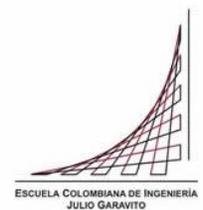


Maestría en Ingeniería Civil

Modelación de Emisiones Ambientales Asociadas a la Movilidad. Caso de Estudio: Corredor de la Calle 13 entre Av. Boyacá y Peaje del Río Bogotá

Paula Natalia Mesa Vélez

Bogotá D.C., 19 de enero de 2018



**Modelación de Emisiones Ambientales Asociadas a la Movilidad.
Caso de Estudio: Corredor de la Calle 13 entre Av. Boyacá y Peaje
del Río Bogotá**

Paula Natalia Mesa Vélez

**Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con
énfasis en Tránsito y Transporte**

Ph. D. Mónica Marcela Suárez Pradilla

Directora

Bogotá D.C., 19 de enero de 2018



La tesis de maestría titulada “Modelación de Emisiones Ambientales Asociadas a la Movilidad. Caso de Estudio: Corredor de la Calle 13 entre Av. Boyacá y Peaje del Río Bogotá”, presentada por Paula Natalia Mesa Vélez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte.

Nota de aceptación

Director

Mónica Marcela Suárez Pradilla

Jurado

María Carolina Romero Pereira

Jurado

Jorge Cerda T.

Agradecimientos

En primera medida a Dios, por permitirme recorrer y superar cada reto que se presentó en mi camino.

A mi familia por su amor, apoyo y confianza incondicional en cada proyecto emprendido.

A mi novio por recorrer este camino de mi lado.

Al grupo PTV por la disponibilidad del software y su permanente comunicación durante el desarrollo del modelo.

A la Secretaría Distrital de Movilidad por facilitarme los datos requeridos.

A mi directora por su entusiasmo y atención especial a cada detalle incluido en este documento.

A mis jurados que aportaron sus mejores ideas para enriquecer este trabajo.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito; mi alma mater y toda su comunidad educativa, por su calidad humana y apoyo para presentar los avances de mi tesis en el XII Congreso Colombiano de Tránsito y Transporte.

Resumen

El objetivo de este proyecto es generar un modelo que permita evaluar de manera sencilla la cantidad de emisiones vehiculares en el corredor de estudio y cuyos resultados contribuyan a la generación de políticas públicas de transporte eficientes que reduzcan la degradación del medio ambiente y la afectación de la salud de los moradores de la zona. Particularmente se utiliza el software PTV Vissim para construir el modelo de simulación y el software PTV EnViVer para cuantificar las emisiones de dióxido de carbono CO₂, óxidos de nitrógeno NO_x y material particulado PM₁₀.

El corredor de estudio está ubicado entre la Calle 13 o Avenida Centenario entre la Avenida Boyacá y el Peaje del Río Bogotá, tiene una longitud de 9 kilómetros y se caracteriza por ser uno de los principales accesos y salidas de transporte de carga. Además, es la principal vía de comunicación de las denominadas ciudades dormitorio del occidente de Bogotá (Funza, Madrid, Mosquera y Facatativá). Adicionalmente, es el único acceso a la zona franca de la ciudad que alberga más de 400 empresas dentro del parque empresarial, de las cuales un 53% pertenecen al sector logística, 27% al sector de servicios, 12% al sector de comercio y 8% al sector industrial constituyéndose como uno de los mayores centros de acopio de mercancía en el país.

Para este estudio se formula una metodología que evalúa la situación actual considerando doce elementos diferentes relacionados con el tráfico vehicular; como la infraestructura vial, áreas de conflicto, zonas de reducción de la velocidad, coordinación de la red semafórica, puntos de parada obligatoria o detención, paraderos de los buses de transporte público e intermunicipal, composición, volúmenes y definición de rutas vehiculares y de transporte público, asignación de factores de emisión para cada categoría vehicular y la creación de nodos de evaluación para obtener resultados operacionales del sector de estudio y a su vez se proponen tres posibles escenarios de mejora del corredor orientados a la disminución de las emisiones que actualmente se producen en él y a su mejor funcionamiento operacional.

Los resultados señalan que existe una alta tasa de contaminación producto del intenso tráfico que soporta el corredor de estudio y del mayor uso industrial del suelo. Otros factores asociados al incremento de las emisiones en el sector son los largos recorridos que realizan

los vehículos de carga que utilizan la zona franca, el alto volumen de transporte interurbano que da servicio a las ciudades dormitorio del occidente de Bogotá y poca oferta de transporte público tecnificado. A nivel de diseño es importante resaltar el efecto de la semaforización y del manejo de las diferentes intersecciones del sector.

Finalmente, se proponen una serie de alternativas de mejora para el sector de estudio en corto, mediano y largo plazo, las cuales pueden ser replicadas en vías con altos volúmenes vehiculares por profesionales de diferentes áreas especializados en la modelación de transporte.

Palabras clave: Emisiones, concentraciones, modelos de simulación, nivel de servicio, tiempos de demora, cola de espera, transporte sostenible, PTV Vissim, PTV EnViVer.

Abstract

The objective of this project is to generate a model to evaluate the volume of vehicular emissions produced along the corridor. The analysis of results of this model may contribute to establish public politics for efficient transportation reducing environmental degradation and health issues among the surrounding community. The software used for building the simulation model was PTV Vissim and PTV EnViVer for calculate carbon dioxide (CO₂), nitrogen oxides (NO_x) and particulate matter (PM₁₀).

The corridor of study is located in 13th street in Bogotá also known as Avenida Centenario between Avenida Boyacá and Rio Bogotá Toll. This section of the road is 9 Km long and its one of the main points for the entrance and exit of heavy transportation. The 13th street is also the main access to communicate the dormitory towns of Funza, Madrid, Mosquera and Facatativa, located at the west of Bogotá. Also, the 13th street is the only access one of the largest Dutty Free Zones in Colombia, known as Zona Franca. Over 400 companies operate in Zona Franca, 53% of which are dedicated to logistics, 27% to services, 12% are trading companies and 8% are industrial business.

For this study, a methodology was formulated to evaluate the current pollution situation considering twelve elements related to vehicular traffic, such as road infrastructure, conflict areas, coordination of the traffic lights network, mandatory staging points, intermunicipal and public bus stops, vehicular volume, volume composition, definition of vehicular, public transport lines, assignment of vehicular emission factors for each category of vehicles an evaluation node create to obtain operational information about the corridor of study. Also, three scenarios were proposed aimed at reducing contamination along the corridor and to produce an operational enhancement.

The results indicate a high rate of pollution product of the heavy traffic along the corridor and also due to the industrial use of the land. Further factors found to be related to emission increase in the 13th street are the heavy traffic long rides used for the Free zone, massive intermunicipal volume of transportation between Bogotá and the dormitory towns and the lack of technical public transportation. At a design level it is important to emphasized the traffic lights effect on the different road intersections in the zone.

A number of alternatives of short, medium and long term were proposed to improve emissions within the corridor, which can be replicated by different kind of transport modelation specialists on high traffic volume roads.

Key words: emissions, concentrations, simulated models, level of service, delay time, queue length, sustainable transportation, PTV Vissim, PTV EnViVer.

Contenido

Resumen.....	5
Abstract.....	7
Contenido	9
Lista de Tablas	14
Lista de Figuras	15
Introducción	18
1. Alcance de la investigación en el contexto de la modelación de las emisiones utilizando elementos de transporte.....	20
2. Pregunta de investigación.....	20
3. Objetivos.....	20
3.1. Objetivo general.....	20
3.2. Objetivos específicos.....	20
4. Hipótesis.....	21
5. Estructura de la tesis.....	21
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE: CALIBRACIÓN DE MODELOS DE EMISIONES UTILIZANDO SOFTWARE PTV VISSIM Y PTV ENVIVER.....	22
1.1. Estudios de tránsito	22
1.1.1. Volúmenes vehiculares	22
1.1.2. Velocidad.....	23
1.2. Nivel de servicio.....	24
1.3. Demoras en tiempos de viaje.....	25
1.4. Longitud de las colas o filas de espera	26
1.5. Dispositivos para el control del tránsito	26
1.5.1. Señales.....	26
1.5.2. Demarcación	27
1.5.3. Semáforos	27
1.6. Materiales contaminantes	27

1.7.	Modelos de simulación del tránsito	28
1.7.1.	Modelos microscópicos de tráfico vehicular	29
1.7.2.	Elementos de entrada del modelo	30
1.7.3.	Calibración del modelo.....	31
1.8.	Estado del arte.....	31
CAPÍTULO II. FUENTES DE INFORMACIÓN Y METODOLOGÍA.....		34
2.1.	Fuentes de información.....	34
2.1.1.	Aforos vehiculares.....	34
2.1.2.	Frecuencia y tiempo de despacho transporte público.....	35
2.1.3.	Coordinación semafórica	35
2.1.4.	Factores de emisión.....	36
2.1.5.	Límite permisible de emisiones.....	37
2.1.6.	Relación de las bases de datos utilizadas.....	38
2.2.	Metodología.....	40
2.2.1.	Consolidación de la información	41
2.2.2.	Construcción del modelo.....	41
2.2.2.1.	Construcción de la red vial	41
2.2.2.2.	Detección de áreas de conflicto	42
2.2.2.3.	Definición de las áreas de reducción de la velocidad	43
2.2.2.4.	Creación de la red semafórica.....	44
2.2.2.5.	Definición de los puntos de detención.....	48
2.2.2.6.	Asignación de paraderos de los buses de transporte público y flotas intermunicipales	49
2.2.2.7.	Composición vehicular.....	50
2.2.2.8.	Asignación de volúmenes vehiculares	51
2.2.2.9.	Definición de rutas vehiculares.....	52
2.2.2.10.	Definición de rutas de Transporte público.....	53

2.2.2.11.	Creación de nodos de evaluación	55
2.2.2.12.	Definición de factores de emisión.....	57
2.2.3.	Escenarios propuestos.....	61
2.2.3.1.	Escenario 1	61
2.2.3.2.	Escenario 2	61
2.2.3.3.	Escenario 3	63
2.2.4.	Comparación de los resultados	63
2.2.4.1.	Factores operacionales	63
2.2.4.2.	Factores ambientales	64
CAPÍTULO III. PRESENTACIÓN CASO DE ESTUDIO		65
3.1.	Caracterización de las unidades de planeamiento zonal	65
3.2.	Caracterización económica	69
3.3.	Caracterización de la infraestructura	69
3.4.	Caracterización de la movilidad del sector	70
3.5.	Volumen y composición vehicular del corredor	72
3.5.1.	Autos, Camiones y Motos	72
3.5.2.	Buses del Sistema Integrado de Transporte (SITP) y flotas intermunicipales ..	75
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DEL MODELO SIMULACIÓN DE EMISIONES DE LA CALLE 13 ENTRE AV. BOYACÁ Y PEAJE RÍO BOGOTÁ		77
4.1.	Calibración del modelo	77
4.2.	Aspectos operacionales	78
4.2.1.	Nivel de Servicio.....	78
4.2.2.	Tiempos de demora	79
4.2.3.	Longitud máxima de la cola	80
4.3.	Aspectos ambientales	81
4.3.1.	Emisiones de contaminantes	81
4.3.2.	Concentración de contaminantes	82

CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA MITIGACIÓN DE EMISIONES DE LA CALLE 13 ENTRE AV. BOYACÁ Y PEAJE RÍO BOGOTÁ	83
5.1. Escenario propuesto 1.....	83
5.1.1. Aspectos operacionales.....	83
5.1.1.1. Nivel de Servicio	83
5.1.1.2. Tiempos de demora.....	84
5.1.1.3. Longitud máxima de la cola	84
5.1.2. Aspectos ambientales.....	85
5.1.2.1. Emisiones de contaminantes.....	85
5.1.2.2. Concentración de contaminantes.....	86
5.2. Escenario propuesto 2.....	87
5.2.1. Aspectos operacionales.....	87
5.2.1.1. Nivel de Servicio	87
5.2.1.2. Tiempos de demora.....	88
5.2.1.3. Longitud máxima de la cola	88
5.2.2. Aspectos ambientales.....	89
5.2.2.1. Emisiones de contaminantes.....	89
5.2.2.2. Concentración de contaminantes.....	91
5.3. Escenario propuesto 3.....	92
5.3.1. Aspectos operacionales.....	92
5.3.1.1. Nivel de Servicio	92
5.3.1.2. Tiempos de demora.....	93
5.3.1.3. Longitud máxima de la cola	94
5.3.2. Aspectos ambientales.....	95
5.3.2.1. Emisiones de contaminantes.....	95
5.3.2.2. Concentración de contaminantes.....	96
5.4. Análisis comparativo de todos los escenarios	97

5.4.1.	Aspectos operacionales	97
5.4.1.1.	Nivel de Servicio	97
5.4.1.2.	Tiempos de demora	97
5.4.1.3.	Longitud máxima de la cola	97
5.4.2.	Aspectos ambientales	101
5.4.2.1.	Emisiones de contaminantes.....	101
5.4.2.2.	Concentración de contaminantes.....	105
5.5.	Condiciones generales identificadas	108
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		110
6.1.	Conclusiones	110
6.2.	Recomendaciones.....	112
7.	BIBLIOGRAFÍA	115

Lista de Tablas

Tabla 1: Principales trabajos consultados que utilizaron la micro simulación y el software PTV Vissim	33
Tabla 2: Factores de emisión de CO ₂ según tipo de vehículo y combustible	36
Tabla 3: Distribución de la flota vehicular según tipo de combustible.....	37
Tabla 4: Niveles permisibles de contaminantes criterio	37
Tabla 5: Concentración y tiempo exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia	38
Tabla 6: Relación de las bases de datos utilizadas.....	39
Tabla 7: Características territoriales de las UPZ de Fontibón.....	66
Tabla 8: Características territoriales de los municipios	67
Tabla 9: Superficie de cada UPZ según el tipo de suelo.....	68
Tabla 10: Resumen de características principales del corredor de estudio	70
Tabla 11: Rutas del Sistema Integrado de Transporte Público SITP	75
Tabla 12: Rutas de flotas intermunicipales.....	76
Tabla 13: Emisiones de contaminantes para el escenario real.....	81
Tabla 14: Concentraciones de contaminantes para el escenario real	82
Tabla 15: Emisiones de contaminantes para el escenario propuesto 1	85
Tabla 16: Concentraciones de contaminantes para el escenario propuesto 1	87
Tabla 17: Emisiones de contaminantes para el escenario propuesto 2	89
Tabla 18: Concentraciones de contaminantes para el escenario propuesto 2.....	92
Tabla 19: Emisiones de contaminantes para el escenario propuesto 3	95
Tabla 20: Concentraciones de contaminantes para el escenario propuesto 3.....	96
Tabla 21: Emisiones de contaminantes para todos los escenarios propuestos	102

Lista de Figuras

Figura 1: Generación y atracción de carga Bogotá y municipios aledaños	19
Figura 2: Distribución entrada de camiones a Bogotá	19
Figura 3: Ubicación de toma de volúmenes vehiculares	35
Figura 4: Semáforos del corredor de estudio	36
Figura 5: Metodología	40
Figura 6: Ejemplo de ingreso de Links	42
Figura 7: Áreas de conflicto	43
Figura 8: Definición de áreas de conflicto	43
Figura 9: Áreas de reducción de la velocidad	44
Figura 10: Creación del controlador de semáforos	45
Figura 11: Grupos de señales	46
Figura 12: Ciclos semafóricos	46
Figura 13: Ubicación de semáforos en la red	47
Figura 14: Optimización de semáforos en la red	47
Figura 15: Estación de peaje	48
Figura 16: Paraderos de los buses de transporte público y flotas intermunicipales	49
Figura 17: Composición vehicular	50
Figura 18: Asignación de volúmenes vehiculares	52
Figura 19: Rutas vehiculares	53
Figura 20: Rutas de transporte público	54
Figura 21: Frecuencia rutas de transporte público	55
Figura 22: Nodos de evaluación	56
Figura 23: Configuración del archivo	57
Figura 24: Importación de información de tráfico	58
Figura 25: Asignación de información de emisiones para las clases de vehículos	58
Figura 26: Caracterización de la flota vehicular	59
Figura 27: Cuantificación y mapa de las emisiones del corredor para CO ₂	60
Figura 28: Localidad de Fontibón	65
Figura 29: Densidad habitacional de las UPZ de la localidad de Fontibón.....	66
Figura 30: Densidad habitacional de los municipios aledaños.....	67
Figura 31: Uso del suelo para cada UPZ de la localidad de Fontibón	68
Figura 32: Porcentaje de viajes según motivo para la localidad de Fontibón.....	71

Figura 33: Volumen vehicular del corredor de estudio	73
Figura 34: Composición vehicular del corredor de estudio	74
Figura 35: Simulación Intersección Carrera 128	77
Figura 36: Nivel de Servicio para el escenario real	79
Figura 37: Demora para el escenario real	80
Figura 38: Longitud máxima de la cola para el escenario real	81
Figura 39: Porcentaje de participación de las emisiones de contaminantes por tipo de vehículo	82
Figura 40: Nivel de Servicio para el escenario propuesto 1	83
Figura 41: Demora para el escenario propuesto 1	84
Figura 42: Longitud máxima de la cola para el escenario propuesto 1	85
Figura 43: Porcentaje de participación de las emisiones de contaminantes por tipo de vehículo para el escenario 1	86
Figura 44: Nivel de Servicio para el escenario propuesto 2	87
Figura 45: Demora para el escenario propuesto 2	88
Figura 46: Longitud máxima de la cola para el escenario propuesto 2	89
Figura 47: Porcentaje de participación de las emisiones de contaminantes por tipo de vehículo para el escenario 2 (15%)	90
Figura 48: Porcentaje de participación de las emisiones de contaminantes por tipo de vehículo para el escenario 2 (30%)	91
Figura 49: Simulación Intersección Carrera 128 para el escenario propuesto 3.....	92
Figura 50: Nivel de Servicio para el escenario propuesto 3	93
Figura 51: Demora para el escenario propuesto 2	94
Figura 52: Longitud máxima de la cola para el escenario propuesto 3	95
Figura 53: Porcentaje de participación de las emisiones de contaminantes por tipo de vehículo para el escenario 3	96
Figura 54: Nivel de Servicio para todos los escenarios propuestos	98
Figura 55: Demora para todos los escenarios propuestos	99
Figura 56: Longitud máxima de la cola para todos los escenarios propuestos	100
Figura 57: Porcentaje de participación de las emisiones de dióxido de carbono por tipo de vehículo para todos los escenarios	102
Figura 58: Emisiones de dióxido de carbono para todos los escenarios	103
Figura 59: Porcentaje de participación de las emisiones de óxido de nitrógeno por tipo de vehículo para todos los escenarios	104

Figura 60: Porcentaje de participación de las emisiones de material particulado por tipo de vehículo para todos los escenarios 105

Figura 61: Concentración de dióxido de carbono para todos los escenarios propuestos
Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017..... 106

Figura 62: Concentración de óxido de nitrógeno para todos los escenarios propuestos
Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017..... 107

Figura 64: Concentración de material particulado para todos los escenarios propuestos
Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017..... 108

Introducción

La permanente necesidad de transportarse en las grandes urbes en largas distancias recorridas por la falta de planificación territorial y de políticas de desarrollo sostenible, sumada a una deficiente oferta de transporte público masivo ha generado que los usuarios del vehículo privado lo utilicen más para realizar sus recorridos.

En el periodo comprendido entre 2004 y 2013 la población creció cerca del 11% mientras que el parque automotor lo hizo 57% (Jaramillo Molina, Ríos Rivera, & Ortiz Lasprilla, 2009) esta diferencia señala el incremento de la movilidad y la saturación de la infraestructura vial en las grandes ciudades del mundo y en especial en aquellas regiones en vía de desarrollo, donde este fenómeno ha incrementado considerablemente el volumen de las emisiones a la atmósfera particularmente, provenientes del sector transporte.

Si consideramos que la cantidad de CO₂ por Kilometro que produce un vehículo liviano está entre 120 y 200 gramos en una situación de flujo libre y alta tecnología, es preocupante el incremento de estos valores en las situaciones de congestión de nuestras ciudades y más aún si se trata de vehículos de alta capacidad. Para el caso colombiano, aproximadamente el 44% de las emisiones que se producen provienen del sector transporte¹.

En el entorno regional, Colombia se encuentra en el cuarto lugar² de los países latinoamericanos con PIB más alto, ello refleja que la actividad productiva del país es muy dinámica por lo que el sector transporte es vital en el proceso. Por ello, en los últimos años se han realizado importantes actuaciones en infraestructura de transporte, especialmente en carreteras para facilitar el desarrollo del comercio a nivel nacional e internacional y se ha creado una agenda para combatir el cambio climático que tiene en cuenta las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Específicamente, en Bogotá cada día se desplazan cerca de 24 mil camiones; si sumamos los desplazamientos urbanos de 8 millones de habitantes, de los cuales el 13% utiliza el vehículo particular y además se consideran las conexiones viarias con los municipios aledaños como Zipaquirá, Tocancipá y Gachancipá al norte y Mosquera y Funza al occidente, es evidente que la actual red viaria se encuentra saturada en su totalidad y presenta sectores de gran congestión y contaminación, especialmente en aquellos

¹ Según el Inventario Nacional de emisiones de gases de efecto invernadero.

² De acuerdo al Fondo Monetario Internacional.

corredores utilizados para transporte de carga, que conectan Bogotá con los principales centros de atracción o generación de viajes de estos municipios (Figura 1).

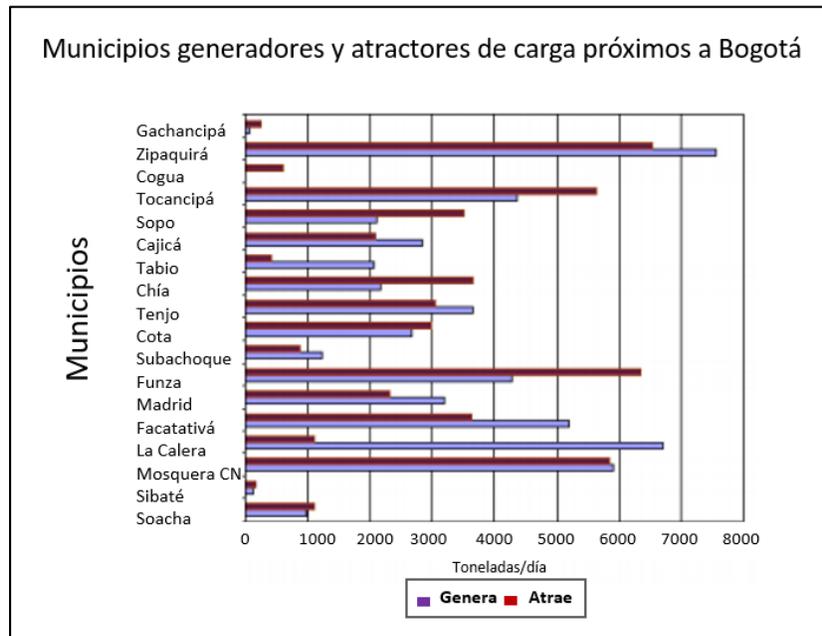


Figura 1: Generación y atracción de carga Bogotá y municipios aledaños **Fuente:** Estudio CALCAB (Centros de actividad logística de carga de Bogotá), 2009

Teniendo en cuenta la anterior situación, se eligió el Corredor de la Calle 13 entre Av. Boyacá y Peaje del Río Bogotá para su estudio y análisis porque conecta el ámbito territorial de Mosquera y Funza con Bogotá y además, a través de él se desplazan hacia Bogotá aproximadamente el 34% de los viajes diarios de carga (Figura 2) y se encuentra ubicado en la localidad de Fontibón cuyo mayor uso de suelo es de tipo industrial.

