Software Speed Analysis Por Ortiz & Ríos..... 37
Figura 8.Modelo IVE. Por Ortiz & Ríos..... 40
Figura 9.Histogramas de bins de potencia para automóviles de la ciudad de Villavicencio 44
Figura 10.Histogramas de bins de potencia de la ciudad de Manizales (Salguero, 2014)..... 44
Figura 11.Software que presenta el porcentaje del flujo vehicular..... 46
Figura 12.Estimación de VKT para Automóvil particular..... 49
Figura 13.Estimación de VKT para Motocicletas..... 50
Figura 14.Grafica de los porcentajes vehiculares según su categoría..... 51
Figura 15.Uso del combustible en vehículos particulares y motocicletas 53
Figura 16.Contribución de contaminante por categoría en partida..... 56
Figura 17.Contribución de contaminante por categoría en ruta..... 58
Figura 18.Distribucion de los combustibles por contaminante..... 60
Figura 19.Regresión logarítmica del parque vehicular para el escenario base. Por Ortiz & Ríos..... 62
Figura 20.Proyección del parque automotor para el escenario base 63
Figura 21.Proyección de la participación de los buses a gas y diésel en el escenario 1. 64
Figura 22.emisiones de PM10 en el escenario base, respecto al escenario 1..... 64
Figura 23.emisiones de CO2en el escenario base, respecto al escenario 1..... 65
Figura 24.Proyección de la participación de las motos con emisiones y cero emisiones en el escenario 2. 66
Figura 25.emisiones de PM10 en el escenario base, respecto al escenario 2..... 67

Figura 26.emisiones de CO22 en el escenario base, respecto al escenario 2 68

Lista de Anexos

Anexo 1. Encuesta de caracterización vehicular 77

Resumen

En este trabajo se realizó un inventario preliminar de emisiones vehiculares para la ciudad de Villavicencio, en donde se estimaron los factores de emisión de contaminantes primarios y gases de efecto invernadero, por medio de una metodología ligada a una campaña de campo, en la cual se realizó recolección de datos, que son necesarios para calcular los factores de emisión por medio del modelo IVE (Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares), donde también se tiene en cuenta otras características como la composición dinámica de la flota vehicular, distribución tecnológica, distribución de partidas en frio y otras que permitieron estimar el total en kg/día de contaminante generado por cada una de las categorías vehiculares seleccionadas, teniendo en cuenta si el funcionamiento del proceso de combustión de cada una de estas, se da a partir del diésel, gas natural u otro combustible, para de esta manera corroborar y mejorar la calidad de los resultados previamente obtenidos. Se busca realizar los cálculos de las emisiones aplicando directamente la relación matemática en la que se basan los estudios de emisiones. Además, ya en la tercera fase se propone generar unos escenarios los cuales serán de utilidad para la mejora en la calidad del aire de la ciudad de Villavicencio.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, inventarios de emisiones, factores de emisión, fuentes móviles en ruta.

Abstract

This paper proposes to carry out a preliminary inventory of vehicle emissions for the city of Villavicencio, where the emission factors of primary pollutants and greenhouse gases were estimated, through a methodology linked to a field campaign, in which A data collection was carried out, which is necessary to calculate the emission factors through the IVE model (International Model of Vehicle Emissions), which also takes into account other characteristics such as the dynamic composition of the vehicle fleet, technological distribution, distribution of cold and other items that allowed estimating the total in kg / day of pollutant generated by each of the selected vehicle categories, taking into account whether the operation of the combustion process of each of these is given from diesel, natural gas or other fuel, in order to corroborate and improve the quality of the results Obtained. The emission calculations are sought by directly applying the mathematical relationship on which the emission studies are based. In addition, in the third phase, it is proposed to generate some scenarios which will be useful for the improvement in the air quality of the city of Villavicencio.

keywords: Air pollution, emission inventories, emission factors, mobile sources en route.

Introducción

La contaminación atmosférica puede considerarse como uno de los mayores impactos a nivel mundial. Se ha evidenciado desde el descubrimiento del fuego, hasta la revolución industrial con la obtención de vapor para la generación de energía. El aprovechamiento energético generó un efecto contaminante debido a el humo y cenizas provenientes de la quema de carbón y aceites (Spiegel & Maystre, 2001). Con el paso del tiempo el problema se ha intensificado, incrementado el deterioro de la calidad del aire y ocasionando efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente (Azim, Subki, & Yusof, 2011). La mayor parte de este tipo de contaminación se deba a la modernización con la aparición de nuevas tecnologías, el desarrollo de las ciudades y al crecimiento de la población.

A partir de la modernización se desarrollaron los vehículos automotores, considerados técnicamente como Fuentes Móviles. En los últimos años se ha observado un importante aumento del parque automotor en los diferentes países desarrollados y subdesarrollados (Tami, 2014), aportando significativamente al incremento de emisiones y generando así un deterioro en la calidad del aire y molestias y enfermedades asociadas a la contaminación como consecuencia de los gases contaminantes que se emiten a la atmosfera. Este tipo de emisiones son esencialmente estudiadas y desarrolladas dentro de un inventario de emisiones; herramienta de importancia para la elaboración de estrategias encaminadas al control y la mitigación de las emisiones ocasionados por las fuentes antropogénicas, entre ellas las móviles (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2014). Adicionalmente, la información generada en un inventario de emisiones nos permite determinar la validez de los programas y las políticas que ya han sido implementadas y que se pretendan desarrollar para disminuir el impacto contaminador por parte del aumento del parque automotriz.

Con el paso de los años se han desarrollado diferentes metodologías para la estimación de inventarios de emisiones por fuentes móviles, las cuales se pueden clasificar en metodologías de estimación directa que son aquellas que se realizan mediante mediciones de emisiones directamente de la fuente. Algunos ejemplos de estas metodologías son el monitoreo a bordo, las mediciones con sensores remotos y las pruebas dinamométricas. Estas metodologías son precisas pero implican una inversión considerable de tiempo, dinero y personal (Behrentz & Bogotá,

2005a). Por otro lado, tenemos las metodologías de estimación indirecta, las cuales no toman mediciones de la fuente directamente, en lugar de esto, utilizan correlaciones entre las emisiones y diversos parámetros que las puedan afectar; para ello se utilizan modelos computacionales que son una de las estrategias de estimación más destacadas, utilizadas para diversos propósitos, desde analizar la exposición cerca de las vías hasta comprender las tasas de emisión en una región en particular; algunos de los modelos más utilizados a fines de generar inventarios de emisión son: los modelos MOBILE6 y MOVES desarrollado por la EPA, el modelo EMFAC desarrollado por Junta de Recursos del Aire de California, el modelo COPERT desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente, el Modelo Modal de Emisiones Modales (CMEM) desarrollado por la Universidad de California en Riverside, y el Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE) desarrollado por ISSRC y la Universidad de California en Riverside (Londoño, Correa, & Palacio, 2011a).

Los estudios de inventarios de emisiones en el contexto de Latinoamérica son escasos. Tan sólo 17 de los 35 países de América Latina cuentan con datos disponibles de inventarios de emisiones, y estos, por lo general, sólo se encuentran en las principales ciudades de cada país (Meta, 2016). Cabe resaltar que esta problemática es evidente en Colombia, en la que se han realizado diversos ejercicios para la medición de las emisiones de contaminantes generados por las fuentes móviles. En Villavicencio, a pesar de ser una ciudad intermedia (516.802 habitantes) (Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 2012b), cuenta con pocos estudios de emisiones vehiculares aun, por lo que se desconoce el impacto de las emisiones por fuentes móviles. En este estudio se realizó una campaña de campo de recolección de datos de actividad vehicular, patrones de conducción, composición de la flota, tecnología vehicular, entre otros, con el objetivo de ajustar el modelo a las condiciones locales. Con esto, se podrán calcular los factores de emisión propios para la ciudad de diferentes contaminantes emitidos por los vehículos y de igual forma realizar la estimación del inventario preliminar de emisiones por fuentes móviles para Villavicencio.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción del problema

La contaminación atmosférica es una de las principales problemáticas del mundo, la cual ha incrementado el deterioro de la calidad del aire ocasionando efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente(Medio, Directores, Capítulo, Spiegel, & Maystre, 2014), como son los casos de la morbilidad y la mortalidad de la población asociada a la contaminación del aire que generan altísimos costos sociales, representados en pérdidas de vida tempranamente, ausentismo laboral, pérdida de productividad y atención hospitalaria a la población que sufre enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Según el DNP, los costos por muertes y enfermedades asociadas a la degradación ambiental en Colombia ascienden a $20.7 billones (2.6% del PIB de 2015) (Azim et al., 2011).

Para entender el impacto ambiental generado por la contaminación atmosférica, es importante que dichos contaminantes puedan ser estimados en un inventario de emisiones (IE), el cual tiene por objetivo organizar la información que permita aportar un diagnóstico cualitativo y cuantitativo de las emisiones que ocurren en el área de estudio (Pimiento Tami, 2009). Es importante resaltar que en tan sólo 17 de los 35 países de América Latina se cuenta con datos disponibles de inventarios de emisiones, y de estos, por lo general, sólo se encuentran en las principales ciudades de cada país (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2014). Esta problemática es evidente en Colombia, en donde los inventarios de emisiones se han desarrollado para las ciudades principales, como Bogotá y Medellín (Behrentz & Bogotá, 2005b) y algunas otras como Envigado (Londoño et al., 2011a).

Villavicencio, a pesar de ser una ciudad intermedia (516.802 habitantes) (DNP, n.d.), enfrenta estos problemas de contaminación atmosférica en donde se evidencia la influencia de las fuentes móviles en ruta; esto debido al crecimiento excesivo que ha presentado la movilidad en la ciudad de Villavicencio, las cuales, según registros de la Secretaría de Movilidad del municipio, en los últimos 6 años se duplicaron en el periodo 2011-2016, llegando a 82.628 vehículos (Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 2012a), sin contar la población flotante que ingresa a la ciudad como destino turístico y como principal corredor vial que conecta el oriente y el centro del país.

Los diversos procesos de emisión generados por las fuentes móviles (tubo de escape, frenado, desgaste de llantas), hacen que el cálculo de las emisiones sea complejo. Una de las formas más empleadas es construirlos a partir de datos estadísticos que relacionen la actividad de la fuente con la emisión de un contaminante, también llamados factores de emisión. Existen diferentes bases de datos de factores de emisión para gran cantidad y tipos de fuentes (EPA, IPCC) (Valle, 2018), así como modelo que a partir de información local ajustan estos factores a las condiciones reales. Sin embargo, el uso de estos factores de emisión tiene gran incertidumbre y se hace necesario generar factores de emisión propios del área de estudio que mejoren la calidad de los resultados. Los modelos son una de las estrategias de medición más destacada, que son utilizados para diversos propósitos, desde analizar la exposición cerca de las vías vehiculares hasta comprender las tasas de emisión en una región en particular; algunos de modelos más utilizados a fines de generar inventarios de emisión son: los modelos MOBILE6 y MOVES desarrollado por la EPA, el modelo EMFAC desarrollado por Junta de Recursos del Aire de California, el modelo COPERT desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente, el Modelo Modal de Emisiones Modales (CMEM) desarrollado por la Universidad de California en Riverside, y el modelo de Emisiones Internacionales de Vehículos (IVE) desarrollado por ISSRC y la Universidad de California en Riverside (Ministerio del Medio Ambiente, 2012).

El modelo de Emisiones Internacionales de Vehículos (IVE), es un modelo de computadora diseñado para estimar las emisiones de los vehículos motorizados. El objetivo del modelo es ayudar a las ciudades y regiones a desarrollar estimaciones de emisiones para enfocar las estrategias de control y la planificación del transporte en aquellas que son más efectivas, predecir cómo las diferentes estrategias afectarán las emisiones locales y medir el progreso en la reducción de emisiones a lo largo del tiempo; dicho modelo ha sido utilizado en diversas ciudades del mundo como Ciudad de México (México), Los Ángeles (Estados unidos), Buenos Aires (Argentina), Beijín (China), Pune (India), entre otras, como también en algunas ciudades principales de Colombia como Manizales, Medellín y Bogotá (HERRERA, 2007).

El departamento del Meta no cuenta con una estimación de emisiones vehiculares. En la ciudad de Villavicencio se llevará a cabo el método a partir de una serie de recolección de datos de bajo costo que consiste básicamente en tener en cuenta dos factores fundamentales como la actividad vehicular, el ciclo de conducción, composición de la flota, tecnología vehicular, etc., para ser incluidos en el modelo. Con esto, se podrán calcular los factores de emisión propios para

la ciudad de diferentes contaminantes emitidos por los vehículos y de igual forma realizar la estimación del inventario preliminar de emisiones por fuentes móviles para Villavicencio.

1.2 Formulación entorno al problema

¿Cuáles son las categorías vehiculares responsables de las mayores emisiones de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Villavicencio y qué estrategias se pueden aplicar para su reducción?

Justificación

La disminución en la calidad del aire afecta la calidad de vida de las personas al estar asociada con el incremento de enfermedades, representando una amenaza para la salud de la población; se tiene que cada año se registran más de dos millones de muertes a causa de la contaminación del aire que afectan a los diferentes segmentos de la población; los efectos más graves se presentan en los habitantes más vulnerables, como los niños, los ancianos y las familias de pocos ingresos (Manuel Santos Calderón et al., 2011)Es importante realizar estudios sobre los factores de emisión para conocer las emisiones de contaminantes primarios que se generan dentro de la zona por las fuentes móviles, en el que es necesario el uso de métodos alternativos para determinar la cantidad de contaminante que se está emitiendo, en el cual se destacan los modelos de emisión vehicular (Vásquez, 2017); para llevar a cabo ésta investigación, se utilizará el modelo de Emisiones Internacionales de Vehículos (IVE) desarrollado por ISSRC y la Universidad de California en Riverside, siendo este importante ya que permite estimar las emisiones de los vehículos motorizados, como también ayuda particularmente a países en desarrollo, permitiéndoles hacer estimaciones precisas de emisiones que son fundamentales para la planificación de la gestión de la calidad del aire. Solo unos pocos países, como los Estados Unidos y los países europeos, han desarrollado herramientas de proyección de emisiones razonablemente precisas, y estos modelos están diseñados solo para sus respectivas regiones. Los modelos de E.E.U.U. y Europa no pueden tener en cuenta las diferentes tecnologías y condiciones que existen en la mayoría de los países en desarrollo. La mayoría de estos modelos existentes no incluyen la gama completa de gases de efecto invernadero y las emisiones tóxicas locales que se necesitan para evaluar completamente el impacto de los vehículos motorizados. El Modelo de Emisiones Internacionales de Vehículos (IVE) está diseñado específicamente para tener la flexibilidad que necesitan las naciones en desarrollo en sus esfuerzos para abordar las emisiones de aire de fuentes móviles(Manuel Santos Calderón et al., 2011).En este proyecto se tendrán en cuenta 3 vías de la ciudad de Villavicencio, donde la primera corresponde a una vía principal de la ciudad con gran flujo vehicular, la segunda hace referencia una vía secundaria y finalmente una vía con poco flujo vehicular o residencial, cuyo comportamiento sea característico de las demás vías de la ciudad. En estas vías se levantará información primaria

sobre el tráfico vehicular como son conteos vehiculares, patrones de conducción, entre otros, con el fin de incluirlos al modelo y ajustar los factores de emisión que este contiene.

Finalmente, el trabajo permitirá generar un análisis de las categorías vehiculares y contaminantes atmosféricos con mayores emisiones y algunas propuestas para la mitigación de estas emisiones en escenarios de movilidad sostenible.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Elaborar un inventario preliminar de emisiones de contaminantes atmosféricos por fuentes móviles en ruta en la ciudad de Villavicencio.

2.2 Objetivos Específicos

- Recolectar información primaria mediante la metodología del Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE).

- Calcular las emisiones de contaminantes primarios (CO, COV, NO_x, SO_x y PM_{10}) y gases de efecto invernadero (CO_2, CH_4 y N_2O) de las fuentes móviles en ruta que circulan por la ciudad.

- Evaluar la reducción de emisiones vehiculares bajo escenarios de inserción de tecnologías de movilidad sostenible.

3. Antecedentes

Para la estimación de un inventario de emisiones es de suma importancia tener bases de antecedentes sobre estudios relacionados con el tema desarrollado en años anteriores y en diferentes sectores los cuales serán de gran ayuda durante el planteamiento y ejecución de la investigación. Dentro de la búsqueda de referentes, se puede resaltar el estudio que se realizó en el año 2006, con el modelo de Emisiones Internacionales de Vehículos IVE financiado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) en el que se evaluó utilizando un conjunto de datos disponible de las mediciones de detección remota en un gran número de vehículos en cinco sitios diferentes en Hangzhou, China, en 2004 y 2005 factores de emisión promedio basados en el combustible derivados de la detección remota. Las mediciones se compararon con los factores de emisión correspondientes derivados de los cálculos de IVE para condiciones urbanas de estabilización en caliente. Se observó un resultado en el modelo IVE, el cual sobreestimó la disminución de las emisiones de la clase de tecnología Estado II al Estado I en comparación con las mediciones de detección remota para los contaminantes (Salguero, 2014).