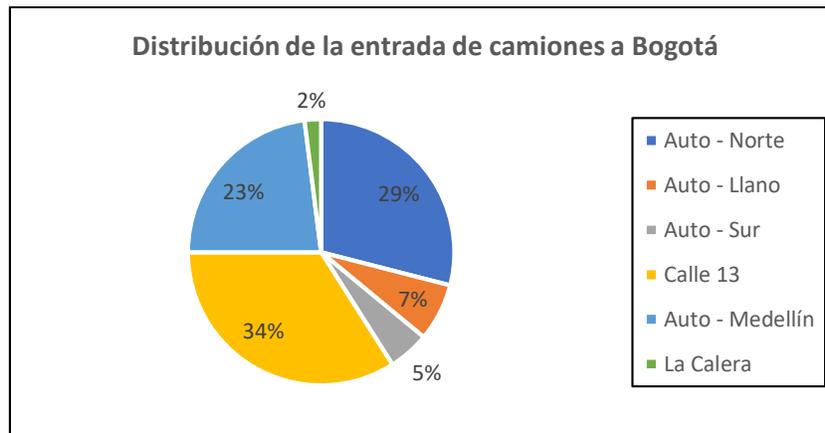


Figura 2: Distribución entrada de camiones a Bogotá **Fuente:** Estudio CALCAB (Centros de actividad logística de carga de Bogotá), 2009

1. Alcance de la investigación en el contexto de la modelación de las emisiones utilizando elementos de transporte

El alcance de esta investigación se inscribe en el campo de los modelos de simulación utilizados actualmente para describir los fenómenos asociados al transporte a través de la utilización de un software especializado que por un lado es capaz de generar modelos de tráfico y de otro lado utiliza una interfaz que permite evaluar las emisiones. Finalmente, este trabajo genera un proceso metodológico sencillo que se puede replicar y ayuda a fortalecer el conocimiento en el área específicamente para Bogotá.

2. Pregunta de investigación

- ¿Qué porcentaje de las emisiones en el sector de estudio producto del transporte logran ser reducidas a través de medidas de gestión del tráfico?
- ¿Qué tan efectivos son los modelos de simulación para los profesionales que construyen políticas de transporte?

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de tesis es generar un modelo de simulación que permita evaluar de manera sencilla las emisiones debidas al tránsito considerando las características de la infraestructura y contribuya a generar políticas públicas de transporte eficientes que las mitiguen.

3.2. Objetivos específicos

- Contribuir en el estado del arte en Colombia sobre medidas de reducción de emisiones en vías con altos volúmenes vehiculares.
- Estimar las emisiones de acuerdo a los diferentes modos de transporte presentes en el sector de estudio considerando la situación actual y diferentes escenarios para evaluar la bondad de los diferentes parámetros que facilitan la modelación, y así mostrar cómo se pueden utilizar estos para generar un mejor funcionamiento ambiental del corredor.
- Generar medidas de mitigación en función de los escenarios evaluados que permitan hacer más sostenible la movilidad en el sector.

4. Hipótesis

- Las medidas de gestión del tráfico contribuyen a disminuir el porcentaje de emisiones del sector de estudio.
- La distribución de las emisiones debidas al transporte generan zonas de alta concentración de contaminantes.

5. Estructura de la tesis

En el primer capítulo se presentan los principales conceptos asociados al estudio de las emisiones utilizando modelos de micro simulación y considerando elementos de transporte, se desarrolla un breve estado del arte de los temas relacionados con la investigación realizada. Posteriormente en el capítulo dos se presentan las fuentes de información utilizadas para la construcción del modelo y se describe la metodología empleada para el desarrollo de los modelos de simulación en el software PTV Vissim.

En el tercer capítulo se realiza la presentación del caso de estudio y sus principales características de manera que sea sencillo para el lector entender el entorno del corredor modelado. El cuarto capítulo presenta la aplicación de la metodología y el análisis de resultados para el escenario actual, consecuentemente el capítulo cinco contiene el análisis para los escenarios propuestos en términos operacionales y ambientales.

En el último capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones surgidas para mejorar la movilidad del sector de estudio y las emisiones asociadas al transporte, las cuales pueden ser replicadas en otros corredores con altos volúmenes vehiculares.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE: CALIBRACIÓN DE MODELOS DE EMISIONES UTILIZANDO SOFTWARE PTV VISSIM Y PTV ENVIVER

En este capítulo se presentarán los principales conceptos utilizados en el desarrollo del trabajo, así como los estudios y avances que se han realizado en torno al tema estudiado. En esta investigación se han abordado los siguientes temas: estudios de tránsito, materiales contaminantes y modelos de simulación.

1.1. Estudios de tránsito

El estudio de tránsito permite analizar la movilidad en una zona determinada, para ello considera de forma estructurada los diferentes elementos que participan y simula una interacción de los nuevos proyectos de infraestructura con la red existente, para proponer soluciones de acuerdo a cada proyecto y lograr con ello actuaciones más eficientes, seguras y comprometidas con el medio ambiente.

En esta sección se analizaron los siguientes estudios de tránsito: volúmenes vehiculares, velocidad, nivel de servicio, demoras en tiempos de viaje, longitud de las colas y dispositivos para el control del tránsito entre otros. En esta parte se consultaron diferentes documentos del Ministerio de Transporte Colombiano y (Garber, N & Hoel, A, 2005).

1.1.1. Volúmenes vehiculares

El estudio de los volúmenes de tránsito o vehiculares se realiza para conocer el número de vehículos que pasa por un punto, carril o sección durante un tiempo determinado. Dentro de este estudio es posible conocer la composición del tránsito discriminando autos, buses, camiones en cada una de sus categorías, motos, bicicletas e incluso peatones de requerirse la información.

Estos estudios se realizan periódicamente por la Secretaría Distrital de Movilidad para monitorear la demanda de las vías de acuerdo a los diferentes periodos del día y así establecer medidas para que las vías mantengan un nivel de servicio aceptable de acuerdo a su capacidad.

Los estudios de volúmenes son realizados en campo por medio de conteo de vehículos de acuerdo a su categoría y por períodos de quince minutos, de manera que sea posible identificar el periodo de una hora con mayor volumen vehicular.

Dependiendo de la unidad de tiempo en la cual se haya efectuado la medición de los volúmenes sus aplicaciones son diferentes, como se muestra a continuación:

Volúmenes de tránsito anual: Su principal uso se evidencia en la evaluación de tendencias de crecimiento y decrecimiento del volumen, usualmente en vías de pago o concesionadas. También es utilizado para la planeación del transporte y la estimación de volúmenes en vías nuevas.

Volúmenes de tránsito promedio diario: Los volúmenes diarios se utilizan para medir la demanda actual de las vías y evaluar los flujos respecto a la red vial, para poder así definir áreas donde sea necesario mejorar la infraestructura o construir nuevas vías que distribuyan el tráfico.

Volúmenes de tránsito horario: Estos fueron los volúmenes utilizados para la modelación del corredor de estudio. Entre sus aplicaciones encontramos la determinación de la longitud y magnitud de los periodos de máxima demanda o periodos pico, evaluar la relación entre la capacidad de la vía y la demanda, establecer controles en el tránsito como la jerarquización de calles, sentidos de circulación, ciclos de semaforización y por último para proyectar y rediseñar geométricamente las calles e intersecciones. En este estudio se utilizó esta clase de información.

1.1.2. Velocidad

La velocidad es uno de los factores que los usuarios de las vías más perciben y califican para medir la calidad de la circulación por el corredor. La manera de planificar una ruta por parte del usuario siempre será aquella que requiera menor tiempo de desplazamiento, lo cual se logrará a través de una velocidad estable que permita un buen nivel de servicio para los usuarios garantizando la seguridad de todos los actores viales.

Los diferentes tipos de velocidades que pueden ser utilizados para establecer parámetros de comparación de índice de servicio de una vía se describen a continuación.

Velocidad de punto: También es denominada la velocidad instantánea dado que es tomada a través de un radar cuando un vehículo pasa por un punto determinado de la vía.

Velocidad media temporal: Es la media aritmética de las velocidades de punto de las velocidades de punto de todos o algunos vehículos que se encuentren en un intervalo de tiempo determinado en una sección de la vía.

Velocidad media espacial: Esta velocidad corresponde a la media aritmética de las velocidades de punto de todos los vehículos que se encuentren en un tramo de la vía en un instante dado.

Velocidad de recorrido: Es el resultado de dividir la distancia recorrida entre el tiempo total de viaje, es decir incluyendo demoras provocadas por el flujo vehicular, semáforos y demás dispositivos de control.

Velocidad de marcha: Es la velocidad promedio de circulación, la cual se obtiene dividiendo la distancia recorrida entre el tiempo efectivo de circulación para recorrer la misma distancia, es decir no se incluyen los tiempos de demora o detención.

Velocidad de proyecto: Conocida también como velocidad de diseño, es la velocidad máxima de circulación por una vía o sección para garantizar las condiciones de seguridad.

Para el caso específico del modelo se ingresaron las velocidades promedio de circulación y se establecieron las velocidades máximas permitidas de manera que ningún vehículo excediera el límite establecido.

1.2. Nivel de servicio

El nivel de servicio es una medida utilizada para calificar las condiciones de operación del flujo vehicular y la percepción de sus usuarios, los factores que afectan el nivel de servicio son de dos tipos internos y externos.

A nivel *interno* los principales cambios se deben a las variaciones de la velocidad, el volumen vehicular, la composición del tránsito y los entrecruzamientos que se generan con otros vehículos. A nivel externo tiene gran influencia las características propias de la infraestructura, como el ancho de los carriles, la pendiente y otros elementos de diseño geométrico.

El nivel de servicio se evalúa utilizando la metodología definida por el Manual de Capacidad Vial HCM 2000 del Transportation Research Board (TRB) de los Estados Unidos en el que se establecen seis niveles de servicio A (mejor) a F (peor). A continuación se describe brevemente cada uno de los servicios:

Nivel de servicio A: Este es el mejor nivel de servicio con el que puede contar una vía, representa una circulación a flujo libre lo cual se traduce en que los usuarios pueden determinar su velocidad deseada de circulación, existe una alta libertad para realizar

maniobras de cambio de carril y el nivel de comodidad que experimentan todos los actores viales es el ideal.

Nivel de servicio B: Aunque es menor el nivel de servicio que el presentado anteriormente, todavía se encuentra dentro del rango del flujo estable. La velocidad deseada todavía puede ser elegida por los usuarios, pero disminuye un poco la libertad para realizar maniobras dentro del tránsito.

Nivel de servicio C: Pese a que la interacción con otros usuarios conlleva a la maniobrabilidad restringida y a la definición parcial de la velocidad, aún se considera que en este nivel el flujo es estable.

Nivel de servicio D: El nivel de comodidad para todos los actores viales presenta una reducción en la comodidad, así como la libertad de elección de velocidad y maniobrabilidad. Sin embargo, representa una circulación alta aunque con una densidad elevada.

Nivel de servicio E: El funcionamiento de la vía se está acercando al límite de su capacidad, por lo cual la velocidad se reduce para todos los actores viales, la libertad de realizar maniobras es muy limitada y depende de que otros usuarios cedan el paso. La circulación es inestable y cualquier perturbación del tránsito puede producir colapsos.

Nivel de servicio F: La condición de circulación puede describirse como flujo forzado, debido a que la cantidad de vehículos excede la capacidad de la vía en un punto. Se presenta la existencia de fenómenos de parada y arranque ocasionado por largas colas de espera.

1.3. Demoras en tiempos de viaje

La demora es el tiempo perdido en un viaje con motivo de la concentración del tráfico o de la existencia de una intersección. Se distinguen dos clases:

Demora por congestionamiento: Tiempo adicional de viaje cuando los vehículos viajan a una velocidad crítica. Se produce por detenciones en la circulación como vehículos estacionados, giros derechos o izquierdos no controlados, altos volúmenes vehiculares y carriles angostos que propician la reducción de la velocidad por la incomodidad que experimenta el usuario.

Demora por intersección: Es producto de la demora causada por las intersecciones semaforizadas en su mayoría. Estas demoras son estudiadas comúnmente para evaluar efectos del diseño geométrico y dispositivos de control del tráfico.

1.4. Longitud de las colas o filas de espera

Las colas o filas de espera se generan a causa de alteraciones en el comportamiento del tránsito, generando demoras en los tiempos de viaje, por lo cual son objeto de estudios matemáticos para explicar este fenómeno.

La teoría de colas permite estimar la tasa de llegada de los usuarios y la velocidad de despacho de los mismos, para así calcular la longitud de la cola en el tiempo de evaluación determinado.

1.5. Dispositivos para el control del tránsito

Los dispositivos para el control del tránsito son elementos instalados por una autoridad pública con el objetivo de prevenir, regular y guiar a los usuarios de las vías. La instalación de cualquier dispositivo debe enfocarse a la satisfacción de una necesidad de información, imponer respeto a todos los usuarios, llamar la atención del usuario transmitiendo un mensaje simple y claro y ubicarse en el lugar apropiado para permitir al usuario suficiente tiempo de reacción. A continuación se describe algunos de ellos.

1.5.1. Señales

Existen tres tipos de señales que se dividen según su función y son identificadas de acuerdo a códigos de color y forma establecidos en cada país.

Señales preventivas: Tal como lo indica su nombre, su función es dar aviso anticipado al usuario sobre la existencia de una condición de peligro ya sea en las condiciones de la infraestructura o del entorno. En Colombia se identifican por su fondo en color amarillo y forma de rombo en su mayoría.

Señales informativas: Su función es guiar al usuario por todas las vías indicándole lugares de interés, servicios, recomendaciones, ubicación de vías principales y carreteras. En su mayoría son rectangulares y de color azul, exceptuando las señales de obra que son de color naranja, las informaciones de destinos, vías y sitios de importancia en color blanco.

Señales reglamentarias: Estas señales informan al usuario de la regulación que debe ser acatada para la circulación por la vía. El incumplimiento de estas acarrea sanciones de acuerdo a lo establecido en cada país.

Estas señales se utilizan para indicar velocidades máximas y mínimas de circulación, movimientos permitidos y restringidos, lugares de estacionamiento y demás prohibiciones y condiciones obligatorias de circulación. Se identifican por el color rojo en su borde circular a excepción de la señal de pare y ceda el paso.

1.5.2. Demarcación

Ubicada sobre el pavimento, cumple la función de regular o canalizar el tránsito a través de la delimitación del ancho del carril para mantener a los conductores alineados en la vía, indicar canalizaciones especiales, presentar los sentidos viales y giros permitidos, palabras que refuercen información importante como vías principales antes de los accesos, zonas especiales como escolares u hospitales y en algunos casos líneas separadoras de sentidos viales continuas para prohibir el adelantamiento y discontinuas para avisar a los usuarios que es permitido y seguro realizar adelantamientos.

Esta demarcación usualmente es acompañada de defensas, indicadores de alineamiento, tachuelas e indicadores de curvas peligrosas.

1.5.3. Semáforos

Los semáforos son dispositivos eléctricos que cumplen la función de regular el tránsito de vehículos, peatones y ciclistas en las vías generalmente por medio de luces rojas, amarillas y verdes. En algunos casos especiales estas luces pueden ser de colores diferentes o con menos luces para indicar zonas de reducción de velocidad en horarios definidos o paso por puentes levadizos.

1.6. Materiales contaminantes

Los materiales contaminantes se producen por la quema de los combustibles utilizados por los vehículos automotores. Los contaminantes que más producen los vehículos son: el óxido de nitrógeno (NO_x), el dióxido de carbono (CO_2) y el material particulado (PM_{10}).

Dióxido de carbono (CO_2): Es un gas inodoro, incoloro, inflamable y altamente tóxico. Se produce cuando se queman materiales combustibles como gas, gasolina, keroseno, carbón, petróleo, tabaco o madera en ambientes de poco oxígeno. Los vehículos detenidos con el motor encendido también lo despiden.

Óxido de nitrógeno (NO_x): Es un compuesto químico formado por los elementos nitrógeno y oxígeno, uno de los principales contaminantes entre los varios óxidos de nitrógeno. Se forma como subproducto en los procesos de combustión a altas temperaturas, como en los vehículos motorizados y las plantas eléctricas.

Material particulado (PM_{10}): Partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen, dispersas en la atmósfera, y cuyo tamaño es igual o inferior a 10 μm . Surgen a causa de la combustión del motor y de la resuspensión del material en la carpeta asfáltica. Están formadas principalmente por compuestos inorgánicos como silicatos y aluminatos, metales pesados entre otros, y material orgánico asociado a partículas de carbono (hollín).

Emisiones: Las emisiones son todos los fluidos gaseosos que emanen como producto de la actividad humana.

Inmisiones: Es la transferencia de contaminantes del aire desde la atmósfera hacia un receptor como el ser humano. También se conoce bajo el nombre de concentración de emisiones.

1.7. Modelos de simulación del tránsito

Los modelos de simulación del tránsito vehicular están basados en teorías con enfoques microscópicos y macroscópicos y a su vez en métodos y modelos matemáticos los cuales representan el comportamiento del flujo.

Pese al interés que despiertan los modelos basados en teorías dinámicas de seguimiento de vehículos, se presenta un problema con el manejo de las variables de espacio y tiempo dado que al momento de realizar la simulación se deben contemplar variables discretas.

Los modelos pueden tener diferentes clasificaciones de acuerdo al escenario que quieran representar tal como se describen a continuación. Esta sección se desarrolla considerando lo expuesto por los autores (Levy, M, Levy, H & Solomon, S., 2000).

Modelos macroscópicos: Se caracterizan por ser representaciones continuas del flujo vehicular; contemplando medidas generales como la relación entre flujo, velocidad y densidad. Estas características generan que el modelo carezca de mucho detalle, pero beneficia la capacidad de abarcar grandes problemas en tiempos cortos de ejecución.

Modelos mesoscópicos: Estos modelos consisten en la modelación de pelotones de vehículos cuyos movimientos de giro, tiempos de entrada y salida son determinados por el programa utilizado para la simulación.

Modelos microscópicos: Consideran las características de cada vehículo de manera individual, así como sus interacciones con otros actores viales en el flujo del tránsito.

1.7.1. Modelos microscópicos de tráfico vehicular

Como el modelo utilizado para la simulación del presente trabajo es el microscópico se ahondará un poco más en sus aplicaciones.

Estos modelos de tráfico buscan describir a gran nivel de detalle el comportamiento de los usuarios de una vía, para lo cual es necesario describir exhaustivamente el entorno de simulación y el comportamiento de los usuarios en diferentes situaciones. Dado lo extenso de las variables de entrada al modelo, su tiempo de ejecución puede ser bastante prolongado para obtener resultados comparables de la situación real.

En función de realizar la simulación, existen dos tipos diferentes de elementos presentes. Por un lado, se encuentran los componentes estáticos que son aquellos que determinan con precisión el escenario que se desea simular y que permanece inalterable a lo largo de la simulación y por otro lado, se encuentran los componentes dinámicos que determinan las interacciones entre los diferentes elementos.

Componentes estáticos: Una vía está compuesta por las calles por donde circulan los vehículos; las cuales pueden estar integradas por carriles de aceleración, desaceleración, frenado y carriles de doble sentido de circulación.

A su vez una vía también está compuesta por intersecciones por en las cuales se definen giros y movimientos. Los giros representan las posibilidades de desplazamiento de un vehículo desde su origen hasta su destino y los movimientos representan una desagregación de los giros incrementando el grado de detalle para identificar las trayectorias que siguen los vehículos.

Otro componente estático es el tipo de conductor de importancia fundamental sobre el comportamiento de los usuarios en la vía son las señales de tráfico, haciendo que los usuarios modifiquen sus patrones de conducción acoplándose a las regulaciones establecidas. El tipo de conductor que cada uno de los vehículos que circulan por la vía es otro componente estático.

Componentes dinámicos: Los componentes dinámicos se caracterizan por su variación en el tiempo y porque determinan las interrelaciones existentes entre distintos componentes del simulador microscópico de tráfico. La precisión del modelo de simulación está estrechamente relacionada con el nivel de detalle con que se definen estos componentes. Los modelos de aceleración, de cambio de carril, selección de ruta y generación de vehículo son los componentes dinámicos de mayor importancia puesto que reflejan el comportamiento de los vehículos en la vía.

1.7.2. Elementos de entrada del modelo

Los elementos de entrada al modelo que deben considerarse para realizar la modelación exitosa de la situación real son descritos a continuación.

Funciones de aceleración y desaceleración: Vissim utiliza distribuciones estocásticas de aceleración y desaceleración, las cuales dependen de la velocidad del vehículo y representan los diferentes comportamientos en la conducción. Cada función se representa con una gráfica con curvas para los valores mínimos, medios y máximos.

Si bien estas funciones pueden ser creadas y modificadas al momento de realizar la modelación, las funciones incluidas en Vissim abarcan una amplia gama de opciones de acuerdo al comportamiento de conducción de la persona y al tipo de vehículo las cuales pueden ser utilizadas.

Distribución de velocidad: Este parámetro tiene una gran influencia en la capacidad de las vías, por lo cual se define la velocidad por tipo de vehículo a la cual los conductores pueden transitar a flujo libre. Vissim de igual manera tiene unas distribuciones de velocidad predefinidas que pueden ser elegidas y/o modificadas por el usuario.

Distribución de color: Esta característica no afecta los resultados de la modelación, solamente es necesaria para la visualización del modelo y en casos especiales como vehículos que se identifican de un solo color debido al servicio que prestan.

Distribución de modelo de los vehículos: Con esta distribución es posible modelar los diferentes tipos de vehículos que se pueden encontrar en una red vial de acuerdo a sus características como dimensiones, longitud entre ejes, etc. Es posible utilizar los modelos pre diseñados por Vissim y modificar características para asemejarlos a la región.

Distribución de tiempos de demora: Estas distribuciones son utilizadas para simular demoras debidas a parqueos, paradas obligatorias, casetas de peajes y paradas de buses.

Tipo de vehículos: Es un grupo de vehículos con características técnicas, físicas y de comportamiento de conducción similar. Vissim tiene por defecto definidos algunos y de ser necesario es posible crear nuevos modelos.

Clases de vehículos: Vissim puede agrupar diferentes tipos de vehículos que contengan características similares como vehículos livianos, pesados, buses, peatones y bicicletas. Es posible crear nuevas clases como motocicletas cuando tengan una participación importante en el tránsito vehicular.

Comportamiento de conducción: De acuerdo a la edad y al género del conductor sus patrones de conducción van a ser diferentes, por lo que Vissim permite modificar el comportamiento y tipo de conductor asignado a los vehículos de manera puntual o aleatoria. Entre los factores que se pueden modificar con el tiempo de reacción, distancias de seguridad, velocidad, grado de obediencia de las señales, agilidad y pericia para la conducción.

Estos factores afectan directamente los parámetros de interacción de los vehículos por lo cual es importante definirlos de acuerdo a la situación evidenciada en el corredor de estudio.

1.7.3. Calibración del modelo

Existen diferentes métodos que indican el grado de calibración del modelo, entre ellos la revisión de los volúmenes modelados con respecto a los volúmenes medidos en campo considerando que todos los vehículos medidos en campo ingresen al modelo en el tiempo de simulación determinado.

Las distribuciones estocásticas de velocidad y umbrales de espacios, replican las características individuales del comportamiento del conductor.

1.8. Estado del arte

Para cuantificar las emisiones generalmente se utilizan dos enfoques metodológicos diferentes conocidos como el enfoque TOP-DOWN y el enfoque BOTTOM-UP (Baldasano y Millán, 2000).