En el año 2010 se realizó un estudio con el tema de expansión urbana relacionada con el tema del crecimiento económico, los cuales han empeorado la dependencia del automóvil ocasionando congestión y contaminación en la India durante las últimas dos décadas. Por lo tanto, se ha intentado estimar las emisiones (en marcha y arranque) de los vehículos de carretera en Chennai utilizando el modelo de Emisiones Internacionales de Vehículos IVE y la recolección de datos sobre los patrones de conducción, en el que se concluyó que la implementación de la tecnología vehicular avanzada y el aumento del transporte público sano, tendría un impacto significativo en la reducción de las emisiones vehiculares (Carlos & Bonfante, 2016).

En el 2012 se realizó un estudio sobre los contaminantes en las horas picos de manera simultánea para el monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx), donde evaluaron las estimaciones de emisiones de fuentes móviles; para ello se realizó una comparación entre los inventarios de emisiones, en el que se concluyó que Santiago, Bogotá y São Paulo están sobrestimadas, Buenos Aires muestra una ligera sobreestimación (Gallardo et al., 2012).

En el año 2014 en la ciudad de Manizales se desarrolló un estudio por Yulánderson Salguero Rodríguez, en el que se estimaron los flujos diarios de los contaminantes criterio, aplicando el modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE) para fuentes móviles en el área urbana de Manizales, fueron estimados los flujos diarios (kg/día) de contaminantes criterio: monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SOx), óxidos de nitrógeno (NOx), material particulado de diámetro menor o igual a 10 micras (PM10) y compuestos orgánicos volátiles (VOC). Las emisiones estimadas con el modelo IVE fueron comparadas con las emisiones de otras ciudades de Colombia y el mundo, teniendo en cuenta un índice de contribución per-cápita. Este inventario fue desarrollado teniendo como base la información para el año 2010 en la ciudad de Manizales (Salguero, 2014) .

Para el año 2015 se desarrolló un estudio por Aura Liliana Rojas Pérez, el cual consistió en la implementación de la metodología IVE para la recolección de datos representativos de la región, incluyendo patrones de conducción y la actividad y distribución de la flota vehicular, en las que se tuvieron en cuenta las siguientes categorías vehiculares como los vehículos particulares, buses, camiones, taxis y motocicletas (Rojas, 2015).

Cabe recalcar que en la ciudad de Villavicencio también se realizó un estudio relacionado con el tema ejecutado por Iván Rene Duarte Hernández, en el que se analizaron las emisiones atmosféricas ocasionadas por vehículos de uso público (buses, busetas y microbuses) que hacen parte del parque automotor del municipio, el propósito de la investigación fue realizar una relación entre las emisiones atmosféricas y la antigüedad de los vehículos que emiten gran cantidad de contaminación a la atmosfera ocasionados por su modelo de fabricación y el tipo de combustible que utilizan; una vez que se adquirió la información, se organizó en bases de datos de manera que fuera más fácil la identificación de las variables, en el que se procedió a la realización del estudio y de ese modo obtener los análisis estadístico implementando el software RStudio Desktop versión 1.0.153, como resultado del procesamiento de los datos transcurridos durante cinco años se obtuvo un aumento en las emisiones atmosféricas, alcanzando un crecimiento de hasta el 10% de opacidad en los vehículos de uso público, para ello presentaron un plan de valoración, análisis e implementación de sistemas de control de emisiones contaminantes para vehículos anticuados, de ese modo poder mejorar el aire en la ciudad de Villavicencio (Duarte Hernández & Ambiental, 2018).

4. Generalidades

El inventario de emisiones corresponde a un conjunto de datos que se consolidan a partir de la sumatoria de emisiones atmosféricas, de acuerdo al tipo y cantidad del contaminante, en un área geográfica y en un tiempo determinado. Cabe resaltar que un inventario de emisión es un instrumento indispensable que coadyuva a la toma de decisiones y la implementación de los procesos de gestión de calidad del aire, ya que estos permiten una evaluación y la imposición de medidas de control, que se encuentren enfocadas en la mejora de la calidad del aire (Gaitán & Cárdenas, 2017).

Al llevar a cabo el cálculo de este indispensable instrumento, se debe tener en cuenta dos características que son fundamentales; el inventario de emisión debe ser completo y preciso y son un pilar fundamental para la determinación de estrategias de control y normas nacionales (Gaitán & Cárdenas, 2017).

De manera general el decreto 948 de 1995, adopta una serie de definiciones para la interpretación de las normas contenidas en el decreto, en el cual expresa que las emisiones se deben asociar de acuerdo a las fuentes emisoras, la cual se clasifica en fuentes estacionarias , fuentes naturales y fuentes móviles (Ministerio del Medio Ambiente, 1995).

El presente estudio realizado en la ciudad de Villavicencio – Meta, se caracteriza por ser uno de los pocos estudios de calidad del aire realizados en el municipio, ya que Villavicencio carece de estudios técnicos referentes a calidad del aire y tampoco cuenta con una red de monitoreo de calidad del aire eficiente, que arroje información en tiempo real de manera continua sobre la calidad del aire del municipio (Duarte Hernández & Ambiental, 2018). Teniendo en cuenta que no se dispone de un Inventario de Emisiones para el área urbana de la ciudad, se procedió a realizar una revisión bibliográfica y se definió la aplicación metodológica para llevar a cabo un inventario de Emisiones a partir del modelo internacional de emisiones vehiculares (IVE), para así poder realizar una estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta.

Inventarios de Emisiones de Fuentes Móviles:

Como se mencionó anteriormente, el decreto 948 de 1995, adopta una serie de definiciones para la interpretación de las normas contenidas en el decreto, en el cual define las fuentes Móviles de la siguiente forma:

Fuente Móvil: es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza (Ministerio del Medio Ambiente, 1995) .

Emisiones Procedentes de Fuentes Móviles

Los vehículos automotores que son propulsados por motores de combustión interna producen, en general tres tipos de emisiones de gases contaminantes: emisiones evaporativas, por el tubo de escape y emisiones de partículas por desgaste como frenos y llantas (Ministerio del Medio Ambiente, 1995).

Emisiones por el tubo de escape

Todas las emisiones provocadas por los tubos de escape de los vehículos, son productos de la quema de combustibles como gasolina, diésel, gas o biocombustibles, los cuales se caracterizan por estar compuestos por una serie de contaminantes tales como: monóxido y bióxido de carbono, los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno y las partículas, sin mencionar que adicionalmente se presentan otro contaminantes que se encuentran inmersos en los combustibles como el azufre y plomo, que son liberados al ambiente tras realizar el proceso de combustión (Ministerio del Medio Ambiente, 2006).

Las emisiones de tubo de escape dependen de las características que poseen los vehículos, como también de la tecnología y el sistema de control de emisiones que contenga, es por esto que, al determinar las emisiones de escape, es de gran relevancia tener en cuenta otras características del automóvil, como el estado de mantenimiento del vehículo y los factores operativos, la velocidad de circulación, la frecuencia e intensidad de las aceleraciones y las características del combustible (Ministerio del Medio Ambiente, 2006).

Emisiones Evaporativas:

Estas emisiones se caracterizan por ser causadas a partir del proceso de evaporación de combustible, que ocurren cuando el vehículo se encuentra estacionado y/o en circulación; la cantidad depende de las características vehiculares, factores geográficos, meteorológicos (altura y temperatura). Los procesos encargados de presentar la mayor cantidad de emisiones evaporativas vehiculares (figura 1) son:

- Emisiones diurnas: generadas en el sistema de combustible del vehículo debido a los cambios de temperatura a través de las 24 horas del día.
- Emisiones del vehículo recién apagado con el motor caliente: Se presentan una vez que se apaga el motor, debido a la volatilización del combustible por su calor residual.
- Emisiones evaporativas en circulación: Se presentan cuando el motor está en operación normal.
- Emisiones evaporativas del vehículo en reposo con el motor frío: Ocurren principalmente debido a la permeabilidad de los componentes del sistema de combustible.
- Emisiones evaporativas durante el proceso de recarga de combustible: Consisten de fugas de vapores del tanque de combustible durante el proceso de recarga; se presentan mientras el vehículo está en las estaciones de servicio y para efectos de inventarios de emisiones, son tratadas típicamente como fuente de área.

Figura 1.Emisiones evaporativas, adaptado de (Instituto Tecnológico (Costa Rica) & Rodríguez-Yáñez, 2015)

Modelos de emisión Vehicular

Un inventario de emisión es un instrumento indispensable que coadyuva a la toma de decisiones y la implementación de los procesos de gestión de calidad del aire, para llevar a cabo dichos inventarios suelen utilizarse modelos computacionales, los cuales utilizan como variables significativas factores locales, flota vehicular y el nivel de actividad de sus motores, para así obtener el valor total del inventario de emisión (Ministerio del Medio Ambiente, 2012). En este sentido, es importante mencionar algunos modelos de emisión vehicular utilizados con mayor frecuencia en el continente Latinoamericano y en el mundo:

Modelo MOBILE

El modelo MOBILE, es un programa de computo utilizado principalmente para estudios relacionados con la calidad del aire, ya que permite el cálculo de factores de emisión para vehículos automotores, que se caracterizan por tener un proceso de combustión en su motor, a base de gasolina, diésel o gas natural. Este modelo ha sido utilizado en inventarios estatales de Estados Unidos, como también en países con características vehiculares similares como México.

Este modelo arroja como resultado los factores de emisión para cada contaminante en gramos por milla (g/milla), siendo este calculado a partir de la multiplicación del factor de emisión por una estimación de las millas recorridas por los vehículos (VMT) de cada categoría, en un lugar y tiempo determinado. Es importante resaltar que este modelo estima las emisiones de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, material particulado y algunos compuestos tóxicos como el benceno, metil-terc-butil éter, butadieno, formaldehído.

Modelo MOVES

El sistema de modelación vehicular llamado Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES), consiste básicamente en una base de datos escrita en Java/MySQL, que se caracteriza por permitir la estimación de emisiones en un amplio rango de contaminante, siendo usado tanto para vehículos que circulan en carretera como los que no, permitiendo múltiples escalas de análisis.

Este modelo se encuentra actualmente disponible al público (MOVES2004), siendo su función la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero y el análisis del ciclo de vida del combustible. Se prevé que saldrán versiones que incorporarán más emisiones de las categorías de fuentes móviles. En MOVES, se usa grandes grupos de categorías vehiculares como, vehículos de pasajeros, camiones de pasajeros ligeros, camiones comerciales, camión recolector de basura, camión de trayecto corto, camión de trayecto largo, autobuses intermunicipales, urbanos, camiones dependiendo si es de trayecto largo o corto, etc para posteriormente determinar el tipo de combustible, uso de combustible, tecnología vehicular de cada una de las categorías, etc.

Modelo IVE

El Modelo internacional de emisiones vehiculare, es un programa que permite la estimación de las emisiones de contaminantes criterio, contaminantes tóxicos y gases de efecto invernadero que son provocados por vehículos automotores que transitan por carretera, se caracteriza por considerar las emisiones de escape y evaporativas, teniendo en cuenta patrones de conducción que permiten estimar las emisiones generadas, dependiendo de los hábitos de conducción utilizados en el área de estudio.

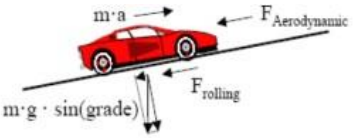
Este modelo fue realizado por la universidad de California en Riverside, Colegio de Ingeniería del Centro para la Investigación Ambiental y Tecnología, el Centro Internacional de Investigación en Sistemas Sustentables y la empresa Investigación en sistemas globales sustentables, con fondos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y está disponible actualmente en varios idiomas como: inglés, Español, Francés y Ruso.

Este modelo fue desarrollado con el fin de disminuir la insuficiencia de disponibilidad de datos de calidad del aire en algunos países en vía de desarrollo, los cuales carecen de experiencia para llevar a cabo usos de manera apropiada los modelos de emisión más complejos, por ende, este modelo se caracterizó por ser fácil de entender y de usar, por tener un uso flexible, adaptarse a cualquier país, demandar pocos insumos, utilizar mediciones de campo y generar resultados consistentes.

El modelo IVE estima las emisiones tanto de contaminantes criterio como descontaminantes tóxicos y gases de efecto invernadero, entre estos podemos encontrar: Compuestos Orgánicos

Volátiles (COV), Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrógeno (NOx), Material Particulado (PM), Dióxido de Carbono (CO2), Metano (CH4), Amoniaco (NH3), Benceno, Aldehídos.

Es importante tener en cuenta la metodología de la potencia especifica vehicular, ya que 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; en el que se tiene incluido la resistencia de 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, ver (figura 2) (Salguero, 2014).



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

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

Figura 2.Ecuación de VPS (Salguero, 2014)

4.1 Marco Legal

Tabla 1.*Marco legal*

JERARQUIA	NORMA	FECHA	DESCRIPCION
DECRETO	948	1995	Contiene el reglamento de protección y control de calidad del aire, el cual establece las normas y principios generales para la protección atmosférica, los mecanismos de prevención, control y atención de episodios por contaminación del aire, generadas por fuentes fijas y móviles; el presente decreto comprende las normas básicas para la fijación de los estándares de emisión y descarga de contaminantes a la atmosfera, emisión de ruido y olores ofensivos, como también regula el otorgamiento, control y vigilancia de los permisos de descargas de emisión

Tabla 1. Continuación

DECRETO	**979**	**2006**	**Se encuentra en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica, como también la protección de la calidad del aire; el presente decreto se encuentra enfocado a regir los distintos niveles periódicos de inmisión, niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación del aire, de igual forma contiene medidas para establecer los planes de contingencia referentes a la contaminación atmosférica**
RESOLUCIÓN	910	2008	La presente resolución establece los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes que deben cumplir las fuentes móviles terrestres y reglamenta los requisitos y certificaciones a las que se deben encontrar sujetos los vehículos y demás fuentes móviles
RESOLUCIÓN	1111	2013	Por la cual se modifica la Resolución 910 de 2008 y presenta a quienes se exceptúan del cumplimiento de las disposiciones de la presente resolución; también reglamenta los límites máximos de emisión permisibles para vehículos pesados con motor dedicado a gas natural o GLP en prueba dinámica; también adopta la clasificación de las fuentes móviles para la medición de emisiones conforme a los ciclos de prueba de los Estados Unidos. finalmente establece los máximos niveles de emisión para los vehículos livianos y medianos, motor ciclo Diésel
RESOLUCIÓN	650	2010	La presente resolución, se expide con el fin de adoptar a nivel nacional el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire

Tabla 1. Continuación

RESOLUCIÓN	**2154**	**2010**	**Por la cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010 y se adoptan otras disposiciones**
Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire		2008	Presenta un aparte de la forma como se deben llevar a cabo los monitoreos desarrollados actualmente por particulares con fines de estandarizar y aumentar la calidad de la información de este tipo de monitoreos para que puedan ser incluidos en el Sistema de Información sobre Calidad del Aire
Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas		2017	Es un documento de referencia que compila los principales criterios técnicos necesarios para desarrollar un inventario de emisiones.

Nota. Normatividad vigente sobre factores de emisiones contaminantes. Por Ortiz & Ríos, 2019

5. Metodología

5.1 Fase 1: Campaña de Campo

Los factores de emisiones de contaminantes primarios (monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), óxidos de nitrógeno (NO_X), óxidos de azufre (SO_x) y material particulado (PM_{10})) y gases de efecto invernadero (dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4) y dióxido de nitrógeno (N_2O)) de las fuentes móviles en ruta que circulan por la ciudad, se obtuvieron de acuerdo a los lineamientos metodológicos de recolección y procesamiento de datos del modelo IVE. La recolección de datos se ejecutó en tres vías de la zona urbana de Villavicencio; la primera fue la "Avenida 40" que corresponde a una vía principal de la ciudad y se caracteriza por tener gran flujo vehicular, la segunda "la calle 15 más conocida como la octava" hace referencia a una vía secundaria con flujo vehicular moderado, finalmente se eligió "La carrera 11 en el barrio del Recreo" debido a que se distingue por su escaso tránsito vehicular (residencial) Figura 3. En cada vía se establecieron tres circuitos de conducción y tres puntos de aforo vehicular.

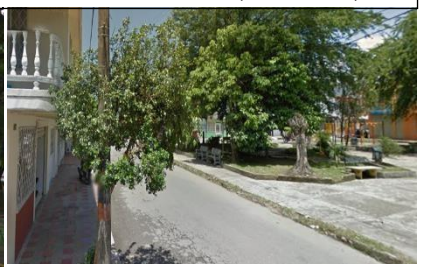
Avenida 40	(Calle15 (la octava)	Carrera 11 (el recreo)
		

Figura 3.Las 3 vías de la zona urbana de Villavicencio. Por Ortiz & Ríos, 2019

A partir del proceso de recolección de datos en la campaña de campo realizada en cada una de las vías urbanas seleccionadas en la ciudad de Villavicencio, se determinó en el área de estudio la composición dinámica de la flota en circulación, llevando a cabo 6 grabaciones de video, durante un periodo de 15 minutos en cada una, es decir de 4:00 a 4:15 pm (hora valle) y de 6:00 a 6:15 pm (hora pico) en cada una de las vías seleccionadas para llevar a cabo la investigación.

seguido de esto, se tomó cada una de las grabaciones para realizar un conteo vehicular, donde el número de autos obtenidos tras el conteo, fue extrapolado a una hora completa suponiendo un comportamiento lineal del flujo vehicular, siendo estos incorporados en una base de datos (Excel), que presenta el total de vehículos particulares, taxis, buses de servicio público, camiones y motos que transitaron durante la hora pico y valle (6:00 pm y 4:00pm respectivamente) en las que se tomaron cada uno de los videos.

5.1.1 Circuitos de conducción.

Recorrido 1:

El circuito tomado para llevar a cabo la investigación en la vía primaria fue la avenida 40, la cual fue recorrida por ambos sentidos durante un periodo de 15 minutos en una hora pico (6:00 pm) donde el flujo vehicular se caracteriza por ser muy denso y en una hora valle (4:00 pm) donde el flujo vehicular es moderado Figura 4.

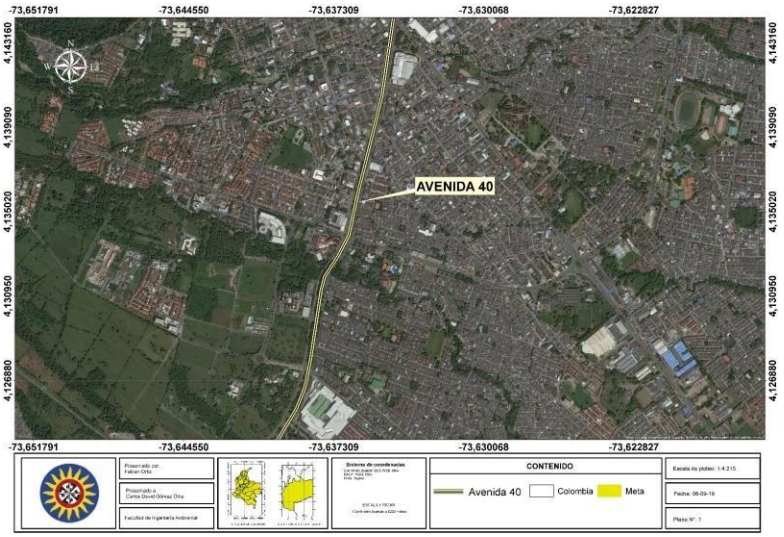


Figura 4. Vía primaria (avenida 40), adaptado de ArcGIS. Por Ortiz & Ríos, 2019

***Recorrido 2*:**

El tramo seleccionado para la investigación en una vía semi-principal, corresponde a la Calle 15 más conocida como la Octava, la cual se caracteriza por poseer menor flujo vehicular que la

avenida seleccionada para el circuito uno. Se obtuvo los resultados del tramo dos recorriendo durante 15 minutos en cada una de las categorías vehiculares con un GPS a bordo en una hora pico (6:00 pm) y una hora valle (4:00 pm) al igual que en el tramo uno Figura 5

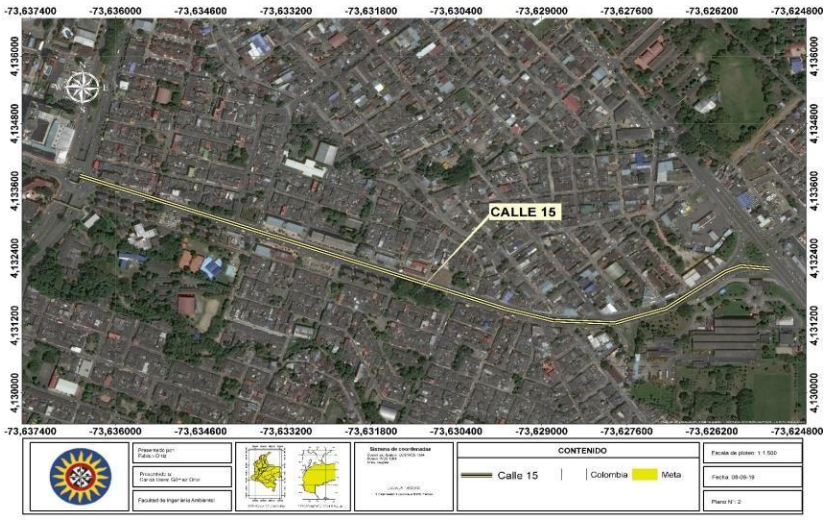


Figura 5. Vía secundaria (calle 15), adaptado de ArcGIS . Por Ortiz & Ríos, 2019

***Recorrido 3*:**

Para el estudio de este último circuito, se seleccionó la carrera 11 ubicada en el barrio Recreo de la ciudad de Villavicencio, la cual corresponde a una vía terciaria, que se caracteriza por tener un flujo vehicular menos denso que el de la vía primaria y secundaria. Los resultados que se obtuvieron de dicha vía fueron conseguidos a partir de la misma metodología empleada para el tramo uno y dos *Figura 6.*

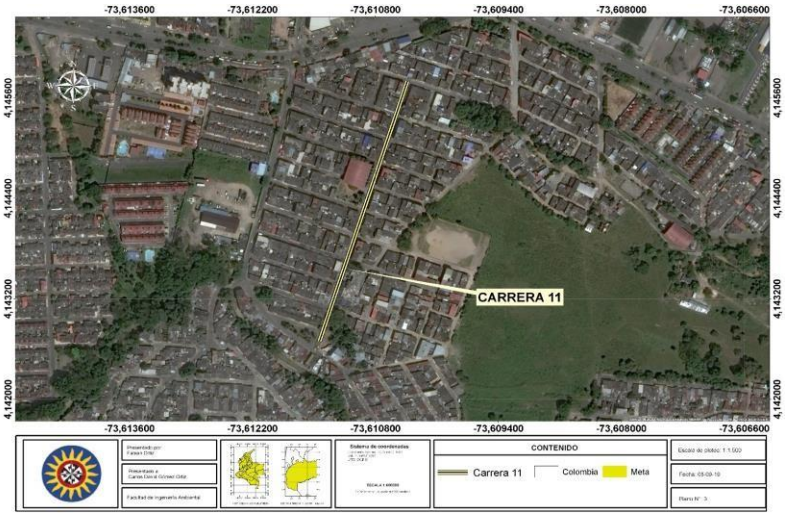


Figura 6. Vía terciaria (carrera 11), adaptado de ArcGIS. Por Ortiz & Ríos, 2019

5.1.2 Actividad 1: Patrones de conducción.

Con la identificación y selección de la zona de estudio, se recolectaron los datos por medio de captura de información segundo a segundo de datos de velocidad y posición geográfica de los vehículos que transitaban por las 3 diferentes vías. Lo anterior se logró con el equipamiento de un vehículo de cada categoría (vehículo particular, taxi, camión, bus y motocicleta) con un GPS GARMIN Oregón. Esto se llevó a cabo en cada una de las categorías, teniendo en cuenta que la hora pico seleccionada fue las 6:00 pm y la hora valle para esta investigación fue 4:00 pm.

Los datos obtenidos en campo con el GPS (Fecha, hora, latitud, longitud, altitud y velocidad), se tabularon en Excel y se importaron al software Speed Analysis Figura 7, arrojando como resultado una variable significativa para el modelo IVE, llamada Bines de potencia, que representa las condiciones de potencia y estrés del motor durante su funcionamiento en una zona urbana. Esta teoría, divide la potencia del motor en tres categorías: potencia negativa, cuando el vehículo realiza un proceso de desaceleración, potencia positiva, se refiere a la velocidad uniforme al conducir un vehículo y la potencia nula se da cuando el vehículo se encuentra en reposo total (David, 2017). Luego de tener los bines por cada una de las categorías, se procede a insertarlos en el archivo de entrada de ubicación del modelo IVE.

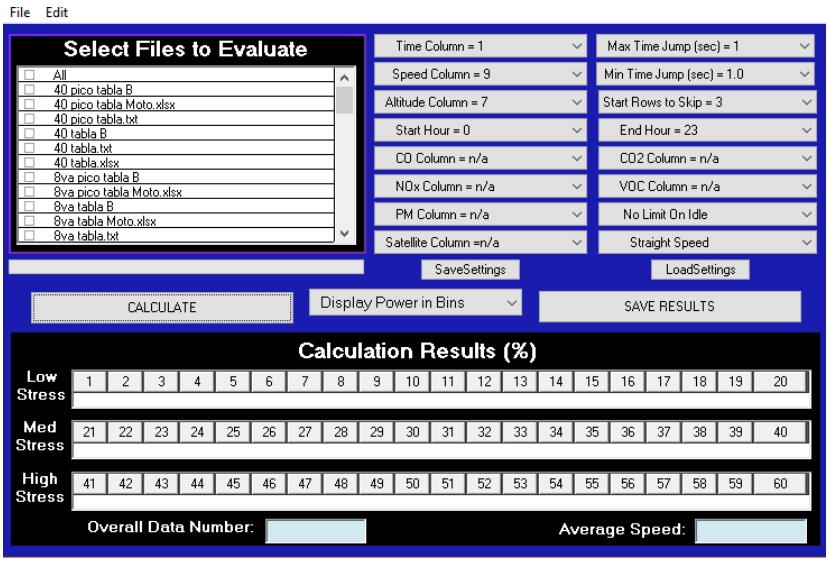


Figura 7.Software Speed Analysis Por Ortiz & Ríos, 2019.

5.1.3 Actividad 2: Composición Dinámica de la flota vehicular.

Para esta actividad se realizaron grabaciones del flujo vehicular en los puntos seleccionados de cada una de las vías (avenida 40, calle 15, carrera 11) de las zonas urbanas de Villavicencio. Posteriormente se realizó un conteo vehicular durante los 15 minutos de grabación, identificando el tipo de vehículo y la cantidad que recorrieron cada una de las vías teniendo en cuenta cada una de las categorías (vehículo particular, taxi, buseta, camión y moto); la toma de los datos del conteo se realizó en una hora pico (6 de la tarde) y en una hora valle (4 de la tarde) y a la vez se solicitaron grabaciones de cámaras de seguridad y de tránsito a las respectivas autoridades competentes con el fin de complementar el estudio.

5.1.4 Actividad 3: Distribución de las tecnologías vehiculares.

El modelo IVE tiene dos grandes conjuntos de información de entrada. Uno de estos es la clasificación tecnológica del parque automotor de la ciudad. Para completar este formulario se requiere información específica de los vehículos que conforman el parque automotor de la ciudad en términos de: tamaño del vehículo, tipo de combustible, uso del vehículo (kilometraje acumulado), sistema de entrega de combustible, sistema de control de emisiones evaporativas y sistema o estándar de control de emisiones por el tubo de escape (IVE model, 2008).

Esta información se obtuvo a partir de la realización de encuestas aleatorias en la ciudad a propietarios de vehículos particulares y motos, además de información secundaria entregada por Centros de Diagnóstico Automotor (CDA), Secretaría de Movilidad y empresas de transporte público para las demás categorías vehiculares. El Anexo 1 muestra el formato de encuesta utilizado. Se obtuvo un total de 102 encuestas en donde se obtuvo información de tipo de vehículo, año modelo, kilometraje, cilindraje del vehículo, tipo de combustible, uso de aire acondicionado y encendidos del vehículo por día. Esta información tuvo que ser comparada posteriormente con las fichas técnicas de los vehículos para obtener información adicional relacionada con los sistemas de control de emisiones y el sistema de entrega de combustible.

Las categorías vehiculares se clasificaron de la siguiente manera:

- Vehículo particular: incluye automóviles, camionetas y camperos.
- Camiones: incluye vehículos de carga livianos, medianos y vehículos de 3 o más ejes.
- Motocicletas: motocicletas de motor de 2 y 4 tiempos.
- Buses: microbuses, busetas y buses de transporte público.
- Taxis

5.1.5 Actividad 4: Distribución de las partidas en frío del motor.

Las partidas en frío del motor corresponden al número de veces que un vehículo es encendido durante el día. Este número difiere según la categoría vehicular según el uso y la vocación (Gómez, 2018). Por ejemplo, los vehículos de servicio público que se encuentran recorriendo la ciudad todo el día, tendrán menos encendidos que un vehículo particular de una persona que labora o estudia. La distribución de partidas corresponde al tiempo entre encendidos en el que el motor estuvo apagado (Rojas, 2015). El modelo IVE divide estos periodos de reposo en 10 fracciones: 15min, 30min, 1h, 2h, 3h, 4h, 6h, 8h, 12h y 18h. Estos periodos, también conocidos como tiempos Soak (remojar, en inglés), hacen referencia a que el motor se encuentra remojado de combustible y aceite. Entre mayor es el tiempo Soak, mayores son las emisiones generadas en el encendido del motor hasta que este alcanza su temperatura de operación óptima (IVE model, 2008).

Las partidas para los vehículos particulares y motos fueron registradas en las encuestas realizadas a los conductores. El tiempo transcurrido entre cada partida es una variable difícil de obtener debido a que se requiere que gran cantidad de conductores de vehículos de cada categoría registren durante cierto periodo la hora en la que encienden el vehículo. Por lo tanto, este último parámetro se utilizó la información proveniente de la distribución de partidas calculada para el inventario de emisiones en la jurisdicción CAR (Rojas, 2015).

5.2 Fase 2: Cálculo de las emisiones.

Para la elaboración del inventario preliminar, se desarrolló la estimación de emisiones anuales para los contaminantes primarios (CO, COV, NO_x, SO_x y PM_{10}) y los gases de efecto invernadero (CO_2, CH_4 y N_2O), teniendo en cuenta 5 categorías vehiculares (vehículos particulares, motocicletas, buses de transporte público, taxis y transporte de carga), y se tomó como referencia las 3 zonas seleccionadas de Villavicencio con comportamiento vehicular característico Figura 8.

Par llevar a cabo las corridas en el modelo IVE Figura 8 para la estimación de las emisiones por contaminante, fue necesario tener en cuenta que el modelo requiere de dos archivos de entrada, donde uno corresponde a uno de localidad y otro de flota vehicular, donde el primero se requiere de información característica de la zona de estudio como altitud, porcentaje de aire acondicionado que se usa a 27 grados centígrados, el tipo de inspección y mantenimiento que se realiza al vehículo, que es donde se incluye la revisión hecha por los CDA, características del combustible como porcentaje de azufre y plomo en la gasolina y el diésel, toda la información obtenida de los patrones de conducción, composición dinámica de la flota y el porcentaje de vehículos que se encuentran por cada tipo de vía (esto solo para motocicletas y vehículos particulares. El archivo de flota que requisito de entrada para las corridas del modelo IVE, tiene información relacionada con la distribución de la flota con respecto a:

- Los tamaños de los vehículos, que está directamente relacionado con el tamaño del motor
- Sistemas de control de emisiones evaporativas
- Tipo de combustible
- Edad del vehículo en términos de recorrido

Tras obtener los dos archivos que son necesarios para realizar las corridas del modelo IVE, se procede a realizar el cálculo de las emisiones por medio del software del modelo, el cual arrojara como información tablas que contienen las cantidades en kilogramo día por cada contaminante y categoría seleccionada.

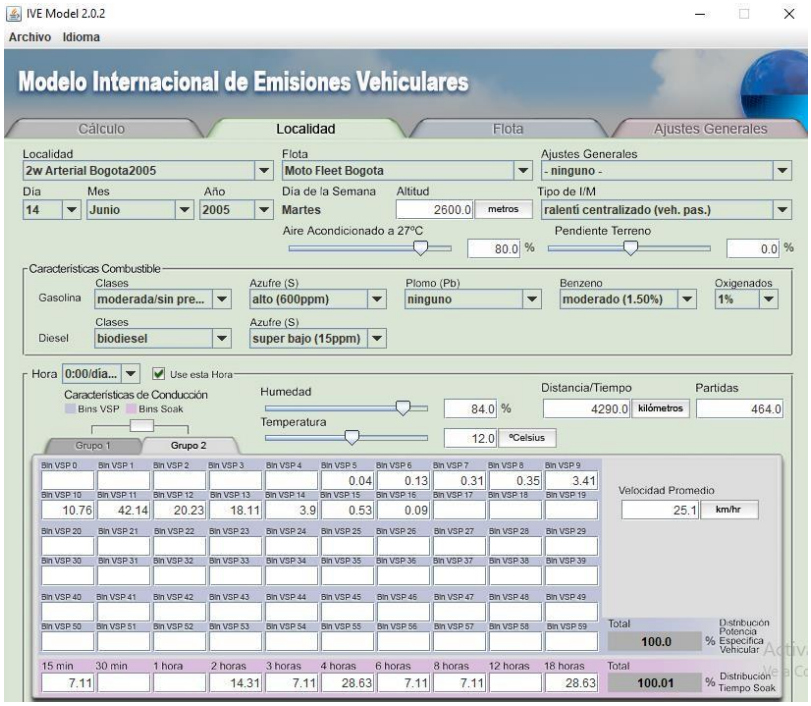


Figura 8.Modelo IVE. Por Ortiz & Ríos, 2019

5.3 Fase 3: Proyección de escenarios

Para establecer una propuesta de escenarios de movilidad sostenible, se realizó una extrapolación logarítmica del parque vehicular al año 2030 tomando como base los parques vehiculares entre 2015 y 2018 reportados por el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) (Figura 11). Con esta información, se calcularon 3 escenarios de emisión de PM10 y CO2: escenario base, cambio de la flota de buses de servicio público a gas natural e inserción de movilidad eléctrica en vehículos particulares. Estos dos compuestos se eligieron debido a que el PM10 es el principal causante de daños en la salud humana y el CO2 por su influencia como gas de efecto invernadero.