El Enfoque TOP-DOWN. Calcula las emisiones totales para un área determinada. Luego de ello, realiza una desagregación espacial, distribuyendo las emisiones totales por las diferentes celdas que conforman la zona de estudio, por medio de parámetros tales como la densidad de tránsito, la densidad de población etc.

El Enfoque BOTTOM-UP. Este método estima las emisiones para cada una de las celdas de la malla que cubre toda la zona de estudio. La estimación de las emisiones de contaminantes en cada celda se hace mediante el cálculo de todos los parámetros específicos para cada celda, que sean significativos para el cálculo de las emisiones.

En este trabajo se utiliza un enfoque que se vale de la microsimulación con software PTV Vissim. Trabajos desarrollados utilizando este tipo de programa generalmente realizan sólo la modelación del tránsito vehicular más no utilizan sus complementos como el PTV EnViVer para la determinación de emisiones e inmisiones de contaminantes. Este trabajo utiliza los dos paquetes para realizar un estudio integral sobre el aporte a la degradación de la calidad del medio ambiente debido a la gestión del tránsito y a su infraestructura.

Otro de los factores identificados en los estudios realizados de modelación del tráfico, es que las versiones del programa han sido de capacidad limitada por lo cual no ha sido posible realizar análisis de corredores completos o tramos largos como el que se eligió para este proyecto, adicionalmente las versiones utilizadas corresponden a años anteriores por lo que muchas opciones que hoy en día el programa ofrece no existían en su momento.

En términos operacionales del tránsito, el programa en su versión 9 ofrece la opción de hacer seguimiento a los vehículos para evaluar si el comportamiento de los conductores se asemeja al real y la posibilidad de optimizar los tiempos de semáforos inicialmente definidos. Otro aspecto interesante es la instalación de semáforos actuados y de tiempo variable lo cual permite evaluar los impactos en la movilidad de los sectores de estudio simulados.

Pese a que la interfaz del software PTV EnViVer no ha sido ampliamente utilizada en los estudios de emisiones a nivel regional, internacionalmente ha sido utilizada y calibrada de acuerdo a los factores de emisión de los diferentes países. Sin embargo, fue necesario calibrar los factores para la región colombiana para poder emplear el programa como se describe en el numeral 2.2.2.12 de este documento.

En la literatura consultada, tampoco es posible identificar que se planteen alternativas para la reducción de emisiones de contaminantes de fuentes móviles a través de la gestión del tránsito o la infraestructura. La mayoría de los estudios se enfocan en cuantificar las emisiones o caracterizarlas dejando de lado las propuestas de mejora.

A continuación, la Tabla 1 muestra algunos trabajos que han utilizado la micro simulación para cuantificar emisiones, considerando las anteriores aclaraciones y que fueron consultados para la realización de esta tesis.

Tabla 1: Principales trabajos consultados que utilizaron la micro simulación y el software PTV Vissim

AUTOR	NOMBRE	CARACTERÍSTICAS
García –Castro y Monzón de Cáceres. (2016)	Efectos de la conducción eficiente en el tráfico y las emisiones mediante micro-simulación	Se modela la conducción considerando diferentes aspectos que ayuden a disminuir el consumo de combustible y a reducir las emisiones.
Sánchez, Quaassdorff, Santiago, Borge, De la Paz, Martilli y Rivas. (2016)	Effects of traffic emission resolution on NO _x concentration obtained by CFD-RANS modelling over a real urban area in Madrid (Spain)	Generar un mapa de concentraciones reales del área urbana de Madrid y analizar la distribución de esas concentraciones a nivel de calle y de peatones.
Spiliopoulou, Kontorinaki, Papageorgiou and Kopelias. (2014)	Macroscopic Traffic flow model validation at congested freeway off-ramp areas	Se comparan dos modelos macroscópicos de flujo que tienen en cuenta la congestión debida a la saturación de la autopista Attiki Odos en Atenas. Con el fin de reproducir la congestión real en las áreas de salida de la autopista.
Zegeye, Schutter, Hellendoorn, Breunese and Heggy. (2013)	Integrated macroscopic traffic flow, emission, and fuel consumption model for control purposes	Generan una metodología que integra diferentes modelos de flujo de tráfico macroscópicos con modelos microscópicos de emisión y consumo de combustible para disminuir los tiempos de simulación
Pájaro y Quezada (2012)	Modelación del tránsito vehicular en el sector Bomba el Amparo- Sao la Plazuela, Cartagena por medio de software PTV Vissim	Modelar las condiciones presentes y futuras del tránsito vehicular del sector de estudio para plantear una alternativa que dé solución al nivel de servicio del sector.

Fuente: Elaboración propia, 2017

CAPÍTULO II. FUENTES DE INFORMACIÓN Y METODOLOGÍA

En este capítulo se enunciarán las fuentes de información utilizadas para la elaboración del modelo de simulación de emisiones del sector de estudio. Seguidamente se presentará la metodología empleada para el desarrollo del modelo de emisiones del sector con el uso del software PTV Vissim y PTV EnViVer.

Con el objetivo de establecer parámetros de mitigación de las emisiones, se desarrollaron tres escenarios teniendo en cuenta alternativas de bajo y alto costo para su implementación; así como el fortalecimiento del Sistema Integrado de Transporte Público para desincentivar el uso del automóvil.

2.1. Fuentes de información

El modelo de simulación que fue construido requiere información sobre el número de carriles de cada vía, velocidades promedio de circulación para cada tipología de vehículos, coordinación semafórica del corredor, distribución de la flota vehicular y volúmenes vehiculares para la hora pico. La información consultada para la construcción del modelo se detalla a continuación.

2.1.1. Aforos vehiculares

La Secretaría Distrital de Movilidad por medio del programa de “Monitoreo, seguimiento y planeación del tránsito y el transporte de Bogotá D.C.” realiza constantemente toma de información de campo para establecer parámetros de control del tránsito de la ciudad.

Dentro de la información recolectada por esta entidad se solicitaron los aforos vehiculares de los puntos relacionados en la Figura 3, para identificar la hora pico, los volúmenes de los accesos hacia y desde la Calle 13 o Avenida Centenario en el período pico de un día típico; es decir de martes a jueves excluyendo días feriados. Con esta misma información se definió el flujo relativo para las trayectorias de las rutas y la composición vehicular de cada acceso como presentará en el numeral 3.5.1.

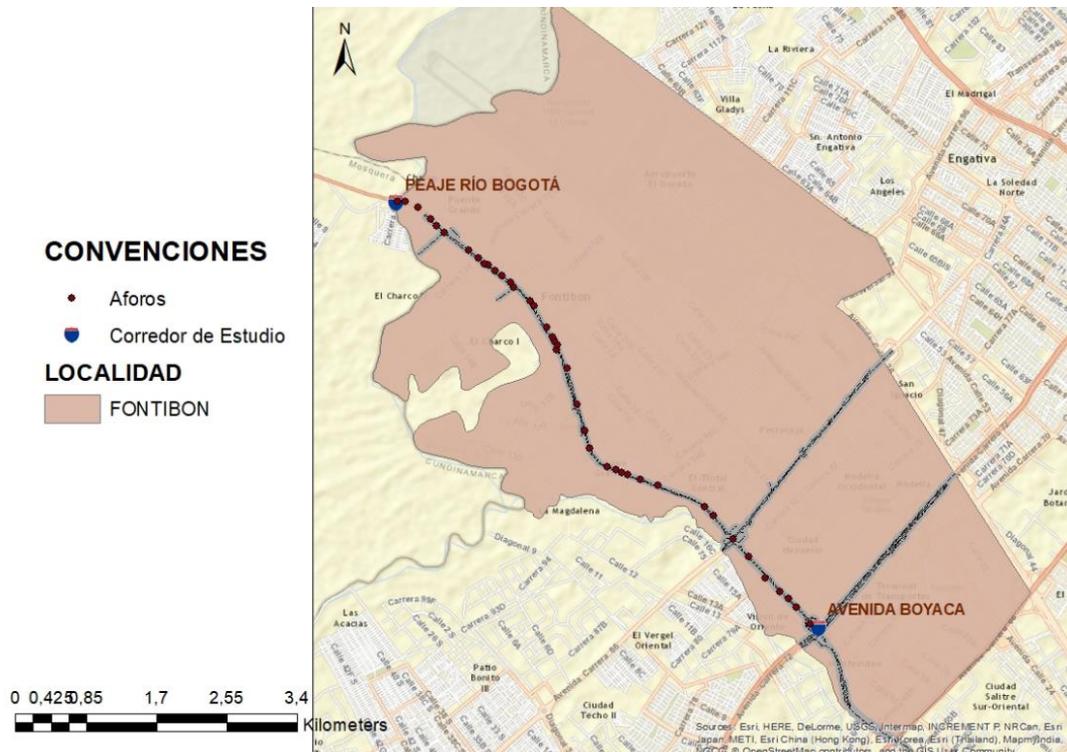


Figura 3: Ubicación de toma de volúmenes vehiculares Fuente: Elaboración propia, 2017

2.1.2. Frecuencia y tiempo de despacho transporte público

Pese a que en los aforos vehiculares suministrados por la Secretaría Distrital de Movilidad se contabilizan los buses y flotas en cada punto de control, estos no discriminan la ruta que está cubriendo cada bus; por lo cual fue necesario identificar las rutas que transitan en el corredor a través de la página web del SITP para el caso de los buses del Sistema Integrado de Transporte Público y para las flotas intermunicipales se realizó un levantamiento de información en campo.

2.1.3. Coordinación semafórica

La programación de los semáforos de la ciudad de Bogotá también se encuentra a cargo de la Secretaría Distrital de Movilidad, quienes proporcionaron los planes semafóricos para el periodo pico que fue identificado y se mencionara posteriormente.

A la fecha de la solicitud de la información se contaba con semáforos instalados en los siguientes nodos:

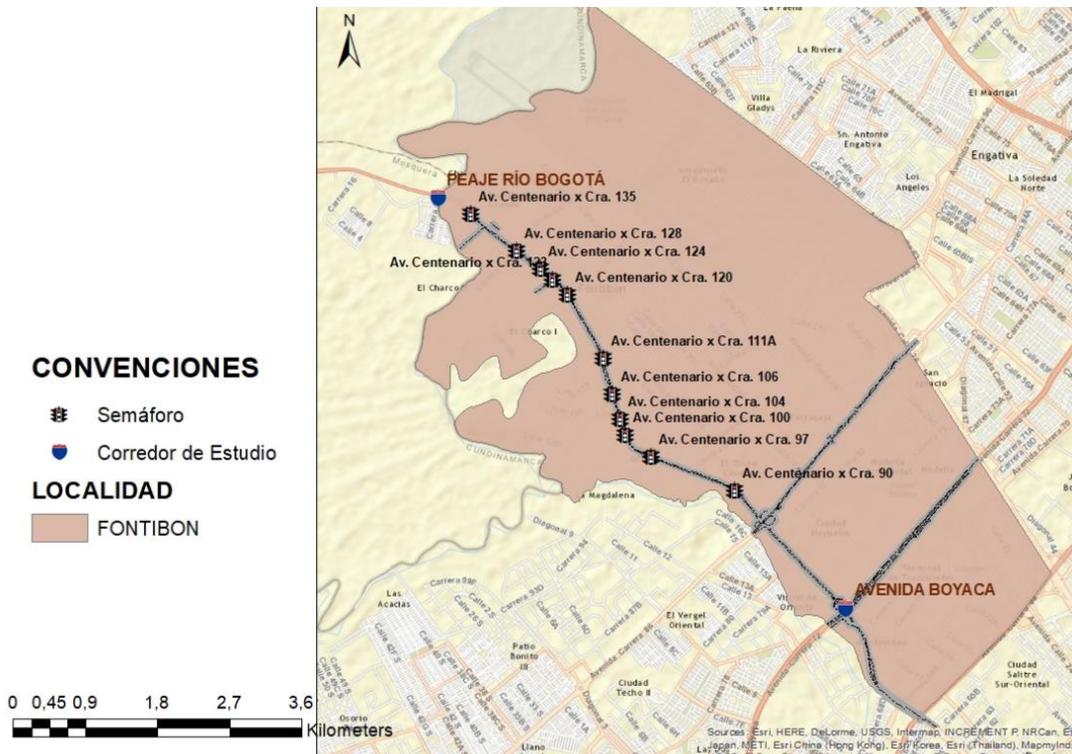


Figura 4: Semáforos del corredor de estudio Fuente: Elaboración propia, 2017

2.1.4. Factores de emisión

De acuerdo a la información consultada en la página web del Observatorio Ambiental de Bogotá se encontró la distribución de la flota de vehículos que transita en la ciudad de Bogotá por tipo de combustible y sus respectivos factores de emisión de dióxido de carbono (CO₂) (ver Tabla 2). Además, también se obtuvo la distribución de la flota vehicular según combustible (Tabla 3).

Tabla 2: Factores de emisión de CO₂ según tipo de vehículo y combustible

TIPO DE VEHÍCULO	GASOLINA		DIÉSEL	
	Kg CO ₂ /gal	g CO ₂ /Km	Kg CO ₂ /gal	g CO ₂ /Km
Automóviles	7,618	185,8	10,149	247,5
Camiones y vehículos pesados	7,618	507,9	10,149	1014,9
Motocicletas	7,618	84,6	—	—
Vehículos de transporte público colectivo	7,618	634,8	10,149	845,75

Fuente: Elaboración propia usando Información del Observatorio Ambiental de Bogotá, 2017

Tabla 3: Distribución de la flota vehicular según tipo de combustible

TIPO DE VEHÍCULO	GASOLINA (%)	DIÉSEL (%)	GAS (%)	ELÉCTRICO (%)
Automóviles	97	2	1	–
Camiones y vehículos pesados	48,7	50,6	0,7	–
Motocicletas	95	–	–	5
Vehículos de transporte público colectivo	11	89	–	–

Fuente: Elaboración propia usando Información del Observatorio Ambiental de Bogotá, 2017

2.1.5. Límite permisible de emisiones

De acuerdo a la Resolución 610 de 2010 expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, se reglamentan los niveles permisibles de contaminantes y su respectivo tiempo máximo de exposición (Tabla 4). Estos niveles han sido establecidos para mitigar la afectación de la salud de los habitantes del territorio nacional.

Se aclara que los límites establecidos en la Resolución 610 de 2010 corresponden a la suma de fuentes móviles y fijas, sin embargo se emplean para establecer la relevancia de a situación actual de contaminación por fuentes móviles.

Dado que el período que empleado para la modelación es de una hora, se escogen niveles máximos permisibles para los tiempos de exposición de una hora. En el caso del material particulado el tiempo mínimo que se presenta en la norma es de 24 horas, por lo cual se presentan comparaciones en el Capítulo V a manera de un ejercicio académico.

Tabla 4: Niveles permisibles de contaminantes criterio

CONTAMINANTE	NIVEL MÁXIMO PERMISIBLE [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	TIEMPO DE EXPOSICIÓN
PM ₁₀	100	24 horas
NO _x	200	1 hora

Fuente: Resolución 610 del 24 de marzo de 2010

Para el dióxido de carbono CO₂ no se cuenta con una norma en cuanto al límite máximo permisible para la región, por lo cual se adopta el Protocolo de Kyoto en el cuál Colombia se encuentra incluida. A pesar de no ser uno de los países que establecieron compromisos de reducción de emisiones para el primer período de 2008 a 2012, se contemplará para efectos de análisis el compromiso adquirido por los otros países desarrollados con la reducción del 5% de este contaminante.

Igualmente se definen en la Resolución los niveles de prevención, alerta y emergencia ambiental para las concentraciones y tiempos de exposición presentados en la Tabla 5.

Tabla 5: Concentración y tiempo exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia

CONTAMINANTE	TIEMPO DE EXPOSICIÓN	ESTADOS EXCEPCIONALES		
		PREVENCIÓN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	ALERTA [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	EMERGENCIA [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM ₁₀	24 horas	300	400	500
NO _x	1 hora	400	800	2.000

Fuente: Resolución 610 del 24 de marzo de 2010

2.1.6. Relación de las bases de datos utilizadas

La Tabla 6 contiene un resumen detallado de las diferentes fuentes de datos consultados en esta tesis y muestra detalladamente el año de realización, la fuente, la unidad temporal y espacial de desagregación y la información suministrada.

Tabla 6: Relación de las bases de datos utilizadas

No.	BASE DE DATOS	AÑO	FUENTE	UNIDAD DE DESAGREGACIÓN		INFORMACIÓN
				ESPACIAL	TEMPORAL	
1	Volúmenes vehiculares direccionales	2017	Secretaría Distrital de Movilidad	Nodo	Periodos de tiempo de: 5 minutos 15 minutos 1 hora	Volúmenes vehiculares direccionales por tipo de vehículo para las 46 vías primarias, secundarias y terciarias presentes en el sector de estudio.
2	Rutas del Sistema Integrado de Transporte Público	2017	SITP	Ciudad	No aplica	Recorrido que realiza cada ruta del SITP comprendida en el corredor de estudio.
3	Rutas de flotas intermunicipales	2017	Información tomada en campo	Ciudad	No aplica	Recorrido que realiza cada ruta de servicios intermunicipales que este comprendida en el corredor de estudio.
4	Frecuencia buses de transporte público y flotas intermunicipales	2017	Información tomada en campo	Ciudad	Hora	Tiempo de partida y frecuencia de despacho por ruta.
5	Programación semafórica	2017	Secretaría Distrital de Movilidad	Nodo	Un ciclo de 180 segundos	Tiempos de amarillo, rojo, rojo-amarillo y verde para las 11 intersecciones semaforizadas en el corredor de estudio.
6	Factores de emisión de CO ₂	2017	Observatorio Ambiental de Bogotá	Ciudad	No aplica	Distribución por tipo de combustible para cada categoría de vehículo y factores de emisión de CO ₂ por tipo de combustible.

Fuente: Elaboración propia, 2017

2.2. Metodología

El objetivo general de este trabajo de tesis es generar un modelo de simulación que permita evaluar de manera sencilla las emisiones debidas al tránsito considerando las características de la infraestructura y contribuya a generar políticas públicas de transporte eficientes que las mitiguen y mejoren la calidad de vida de los habitantes del sector de estudio. De acuerdo con el objetivo, el trabajo se estructuró en cuatro etapas: en la primera etapa se consolidó la información necesaria para realizar la construcción del modelo; el cual corresponde a la segunda etapa que comprende 12 pasos que se describen posteriormente en este numeral. En la tercera etapa se modelaron tres escenarios propuestos para la reducción de las emisiones asociadas al transporte considerando los resultados obtenidos en la modelación de la situación actual y presentado alternativas de diferente costo y nivel operativo, finalmente la cuarta etapa está comprendida por el análisis y comparación de resultados obtenidos.



Figura 5: Metodología Fuente: Elaboración propia, 2017

2.2.1. Consolidación de la información

Como se presenta a lo largo del Capítulo II, la información necesaria para la construcción del modelo fue solicitada a los diferentes entes distritales y levantada en campo de ser necesario.

2.2.2. Construcción del modelo

A continuación se detallan las operaciones y consideraciones tenidas en cuenta para la construcción del modelo.

2.2.2.1. Construcción de la red vial

El primer paso para la realización del modelo fue la construcción de la red vial en el software Vissim. En primera instancia se definió la vía principal o “Link” como la denomina el programa, se dibujó el corredor de la Calle 13 o Av. Centenario en el sentido Oriente – Occidente y Occidente – Oriente utilizando la imagen satelital que viene integrada en el programa; después se dibujaron las vías correspondientes a los accesos elevados: Av. Ciudad de Cali o Kr 86 y la Av. Boyacá o Kr 72. Finalmente se incorporaron los accesos secundarios presentados en la Figura 3.

El trazado de las vías en el programa se realizó a través del menú Links; mediante el cual se define el ancho del carril para cada vía, el número de carriles, el nombre de la vía, el tipo de comportamiento de la red vial y nivel en la vía; para el caso específico del corredor se contaba con dos niveles; base y puente el cual se definió con una elevación o galibo de 4 metros.

Un ejemplo de la construcción de la red se muestra en la Figura 6, en donde una vez ingresado el Link se resalta en amarillo y despliega la ventana de atributos que se mencionaron anteriormente

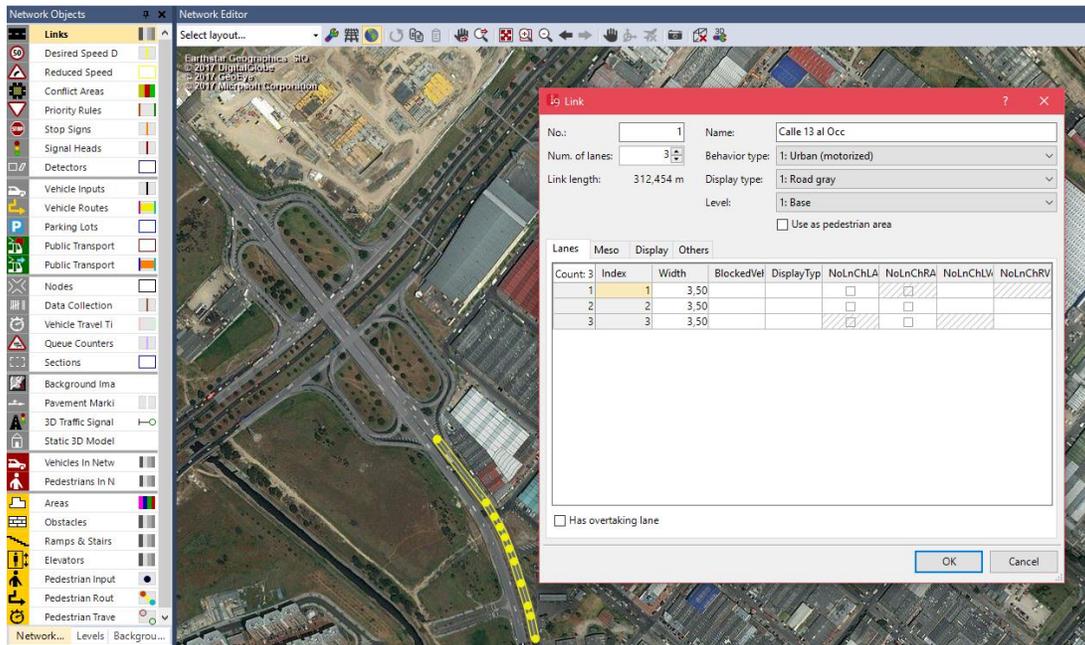


Figura 6: Ejemplo de ingreso de Links Fuente: Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

2.2.2.2. Detección de áreas de conflicto

Una vez construida toda la red vial, es necesario definir en las áreas de conflicto qué sentido del flujo tiene la prioridad. Esta definición de conflicto se puede asemejar a la función que tiene la señal de Ceda el Paso que restringe el tráfico del acceso secundario para que el acceso principal no se vea afectado en términos operacionales de velocidad y seguridad.

Una vez se selecciona el menú Conflict Areas se resaltan en color amarillo todos los puntos que de acuerdo con el programa generan conflicto en la circulación del corredor (Figura 7), para lo cual se define con clic derecho sobre cada zona de conflicto el acceso principal; quedando este resaltado en color verde (Figura 8). Se realiza este mismo procedimiento seleccionando el menú Priority Rules.