La proyección de las emisiones se calculó siguiendo la metodología EPA (Palmer, 2000) de acuerdo con las siguientes Ecuación 1 y Ecuación 2(Ec. 1 y 2):

La Ecuación 1, arroja como información la emisión calculada para el año proyectado en la extrapolación logarítmica. Para llevar a cabo este procedimiento es necesario tener la cantidad de vehículos registrados en la ciudad del año base, también es necesario tener el factor de crecimiento desde el año base, como también el factor de emisión apropiado para la tasa de emisión futura de la fuente en el año proyectado, el cual es calculado a partir de la Ecuación 2.

$$E_n = (AD_s * GF_n) * EF_n$$

Ecuación 1.Emisión para calcular el año proyectado

Donde:

E_n: Emisión calculada para el año proyectado n,

AD_s: Datos de actividad (número de vehículos) del año base,

GF_n: Factor de crecimiento para la actividad desde el año base hasta el año proyectado,

EF_n: Factor de emisión apropiado para la tasa de emisión futura de la fuente en el año n.

$$EF_n = \frac{\sum_{t=1...p} EF_t * AD_t}{AD_n}$$

Ecuación 2.Factor de emisión para el sistema de control especifico

Dónde:

EF_t: Factor de emisión para una subsección de la fuente usando una tecnología o sistema de control específico,

AD_t: Datos de actividad proyectados para una tecnología o sistema de control específico dentro de la fuente,

p: Número total de tecnologías,

AD_n: Actividad proyectada para toda la fuente en el año n.

Escenario base: Aumento del parque vehicular

Para desarrollar el escenario base se utilizó una regresión logarítmica para proyectar el parque vehicular al año 2030. En este se asume que la distribución tecnológica del parque automotor se mantiene constante. Para así poder calcular el total de vehículos que habría para el año 2030, teniendo como año base el 2018, el cual presenta un total de 97387 vehículos.

Escenario 1: Flota de buses con conversión a gas natural vehicular

En este escenario se aplicó una transformación paulatina de la flota de buses de servicio público hacia un combustible más limpio como es el gas natural vehicular (GNV). En esta, se partió de la base que todos los vehículos de transporte público actuales usan diésel como combustible y se irá reemplazando la flota progresivamente por vehículos con reconversión a GNV hasta alcanzar el 100%.

Escenario 2: Inserción de movilidad eléctrica en Motocicletas

En este escenario se supuso una transición hacia la movilidad eléctrica o de cero emisiones en las motocicletas debido a su alta participación en el parque automotor (cerca del 70%). En este caso, se estimó que para el 2030, la participación de motos eléctricas en el parque automotor es del 50%.

6. Resultados y Análisis

A continuación, se encuentran los resultados que se obtuvieron en cada una de las tres fases de la metodología planteadas anteriormente para la estimación de factores de emisión por fuentes móviles en ruta de la ciudad de Villavicencio por medio del modelo IVE.

6.1 Fase 1: Campaña de Campo

6.1.1 información primaria.

Para llevar a cabo esta investigación, fue necesario recolectar información directamente de la zona a estudiar como lo son la vía primaria, secundaria y terciaria seleccionada previamente, donde se tomaron una serie de grabaciones de video que permitieron obtener información necesaria para los archivos de entrada del modelo IVE, como el total de vehículos que transcurrieron durante la 1 hora por cada una de las vías y las categorías que transitan por allí.

6.1.1.1 Patrones de conducción.

Los tres tramos seleccionados en la investigación (vía primaria, vía secundaria y vía terciaria), que corresponden a la avenida 40, calle 39 y calle 12 del barrio Recreo, fueron recorridos por un vehículo de cada categoría, que fue equipado con un GPS GARMIN Oregón el cual marcaba la posición segunda a segundo mientras el vehículo llevaba a cabo su recorrido durante un periodo de 4:00 a 4:15 pm (hora valle) y de 6:00 a 6:15 pm (hora pico) en cada una de las vías anteriormente mencionadas.

Los datos resultantes del recorrido fueron tabulados en una base de datos (Excel), que contiene como información fecha, tiempo, latitud, longitud, altitud y velocidad recorrida segundo a segundo y procesados mediante el software Speed Analysis, que arrojó un archivo que contiene bines de potencia, necesarios para realizar las corridas del modelo IVE, debido a que estos representan la potencia y el estrés del motor (Henríquez, 2007).

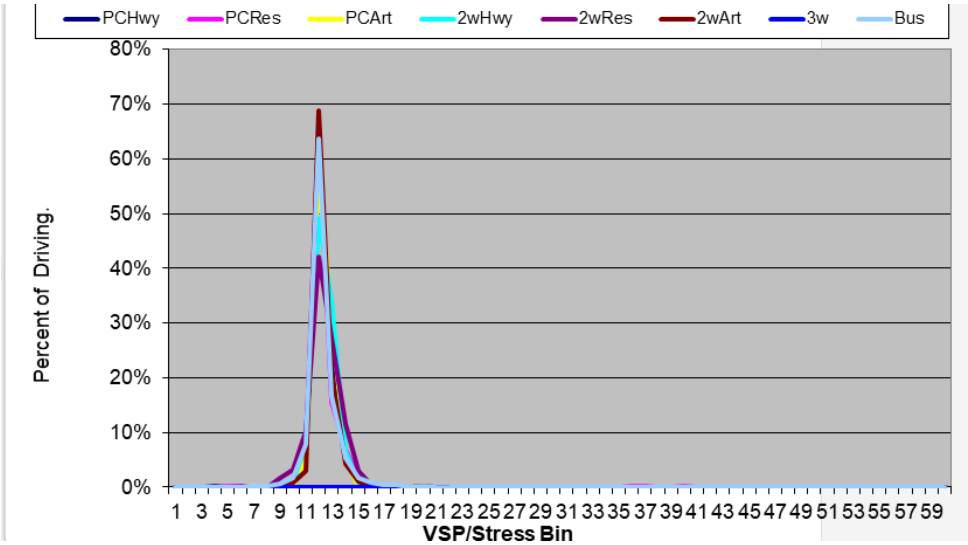


Figura 9.Histogramas de bins de potencia para automóviles de la ciudad de Villavicencio. Por Ortiz & Ríos, 2019

En la Figura 9, se puede observar claramente que todas las categorías vehiculares se encuentran la mayor parte del recorrido sobre el bin número 11, el cual representa una aceleración baja, una velocidad angular del motor baja, durante los últimos 20 segundos de funcionamiento del auto, identificándose como una carga baja, el cual es característico de vías con alto flujo vehicular, con constantes paradas (Henríquez, 2007). Si los bines se localizarán en un rango de 40 a 60, sería una carga alta, la cual se caracteriza por tener altas aceleraciones y si los bines estuviesen en un rango de 20 a 40, las condiciones de velocidad de los vehículos sería intermedia. En el gráfico de bines se puede denotar que en la relación tiempo y potencia, las motocicletas son la categoría que presentan menos tiempo con bajas velocidades durante los trayectos (Henríquez, 2007).

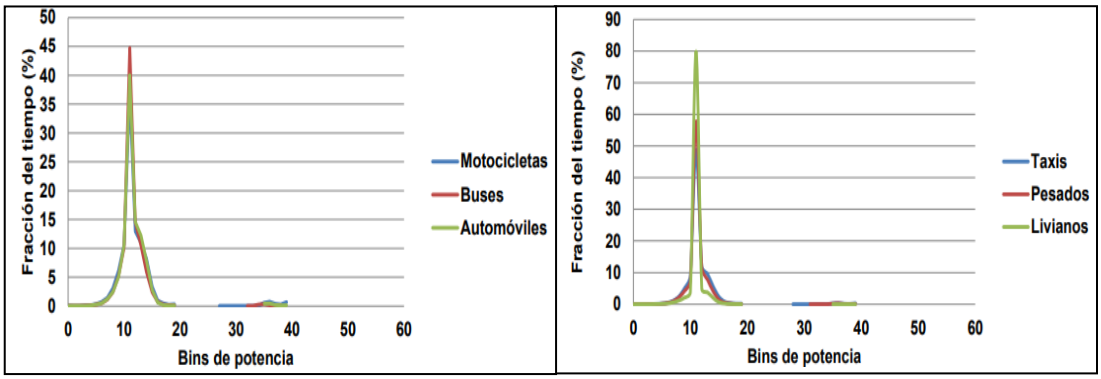


Figura 10.Histogramas de bins de potencia de la ciudad de Manizales (Salguero, 2014) *Se comparó en las Figura 9*

Figura 10 el comportamiento vehicular de la ciudad de Manizales frente a la ciudad de Villavicencio por medio de los bines de potencia, donde se puede denotar que la mayor parte del parque automotor de Manizales presenta velocidades bajas, siendo los taxis la categoría que presentó menor tiempo con velocidades bajas a diferencia de la ciudad de Villavicencio que la categoría que registro menor tiempo con velocidades muy bajas fueron las motocicletas en la vía secundaria, pero cabe destacar que los bines de potencia de ambos estudios se encuentran concentradas en rangos de 11 a 12, lo cual es característico de una vía que posee gran densidad vehicular (Salguero, 2014).

6.1.1.2 Composición dinámica de la flota vehicular.

Al llevar a cabo las 6 grabaciones de video (mencionadas en la metodología), durante un periodo de 15 minutos en cada una, es decir de 4:00 a 4:15 pm (hora valle) y de 6:00 a 6:15 pm (hora pico) en cada una de las vías seleccionadas para llevar a cabo la investigación. Seguido de esto, se tomó cada una de las grabaciones para realizar un conteo vehicular, así identificar la cantidad de vehículos por categoría, que transitaron durante los 15 minutos.

El números de vehículos (por categoría) obtenidos tras el conteo realizado en cada una de las grabaciones que contienen información de 15 minutos de video, fue extrapolado a una hora completa, multiplicando la cantidad de vehículos de cada categoría por dos, debido a que la avenida principal se encontraba en doble sentido, y luego el resultado se multiplico por sesenta ya que se debían extrapolar los quince minutos del video tomado anteriormente a 60 minutos Tabla 2.

Luego de calcular la cantidad de vehículos que transitaron por cada una de las vías durante una hora, se procedió a estimar el total de vehículos que recorrieron las vías durante las horas pico y horas valle, a partir del software Google Maps, que ofrece como información minuto a minuto sobre el comportamiento vehicular de cada una de las vías, mostrando el porcentaje del aforo vehicular que transita por un lugar y momento determinado; el software representa en color verde el 25% de los vehículos que transitaron allí, en color nanja el 50% de los vehículos, en color rojo el 75% y 100% el color vinotinto Figura 11, donde dichos porcentajes fueron multiplicados por el total de los vehículos que obtenidos en el conteo vehicular, según el color que muestra el software por cada una de las horas evaluadas.

Tabla 2.
Conteo vehicular según la categoría

VIA PRINCIPAL					
Horas	**VEHICULOS PARTICULARES**	**TAXIS**	**BUSES DE SERVICIO PUBLICO**	**CAMIONES**	**MOTOS**
VALLE	287	175	15	14	236
PICO	275	156	8	18	260
MULTIPLICADO*2	574	350	30	28	472
MULTIPLICADO *2	550	312	16	36	520
MULTIPLICADO *60	34440	21000	1800	1680	28320
MULTIPLICADO *60	33000	18720	960	2160	31200

Nota. El conteo vehicular se multiplico por dos para cada categoría debido a que la avenida principal se encontraba en doble sentido, y se multiplico por sesenta ya que se debían extrapolar los quince minutos del video tomado anteriormente a una hora. Por Ortiz & Ríos, 2019

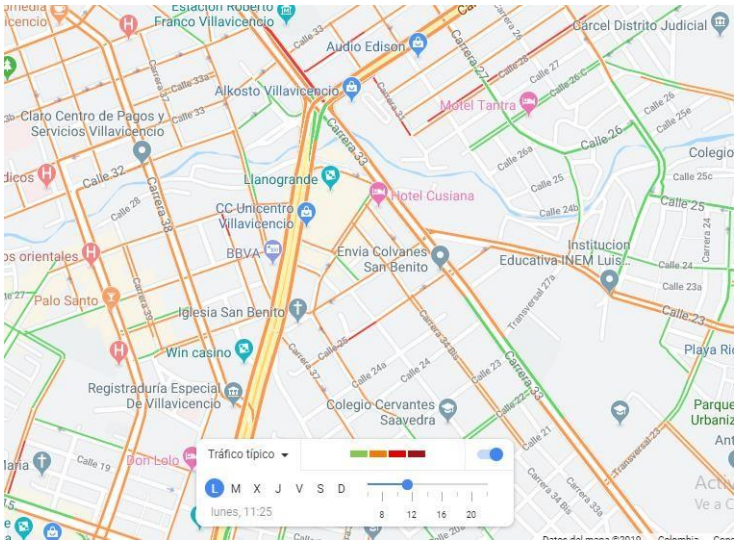


Figura 11.Software que presenta el porcentaje del flujo vehicular. Por Ortiz & Ríos, 2019

6.1.2 información secundaria.

Fue necesario realizar una recolección de información secundaria a partir de encuestas, documentos proporcionados por la Secretaria de movilidad y tránsito de Villavicencio, centros de diagnóstico automotor e investigaciones similares en otras ciudades, las cueles permitieron obtener la información necesaria para llevar a cabo las corridas del modelo IVE.

6.1.2.1 Encuestas.

se realizaron una serie de preguntas por medio de Encuestas Google, las cuales fueron contestadas por 102 pobladores de la ciudad, que permitieron obtener información que no fue proporcionada por la Secretaria de Tránsito y Transporte de la ciudad de Villavicencio y Centros de diagnóstico automotor. Dichas encuestas brindaron información de gran relevancia como el tipo de vehículo, año modelo, kilometraje, cilindraje del vehículo, tipo de combustible, uso de aire acondicionado y encendidos del vehículo por día, ya que la información mencionada, se debe insertar dentro de los archivos de entrada que requiere el modelo IVE.

6.1.2.1.1 VKT.

6.1.2.1.1.1 Kilometraje total recorrido según la categoría.

Los kilómetros recorridos por los vehículos de cada una de las categorías, es una variable de gran relevancia para el desarrollo óptimo del modelo IVE. Es por esto, que en la presente investigación se llevó a cabo el cálculo de dicha variable por medio del método de VKT en cada una de las categorías vehiculares, teniendo en cuenta que este método ha sido usado en otras investigaciones nacionales como en Bogotá (Behrentz & Bogotá, 2005a) y Valle de Aburrá (Prieto, 2015) y en otros estudios internacionales como el que se desarrolló en México, donde se estima los factores de emisión de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en las vías urbanas en Mexicali (Ministerio del Medio Ambiente, 2012)(Meza, Quintero, García, & Ramírez, 2010).

6.1.2.1.1.2 Estimación de VKT.

Tras realizar la campaña de campo, se obtuvo el total de kilómetros recorridos por cada uno de los vehículos en cada una de las categorías, esto se adquirió a partir de información proporcionada de diversas fuentes como la Secretaría de Movilidad y Transito de la ciudad de Villavicencio, Centros de diagnóstico automotor y encuestas realizadas a una parte de la urbe Villavicense. Dicho valor (kilómetros recorridos) es de gran relevancia para el desarrollo del modelo IVE, es por esto que la información fue introducida en una base de datos (Excel), donde se pudo observar edad de los vehículos y kilometraje en su uso de vida útil, posteriormente, se realizó una correlación entre ambos datos, en la cual se obtuvo un gráfico que ofrece como información el promedio aritmético de los kilómetros recorridos respecto al año modelo de los vehículos de cada una de las categorías seleccionadas.

Con la información recolectada en las encuestas se calcularon los VKT para vehículos particulares y motos. Los VKT para las demás categorías vehiculares se estimaron a partir de información obtenida en otros estudios para los cuales el VKT de vehículos particulares y motos fueron similares a los calculados en Villavicencio (González et al., 2017), (Londoño et al., 2011a), (Londoño, Correa, & Palacio, 2011b), Tabla 3. Esta similitud en los VKT de vehículos particulares y motos es un indicador de que los recorridos de las otras categorías podrían tener el mismo comportamiento que en las ciudades citadas a pesar de las diferencias que puedan existir en cuanto a población y superficie. Una aproximación similar se aplicó en el estudio realizado en la ciudad de Quito (Guadalupe, 2016) para determinar el VKT de buses y vehículos de carga.