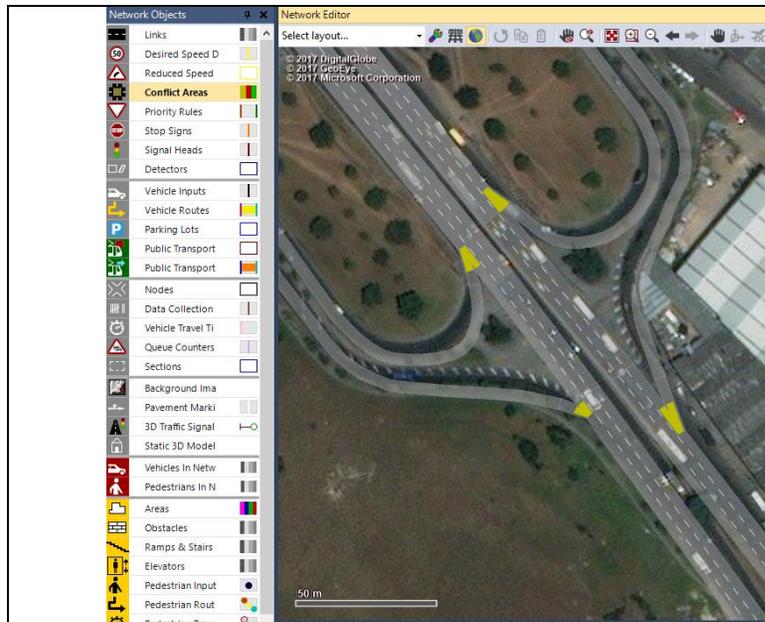


Figura 7: Áreas de conflicto **Fuente:** Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

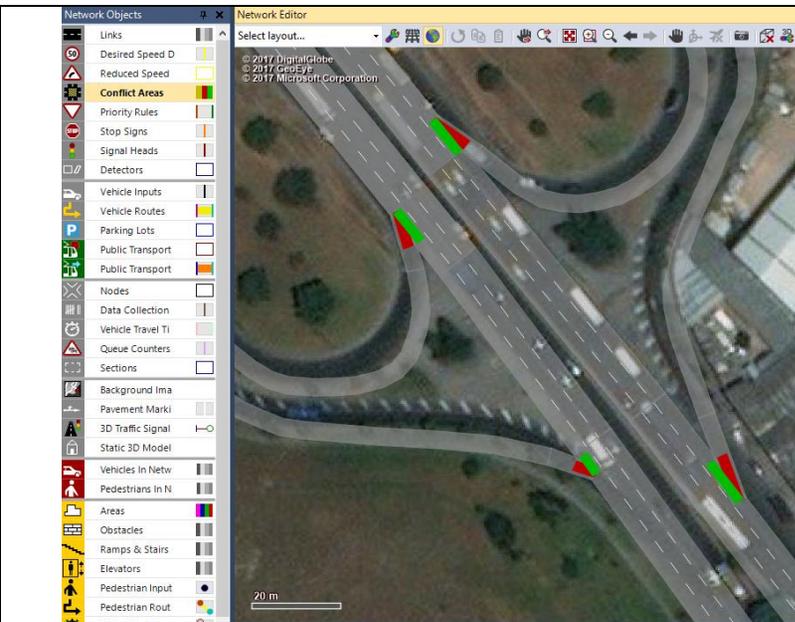


Figura 8: Definición de áreas de conflicto **Fuente:** Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

2.2.2.3. Definición de las áreas de reducción de la velocidad

Considerando las áreas de conflicto seleccionadas previamente, se define qué zonas de estas deben reducir la velocidad, ya sea por las condiciones del diseño geométrico de las vías o por la regulación establecida según la autoridad competente. El menú Reduced Speed Areas permite crear zonas de desaceleración de los vehículos como se muestra en la Figura 9.

Esta opción se utilizó en las zonas donde existía señalización acerca de reducción de la velocidad, ceda el paso o pare.

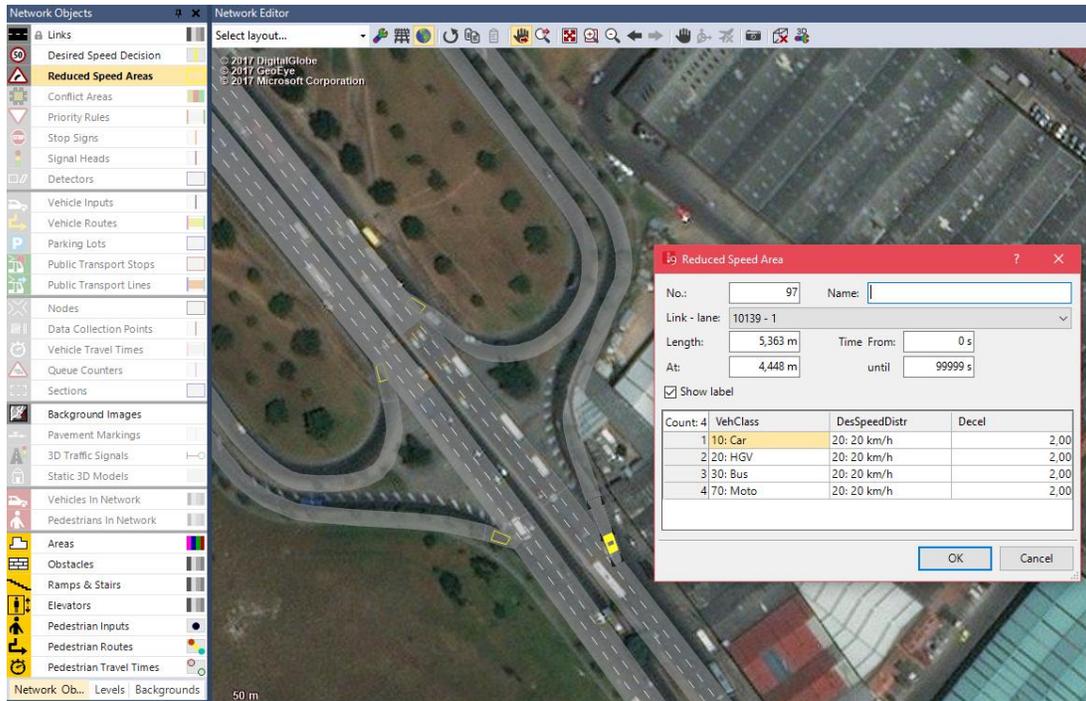


Figura 9: Áreas de reducción de la velocidad Fuente: Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

2.2.2.4. Creación de la red semafórica

Dado que el sector de estudio cuenta con varios semáforos instalados, es necesario replicar esta información en el modelo. El proceso de asignación de un semáforo a la vía inicia con la creación de un controlador a través de la opción Signal Controllers ubicada en el menú Signal Control, como se puede observar en la Figura 10 una vez se ha desplegado el menú aparece en la parte inferior el recuadro de edición para iniciar el proceso de creación.

En la ventana que aparece en la pantalla debe asignarse un nombre al controlador y proceder a dar clic en Edit Signal Control.

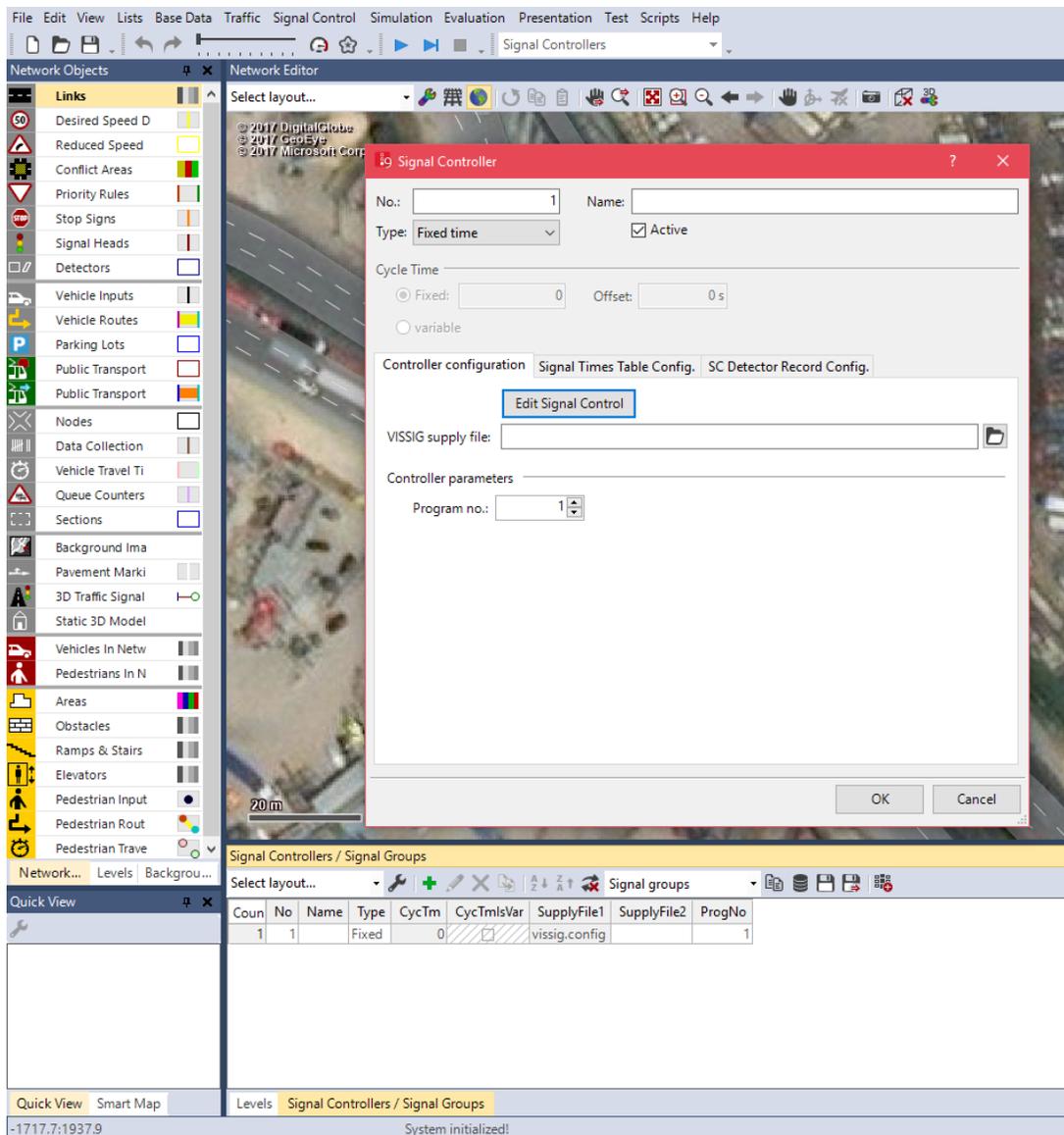


Figura 10: Creación del controlador de semáforos **Fuente:** Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

Una vez se empieza la edición, aparece en la pantalla el controlador que se presenta en la Figura 11, en la cual se debe agregar el número de semáforos con programación diferente con las que cuente el modelo. Después de crear los grupos de señales se procede a definir el tiempo de ciclo del semáforo y a establecer los tiempos para cada color del semáforo; un ejemplo se muestra en la Figura 12.

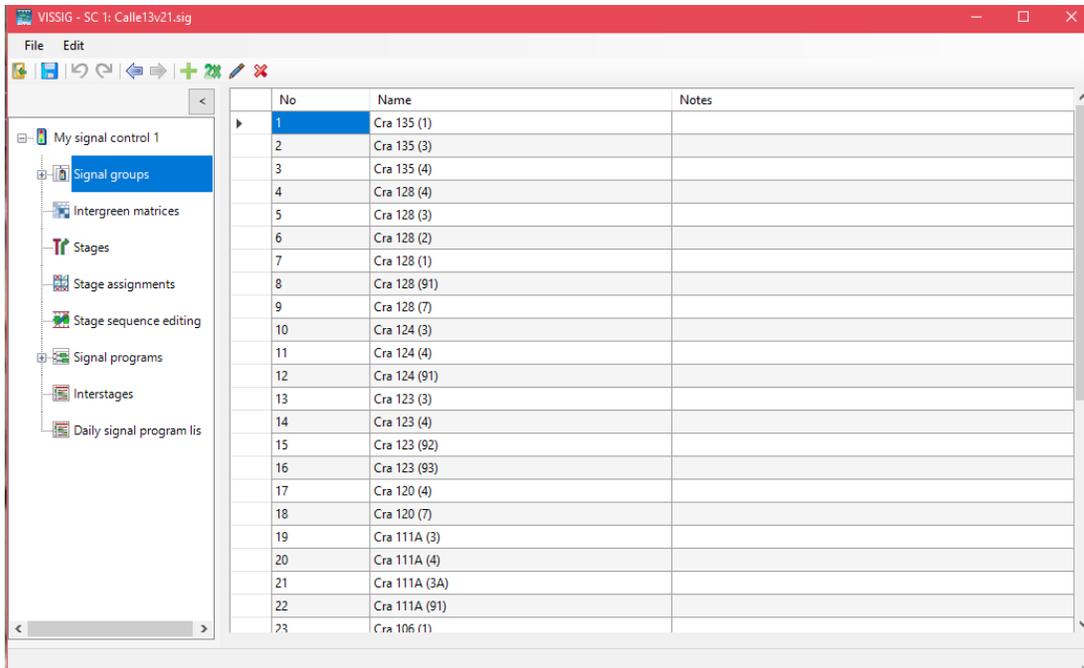


Figura 11: Grupos de señales Fuente: Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

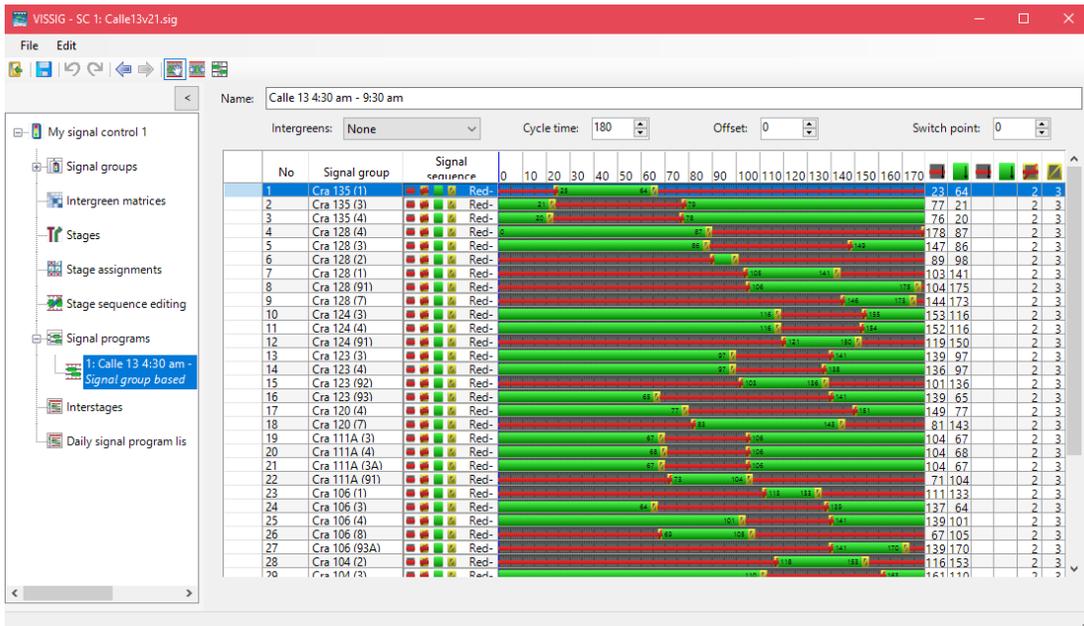


Figura 12: Ciclos semafóricos Fuente: Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

Después de haber creado los grupos de controladores o semáforos, se ubican en la red usando el menú Signal Heads mediante el cual se asigna el controlador creado previamente cómo se muestra en la Figura 13.

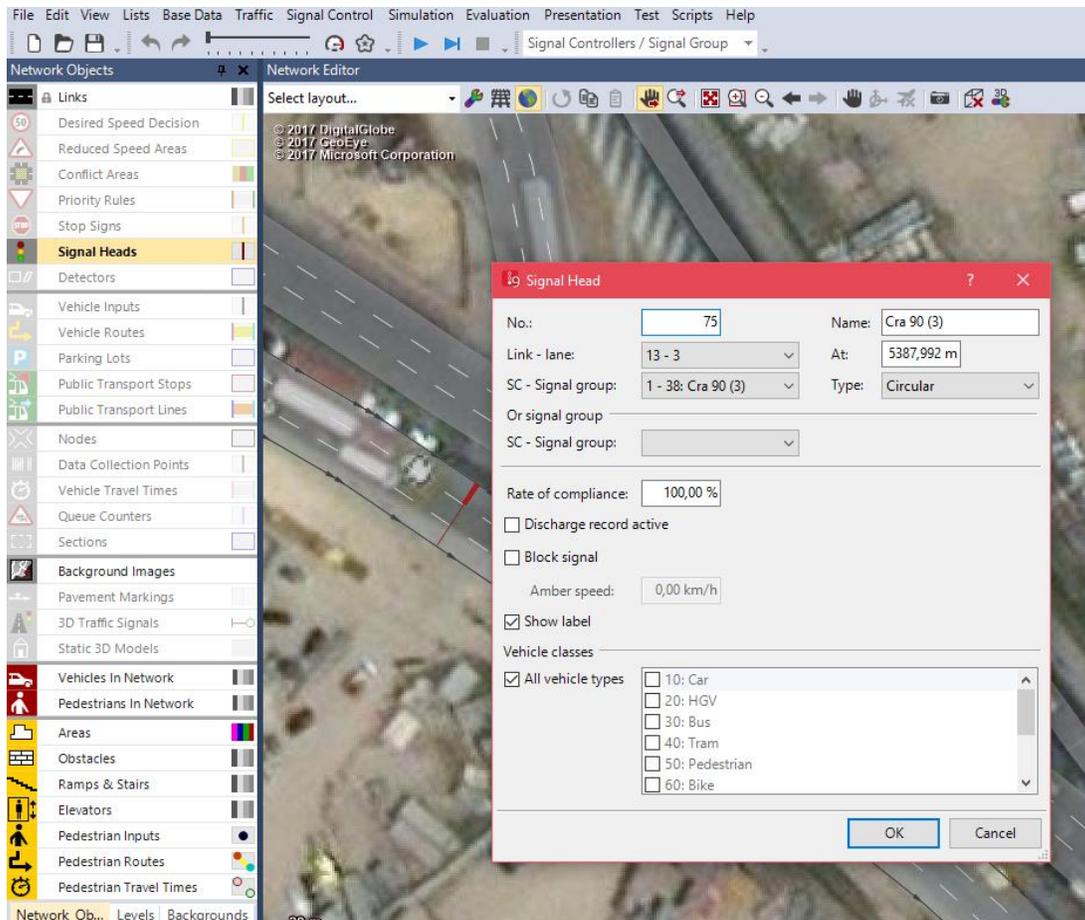


Figura 13: Ubicación de semáforos en la red **Fuente:** Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

Adicionalmente el software permite realizar la optimización de los tiempos semafóricos para la red ingresada previamente siguiendo el menú Signal Control y Optimize All Fixed Time Signal Controllers como se muestra en la Figura 14.

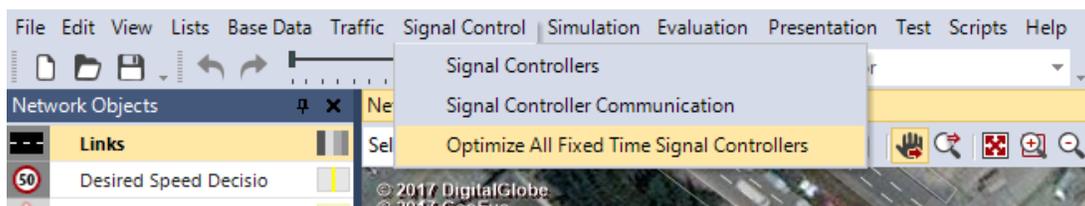


Figura 14: Optimización de semáforos en la red **Fuente:** Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

La opción de Optimize All Fixed Time Signal Controllers se emplea en el desarrollo del escenario propuesto 1.

2.2.2.5. Definición de los puntos de detención

En el software existe la opción de modelar escenarios donde los vehículos deben detenerse de manera obligatoria durante un tiempo que puede ser definido por medio de una distribución normal. Este caso puede aplicarse a estaciones de peaje; como es el presente caso, talanqueras de parqueaderos, puntos de control policiales, entre otros.

La manera de crear estos puntos de parada en la red se realiza usando el menú Stop Signs el cual despliega la ventana que se muestra en la Figura 15, en la cual se especifica qué clase de vehículos deben detenerse en el punto de parada definido y la distribución de tiempo que se aplicará en la parada.

Este concepto se aplicó para el punto final de la Calle 13 sentido Occidente – Oriente, debido a que el modelo en este punto finalizaba a flujo libre fue necesario establecer un punto de parada que se asemejara al comportamiento real del tráfico.

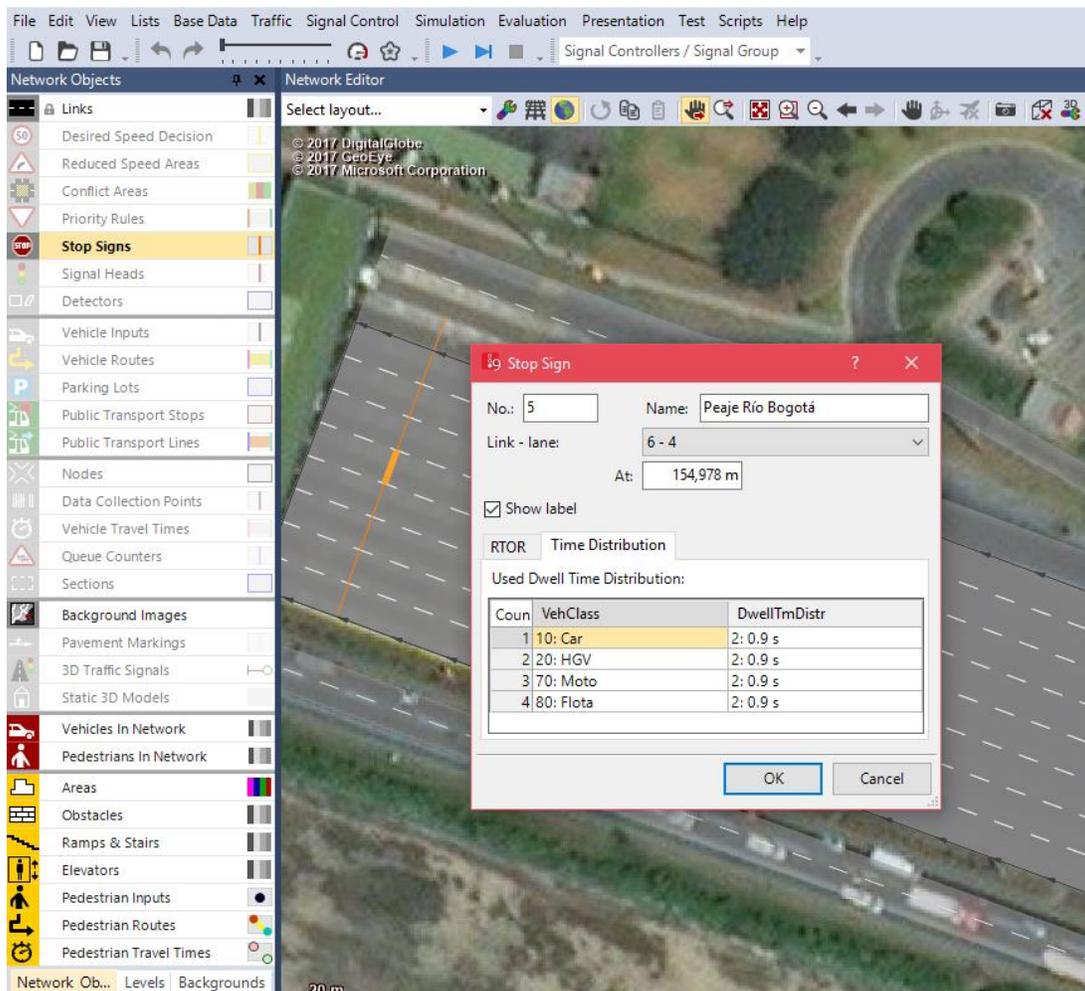


Figura 15: Estación de peaje Fuente: Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

2.2.2.6. Asignación de paraderos de los buses de transporte público y flotas intermunicipales

A través del menú Public Transport Stops se realiza la asignación de los puntos autorizados para que los buses realicen la operación de ascenso y descenso de pasajeros. Estos paraderos son definidos de manera separada para buses del SITP (sistema integral de transporte público de Bogotá) y para buses intermunicipales con el fin de representar la operación normal del transporte público en el corredor.