Tabla 3

Promedio de kilometros recorridos por día según categoria

VKT	Villavicencio, 2018	Manizales, 2017	Manizales, 2014	Envigado, 2011	Medellín, 2016	Quito, 2017
AP	37	29	25	12	37	45
Moto	52	29	23	17	61	30
Taxi	149	158	158	81	151	200
Bus	159	175	168	72	132	250
Camiones	93	50	50	36	132	200

Nota. Promedio de kilómetros recorridos por día según la categoría, las cuales fueron tomadas de cinco investigaciones en ciudades con características similares a la ciudad de Villavicencio como extensión territorial, población y aforo vehicular (González et al., 2017), (Londoño et al., 2011a), (Londoño et al., 2011b). Por Ortiz & Ríos, 2019

En las Figura 12Figura 13 se puede evidenciar el grafico de correlación donde se lleva a cabo el método de VKT para Autos particulares y Motocicletas, donde muestra el kilometraje acumulado vs el año modelo de cada vehículo. El objetivo de esta figura, es calcular en promedio cuantos kilómetros recorre un vehículo en un día. En la Tabla 4 se puede observar el resultado final de VKT para cada una de las categorías seleccionadas, como también se puede observar los kilómetros por día recorridos por cada una de las categorías, siendo las motocicletas, taxis y la que más distancias en kilómetros recorre.

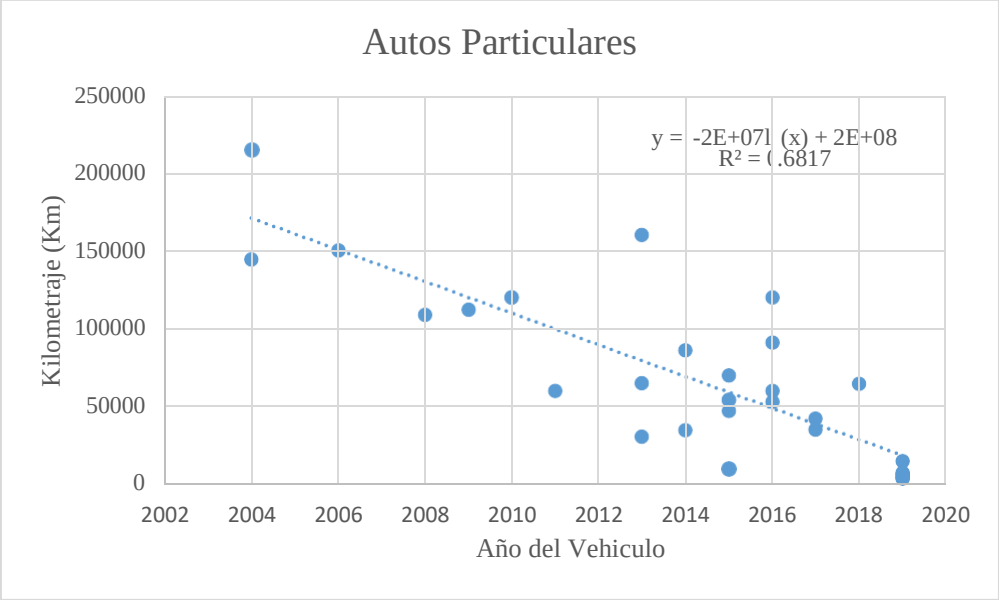


Figura 12.Estimación de VKT para Automóvil particular. Por Ortiz & Ríos, 2019

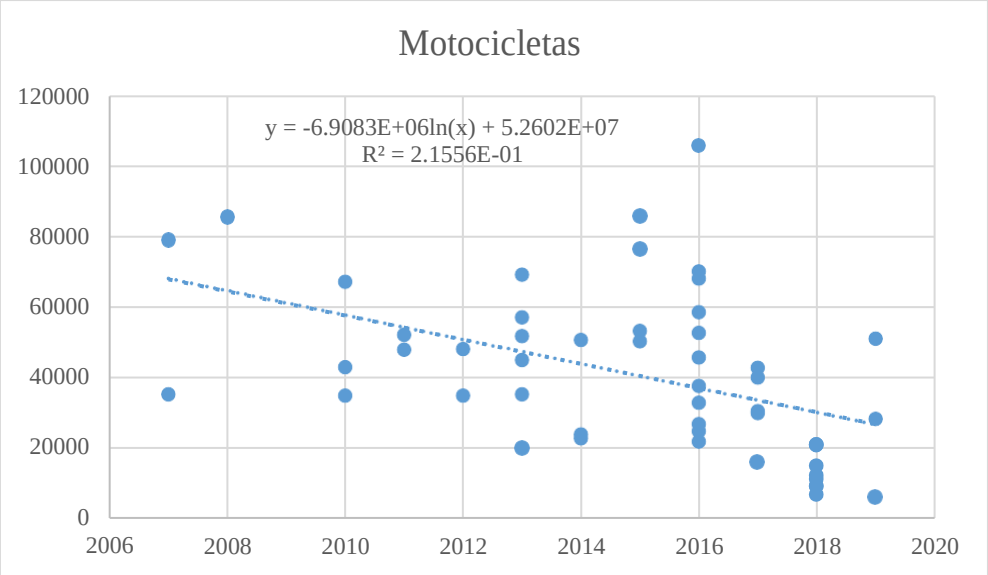


Figura 13.Estimación de VKT para Motocicletas. Por Ortiz & Ríos, 2019

Tabla 4

Resultado final de VKT y kilómetros diarios para cada una de las categorías

Categoría	**VKT (km/veh/día)**	**Cantidad de vehículos**	**Kilómetros diarios (km/día)**
Taxi	149	5492	856752
Bus	159	2032	331216
Motos	52	66372	3451344
Camión	92	1492	137264
Vehículo particular	93	21999	813963

Nota. Los datos de VKT fueron utilizados para el cálculo de kilómetros diarios (Km/dia), resultantes de la multiplicación de la cantidad de vehículos de cada categoría por el VKT de cada uno de estos. Por Ortiz & Ríos, 2019

6.1.2.1.2 Distribución de las tecnologías vehiculares.

6.1.3 composición estática de la flota

En Villavicencio circularon 97387 vehículos en el año 2018 según la Secretaria de Movilidad de la ciudad. Agrupados en cinco categorías principales; Taxi, Bus, Moto, Carro y Camión, las categorías vehiculares más relevantes fueron las motos con 66372 transitando y los vehículos particulares con 21999 en la ciudad, los cuales representan un 68,15% y un 22,58% del parque, respectivamente. El restante de la flota vehicular corresponde al 1,53% en camiones, 2,08% buses y 5,63% taxis como se muestra en la Figura 14. Villavicencio cuenta con una tasa de motorización de 193 vehículos por cada 1000 habitantes, cercanas a la de Bogotá con 246 vehículos por cada 100 habitantes, pero alejadas de Medellín, la ciudad con mayor número de vehículos en el país, con 435 vehículos por cada 100 habitantes.

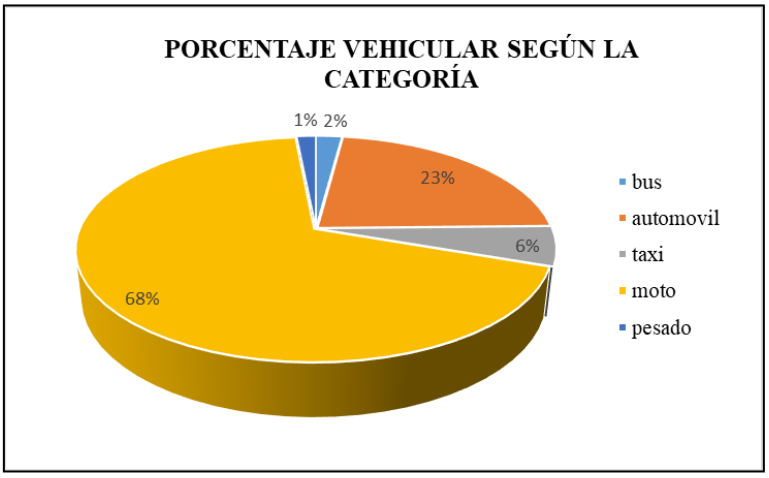


Figura 14.Grafica de los porcentajes vehiculares según su categoría. Por Ortiz & Ríos, 2019

En la ciudad de Villavicencio, el parque automotor cuenta con un sistema de combustión alimentado generalmente por gasolina, diésel y algunos vehículos poseen sistemas de reconversión gasolina – gas natural. A partir de las encuestas aplicadas principalmente a propietarios de motocicletas y vehículos particulares, se identificó que el combustible más relevante utilizado por dicha población fue la gasolina con un 92%, seguido del diésel correspondiente a un 7% y el porcentaje restante corresponde a los vehículos con gas natural, como se evidencia en la Figura 15. Además, para algunas de las categorías restantes se asumió su porcentaje de uso de combustible, como buses y vehículos pesados los cuales se tomó que el 100% utilizan diésel como combustible. Seguido de esto, fue necesario tomar información secundaria de otro estudio con unas características similares en la flota vehicular de taxis, esto debido a que en la presente ciudad se presentaron dificultades en la obtención de información, como se puede ver en la Tabla *5* (Salguero, 2014).

Tabla 5

Uso de combustible según su categoría

Categoría	Combustible	Porcentaje (%)
Vehículos particulares	Gasolina	92
	Diésel	7
	Gas natural y gasolina	1
Motocicletas	Gasolina	100
Taxis	Gasolina	23
	Diésel	17
	Gas natural y gasolina	60
Buses	Diésel	100
Camiones	Diésel	100

Nota. Los datos de las categorías de motocicletas y vehículos particulares se recolectaron mediante la aplicación de la encuesta, mientras que los datos de buses y camiones se asumieron completamente, respecto a la categoría de taxis, los datos fueron tomados de un estudio que poseía similitud en la flota vehicular de la ciudad (González et al., 2017). Por Ortiz & Ríos, 2019

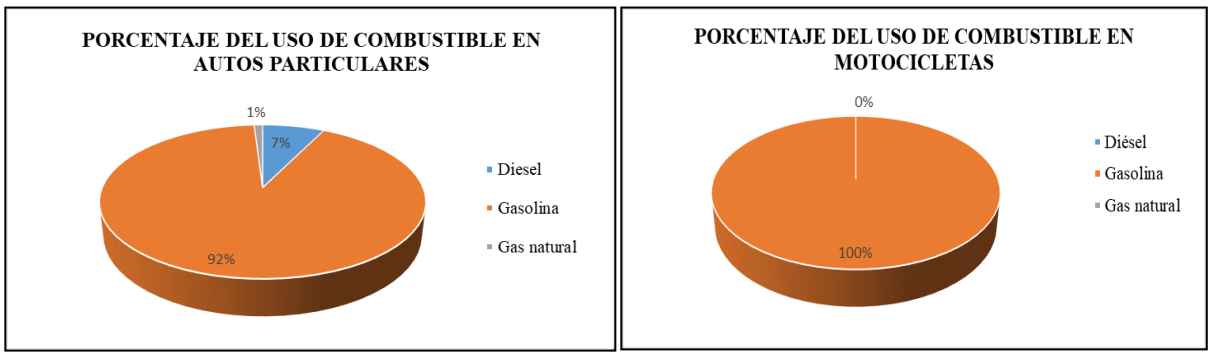


Figura 15.Uso del combustible en vehículos particulares y motocicletas. Por Ortiz & Ríos, 2019

6.2 Fase 2: cálculo de las emisiones

Par llevar a cabo las corridas en el modelo IVE para la estimación de las emisiones por contaminante, fue necesario tener en cuenta que el modelo requiere de dos archivos de entrada, donde uno corresponde a uno de localidad y otro de flota vehicular, donde el primero se requiere de información característica de la zona de estudio como altitud, porcentaje de aire acondicionado que se usa a 27 grados centígrados, el tipo de inspección y mantenimiento que se realiza al vehículo, que es donde se incluye la revisión hecha por los CDA, características del combustible como porcentaje de azufre y plomo en la gasolina y el diésel, toda la información obtenida de los patrones de conducción, composición dinámica de la flota y el porcentaje de vehículos que se encuentran por cada tipo de vía (esto solo para motocicletas y vehículos particulares. El archivo de flota que requisito de entrada para las corridas del modelo IVE, tiene información relacionada con… cómo se distribuye la flota con respecto a:

- Los tamaños de los vehículos, que está directamente relacionado con el tamaño del motor
- Sistemas de control de emisiones evaporativas
- Tipo de combustible
- Edad del vehículo en términos de recorrido

6.2.1 Estimación de emisiones por contaminantes

Tras insertar la información necesaria para generar las corridas en el software del modelo IVE, se procedió a seleccionar la información que corresponde a la totalidad de kilogramos por

día de cada uno de los principales contaminantes emitidos, teniendo en cuenta las categorías vehiculares seleccionadas Tabla6.

Tabla 6

Total de emisiones contaminantes en partida según la categoría

	Emisiones en partidas en frío (kg/día)										
	Categoría	# partidas	CO	VOC	VOCevap	NOx	SOx	PM10	CO2	N2O	CH4
Particular	Total	87996	1714.32	119.34	41.06	116.02	0.36	4.08	2283.68	0.56	63.56
	Primaria	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Secundaria	12319	240.00	16.71	5.75	16.24	0.05	0.57	319.71	0.08	8.90
	Terciaria	75677	1474.32	102.63	35.32	99.77	0.31	3.51	1963.97	0.48	54.66
Moto	Total	331860	14333.57	4252.58	1211.39	170.27	0.29	150.73	3075.14	0.31	850.52
	Primaria	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Secundaria	43142	1863.36	552.84	157.48	22.14	0.04	19.59	399.77	0.04	110.57
	Terciaria	288718	12470.20	3699.74	1053.91	148.14	0.25	131.13	2675.37	0.27	739.95
Taxi	Total	27460	683.37	16.56	34.09	35.15	0.03	1.70	410.50	0.28	116.77
Bus	Total	6096	2.69	0.29	0.00	11.19	0.00	22.11	368.00	0.03	0.00
Carga	Total	8952	9.32	0.80	0.00	24.14	0.01	37.99	735.19	0.05	0.00
Total		462364.00	16743.26	4389.56	1286.54	356.77	0.70	216.61	6872.50	1.22	1030.85

Nota. La tabla muestra la cantidad total en kg/día de las emisiones contaminantes, teniendo en cuenta el total partidas en frio por cada categoría vehicular. Por Ortiz & Ríos, 2019

Inicialmente en la Tabla6, es posible evidenciar el total de emisiones contaminantes en partida según la vía (primaria, secundaria y terciaria) para dos categorías (Autos particulares y motocicletas), debido a que son las categorías que representan mayor participación en el parque automotor de la ciudad de Villavicencio, en los cuales se puede denotar que la cantidad de emisiones se encuentra directamente relacionado con la cantidad de vehículos y encendidas diarias, como se refleja en la vía primaria donde hay cero contaminación debido a que en estos corredores viales no se realizan partidas en frio, ya que los vehículos se encuentran siempre en circulación; también es posible observar que las emisiones son más representativas en vías en las vías terciarias, debido a que son las zonas donde automóviles permanecen más en reposo y al realizar encendidos con el motor frio se generan mayores agentes contaminantes. Es importante mencionar que lo más usual es que los automóviles se desplacen de las vías terciarias, pasando

por las secundarias para llegar a una terciaria, y es por esto que se presenta mayor emisión por partidas en frio del motor en la carrera 11 que en la avenida 40.

En Tabla6 se puede observar que el contaminante que más se generó por el parque automotor de la ciudad de Villavicencio, es el monóxido de carbono con un total de 16743.3 kg/día, donde su principal contribuyente fueron las motocicletas con un 85.6% del total emitido, es decir con 14333.6 kg/día, seguido de los vehículos particulares representado con un 10.7 % de CO, es decir 1714.3 kg/día y la categoría que menos influye en las emisiones de monóxido de carbono fueron los buses, con 0.01% , correspondiente a 2.7 kg/día.

Por otro lado, la emisión de compuestos orgánicos volátiles en la ciudad de Villavicencio fue generada en gran medida por las motocicletas aproximadamente de 4252.6 kg/día (96,9%), la segunda categoría con mayor contribución de emisiones VOC fueron los vehículos particulares con un 2.7%, el cual corresponde a 119.3 kg/día, y el medio transporte con menor proporción en emisión de este contaminante fue el bus con 0.006%, es decir 0.3 kg/día.

Gran proporción de los compuestos orgánicos volátiles evaporativos, son las motocicletas, las cuales demostraron producir el 94.15% del total emitido por el parque automotor de la ciudad, seguido de los autos particulares con un 3.9%, es decir con un aproximado de 41.1 kilogramo por día. La categoría que menos influye en la emisión de este contamínate son los buses y los camiones con un 0%.

En cuanto a los óxidos de nitrógeno (NO_x), se puede observar claramente que los mayores generadores de este contaminante fueron las motocicletas, las cuales fueron las encargadas de emitir un 47.7% del total emitido por el parque automotor, el cual corresponde 170.3 kilogramo por día, seguido de los vehículos particulares que generan 32.5%, es decir 116.0%.

El mayor influyente de la emisión de óxidos de azufre (SO_x), son los vehículos particulares con un 57.1% (0.4 kg/día) del total emitido, seguido de las motocicletas, que comprenden el 42.9% de la emisión de dicho contaminante, es decir con 0.3 kg/día.

Por otro lado, se encuentran las emisiones de material particulado (PM_{10}), las cuales son generada en mayor medida por las motocicletas, comprendiendo un 69.5% de PM_{10} del total emitido por el parque automotor de la ciudad de Villavicencio, seguido de los vehículos pesados con un total de 38 kilogramos por día, y la categoría que menos influye en la emisión de dicho contamínate son los taxis con un 0.78%, es decir 1.7 kilogramos por día.