En la Figura 16 se puede observar el menú y la ventana de selección de los atributos del paradero.

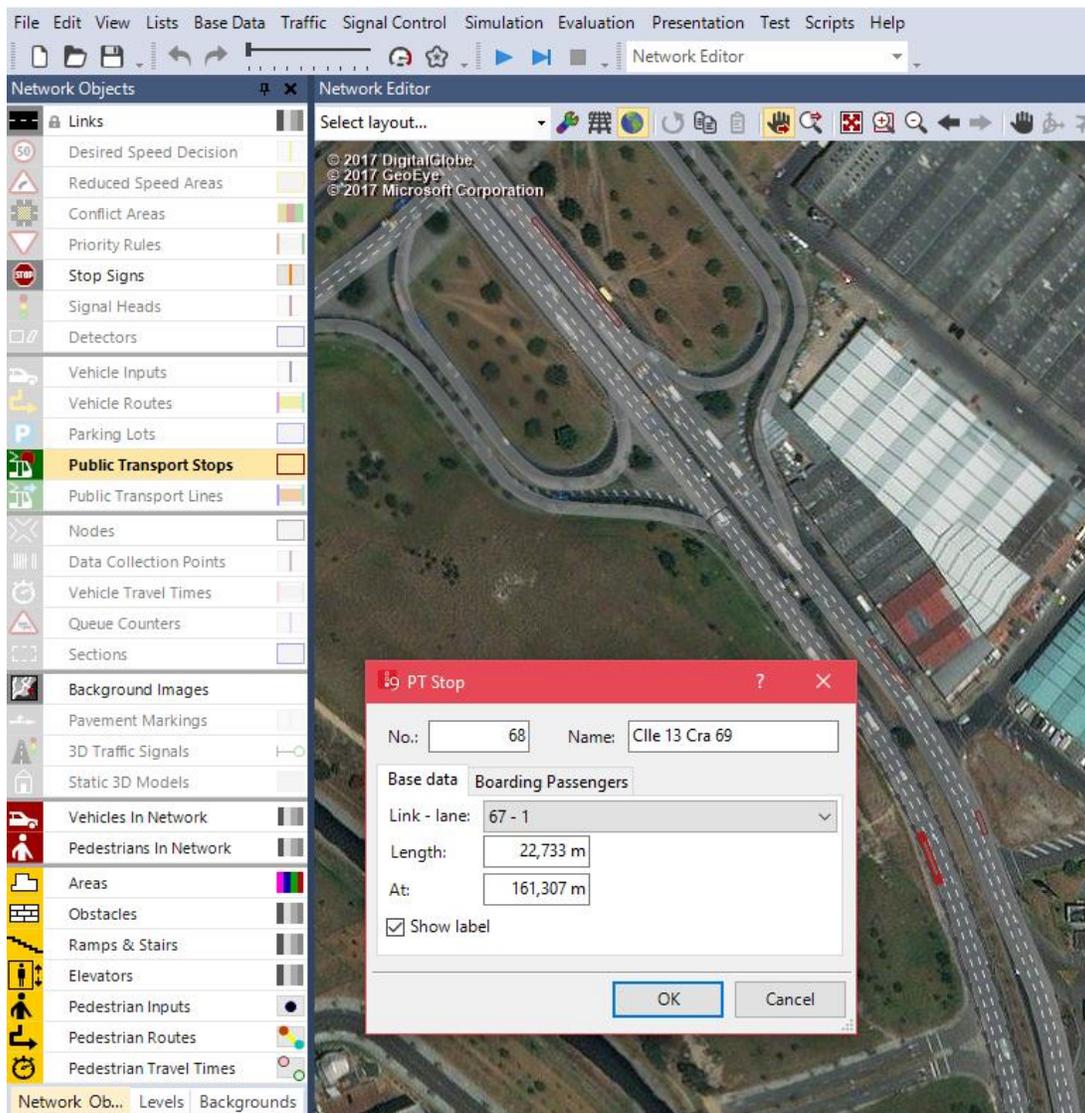


Figura 16: Paraderos de los buses de transporte público y flotas intermunicipales Fuente: Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

2.2.2.7. Composición vehicular

Dadas las condiciones de la red que se va a modelar, es necesario definir una composición vehicular para cada acceso; la cual se realiza en la opción Vehicle Compositions del menú Traffic. Se debe crear una composición en la ventana inferior tal como se muestra en la Figura 17, en este mismo lugar se debe definir la velocidad promedio de circulación por el corredor.

Es importante aclarar que el transporte público colectivo no es cuantificado en esta composición debido a que este es definido como se explica en el numeral 2.2.2.10.

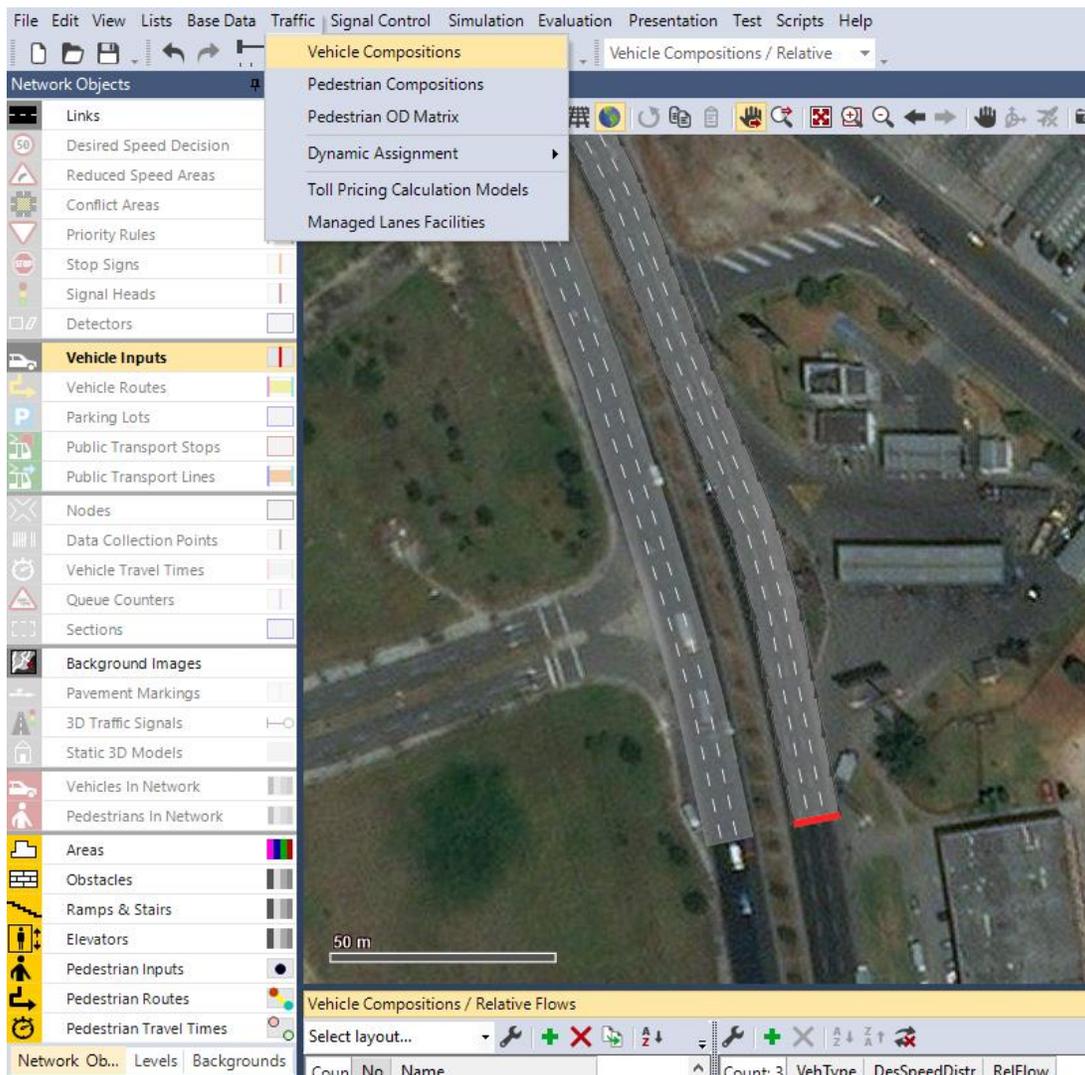


Figura 17: Composición vehicular Fuente: Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

2.2.2.8. Asignación de volúmenes vehiculares

Una vez definida la composición vehicular se procede a ubicar en la red los puntos donde los volúmenes que serán ingresados a través del menú Vehicle Inputs iniciarán su recorrido en la red. Una vez se seleccione este menú se procede a ubicar la línea roja que se observa en la Figura 18 lo más cercana al inicio de la vía como sea posible; esta línea corresponde al punto de partida de los vehículos que ingresan a la red.

El valor del volumen se ingresa en la ventana inferior de la pantalla; la cual aparecerá una vez se defina el punto de inicio de los vehículos, seguidamente se debe asignar la composición vehicular que fue definida en el anterior numeral.

Por defecto, Vissim selecciona la opción VolType: Stochastic para el modo en el que ingresan los vehículos al modelo, de manera que si no se modifica esta opción los vehículos ingresan a la red vial de manera aleatoria y puede presentarse que al finalizar el tiempo de simulación establecido no ingresen el total de los vehículos que fueron medidos en campo; generando así que el modelo no represente la situación real ni este calibrado, por lo cual no se recomienda utilizar esta opción.

En este orden de ideas, para obtener resultados exactos sobre el número de vehículos que son ingresados a la red y que en efecto transitan por ella, se selecciona en la ventana ubicada en la parte inferior la opción VolType: Exact, de esta manera se garantiza que los resultados del modelo de simulación corresponden a lo observado en campo y recopilado a través de aforos vehiculares. Una vez se seleccione la opción Exact, las celdas se resaltarán en color amarillo.

Seleccionando esta opción al finalizar el tiempo de simulación establecido para la hora pico, el programa arrojará alertas si hay vehículos que no ingresan a la red; por lo cual será tarea del usuario verificar que características están impidiendo que el modelo permita la circulación de todos los vehículos.

Se aclara que estos volúmenes no incluyen los buses del Sistema Integrado de Transporte y las flotas intermunicipales puesto que serán incluidos como se indica en el numeral 2.2.2.10.

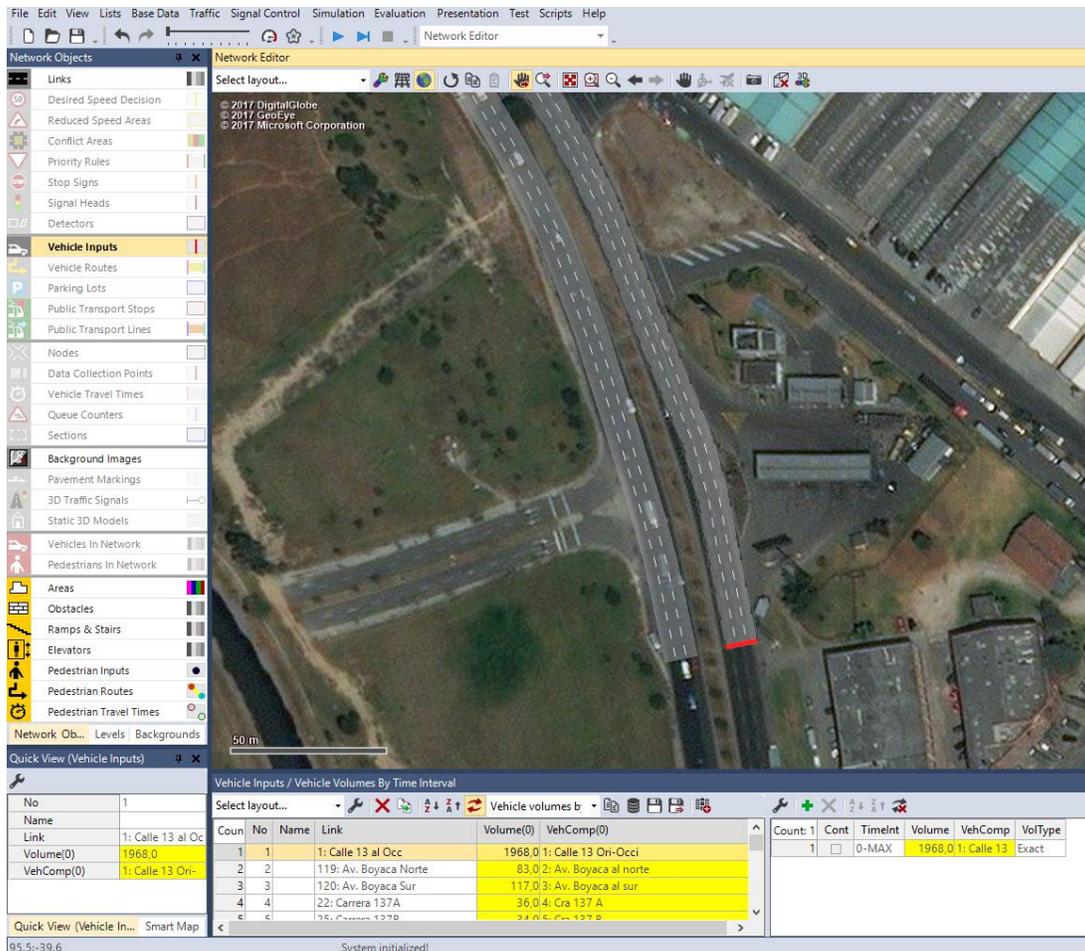


Figura 18: Asignación de volúmenes vehiculares Fuente: Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

2.2.2.9. Definición de rutas vehiculares

Después de obtener los volúmenes vehiculares, se definen las rutas que recorren los vehículos ingresados a la red. Para ello se va al menú Vehicle Routes y se elige el punto de inicio de la ruta y cada uno de los puntos finales de los recorridos.

La manera de definir las rutas vehiculares en la red consiste en identificar cada uno de los posibles movimientos que pueden realizar los usuarios y en concordancia con los aforos vehiculares definir el flujo relativo que cada movimiento aporta al volumen de la vía.

Las rutas que se van definiendo se colocan en color amarillo en la red. También en este paso se especifica el flujo relativo que compone cada una de las anteriores rutas, el cual se asigna en la ventana que se encuentra en la parte inferior derecha de la Figura 19.

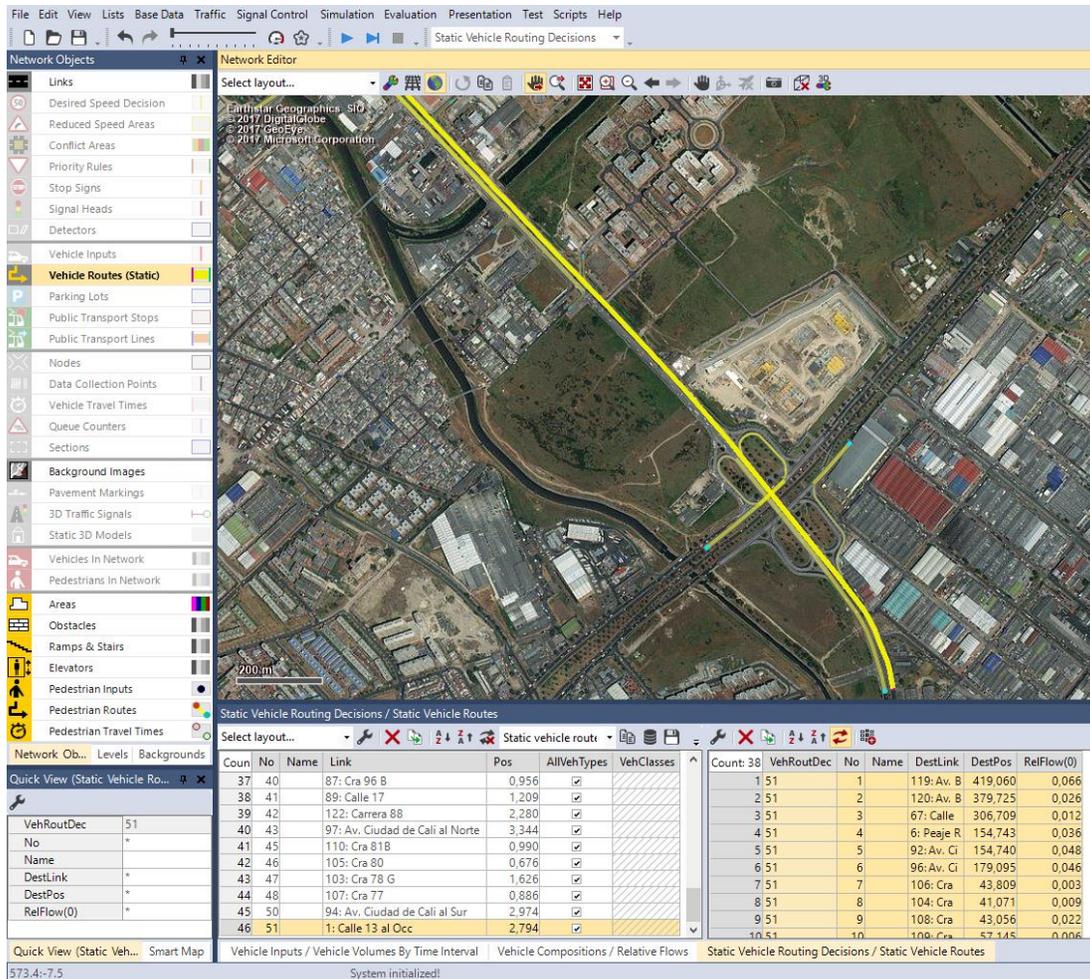


Figura 19: Rutas vehiculares Fuente: Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

2.2.2.10. Definición de rutas de Transporte público

Cómo se mencionó anteriormente las rutas de transporte público no han sido incluidas en el modelo hasta este momento. El motivo corresponde a que Vissim considera dos módulos diferentes para el transporte privado y para el transporte público, dado que el comportamiento en cada uno es particular a su uso.

Las rutas vehiculares o de transporte privado, no realizan paradas habituales en la vía para dejar o recoger pasajeros y su ingreso a la red se realiza siguiendo una distribución normal en el tiempo. Por su parte, las rutas de transporte público cuentan con horarios de despacho definidos y frecuencias que fueron observadas en campo y asignadas como se muestra en la Figura 21 para dar cobertura a los usuarios de este servicio, los cuales deben esperar el bus en los paraderos definidos en el numeral 2.2.2.6.

Para ello se selecciona el menú Public Transport Lines, mediante el cual se dibuja el recorrido de la ruta por la red establecida previamente. Una vez finalizada la definición de

la ruta de transporte público se observa que los paraderos por los cuales la ruta transita se resaltarán en color verde como se muestra en la Figura 20.

Seguidamente aparecerá la ventana que se presenta en la Figura 21, donde se asigna el tipo de vehículo que realizará la ruta, la distribución de velocidad deseada y los tiempos de partida para cada bus que cubre la misma ruta.

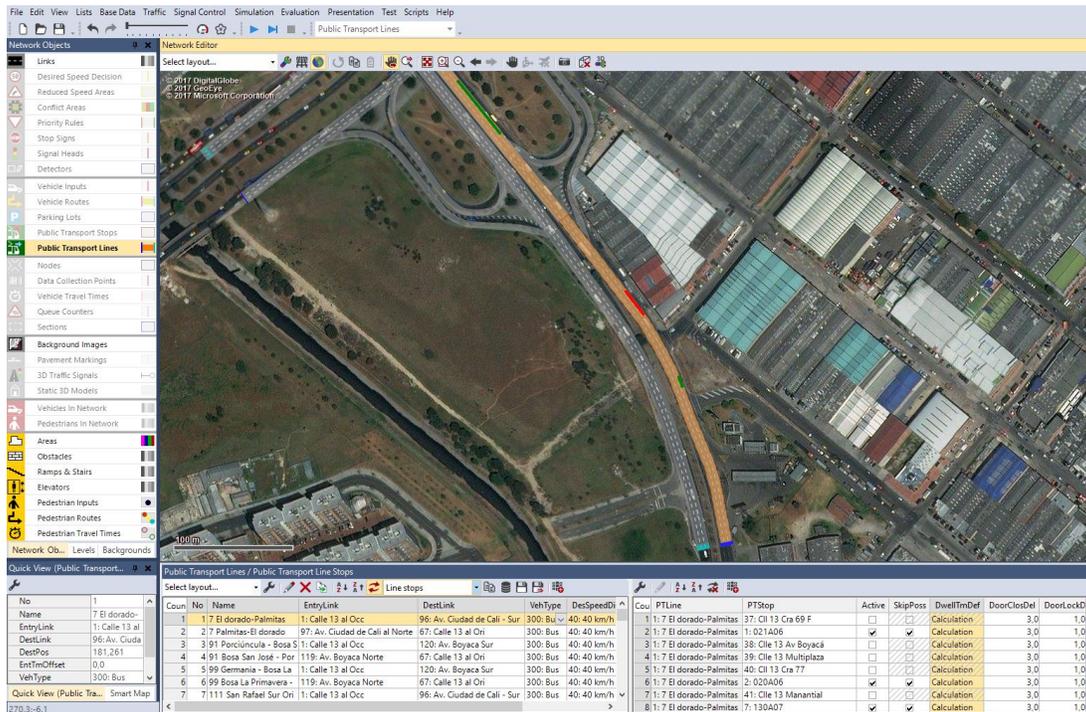


Figura 20: Rutas de transporte público Fuente: Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

Cuando la ruta no está autorizada a utilizar determinados paraderos, es posible activar o desactivar las paradas mediante la ventana que aparece en el costado inferior derecho de la Figura 20; de manera que los paraderos en los cuales la ruta se detiene a recoger y dejar pasajeros se colocan de color verde, mientras que aquellos que no están autorizados toman un color rojo.