La categoría que registro mayor cantidad de emisión de dióxido de carbono fueron las motocicletas con un total emitido de 3075.1 kg/día, representado por un 44.7% seguido de los vehículos particulares que correspondieron a un 33.22%, con un total de 2283.7 kg/día y la categoría con menor contaminante emitido de CO_2 fueron los buses con tan solo un 5.3%. A diferencia de los dióxidos de nitrógeno, que la categoría que emite más contaminante fueron los vehículos particulares con 0.6 kg/día, correspondiente al 50%, seguido de las motos y taxis con un 25% para cada categoría. Además, se pudo apreciar que los buses y camiones no generaron emisiones de este tipo (N_2O). En cambio, la categoría que más genero metano fueron las motocicletas con un 82.5% de CH_4.seguido de los taxis y los vehículos particulares con un 11.3 y 6.2% respectivamente.

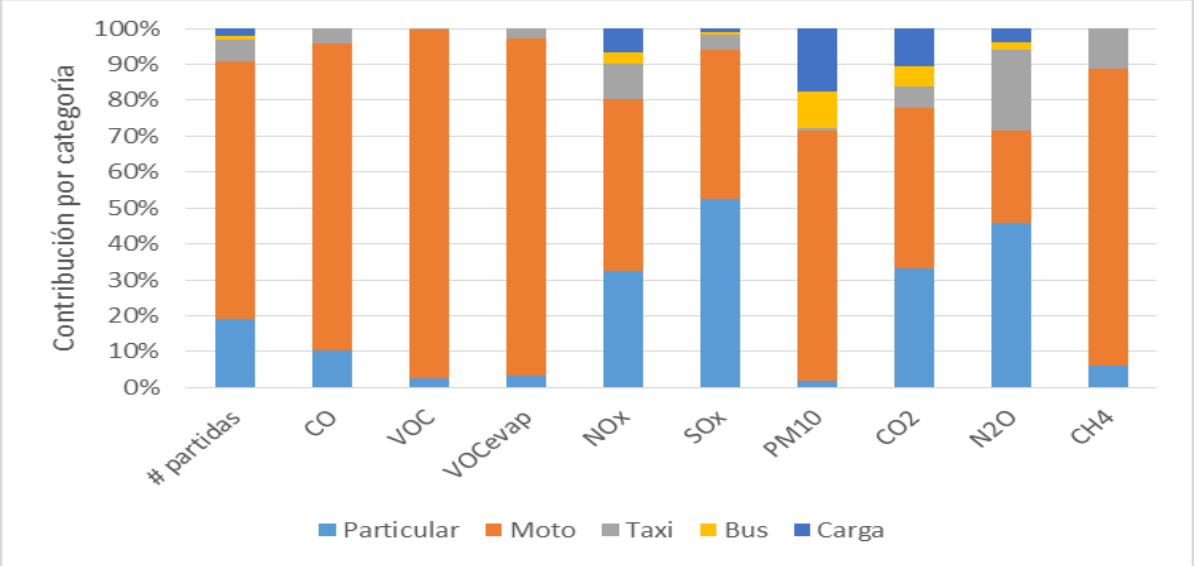


Figura 16.Contribución de contaminante por categoría en partida. Por Ortiz & Ríos, 2019

En la Figura 16, se puede apreciar que la categoría con mayor influencia de emisiones contaminantes del parque automotor de Villavicencio correspondió a las motocicletas. Ya que estas comprenden la mayor parte del aforo vehicular de la ciudad con un 68%. Es importante mencionar que quien genero más emisiones de monóxido de carbono, compuestos orgánicos y evaporativos fueron las motocicletas, debido a que esta categoría se caracteriza por presentar controles de emisiones evaporativas ineficiente (Rodríguez, Santana, & Pardo, 2015), de igual forma cabe resaltar que su principal sistema de combustión es la gasolina, la cual genera grandes cantidades de COV, COV evaporativas y CO.

Tabla 7.
Total de emisiones contaminantes en ruta según la categoría

		Emisiones en ruta (kg/día)									
	Categoría	**km/día**	**CO**	**VOC**	**VOCevap**	**NOx**	**SOx**	**PM10**	**CO2**	**N2O**	**CH4**
Particular	**Total**	813963.00	13462.53	1490.09	305.38	1130.68	26.05	27.66	283476.09	8.88	1184.54
	Primaria	463958.91	6633.18	720.55	150.09	546.76	12.91	13.48	140305.86	4.39	572.04
	Secundaria	293026.68	5913.21	660.74	133.02	514.56	11.27	12.17	122816.38	3.85	526.01
	Terciaria	48837.78	916.14	108.80	22.27	69.37	1.87	2.01	20353.86	0.63	86.49
Moto	**Total**	3451344.00	42342.70	23375.26	1164.92	258.78	29.82	691.06	260440.71	0.00	4675.05
	Primaria	1898239.20	21929.03	12400.68	621.47	127.81	15.59	357.79	136262.92	0.00	2480.14
	Secundaria	1173456.96	13911.69	7294.34	366.73	89.60	9.69	227.93	84406.67	0.00	1458.87
	Terciaria	379647.84	6501.98	3680.24	176.71	41.38	4.54	105.35	39771.12	0.00	736.05
Taxi	**Total**	856752.00	27873.17	214.79	573.49	1479.01	6.91	32.54	285077.74	15.14	2734.03
Bus	**Total**	331216.00	1029.35	302.99	0.00	7789.43	3.85	1193.72	383608.09	2.87	0.00
Carga	**Total**	137264.00	865.19	201.58	0.00	3119.97	1.51	485.55	149611.69	0.99	0.00
	Total	5590539.00	85572.93	25584.70	2043.79	13777.86	68.13	2430.53	1362214.33	27.87	8593.62

Nota. La tabla muestra la cantidad total en kg/día de las emisiones contaminantes en ruta por categoría. Por Ortiz & Ríos, 2019

Inicialmente en la Tabla 7, es posible evidenciar el total de emisiones contaminantes en ruta según la vía (primaria, secundaria y terciaria) para dos categorías (Autos particulares y motocicletas), debido a que son las categorías que representan mayor participación en el parque automotor de la ciudad de Villavicencio, en los cuales se puede denotar que la cantidad de emisiones se encuentra directamente relacionado con la cantidad de vehículos como se puede observar en el estudio realizado en Manizales en 2017 (González et al., 2017), donde dichas categorías también representan una gran porción del parque automotor de la capital del departamento de Caldas, con un 50.7% (Motocicletas) y 49.9% (autos particulares), los cuales generan el mayor aporte de emisiones contaminantes, siendo de las categorías que menos recorridos hacen al día, esto mismo ocurre en la presente investigación, donde la ciudad de Villavicencio las categoría de autos particulares y motocicletas, representan el mayor porcentaje del aforo vehicular de la ciudad con un 68% y un 23% respectivamente, siendo las que generan emisión en mayor medida con un 73.04% (motocicletas) y 6.9% (autos particular) del total de la flota vehicular.

En la Tabla 7 se muestra el total de emisiones generadas por los vehículos en ruta, teniendo en cuenta cada una de las categorías seleccionadas, tomando como base los kilómetros recorridos por día por cada una de las categorías, para finalmente obtener el total en kilogramos por día del monóxido de carbono, compuestos orgánicos y evaporativos, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, material particulado (PM_{10}), dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno y metano.

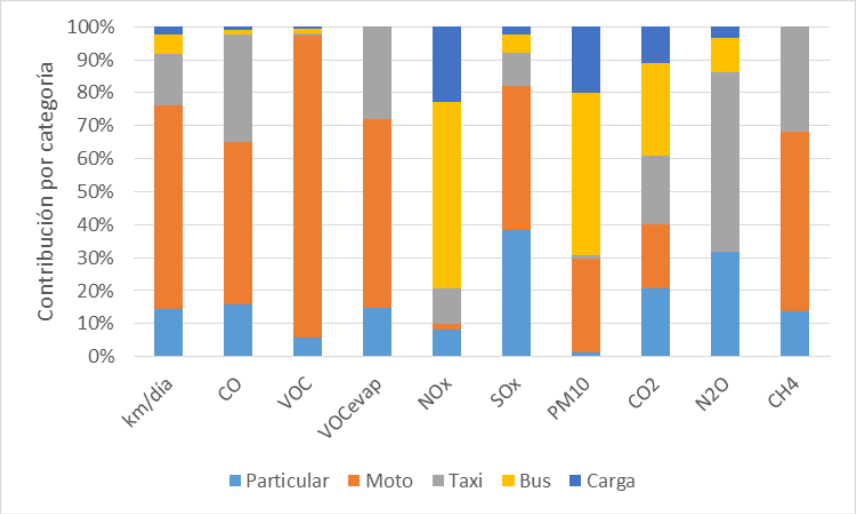


Figura 17.Contribución de contaminante por categoría en ruta. Por Ortiz & Ríos, 2019

En la Figura 17 se puede observar claramente la relevancia que posee las motocicletas frente a las demás categorías, al momento de producir monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles y evaporativos, esto es debido a que el motor de esta categoría funciona a partir del ciclo termodinámico de Otto, el cual es aplicado para motores de combustión interna, funcionando usualmente a partir de gasolina, siendo esta una gran generadora de dichos contaminantes. Además, los compuestos orgánicos evaporativos se dan en gran medida, ya que como se mencionó anteriormente, las motocicletas presentan sistemas de control ineficientes. Por otro lado, otro vector fundamental para estas emisiones, es el aforo vehicular, donde las motocicletas abarcan gran parte del parque automotor de la ciudad (Salguero, 2014).

Por otro lado, en la figura anterior se evidencia que los taxis son en gran medida contribuyentes a contaminantes como dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno y metano a causa de que los motores de este medio de transporte, generalmente funcionan mediante gas natural que al generar su proceso de combustión se convierte en un gran contribuyente de mercurio,

óxido de nitrógeno, dióxidos de carbono y metano, los cuales favorecen la formación de smog, lluvia acida y el metano se caracteriza por ser un gran causante del efecto invernadero y por ser el principal componente del gas natural (Ministerio del Medio Ambiente, 2012). También, se puede analizar que la categoría que más se ve asociada a mayor contaminación de NOx son los buses y camiones, debido a que el proceso de combustión de estos motores es a base de combustible diésel, el cual se caracteriza por ser más eficiente en su combustión más que los motores Otto, ya que los motores diésel provocan menor consumo en motores de baja potencia, funcionando con un proceso de inyección de aire que se mezcla con el combustible, proporcionando aumento de oxígeno al mezclarse. Sin embargo, esto provoca que a su vez incremente el nitrógeno. El proceso de combustión generado dentro del motor no es cien por ciento efectivo a causa de que queda gran parte del oxígeno sin reaccionar, el cual se mezcla con el nitrógeno generando los óxidos y dióxidos de nitrógeno. Cabe destacar que este combustible se caracteriza por liberar nano partículas que no son quemadas en el proceso de combustión, y es por esto que también la categoría de buses y camiones son de gran relevancia en la emisión de material particulado de PM_{10} (Cárdenas & Armas, 2016).

Tabla 8

Distribución de las emisiones en kg/día según su tipo de combustible

	Emisiones (kg/día)								
Combustible	CO	VOC	VOCevap	NOx	SOx	PM10	CO2	N2O	CH4
Gasolina	72673.1	29310.8	2827.5	1598.8	62.5	848.7	563111.1	10.8	5862.2
Gas Natural	27601.3	80.6	502.8	1473.3	0.7	5.9	242450.2	14.2	3762.3
Diésel	2041.8	582.9	0.0	11062.6	10909.7	1792.5	563525.6	4.1	0.0

Nota. La tabla muestra la cantidad en kilogramo día de contaminante generado según el combustible usado por el parque automotor. Por Ortiz & Ríos, 2019

En la *Tabla 8* de distribución de las emisiones en kilogramo por día, según el tipo de combustible usado por el aforo vehicular, se puede observar la cantidad de monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles y evaporativos, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, material particulado PM_{10}, dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno y metano producido por el proceso de combustión generado en los motores, los cuales se dan a base de gasolina, gas natural y diésel.

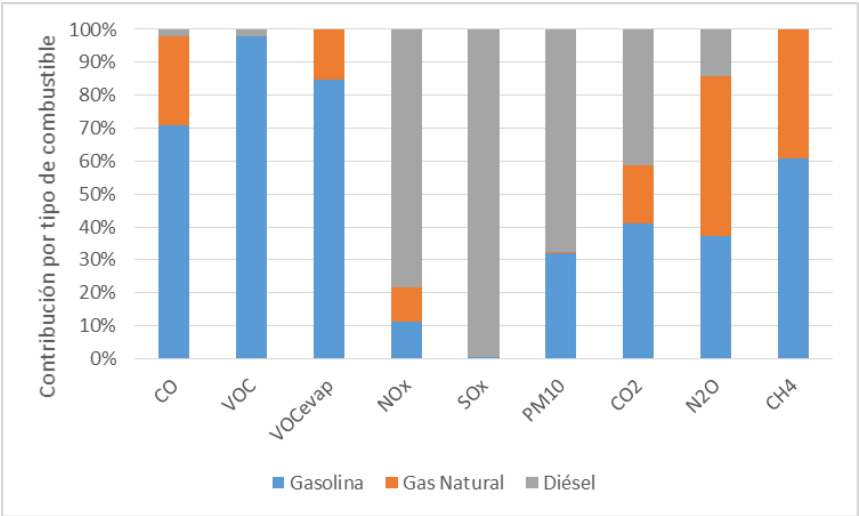


Figura 18.Distribucion de los combustibles por contaminante. Por Ortiz & Ríos, 2019

En la Figura 18 es posible observar que uno de los principales contribuyentes a las emisiones estudiadas, es la gasolina, debido a que la mayor parte del parque automotor de la ciudad hace uso de este combustible, el cual genera un proceso de combustión interna en el motor, provocando gases como dióxido de carbono que se da debido a que se mezcla el carbono con el oxígeno aspirado al momento de la combustión. Por otro lado, están óxidos de nitrógenos, los cuales se caracterizan por producirse a altas temperaturas, con un exceso de oxígeno en la cámara de combustión. La gasolina también es gran contribuyente de los monóxidos de carbono, que se produce al realizarse una combustión incompleta con alto contenido de carbono, el cual es incoloro, explosivo y posee un alto nivel de toxicidad, siendo nocivo para la salud, ya que interrumpe el transporte de oxígeno por parte de los glóbulos rojos. (Tipanluisa, Remache, Ayabaca, & Reina, 2017).

Por otro lado, en el grafico es posible denotar que el gas natural, es el combustibles con menor emisión y esto es debido a que muy poca proporción del parque vehicular usa este combustible, el cual es usado generalmente por los taxis, pero así el grafico expone que aunque sea usado menos que los demás combustibles, este es un gran generador de dióxido de nitrógeno y de gas metano, que son generados a partir del proceso de combustión, contribuyendo en la formación de smog y aportando al efecto invernadero como se mencionó anteriormente (Ministerio del Medio Ambiente, 2012).

Aunque el combustible diésel, es usado por una fracción inferior a un aproximado de 3% del parque vehicular, el grafico muestra que son los mayores contribuyentes de óxidos de nitrógeno,

óxidos de azufre y material particulado PM_{10}, ya que dicho combustible se caracteriza por emitir dichos contaminantes en su proceso de combustión incompleta causando que gran parte del oxígeno sin reaccionar se mezcle con el contenido de nitrógeno, generando los óxidos y dióxidos de nitrógeno (Ministerio del Medio Ambiente, 2012).

En una zona urbana Los óxidos de nitrógenos (NOX), son generados usualmente por la flota de buses y camiones, siendo estas las categorías que menos participación tiene en la flota vehicular como se pudo evidenciar tanto en la presente investigación como en la de Manizales 2017 (González et al., 2017), donde dicha categoría representa el 3.2 % del total de la flota vehicular de la capital del departamento de caldas y tan solo el 2 % del total de la ciudad de Villavicencio. Cabe resaltar que las categorías mencionadas anteriormente se caracterizan por tener en su motor un proceso de combustión a partir del combustible diésel, el cual se encuentra asociado a la emisiones dicho contaminante, que es provocado principalmente por las elevadas temperaturas que alcanzan los motores de ciclo diésel, generando una oxidación del nitrógeno presente en el aire (Prieto, 2015).

Tanto en Manizales como en Villavicencio es posible analizar que los principales generadores de material particulado en la flota vehicular, son los autobuses de servicio público y los camiones, donde en la capital del meta generaron el 69,08% del total emitido por el parque automotor con un aproximado de 1679.2 kilogramos por día, y en la capital del departamento de caldas, dichas categorías se encontraron asociadas al 78.57% de las emisiones de PM10, con un aproximado de 490.36 ton/año (González et al., 2017). Respecto a lo anterior es posible analizar que el combustible diésel es el más usado por estas categorías, debido a las extensas distancias que deben recorrer y a lo económico que es, provocando que los vehículos requieran de menos litros de combustible para recorrer la misma cantidad de kilómetros que se recorren con más litros de otro combustible como la gasolina (IDAE & FITSA, 2008).