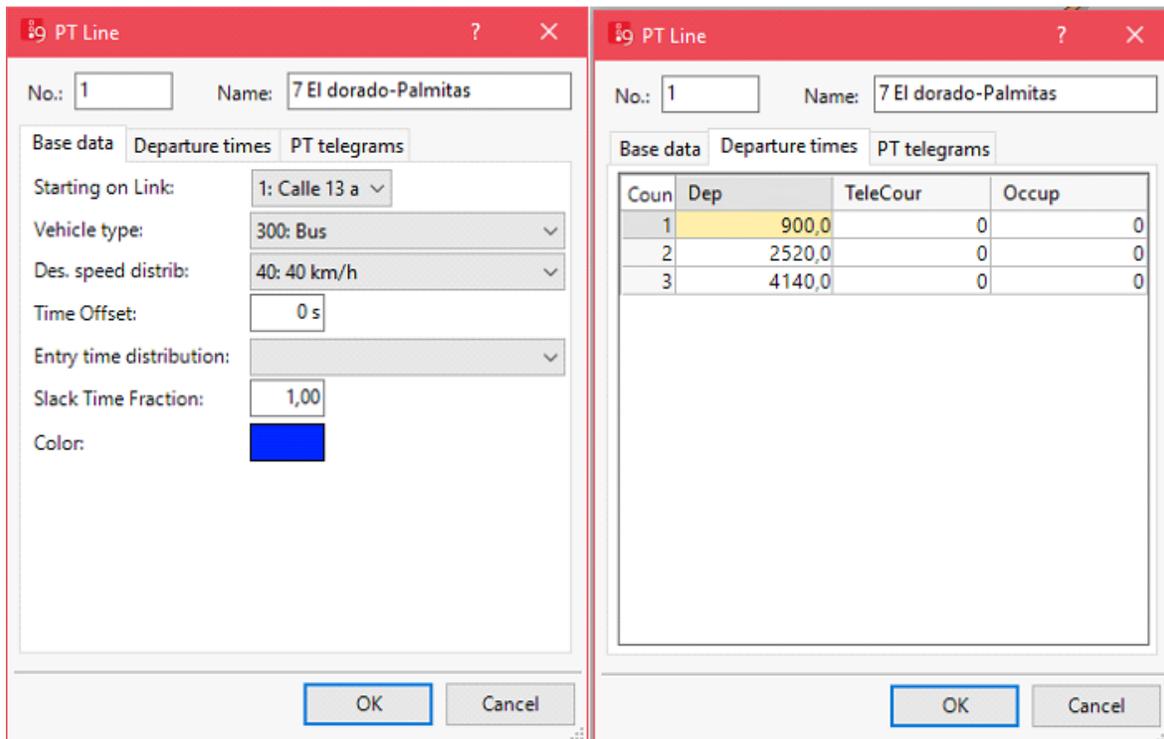


Figura 21: Frecuencia rutas de transporte público **Fuente:** Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

2.2.2.11. Creación de nodos de evaluación

Para que sea posible generar resultados operacionales de la red, se deben definir nodos de evaluación en los cuales se podrá identificar el nivel de servicio de la vía o intersección, la cantidad de vehículos que pasan por el semáforo y los valores de emisiones que vienen incluidos en el software que serán modificados como se explica en el siguiente numeral.

Para obtener resultados que sean una representación real de las condiciones ambientales y de operación del corredor, se crean nodos en cada una de las intersecciones semaforizadas y en aquellas vías primarias, secundarias y terciarias que alimentan y desalimentan el tráfico vehicular del corredor principal (Calle 13 o Avenida Centenario). En total 46 nodos de evaluación fueron creados.

La manera de crear estos nodos es seleccionando el menú Nodos, y dibujando los nodos en todas las intersecciones semaforizadas; teniendo en cuenta que la línea del nodo quede ubicada antes de la línea de pare o del semáforo, tal como se muestra en la Figura 22 donde en color amarillo se identifica el nodo y en color rojo los semáforos de la intersección.

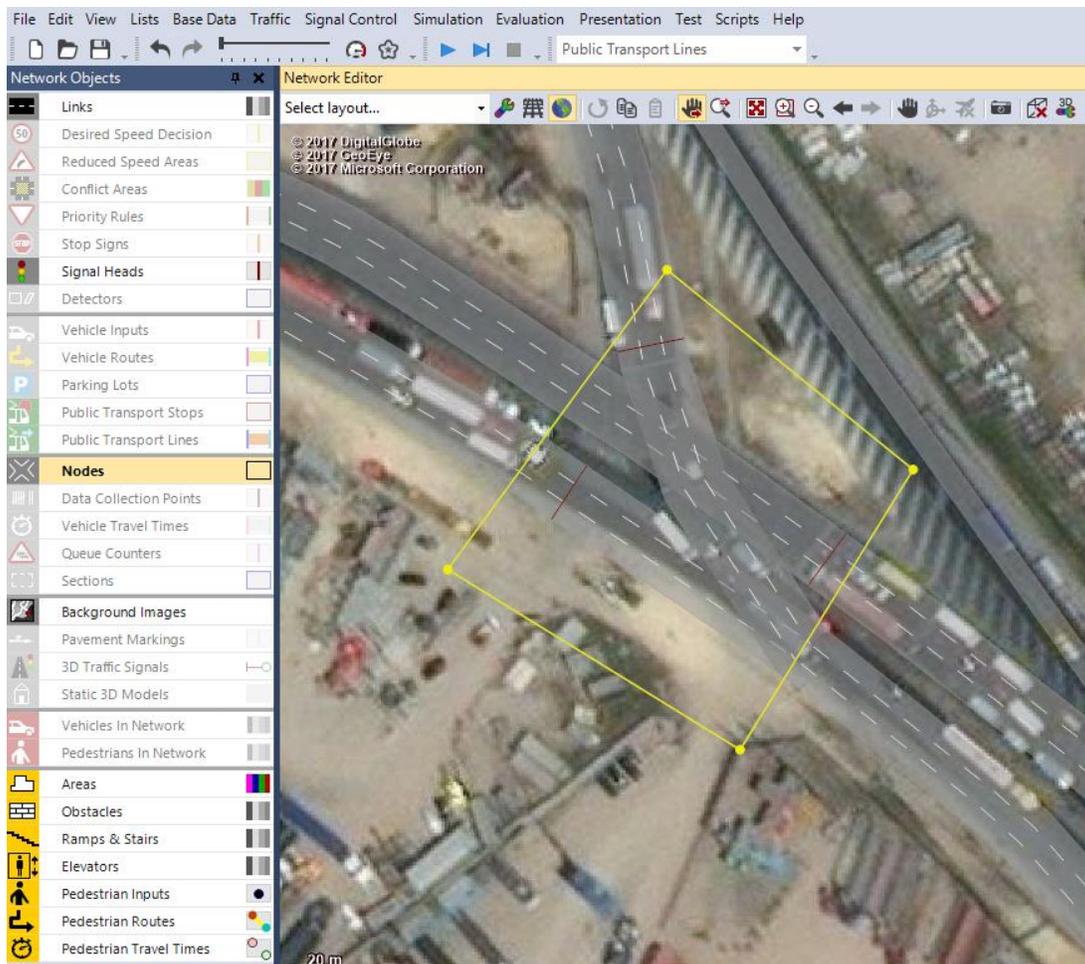


Figura 22: Nodos de evaluación *Fuente: Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017*

Antes de correr el modelo para obtener resultados de la simulación, se deben configurar los resultados que debe generar el programa. Para este paso es importante mencionar que los resultados serán exportados al software PTV EnViVer, el cual requiere que el archivo que se genera con extensión .fzp cuente con las características que se muestran en la Figura 23.

La manera de acceder a las ventanas que se muestran en la Figura 23, es a través de la opción Evaluation Configuration que se encuentra en el menú Evaluation ubicado en la parte superior de la barra de herramientas.

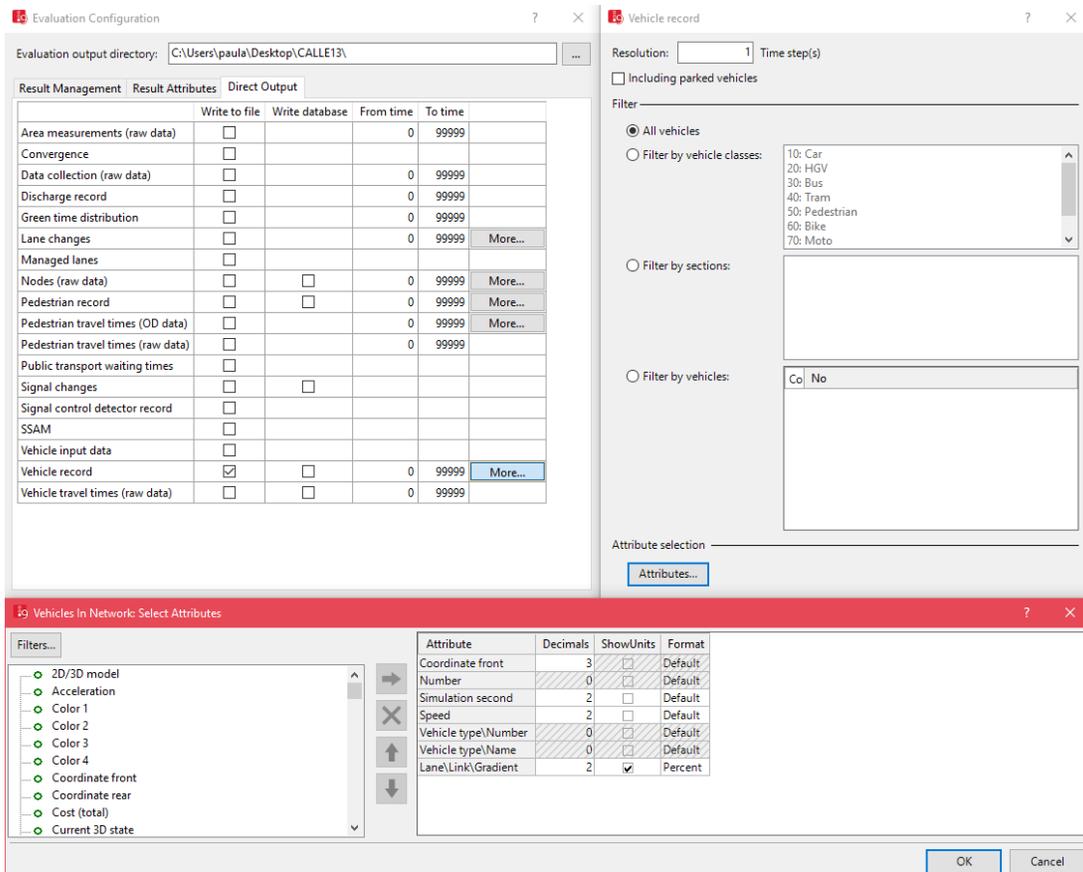


Figura 23: Configuración del archivo Fuente: Elaboración propia usando el software PTV EnViver, 2017

2.2.2.12. Definición de factores de emisión

Como se mencionó en el punto anterior, el archivo de extensión .fzp se genera en el software PTV Vissim para ser ingresado al software PTV EnViver el cual permite modificar los factores de emisión para cada tipo de vehículo.

El archivo que contiene la información del tráfico se importa al programa como se muestra en la Figura 24, una vez el programa identifica las categorías de vehículos con las que cuenta el modelo es necesario asignarle la información correspondiente a la tecnología y factores de emisiones seleccionando Custom Vehicle Parcs el cual aparece en la Figura 25.

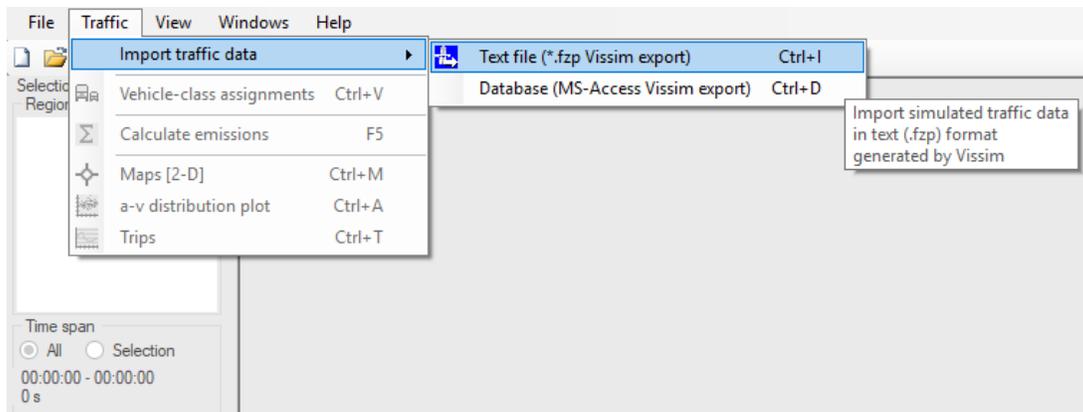


Figura 24: Importación de información de tráfico **Fuente:** Elaboración propia usando el software PTV EnViVer, 2017

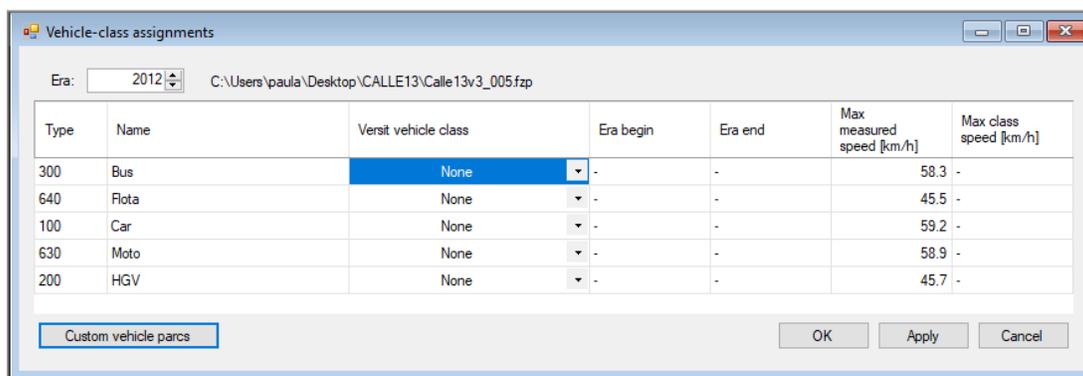


Figura 25: Asignación de información de emisiones para las clases de vehículos **Fuente:** Elaboración propia usando el software PTV EnViVer, 2017

Existe una serie de características pueden ser modificadas para cada clase de vehículos como se muestra en la Figura 26, entre estas las de mayor relevancia son:

- Tipo de vía: urbana o autopistas.
- Tipo de combustible: Es importante identificar el porcentaje de la flota vehicular que usa cada tipo de combustible, pues en base a esto se calcularan las emisiones totales del corredor.
- Distribución de la antigüedad de los vehículos: Se usa para conocer qué porcentaje de los vehículos corresponden a cada una de las tecnologías Euro.
- Legislación de emisiones: Corresponde al año de entrada en vigencia de cada una de las especificaciones Euro para el país o la ciudad.
- Promedio de emisiones de CO₂ para la región: Este valor debe ser ingresado en gramos/kilometro y a partir de este valor el programa asigna las emisiones de NO_x y PM₁₀ de acuerdo a mediciones que ha efectuado en una gran cantidad de vehículos, a efectos de presentar una interfaz sencilla para el usuario.

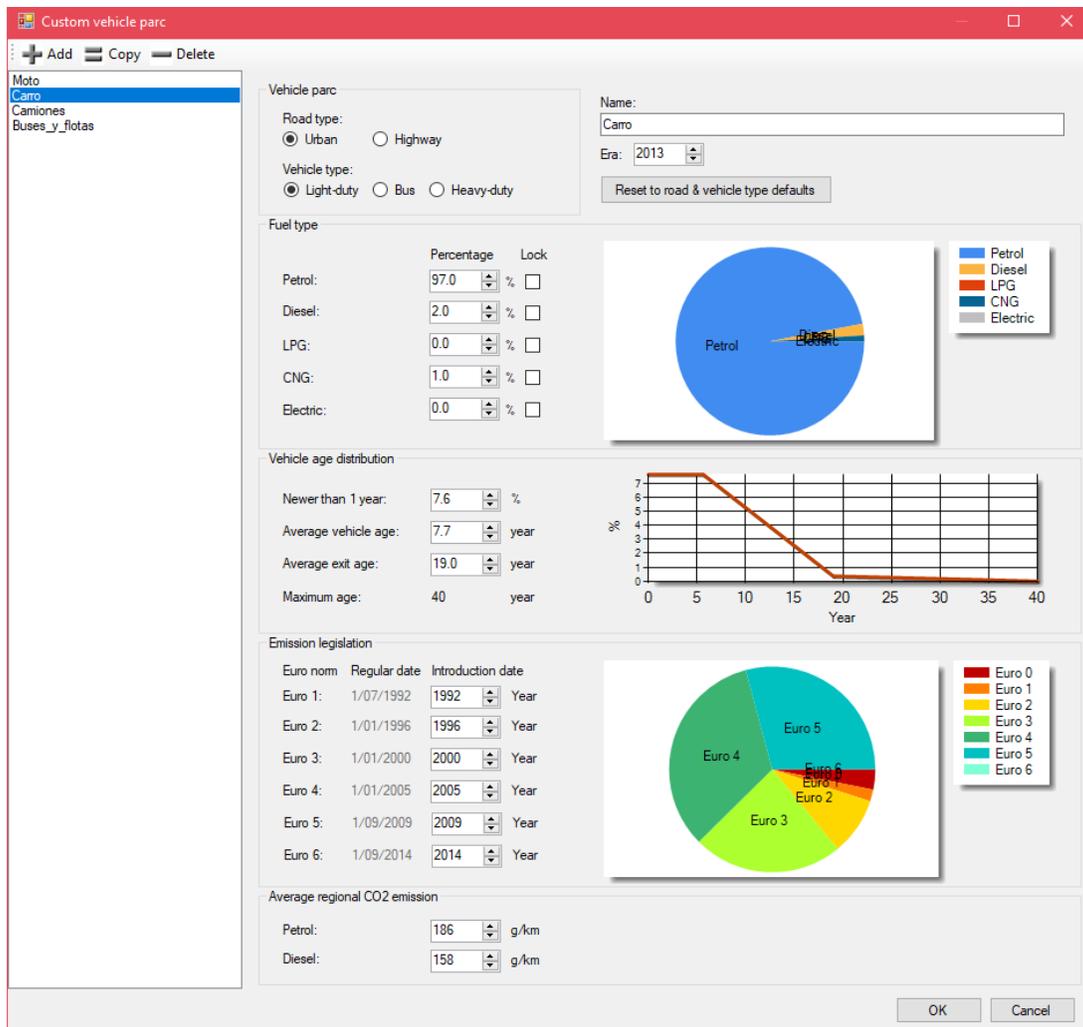


Figura 26: Caracterización de la flota vehicular Fuente: Elaboración propia usando el software PTV EnViVer, 2017

Una vez definidas las características de la flota vehicular, estas se deben asignar en la pestaña presentada en la Figura 25.

Con toda la información ingresada previamente es posible conocer las emisiones generadas por el tráfico importado desde Vissim, para lo cual en la pantalla principal de EnViVer se debe seleccionar el icono de sumatoria y la estrella de cuatro puntos que está ubicada al lado derecho del mencionado anteriormente; de esta manera se conocerá el total de emisiones para el corredor por tipo de contaminante y se generará el mapa de emisiones de igual manera. Se presenta la Figura 27 para ejemplificar los resultados obtenidos.

Estos resultados pueden generarse también de manera puntual para aquellos tramos que se identifique una alta concentración de emisiones.

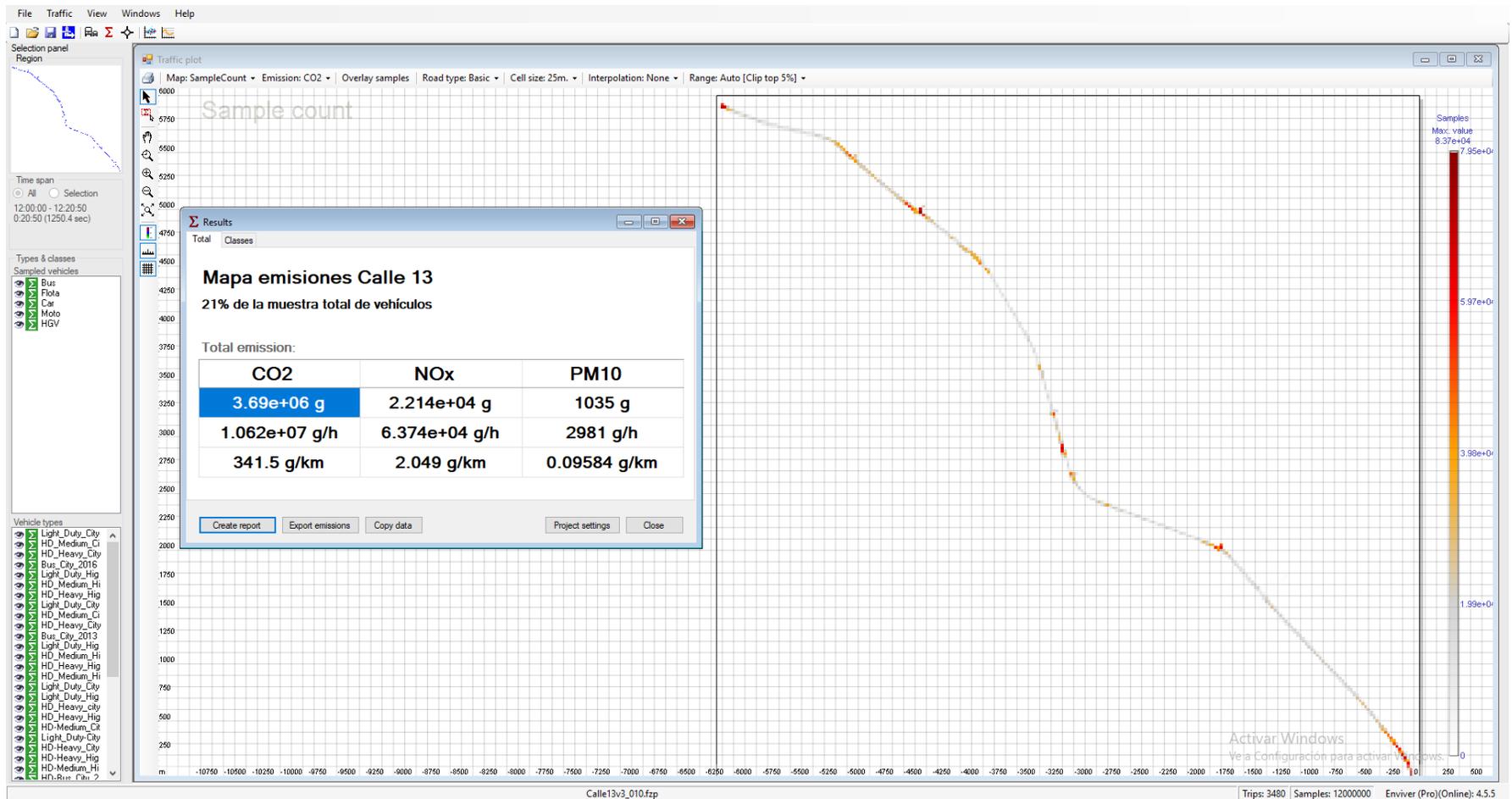


Figura 27: Cuantificación y mapa de las emisiones del corredor para CO₂ Fuente: Elaboración propia usando el software PTV EnViVer, 2017

Es importante mencionar que el programa cuenta con capacidad para cuantificar las emisiones de una muestra de 12'000.000 de viajes por lo cual es necesario extrapolar en algunos casos, teniendo en cuenta que los viajes simulados guardan estricta proporción con los reales de la zona de estudio.

2.2.3. Escenarios propuestos

A efectos de obtener resultados cuantificables de reducción de emisiones con medidas de gestión del tránsito y aplicando conceptos de política pública que se manejan en el país, se establecen los siguientes escenarios propuestos.

2.2.3.1. Escenario 1

La primera alternativa propone la *Optimización de la programación semafórica del sector*, dado que se identifica que existe una alta concentración de emisiones en estos puntos de parada.

Esta alternativa se presenta por su bajo costo y fácil implementación; la cual requiere que la Secretaría Distrital Movilidad como ente gestor del tráfico en Bogotá aplique sus políticas internas y optimice frecuentemente la programación semafórica del sector.

Adicionalmente, esta propuesta se presenta por su factibilidad de implementación dado que actualmente existe una licitación³ en curso para suministrar, instalar, implementar, operar y mantener el sistema de semáforos inteligentes (SSI) de Bogotá, lo cual representaría mejoras operacionales asociadas a la movilidad con semáforos actuados por la cola de espera.