Al comparar un vehículo a diésel con uno a gasolina, es claro que el motor que posee un sistema de combustión con gasolina, genera en mayor proporción dióxido de carbono (CO2), el cual es el principal causante del efecto invernadero y calentamiento global, pero los motores diésel son generadores de óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx) y partículas en suspensión, siendo estos tres los principales causantes del cáncer de pulmón y vejiga, debido a la unión del NOx Y SOx con el agua de lluvia, formando ácido sulfúrico y ácido nítrico, afectando tanto a la naturaleza como al hombre, pero se enfatiza que el principal causante de dichas

enfermedades son unas pequeñas partículas nocivas y cancerígenas, tan finas y ligeras que pueden viajar distancias significativas con el viento; cabe resaltar que las partículas emitidas por los vehículos diésel son PM10 y PM2.5, correspondiendo aproximadamente a un 60% de polución por partículas en suspensión de las zonas urbanas (OMS, 2005)

Es importante generar campañas de concientización y/o de incentivos, como los generados en Londres donde se promueve que las personas cambien sus vehículos a modelos con combustibles más limpios, y a cambio de esto se benefician las personas con un monto de dinero de hasta 200 libras, es decir un aproximado de 222,87 euros y 840,437.41 pesos colombianos.

6.3 Fase 3: Proyección de escenarios

Inicialmente, para generar la propuesta de escenarios de movilidad sostenible en la ciudad de Villavicencio, fue necesario realizar una proyección logarítmica del parque vehicular de la ciudad hasta el año 2030, tomando como base los vehículos reportados por el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) desde el año 2015 hasta el 2018, permitiendo calcular tres escenarios de emisión de PM_{10} y CO_2 los cuales corresponden al escenario base, el escenario uno y el escenario dos. Estos compuestos fueron elegidos para proponer escenarios de movilidad sostenible, ya que el PM_{10} es el principal causante de daño en la salud y el CO_2 es uno de los principales gases de efecto invernadero Figura 19.

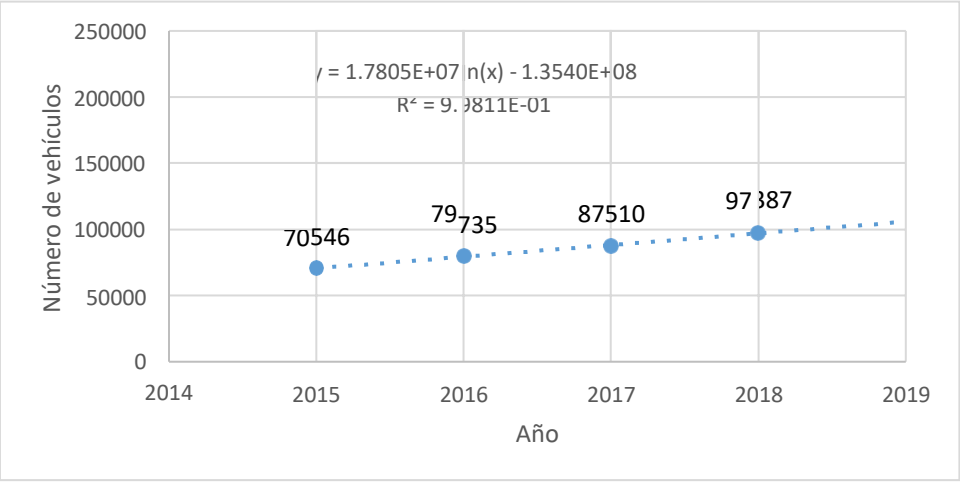


Figura 19.Regresión logarítmica del parque vehicular para el escenario base. Por Ortiz & Ríos, 2019

6.3.1 Escenario Base.

Para el escenario base fue necesario utilizar la regresión logarítmica mencionada anteriormente Figura 19 , para obtener el aumento del parque vehicular hasta el 2030 teniendo como año base, el año 2018, asumiendo que la distribución tecnológica del parque automotor se mantiene constante.

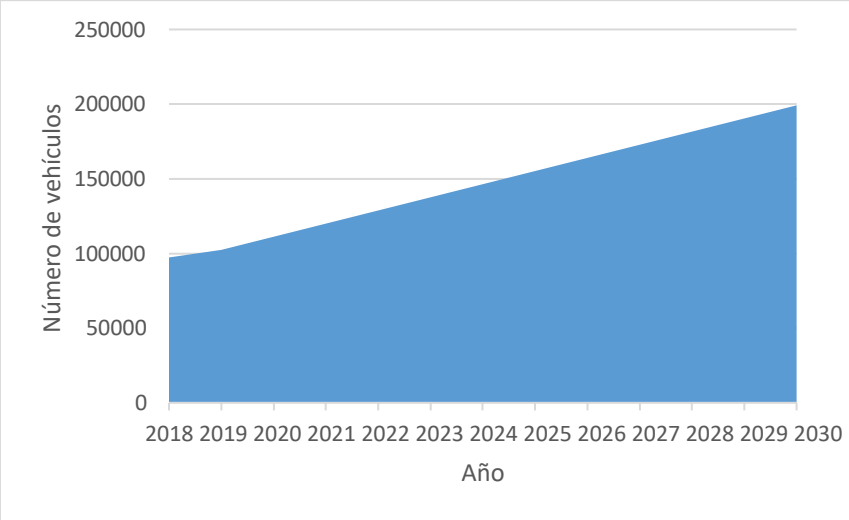


Figura 20.Proyección del parque automotor para el escenario base. Por Ortiz & Ríos, 2019

En la Figura 20 presenta la proyección realizada a partir de la regresión logarítmica, donde el año base (2018), contó con un aproximado de 97387 vehículos, y al realizar dicha proyección, se obtuvo como información que los vehículos aumentarían de manera significativa para el año 2030, con un total de 199160 vehículos, es decir que tendría un aumento de 101773 vehículos en comparación del año base.

6.3.2 Escenario 1: Flota de buses con conversión a gas natural vehicular.

En la Figura 21 se puede evidenciar la transformación paulatina de la flota de buses de servicios públicos hacia un combustible más limpio, que es el gas natural vehicular (GNV). Es importante resaltar que se partió de que los vehículos de transporte público actuales usan diésel como combustible para irse reemplazando progresivamente por vehículos con reconversión a GNV hasta alcanzar el 100% que se dará en el año proyectado (2030).

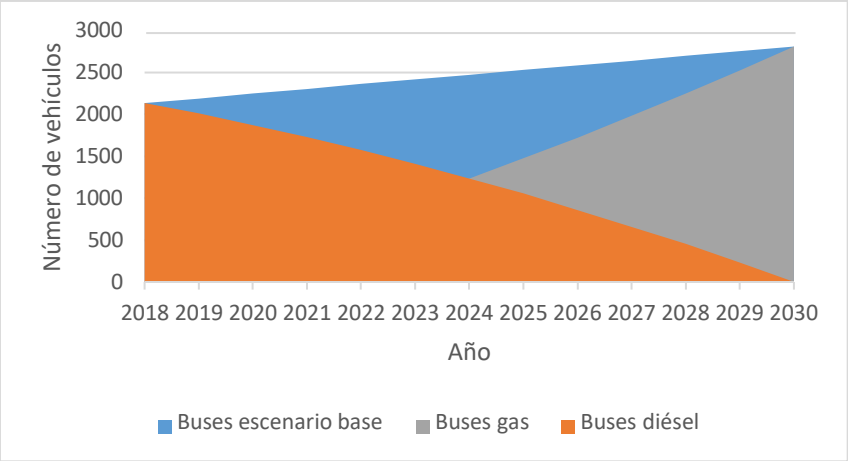


Figura 21.Proyección de la participación de los buses a gas y diésel en el escenario 1. Por Ortiz & Ríos, 2019

En la Figura 21 se puede evidenciar con color naranja la disminución de los buses de servicio público al reemplazar dicha categoría por vehículos con reconversión a gas natural, sin dejar de lado el aumento proyectado por el escenario base, teniendo en cuenta que para el año base (2018) se encontraban 2132 autobuses de servicio público, los cuales fueron disminuyendo al realizar la reconversión a gas natural vehicular en todos los vehículos de esta categoría. Donde para el año 2030 se contaría con un aproximado de 2806 autobuses con un sistema de combustión a base de gas natural y cero autobuses con un sistema de combustión a base de diesel.

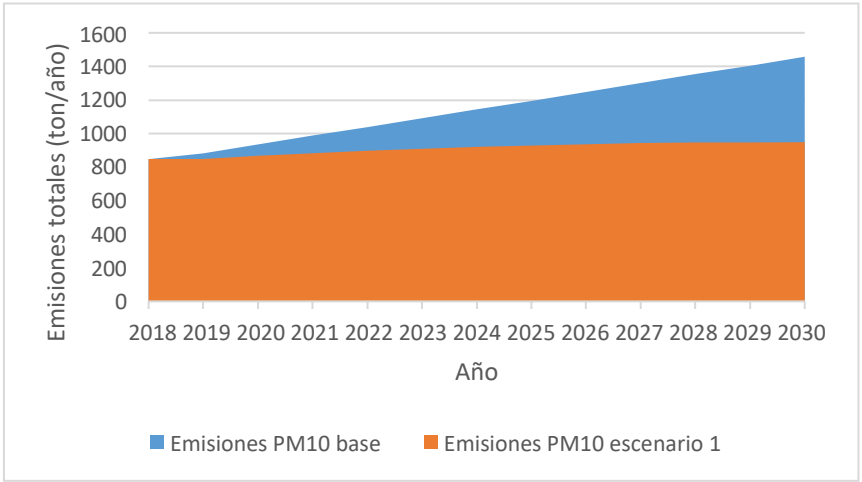


Figura 22.emisiones de PM_{10} en el escenario base, respecto al escenario 1. Por Ortiz & Ríos, 2019

En la Figura 22, es posible observar que las toneladas por año de PM_{10} en el escenario base que inicia a partir del año 2018, representa un aproximado de 800 ton/año, las cuales tras realizarse la proyeccion vehicular hasta el año 2030, aumentarian significativamente a un aproximado de 1450 toneladas por año de contaminante PM_{10}; en cambio al observar la proyeccion realizada en el escenario 1, es posible denotar que el aumento de la emision de material particulado PM_{10}, por parte de la categoria de autobuses, no aumentaria de forma tan singnificativa como en el escenario mencionado anteriormente, ya que la flota de buses con conversion a gas natural, aumentaria tan solo el 58% de PM_{10} del total generado por el escenario base, es decir un aproximado de 948 toneladas por año.

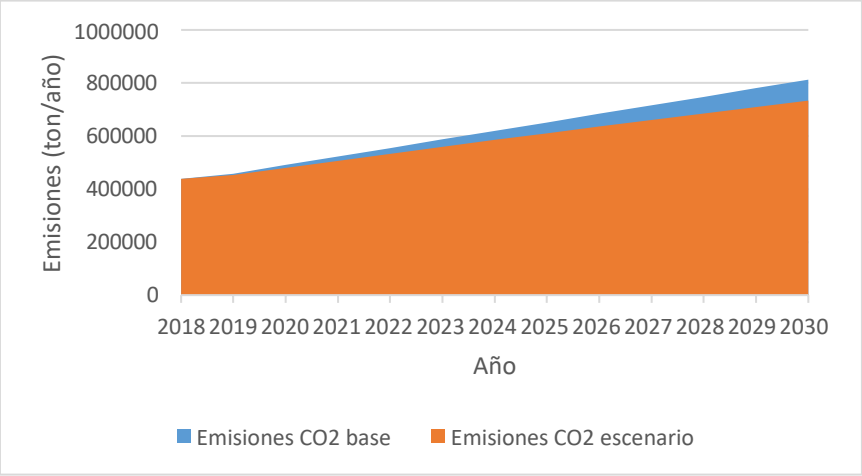


Figura 23.emisiones de CO_2en el escenario base, respecto al escenario 1. Por Ortiz & Ríos, 2019

Tras realizar las proyecciones, es posible apreciar en la Figura 23, que las emisiones generadas por el escenario base, que parte del año 2018 con un aproximado de 4380000 toneladas por año, aumentarían de manera proporciona al transcurrir el tiempo, proyectando un aproximado de 812000 toneladas de CO_2 para el año 2030. En cambio, si la flota de bus, cambian diésel a gas natural, la reducción para el año 2030 respecto al escenario base, seria de un aproximado de 9.7% menos del total emitido por el escenario base, es decir 78928 toneladas por año menos.

6.3.3 Escenario 2: Inserción de movilidad eléctrica en motocicletas

En este escenario se propuso una inserción de movilidad eléctrica en motocicletas para disminuir la gran cantidad de emisión generada debido a su alta participación en el parque automotor ya que este corresponde a un aproximado del 70% del total del aforo vehicular de la ciudad, en este caso se estimó que para el año 2030 la participación de motocicletas eléctricas correspondería a un 50% del parque automotor. Figura 24 muestra la variación de la participación en la flota de motos en este escenario

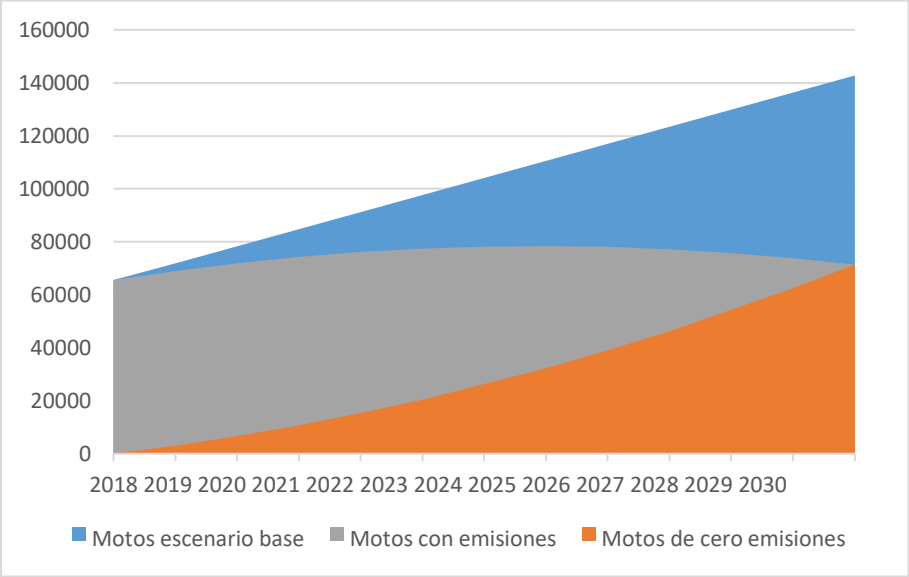


Figura 24. Proyección de la participación de las motos con emisiones y cero emisiones en el escenario 2. Por Ortiz & Ríos, 2019

En la Figura 24 es posible observar que para el año 2030 se contaría con un total de 71381 motocicletas con un potencial de cero emisiones. Pero aun así la disminución de motocicletas con emisiones para el año 2030 no va a ser tan significativo, debido que para este año las motocicletas eléctricas tendrían una proporción similar al de las motocicletas con emisiones.

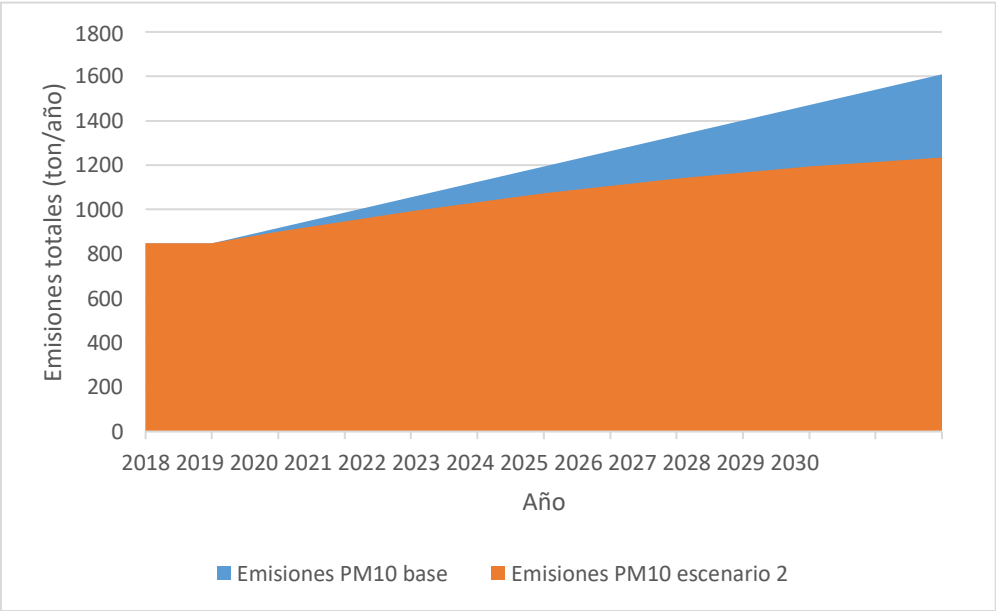


Figura 25.emisiones de PM_{10} en el escenario base, respecto al escenario 2. Por Ortiz & Ríos, 2019

En la Figura 25 , se puede evidenciar que en el escenario base, que da inicio en el año 2018, con un total de 800 toneladas por año de material particulado PM_{10} las emisiones de la categoría vehicular seleccionada, que para la proyección realizada hasta el año 2030, dichos vehículos generarían aproximadamente 1609 toneladas por año, a diferencia del escenario 2 planteado, donde se llevaría a cabo la inserción de movilidad eléctrica en motocicletas, estos tendrían una disminución poco significativa, ya que a pesar de que se utilizó un porcentaje de participación alto (50%) la reducción en las emisiones es baja (alrededor del 15% para PM10), por lo que se deben implementar estrategias que desincentiven la compra de cualquier tipo de vehículo con sistema de combustión a base da gasolina o diésel, como ocurre en Londres, donde se promueve que las personas cambien sus vehículos a modelos con combustibles más limpios, y a cambio de esto se benefician con un monto de dinero de hasta 200 libras, es decir un aproximado de 222,87 euros y 840,437.41 pesos colombianos.