2.2.3.2. Escenario 2

Como segunda alternativa se propone la *Migración de usuarios de vehículo particular hacia el transporte público*, lo anterior considerando que según aforos de ocupación visual realizados en la zona se evidencia que los vehículos particulares transitan con una ocupación máxima de 2 personas incluido el conductor y adoptando políticas del DOTS⁴ para una ciudad ya estructurada, se propone un cambio en la manera de realizar los viajes de la siguiente manera:

- Migración del 15% de los usuarios vehículos particulares hacia el Sistema Integrado de Transporte Público (SITP).
- Migración del 30% de los usuarios vehículos particulares hacia el Sistema Integrado de Transporte Público (SITP).

Estos valores se definen para ofrecer dos alternativas, las cuales pueden ser adoptadas por la Secretaría Distrital de Planeación en conjunto con la Secretaría Distrital de Movilidad

³ Licitación pública SDM-LP-030-2017.

⁴ Desarrollo Orientado al Transporte Sustentable.

y la empresa Transmilenio (a cargo de la operación del SITP), para obtener mejoras operacionales. También se definen con el objetivo de presentar valores de referencia que pueden ser ajustados con encuestas de preferencia declarada, midiendo así la disponibilidad a la migración de modo de transporte.

Esta alternativa también comprende políticas públicas de transporte público, debido a que es necesario mejorar el servicio que presta el sistema y extender el contrato establecido por kilómetro recorrido con los operadores para ampliar la oferta de transporte. Se debe acompañar esta opción con el ingreso de buses con tecnologías limpias y con campañas de mejora de la percepción del servicio que presta el sistema para lograr atraer a los usuarios.

Se considera que esta opción es de costo medio, puesto que los usuarios cubren en mayor parte con su pasaje el costo de operación del servicio y sería necesario realizar campañas de atracción del usuario, su implementación es a mediano plazo mientras se ajustan los términos contractuales de los contratos con los operadores y se empieza a ofrecer el servicio.

Para los dos escenarios se modificó la composición vehicular reduciendo el número de automóviles en los porcentajes propuestos y se aumentando la oferta de autobuses para satisfacer la demanda, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Por cada vehículo que se retire de la red, dos personas ingresarán a los buses del SITP.
- La capacidad en promedio de los buses es de 19 personas sentadas, sin embargo considerando que la operación sea rentable para el operador y que se convierta en una opción atractiva cambiar de modo de transporte para los usuarios, se adopta un máximo de 30 pasajeros por bus; teniendo en cuenta las condiciones de comodidad de los usuarios.
- Las frecuencias de las rutas son modificadas para que todos los buses nuevos puedan ingresar a la red vial, de manera que los tiempos de espera se disminuyen.
- La composición vehicular y el flujo relativo se ajusta para los 46 accesos presentes en el sector de estudio, debido a su reducción en número de vehículos.
- Los usuarios son asignados a los buses que cubran la ruta más cercana a su destino, de acuerdo a los 63 movimientos definidos para la red.

2.2.3.3. Escenario 3

Como tercera opción se propone *Una intervención a nivel de infraestructura*, pese a ser una propuesta de alto costo su impacto sería significativo para el sector de estudio teniendo en cuenta la ubicación estratégica del corredor y la intensidad de los viajes por motivo trabajo de los habitantes de las denominadas ciudades dormitorio de la zona occidental de Bogotá que lo utilizan. En vista de esta situación, el aumento de los viajes a futuro es inminente por lo cual se propone la utilización de la franja de reserva para realizar la ampliación de tres a cinco carriles para tráfico mixto por sentido.

Esta propuesta está asociada a las políticas de desarrollo urbano que se crean entre la Secretaría Distrital de Planeación y el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), que tienen como objetivo mantener una relación adecuada entre la capacidad de las vías y su nivel de servicio.

Dentro del abanico de ventajas que ofrece esta opción, se encuentra que facilitaría la utilización de la franja central del corredor para un sistema de transporte público masivo configurado al estilo de los buses BRT⁵, carriles de pago para vehículos de carga disminuyendo así los costos logísticos de los productos y la reducción del tiempo de desplazamiento y de emisiones debido a la reducción de la congestión, carriles exclusivos para vehículos particulares con alta ocupación, entre otras.

Este escenario se modela con los vehículos existentes y pese a que existen opciones complementarias no se considera la exclusividad de un carril para determinada clase de vehículos o servicios, dado que sería necesario realizar estudios de disponibilidad de pago de los usuarios para proponer carriles de pago o de alta ocupación vehicular. Todas estas opciones que pueden ser implementadas de manera complementaria con este escenario se mencionaran posteriormente en el Capítulo VI del presente documento.

2.2.4. Comparación de los resultados

El análisis de la movilidad del sector se realiza siguiendo dos categorías principales:

2.2.4.1. Factores operacionales

En primera medida se evalúa en términos operacionales la simulación teniendo en cuenta el nivel de servicio de la vía (A siendo el mejor y F el peor), los tiempos de demora promedio que experimentan los vehículos y la longitud máxima de la cola que se genera debido a la

⁵ Bus Rapid Transit o Buses de tránsito rápido, son sistemas de transporte público masivo basado en buses.

congestión para cada uno de los 63 movimientos identificados para el corredor (De acuerdo a las intersecciones modeladas y sus respectivos accesos permitidos).

En este trabajo los elementos operacionales se interpretan de la siguiente manera:

Nivel de Servicio: Se evalúa en un rango de A-F siendo A la de mayor calificación y F la de menor.

Tiempos de demora: En esta investigación se analiza la demora por congestión que está asociada a la variación del nivel de velocidad por vehículos estacionados en la vía, carriles muy angostos, altos volúmenes de tráfico.

Longitud máxima de la cola: De igual manera que en el numeral anterior se establecieron 5 intervalos para clasificar la longitud de la cola en su momento más crítico para los 63 movimientos identificados.

2.2.4.2. Factores ambientales

La segunda categoría evalúa aspectos ambientales como las emisiones de contaminantes al medio ambiente y la concentración de los mismos para el período simulado de la hora de máxima demanda. Estos últimos permiten establecer una comparación con los límites permisibles reglamentados en la Resolución 610 de 2010 y la reducción del 5% de CO₂, los cuales se exponen en el numeral 2.1.5.

CAPÍTULO III. PRESENTACIÓN CASO DE ESTUDIO

3.1. Caracterización de las unidades de planeamiento zonal

En este apartado se presenta una breve caracterización de los aspectos demográficos y de usos de suelo de la localidad y los municipios que acogen el proyecto. El corredor de la Calle 13 (Av. Centenario) comprendido entre la Av. Boyacá y el peaje de Mosquera, geográficamente está ubicado en la *localidad de Fontibón*. Este sector de la ciudad alberga aproximadamente 345 mil habitantes y comprende 3.327,2 hectáreas que se distribuyen en 8 UPZ (Unidades de Planeamiento Zonal) que abarcan cerca de 1.610 manzanas en su totalidad (Figura 28).

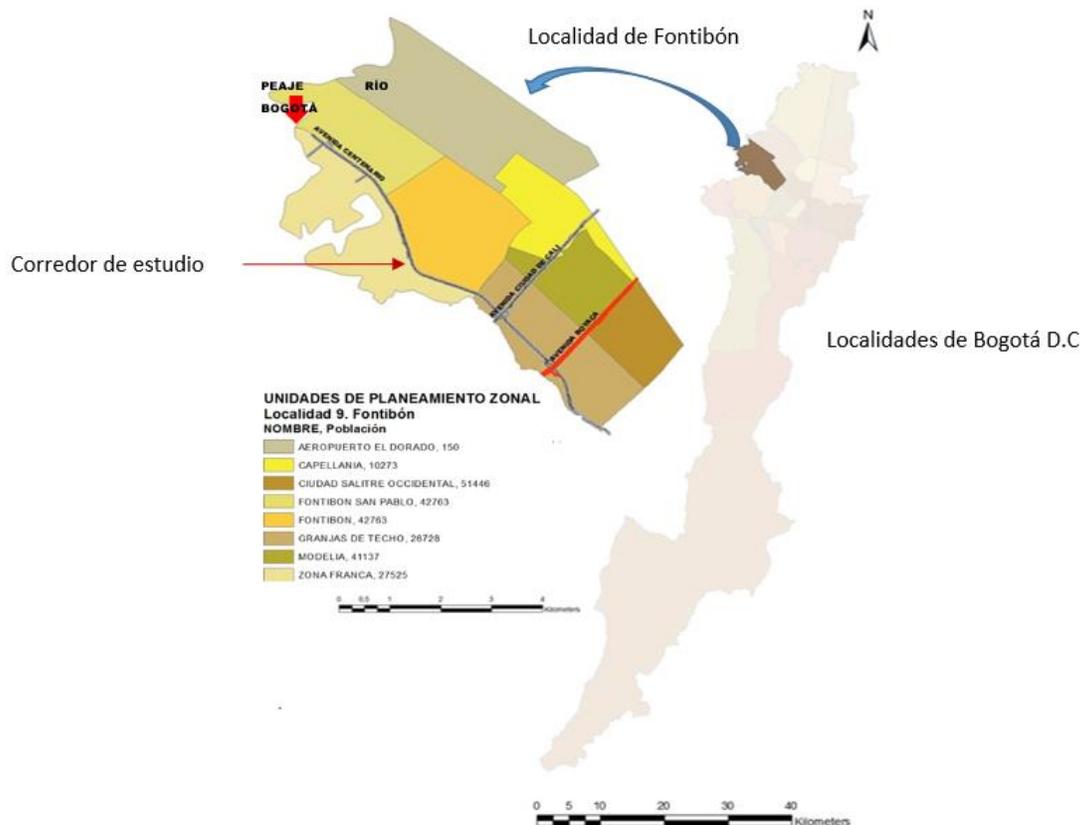


Figura 28: Localidad de Fontibón **Fuente:** Elaboración propia, 2017

Las dinámicas demográficas que intervienen en este estudio consideran la distribución de la población del sector urbano correspondiente a Bogotá y de los municipios del sector occidental de Bogotá que confluyen al corredor. Para el caso del sector urbano, el corredor transcurre por la localidad de Fontibón, en la Tabla 7 se aprecian las características territoriales del sector.

Tabla 7: Características territoriales de las UPZ de Fontibón

Nº	UPZ DE LA LOCALIDAD DE FONTIBÓN	POBLACIÓN (MILES)	SUPERFICIE (KM ²)	% DE ÁREA DE LA LOCALIDAD	DENSIDAD PROMEDIO (HB/KM ²)
1	Fontibón	135454	49,65	14,92	2728,17724
2	San Pablo	42763	36	10,82	1187,86111
3	Zona Franca	48025	49,16	14,77	976,912124
4	Ciudad Salitre Occidente	51446	22,57	6,78	2279,39743
5	Granjas de Techo	26728	47,76	14,35	559,631491
6	Modelia	41137	26,16	7,86	1572,51529
7	Capellanía	18607	27,21	8,18	683,829474
8	Aeropuerto el Dorado	150	74,31	22,33	2,01857085
TOTAL		364310	332,82	100	1094,61571

Fuente: Elaboración propia usando información de la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital, 2017

Es importante visualizar la alta densidad que tienen algunas de las UPZ que configuran la localidad de Fontibón.

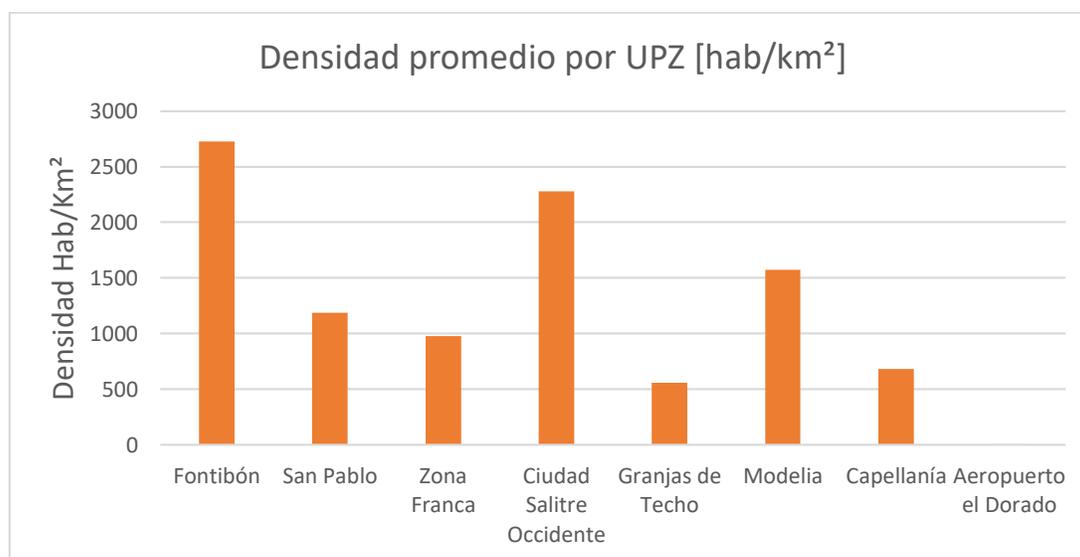


Figura 29: Densidad habitacional de las UPZ de la localidad de Fontibón Fuente: Elaboración propia usando información de la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital, 2017

En cuanto a los municipios que utilizan el corredor como Funza, Mosquera, Madrid y Facatativá la población se ha incrementado considerablemente potenciada por la cercanía a Bogotá y la accesibilidad al corredor de estudio que facilita los viajes entre los diferentes ámbitos territoriales y fortalece los viajes por trabajo.

Tabla 8: Características territoriales de los municipios

MUNICIPIO	HABITANTES (MILES)	SUPERFICIE (KM ²)	DENSIDAD (HAB/KM ²)
Funza	75331	71	1061
Mosquera	80688	107	773
Facatativá	119849	151	793,42
Madrid	80622	121	666,3

Fuente: Elaboración propia usando información de la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital, 2017

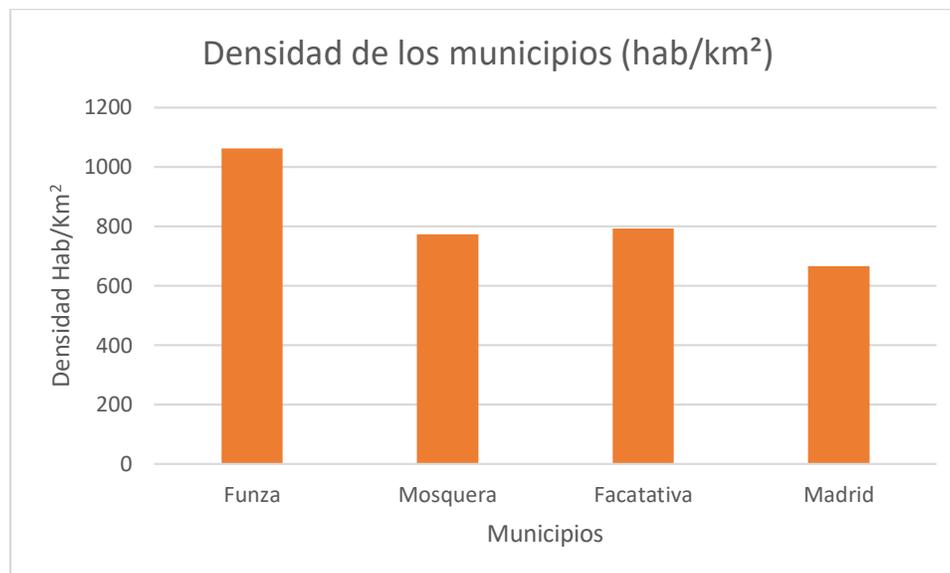


Figura 30: Densidad habitacional de los municipios aledaños. Fuente: Elaboración propia usando información de la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital, 2017

Respecto al uso predominante de cada UPZ de la localidad de Fontibón es predominantemente de uso Industrial y dotacional, aunque tiene un sector altamente urbanizado.

En la Figura 31 y Tabla 9 se puede identificar claramente el uso del suelo de las unidades de planeamiento zonal (UPZ) de la localidad de Fontibón y su respectiva superficie ocupada por el uso de suelo predominante.

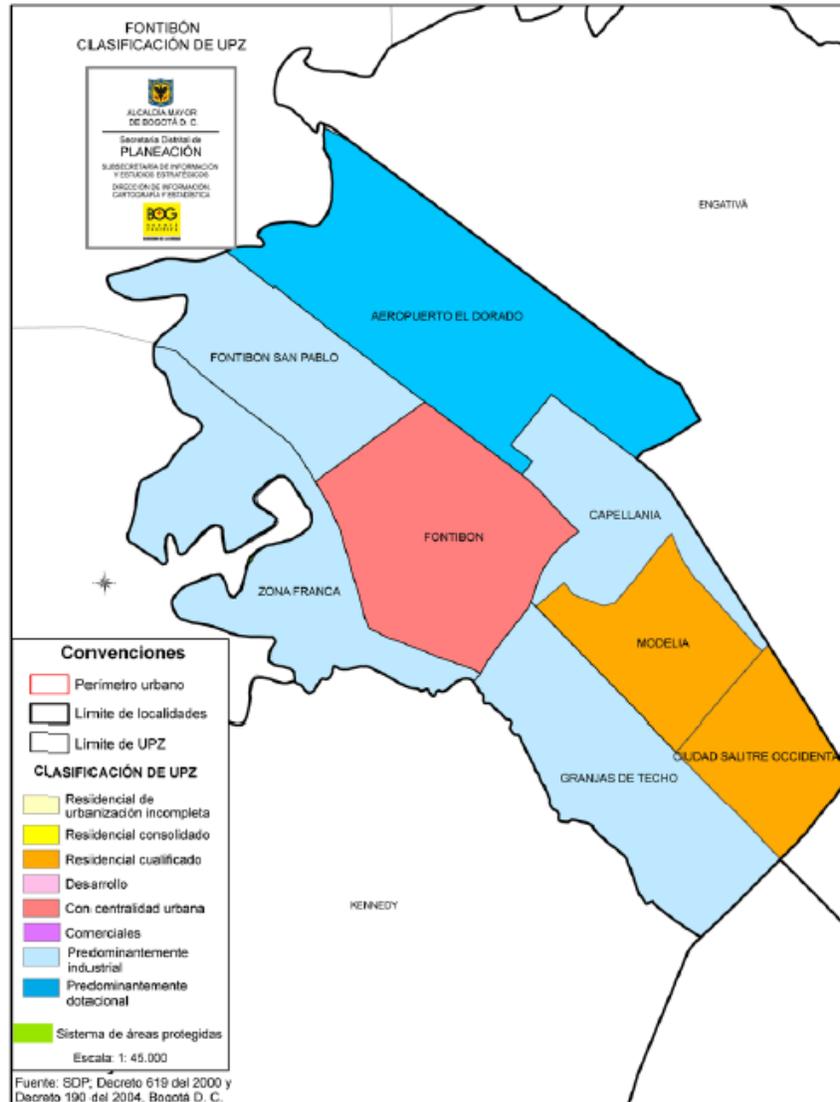


Figura 31: Uso del suelo para cada UPZ de la localidad de Fontibón. Fuente: Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital, 2011

Tabla 9: Superficie de cada UPZ según el tipo de suelo

UPZ	Clasificación	Área total (ha)	%
75 Fontibón	Con Centralidad Urbana	496,5	14,9
76 Fontibón San Pablo	Predominantemente Industrial	360,0	10,8
77 Zona Franca	Predominantemente Industrial	491,6	14,8
110 Ciudad Salitre Occidental	Residencial Cualificado	225,7	6,8
112 Granjas de Techo	Predominantemente Industrial	477,6	14,4
114 Modelia	Residencial Cualificado	261,6	7,9
115 Capellania	Predominantemente Industrial	272,1	8,2
117 Aeropuerto El Dorado	Predominantemente Dotacional	743,1	22,3
Total		3.328,1	100,0

ha: hectáreas

Fuente: SDP, Decreto 619 del 2000, Decreto 190 del 2004 y Decreto 544 de 2009, Bogotá D. C.

Fuente: Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital, 2011

En cuanto a los municipios de Funza, Mosquera, Madrid y Facatativá la población se ha incrementado considerablemente potenciada por la cercanía a Bogotá y la accesibilidad al corredor de estudio que facilita los viajes entre los diferentes ámbitos territoriales.

3.2. Caracterización económica

Los hogares de la localidad de Fontibón, en su mayoría se ubican en el estrato socioeconómico 3 seguidos por el estrato 2. No obstante, una cantidad importante cuenta con estrato socioeconómico 4, lo que indica que en general la capacidad de pago de los moradores del sector es aceptable.

Los predios con estrato socioeconómico 4, se ubican en las UPZ de Modelia y Salitre Occidental que se pueden evidenciar en la Figura 31.

Es importante mencionar que, en cuanto a los predios industriales o comerciales, éstos están ubicado en una de las principales zonas francas del país, en la cual se centra un sin número de operaciones comerciales y de transporte de bienes que ingresan al país. Esta zona franca por su cercanía al aeropuerto el Dorado, se hace más atractiva para el sector comercial que centra sus actividades en la capital de Colombia.

A su vez las pequeñas, medianas y grandes industrias que se ubican en el sector generan un impulso económico para los moradores de la zona que explica el alto porcentaje de autocontención de viajes evidenciado en la Encuesta de Movilidad del año 2015.

3.3. Caracterización de la infraestructura

El corredor de estudio está delimitado hacia el occidente por la Av. Boyacá, eje viario de alta importancia que cruza la ciudad de norte a sur y principal corredor de transporte de carga. El límite al occidente del corredor se establece en el peaje del Río Bogotá, el cual representa un punto de control para los vehículos en el ingreso y salida de la ciudad.

El corredor además está compuesto por importantes vías como la Av. Ciudad de Cali; que conecta al corredor con la Calle 80 y el sur de la ciudad.

Finalmente, la ubicación de la Zona Franca de Bogotá en el corredor refuerza su uso como corredor de carga de mercancías, además de su importancia en la movilización de pasajeros hacia y desde las ciudades dormitorio ubicadas al occidente de Bogotá.

Las principales características del corredor de estudio se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10: Resumen de características principales del corredor de estudio

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL CORREDOR DE ESTUDIO	
Número de Carriles por sentido	3 carriles
Ancho promedio del carril	3.50 metros
Longitud del corredor	9 kilómetros
Material	Pavimento asfáltico
Velocidad máxima permitida	60 Km/h
Velocidad promedio en hora pico	15 Km/h
Número de intersecciones elevadas	2
Número de intersecciones semaforizadas	11 (40 semáforos)
Número de accesos	46

Fuente: Elaboración propia, 2017

El estado del pavimento presenta fisuras debidas en su mayoría al sobre esfuerzo de la estructura del pavimento al soportar vehículos pesados y constantes desplazamientos a velocidades bajas debido a la congestión de la zona.

También, cuenta con una distribución de tres carriles por sentido que se unen a la red vial secundaria con una numerosa cantidad de accesos semaforizados y a flujo libre.

3.4. Caracterización de la movilidad del sector

A manera general, la movilidad del sector se identificó usando la información recolectada en la Encuesta de Movilidad de Bogotá y sus municipios cercanos de 2015. De manera que es posible afirmar que 7.100 viajes tienen como origen y destino la localidad de Fontibón.

El 40% de estos viajes tienen origen en los diferentes barrios de la localidad hacia el resto de la ciudad y sus municipios aledaños, mientras que el 39% de los viajes tiene como destino esta localidad lo cual representa un porcentaje importante de atracción de viajes, además la autocontención es de aproximadamente el 21%.

La Figura 32, muestra que el principal motivo de viaje es el trabajo (26%), seguido del estudio que representa un 6% de los viajes que se realizan.