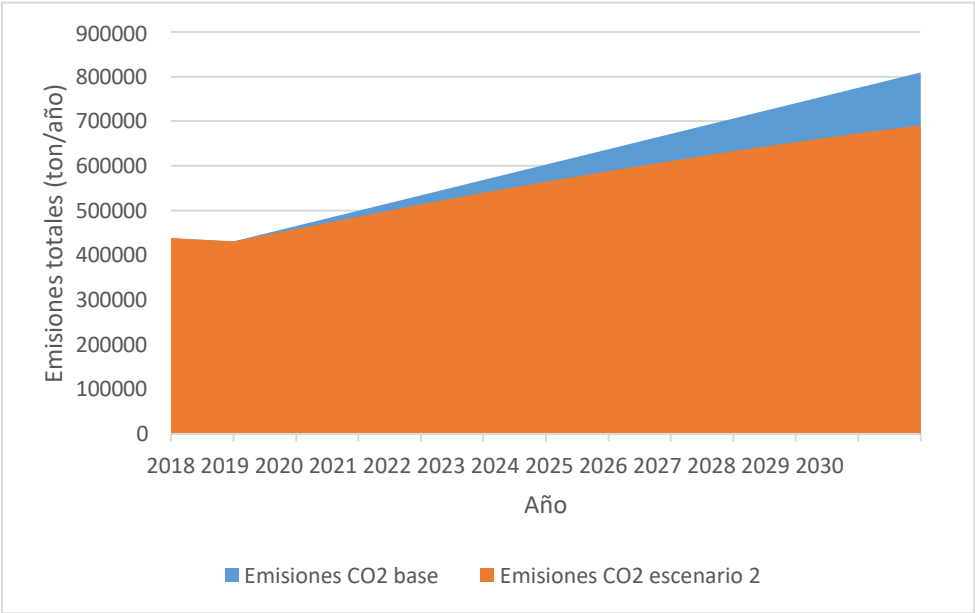


Figura 26.emisiones de CO_2 en el escenario base, respecto al escenario 2. Por Ortiz & Ríos, 2019

En la Figura 26, se puede observar que la Inserción de movilidad eléctrica en vehículos particulares, no es una alternativa con gran eficiencia, ya que teniendo en cuenta el escenario base el cual se da a partir del año 2018 con 800 toneladas por año de CO_2, lo proyectado arroja que para el 2030 las emisiones aumentaran a 809392 toneladas por año y realizando la inserción de movilidad eléctrica, para el año 2030, la contaminación disminuiría tan solo un 14.6%, es decir 118.121 toneladas por año, lo que quiere decir que se debe cambiar de estrategia para llevar a cabo la disminución de los contaminantes.

7. Conclusiones

Tras realizar todo el proceso de investigación, se puede concluir que de los 97387 vehículos que componen el parque automotor de la ciudad de Villavicencio, la categoría más relevante son las motocicletas, siendo estas el 68% de total del aforo vehicular de la ciudad, seguido de los autos particulares con 23%. La categoría que presenta menor cantidad del parque automotor, son los vehículos pesados, los cuales representan tan solo un 1% del total de la flota.

El combustible más usado por el parque automotor de la ciudad de Villavicencio, es la gasolina, ya que esta se encuentra en el proceso de combustión del 92% de los vehículos particulares, del 23% de los taxis y del 100% de las motocicletas; siendo este último la categoría con mayor aforo vehicular en la ciudad. Seguido de dicho combustible se encuentra el diésel, el cual es usado por el 100% de buses de transporte público y privado, como también los vehículos pesados. En tercer lugar, se encuentra como el combustible con menor uso el gas natural, ya que este es usado en mayor medida por los taxis.

Al observar el histograma de bins de potencia para los automóviles de la ciudad de Villavicencio, se puede concluir que la mayor parte de toda la flota vehicular se encuentra en el bin número 11, lo cual quiere decir que los vehículos que transitan por las vías urbanas, presentan una carga baja, es decir que constantemente experimentan gran parte del tiempo aceleraciones bajas, el cual es característico de vías con alto flujo vehicular.

El inventario preliminar de emisiones llevado a cabo a partir del modelo IVE en la ciudad de Villavicencio, arrojó como información que el contaminante que contribuye más a las emisiones de la ciudad, es el dióxido de carbono con un total de 1362214.3 kilogramos por día. Esto es debido a que los combustibles usados por cada una de las categorías, luego de su proceso de combustión, contribuyen con la liberación de dióxido de nitrógeno a comparación de otros contaminantes como los óxidos de nitrógeno y PM_{10}, que son emitidos en su mayoría por un solo combustible (Diésel). Seguido del dióxido de carbono, el contaminante más emitido por el parque automotor es el monóxido de carbono con un total de 85572.9 kilogramo por día y luego los compuestos orgánicos volátiles, los óxidos de nitrógeno y el metano con 25584.7, 13777.9 y 8593.6 respectivamente.

El monóxido de carbono y los compuestos orgánicos volátiles, tuvieron gran relevancia en las emisiones generadas por los vehículos, debido a que la mayor parte de estos, son generados a partir del uso de combustible de gasolina y como se mencionó anteriormente, las categorías que componen en mayor medida el parque automotor son las motocicletas y vehículos particulares, los cuales poseen motores que trabajan con un proceso de combustión que depende de la gasolina.

8. Recomendaciones

Teniendo en cuenta el inventario preliminar realizado, el cual demostró una apropiada aproximación en los resultados arrojados por el modelo IVE en kilogramo día. sin embargo para tener menor margen de error, se recomienda mejorar la calidad de la información de entrada al modelo, es decir: tomar patrones de conducción durante todo un día, generar grabaciones durante todo un día, que permita realizar un conteo vehicular más específico, se deben realizar encuestas que abarque la mayor parte de las categorías vehiculares de la ciudad (para el presente caso Motocicletas, automóvil particular, bus, camión y taxis), al momento de realizar las encuestas para obtener las características de la flota vehicular.

Al momento de llevar a cabo la metodología de los patrones de conducción, es importante utilizar un GPS con el menor margen de error posible, ya que este permitirá obtener resultados más específicos en velocidad, posición actual, distancia recorrida…etc., que posteriormente serán utilizados en el archivo de entrada del modelo IVE.

Es importante que las entidades gubernamentales del municipio de Villavicencio, presenten regulaciones más rigurosas frente a la tecnología vehicular usada por los habitantes, teniendo en cuenta que la mayor parte del parque automotor de la ciudad corresponden a motocicletas las cuales representan el 68% de la flota y se caracteriza por hacer uso de la gasolina en su proceso combustión interna.

Se recomienda que el parque automotor de la ciudad de Villavicencio, haga uso de combustibles que se caractericen por generar menos emisión de agentes contaminantes, como es el caso del gas natural, ya que como se demostró en el planteamiento de los escenarios, si los vehículos que generan su proceso de combustión interna por medio de gasolina, hicieran una reconversión a gas natural, las emisiones generadas disminuirían de forma significativa.

Al observar el escenario base frente al escenario 1, es posible analizar que tras la conversión de combustible (de diésel a gas natural) por parte de la categoría vehicular de los buses, las emisiones disminuirían de manera significativa, ya que la flota de buses con conversion a gas natural, aumentaria tan solo el 58% de PM_{10} del total generado por el escenario base (1450 ton/año), es decir un aproximado de 948 toneladas por año. En cuanto al CO_2 generado por el combustible diesel, disminuiria un 9.7% del total emitido si no hubiese conversion de

combustible. Es por esto que se debe trabajar en el cambio de tecnologias vehiculares en la ciudad de villavicencio.

9. Referencias Bibliográficas

Azim, N. H., Subki, A., & Yusof, Z. N. B. (2011). *Informe del estado del aire en Colombia* (Vol. 14). https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Behrentz, E., & Bogotá, D. C. (2005). Estimacion del inventario de emisiones de fuentes moviles para la ciudad de Bogotá e identificacion de variables pertinentes, *tesis de maestría.* Universidad de los Andes. Obtenido de: https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/9147?show=full

Camila, M., & Cárdenas, V. (2019). Fuentes móviles y estimación de emisiones combustible en la ciudad de Manizales, 1–95.

Cárdenas, M. D., & Armas, O. (2016). Estudio de las emisiones de motores diésel de automoción en condiciones de funcionamiento transitorias al usar biodiesel, tesis doctoral. Universidad de Castilla La Macha. Obtenido de: file:///C:/Users/prof.biblioteca/Downloads/TESIS%20C%C3%A1rdenas%20Almena.pdf

Carlos, L., & Bonfante, A. (2016). Factores de emisión por efecto de la movilidad vehicular en ciudades con similares condiciones a Cartagena de Indias, Colombia., trabajo de grado. Universidad de Cartagena: Obtenido de: http://190.242.62.234:8080/jspui/handle/11227/5758

David, C. (2017). Desagregación espacial y temporal del inventario de emisiones por fuentes antropogénicas para la ciudad de Manizales, Caldas. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia: Obtenido de: http://bdigital.unal.edu.co/50965/1/52837545.2015.pdf

Departamento Nacional de Planeación. (DNP) (n.d.). Codigo Municipal 50001. *2018*, *50001*. Bogotá. DNP.

Decreto 948 (5, junio de 1995). Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto - Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire. Diario Oficial No. 41876. Obtenido de: https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/decreto_0948_1995.htm

Duarte Hernández, I. R., & Ambiental, I. (2018). Análisis de las emisiones atmosféricas generadas por los vehículos de uso público en función de su antigüedad para el municipio de Villavicencio-Meta. *Instname:Universidad Santo Tomás*. Retrieved from https://repository.usta.edu.co/handle/11634/12085

Gaitán, M., & Cárdenas, P. A. (2017). *Guía para la elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas*. Retrieved from: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/guia_para_la_elaboracion_de_inventarios_de_emisiones_atmosfericas.pdf

Gallardo, L., Escribano, J., Dawidowski, L., Rojas, N., de Fátima Andrade, M., & Osses, M. (2012). Evaluation of vehicle emission inventories for carbon monoxide and nitrogen oxides for Bogotá, Buenos Aires, Santiago, and São Paulo. *Atmospheric Environment*, *47*(x), 12– 19. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.051

Gobernación del Meta, (2016). Ficha informativa sobre los principales indicadores y caracteristicas del Municipio de Villavicencio, Villavicencio. Gobernación del Meta

González, C. M., Gómez, C. D., Rojas, N. Y., Acevedo, H., & Aristizábal, B. H. (2017). Relative impact of on-road vehicular and point-source industrial emissions of air pollutants in a medium-sized Andean city. *Atmospheric Environment*, *152*, 279–289. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.048

Guadalupe, J. L. (2016). Modelación de emisiones contaminantes de fuentes móviles terrestres en Quito , Ecuador Tesis de maestría. Universidad Técnica Federico Santa María. Obtenido de: https://pdfs.semanticscholar.org/9c90/4a89c4a04aac4f62900f077e1216cf39e929.pdf

Henríquez, P. (2007). *Estudio comparativo de actividad vehicular y modelación de emisiones para Santiago y Buenos Aires*. Trabajo de grado. Universidad de Chile. Obtenido de: http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103264

Herrera, D. (2007). Modelo De Emisiones Vehiculares Para La Ciudad De Bogotá (Evb). *Universidad de Los Andes, IAMB 20062*, 42.

IDAE, & FITSA. (2008). *Nuevos Combustibles y Tecnologías de Propulsión: Situación y Perspectivas para Automoción*. Obtenido de: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Nuevos_Combustibles_6_2d83b8b8.pdf

Instituto Tecnológico (Costa Rica), J. E., & Rodríguez-Yáñez, J. E. (2015). *Emisión de compuestos tóxicos del aire de fuentes móviles en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica en 2007*. *Revista Tecnología en Marcha* (Vol. 28). El Instituto. Retrieved from https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822015000400066

IVE model, version 2. . (2008). IVE Model Users Manual, Obtenido de: http://www.issrc.org/ive/downloads/manuals/UsersManual.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2016). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011-2015.* Obtenido de: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023637/Informe_del_Estado_de_la_Calidad_del_Aire_en_Colombia_2011-2015_vfinal.pdf

Londoño, J., Correa, M. A., & Palacio, C. A. (2011a). Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia, Revista EIA, págs.149–162. Obtenido de: https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/439/432

Meza, L. M., Quintero, M., García, R., & Ramírez, J. (2010). estimación de factores de emisión de pm 10 y pm 2.5 , en vías urbanas en mexicali, baja California, México. *Informacion Tecnologica*, *21*(4), 45–56. https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4308it.09

Ministerio de Hacienda y Crédito Público, U. (2012). Información del Departamento del Meta, (38), págs..583–610. Retrieved from WWW.upra.com.co

Ministerio del Medio Ambiente. (2006). Los vehículos automotores como fuentes de emisión, págs.. 25–34. Bogotá. MinAmbiente

Ministerio del Medio Ambiente. (2012). Modelos empleados en la elaboración de inventarios de emisiones vehiculares. *Para Facilitar La Integración de Los Inventarios de Emisiones Vehiculares, Se Uti- Lizan Modelos Computacionales, Éstos Toman Como Datos de Insumo Las Carac- Terísticas de La Flota Vehicular, El Nivel de Actividad y Otros Factores Locales, Ya Sea Para Det*, 53–73. Retrieved from http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/618/modelos.pdf

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2005). Actualización mundial 2005, págs.1–21. Obtenido de: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=A7AFF7AC7B432DA4ECAC28CAD1A01AE6?sequence=1

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2014). Monitoreo del progreso hacia la cobertura universal de salud a nivel nacional y global Marco de trabajo , medidas y metas mayo de 2014, 14

Palmer, R. G. (2000). Genetics of four male-sterile, female-fertile soybean mutants. *Crop Science*, *40*(1), 78–83.

Pimiento Tami, L. M. (2009). "Realización Del Inventario De Emisiones Atmosféricas Generadas Por Las Actividades Del Recinto Portuario De Veracruz, México" Tesis.

Prieto, E. (2015). Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, actualización 2015, 50. https://doi.org/10.4049/jimmunol.0804341

Rodríguez, D., Santana, M., & Pardo, C. (2015). *La motocicleta en América Latina: caracterización de su uso e impactos en la movilidad en cinco ciudades de la region*. Retrieved from http://www.despacio.org/portfolio/la-motocicleta-en-america-latina/

Rojas, A. (2015). Estimación de emisiones contaminantes provenientes de fuentes moviles en la jurisdicción CAR, 120. Retrieved from http://www.bdigital.unal.edu.co/52666/7/AuraRojas.2015.pdf%0Ahttp://www.bdigital.unal.edu.co/52666/

Salguero, Y. (2014). Inventario preliminar de emisiones por fuentes móviles para la ciudad de Manizales.

Spiegel, J., & Maystre, L. Y. (2014). Control De La Contaminacion Ambiental, Obtenido de: https://www.insst.es/documents/94886/162520/Cap%C3%ADtulo+55.+Control+de+la+contaminaci%C3%B3n+ambiental/83098e6e-e690-4259-ad95-6c1dd936762d?version=1.0

Spiegel, J., & Maystre, L. Y. (2001). Control de la contaminación ambiental. *Enciclopedia de Salusd y Seguridad En El Trabao*, *2*, 56.2-56.42. https://doi.org/10.1157/13109987

Tami, L. (2014). Realización del inventario de emisiones atmosfericas generadas por las actividades del recinto portuario de Veracruz.

Tipanluisa, L. E., Remache, A. P., Ayabaca, C. R., & Reina, S. W. (2017). Emisiones Contaminantes de un Motor de Gasolina Funcionando a dos Cotas con Combustibles de dos Calidades. *Informacion Tecnologica*, *28*(1), 3–12. https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000100002

Valle, M. (2018). (IVE) para la estimación de emisiones atmosfericas.

Vásquez, E. M. (2017). Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, (C).

10. Anexos

Anexo 1. Encuesta de caracterización vehicular

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

ENCUESTA DE LAS CARACTERISTICAS VEHICULARES

NOMBRE_____ **FECHA**_____

1. ¿Qué tipo de vehículo posee?
2. ¿Cuál es la marca de su vehículo?
3. ¿Cuál es el modelo del vehículo?
4. ¿Cuál es el kilometraje de su vehículo?
5. ¿Cuál es el cilindraje de su vehículo?
6. ¿Qué tipo de combustible utiliza su vehículo?
7. ¿Qué tipo de motor posee su vehículo?
8. ¿Utiliza el aire acondicionado de su vehículo?
9. ¿Cuantas veces en el día enciende su vehículo?
10. ¿Cuál es la placa de su vehículo?