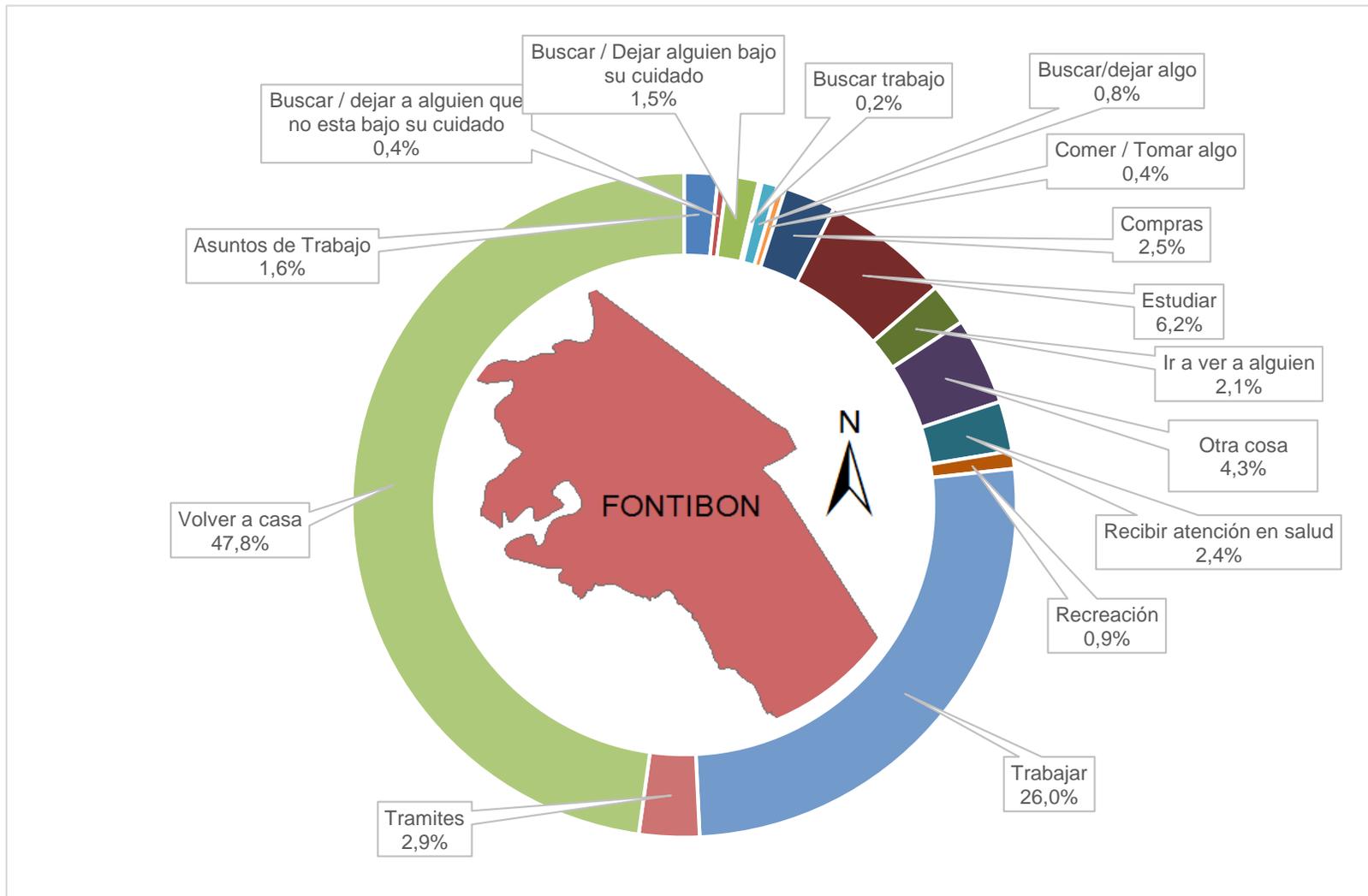


Figura 32: Porcentaje de viajes según motivo para la localidad de Fontibón **Fuente:** Elaboración propia utilizando información de la Encuesta de Movilidad de Bogotá, 2015

Para caracterizar la movilidad del sector, inicialmente se cuantificó el volumen vehicular a las diferentes horas del día. De acuerdo con lo observado se encontró que los periodos que presentan mayor flujo de vehículos están comprendidos entre las 6:30 a.m. y las 7:30 a.m. y 5:15 p.m. y 6:15 p.m. En el primer periodo circulan un total de 27.353 vehículos mixtos (incluyendo buses de transporte público y flotas intermunicipales); para el segundo periodo el total de vehículos es de 25.961, de manera que la situación más crítica en el día se presenta en el horario de la mañana.

En cuanto a la composición vehicular del corredor, para cada uno de los sentidos encontramos que en la dirección Occidente – Oriente predomina el uso del automóvil que abarca cerca del 52.5%, seguido de la motocicleta con un 32.3%. La anterior tendencia se mantiene para el sentido Oriente – Occidente donde el automóvil ocupa el 58.1% y la motocicleta el 22.2%.

3.5. Volumen y composición vehicular del corredor

3.5.1. Autos, Camiones y Motos

Cómo se mencionó en el numeral 2.1.1, los aforos vehiculares que sirvieron de insumo para la determinación de los volúmenes vehiculares del sector de estudio fueron suministrados por la Secretaría Distrital de Movilidad. A continuación se presenta un resumen de los datos que fueron ingresados al modelo para la hora pico (6:30 a.m. a 7:30 a.m.) en cada uno de los 46 accesos.

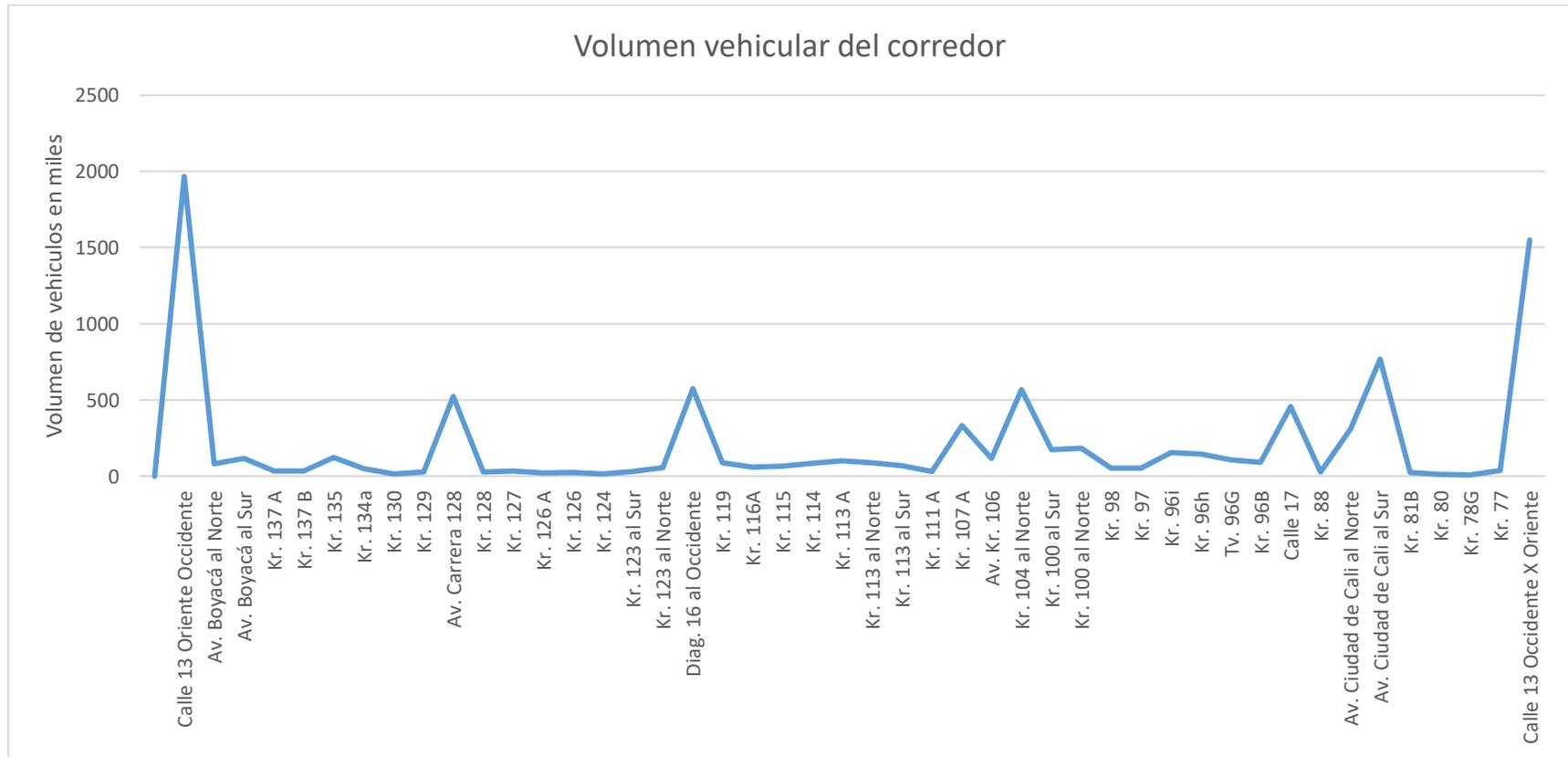


Figura 33: Volumen vehicular del corredor de estudio **Fuente:** Elaboración propia, 2017

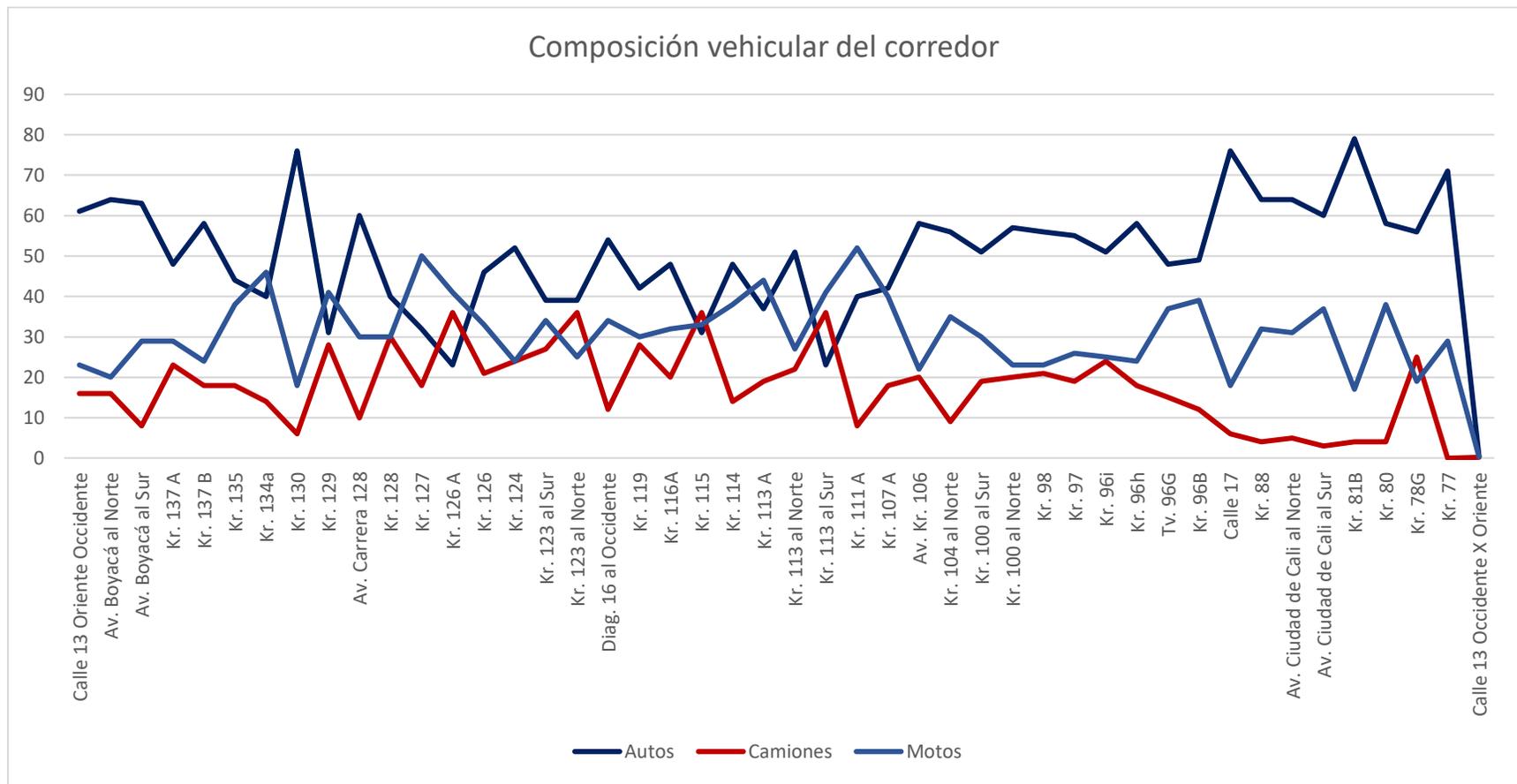


Figura 34: Composición vehicular del corredor de estudio Fuente: Elaboración propia, 2017

3.5.2. Buses del Sistema Integrado de Transporte (SITP) y flotas intermunicipales

Como resultado de la comparación de la información consultada que se relacionó en el numeral 2.1.2, se elaboró la Tabla 11 que compila el punto de inicio y de terminación de cada ruta de acuerdo a los paraderos establecidos, el número de rutas que realizan el recorrido y la longitud de cubrimiento dentro de la red establecida por cada bus que cubre la ruta; las cuales se identificaron en campo.

De la misma manera, se presenta en la Tabla 12 el paradero de inicio y final para las flotas intermunicipales y la longitud recorrida por cada bus dentro del sector de estudio.

Tabla 11: Rutas del Sistema Integrado de Transporte Público SITP

PUNTO DE INICIO	PUNTO FINAL	NÚMERO DE RUTAS	LONGITUD DE COBERTURA [Km]
Av. Boyacá al Norte	Calle 13 al Oriente	11	1
Av. Boyacá al Norte	Calle 17 x Cra. 96H	1	3.4
Av. Boyacá al Sur	Av. Ciudad de Cali al Sur	1	2.7
Av. Ciudad de Cali al Norte	Calle 13 al Oriente	5	2.2
Av. Ciudad de Cali al Norte	Calle 17 x Cra. 96H	5	1.7
Av. Ciudad de Cali al Norte	Av. Boyacá al Norte	1	2.7
Av. Ciudad de Cali al Sur	Calle 13 al Oriente	1	2.6
Calle 13 x Cra. 135 (Al Ori)	Calle 13 al Oriente	1	7.8
Calle 13 x Cra. 135 (Al Ori)	Cra 106 x Calle 13	1	3.4
Calle 13 x Cra. 69B (Al Occi)	Av. Ciudad de Cali al Sur	5	3.1
Calle 13 x Cra. 69B (Al Occi)	Av. Boyacá al Sur	12	1.5
Calle 13 x Cra. 69B (Al Occi)	Cra. 80 x Calle 13	1	3.6
Calle 13 x Cra. 69B (Al Occi)	Calle 13 x Cra 91	1	3.0
Calle 13 x Cra. 69B (Al Occi)	Calle 13 x Cra 134A	1	9.0
Calle 13 x Cra. 69B (Al Occi)	Calle 17 x Cra 96H	1	4.0
Calle 17 x Cra. 96H al Oriente	Av. Ciudad de Cali al Sur	5	1.3
Calle 17 x Cra. 96H al Oriente	Av. Boyacá al Sur	1	2.6

PUNTO DE INICIO	PUNTO FINAL	NÚMERO DE RUTAS	LONGITUD DE COBERTURA [Km]
Calle 17 x Cra. 96H al Oriente	Calle 13 al Oriente	1	2.9
Cra 100 x Calle 13	Calle 13 x Cra 135	1	3.7
Cra. 80 x Calle 13	Av. Boyacá al Norte	1	2.1
Cra. 80 x Calle 13	Calle 13 al Oriente	2	1.5

Fuente: Elaboración propia, 2017

Tabla 12: Rutas de flotas intermunicipales

PARADERO INICIO	PARADERO FINAL	LONGITUD DE COBERTURA [Km]
Calle 13 al Occidente	Peaje Río Bogotá	8.8
Calle 13 Oriente-Río Bogotá	Calle 13 Oriente	8.8
Calle 13 al Occidente	Av. Boyacá al Sur	1.2
Calle 13 al Occidente	Av. Boyacá al Norte	0.85
Av. Boyacá al Sur	Calle 13 Oriente	1.4
Av. Boyacá al Sur	Peaje Río Bogotá	8.9
Av. Boyacá al Norte	Calle 13 Oriente	1.0
Av. Boyacá al Norte	Peaje Río Bogotá	9.5
Calle 13 Oriente	Av. Boyacá al Sur	9.1

Fuente: Elaboración propia, 2017

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DEL MODELO SIMULACIÓN DE EMISIONES DE LA CALLE 13 ENTRE AV. BOYACÁ Y PEAJE RÍO BOGOTÁ

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la simulación considerando la situación actual para el corredor de la Calle 13 o Avenida Centenario entre la Avenida Boyacá y el Peaje del Río Bogotá. Como se mencionó anteriormente, el modelo de simulación fue construido en el software PTV Vissim y las emisiones fueron cuantificadas en el software PTV EnViVer.

El análisis de las condiciones operacionales y ambientales del corredor se realiza de acuerdo a la metodología presentada en el numeral 2.2.4, adicionalmente se identifican a modo general las situaciones críticas presentes en el corredor que llevan a construir los escenarios propuestos y las recomendaciones que se enuncian en el Capítulo VI.

En la Figura 35 se presenta un ejemplo de la red modelada para la situación actual.



Figura 35: Simulación Intersección Carrera 128 **Fuente:** Elaboración propia usando el software PTV Vissim, 2017

4.1. Calibración del modelo

Una vez construida la red vial y asignadas las características mencionadas en el numeral 2.2.2, se realiza la corrida del modelo para la hora de máxima demanda. En este período de simulación el programa se encarga de ingresar los vehículos a la red vial establecida y al finalizar la simulación arroja una serie de ventanas de alertas, de manera que es posible verificar las inconsistencias que presente en el modelo.

Estas inconsistencias pueden llegar a ser que si se selecciona la opción VolType: Exact (Ver numeral 2.2.2.8), indique la cantidad de vehículos por acceso que no ingresaron a la red debido a la congestión. Es en este momento que se debe realizar la verificación de los factores que pueden estar afectando la representación real del corredor; como la composición vehicular errónea, incluir los volúmenes de los vehículos de transporte público como si fueran vehículos particulares, no asignar el ancho de carril real de la zona de manera que no permite el adelantamiento de las motocicletas, entre otras.

Para el caso de estudio que se presenta, se seleccionó la opción VolType: Exact y una vez finalizada la simulación no se encontraron problemas con el ingreso de los vehículos a la red, por lo cual el modelo está calibrado con la situación real en temas de volumen vehicular.

Adicional a la verificación del volumen, con las observaciones realizadas en campo se identifican problemáticas en algunas intersecciones; como por ejemplo en el puente de la Avenida Boyacá, donde las flotas intermunicipales suelen dejar y recoger pasajeros interrumpiendo los accesos hacia el sur y el ingreso de vehículos hacia la Calle 13. Esta situación se verifica visualmente en la simulación, sin embargo corresponde a los parámetros ingresados al modelo (Paraderos, zonas de reducción de la velocidad, áreas de conflicto, entre otras mencionadas en el numeral 2.2.4).

4.2. Aspectos operacionales

4.2.1. Nivel de Servicio

Considerando que el nivel de servicio está asociado a las velocidades de circulación de los vehículos, los tiempos de demora, las colas de espera y a la comodidad que experimenta el conductor, se encontró que el 67% de los movimientos están clasificados entre los niveles de servicio A, B y C lo que deja un restante de 33% para los niveles de servicio más bajos D, E y F.

La situación representada en la Figura 36 refleja que existe un alto número de movimientos que no son afectados por la congestión vehicular; como son aquellos que salen de la Calle 13 en algún punto o que atraviesan esta vía en pasos elevados.

Esta situación ratifica la importancia de realizar un manejo en las intersecciones a nivel, por lo cual se propone como primera medida la optimización de los tiempos de la red semafórica instalada en el sector.

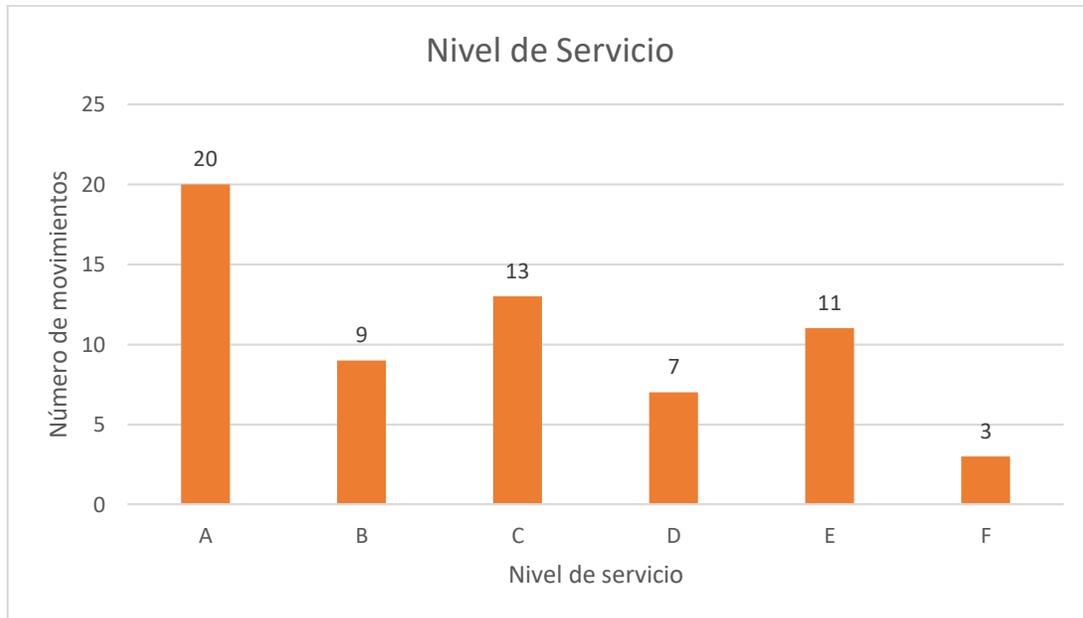


Figura 36: Nivel de Servicio para el escenario real **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

4.2.2. Tiempos de demora

Los tiempos de demora que experimenta en promedio cada vehículo debido a la congestión están estrictamente relacionados al nivel de servicio, por lo que se evidencia que más de la mitad de los movimientos experimentan demoras en promedio de un minuto.

Como se presenta en la Figura 37, para los 63 movimientos que pueden realizar los vehículos se definieron 5 intervalos referentes al tiempo de demora que experimentan los usuarios.

De los resultados obtenidos se puede relacionar que cuando la espera es una intersección es mayor a un minuto, los conductores tienden a no respetar las señales de tránsito y los tiempos de verde de los semáforos, ocasionando bloqueos en las intersecciones y generando problemas de seguridad vial en el sector. Estos comportamientos incrementan los tiempos de demora en los viajes y conllevan a que las intersecciones y las vías se saturen con flujos menores.

Los tiempos de demora podrían disminuirse con una reducción de los vehículos presentes en la red vial o con una mejora en la infraestructura que mejore la capacidad de las vías analizadas.

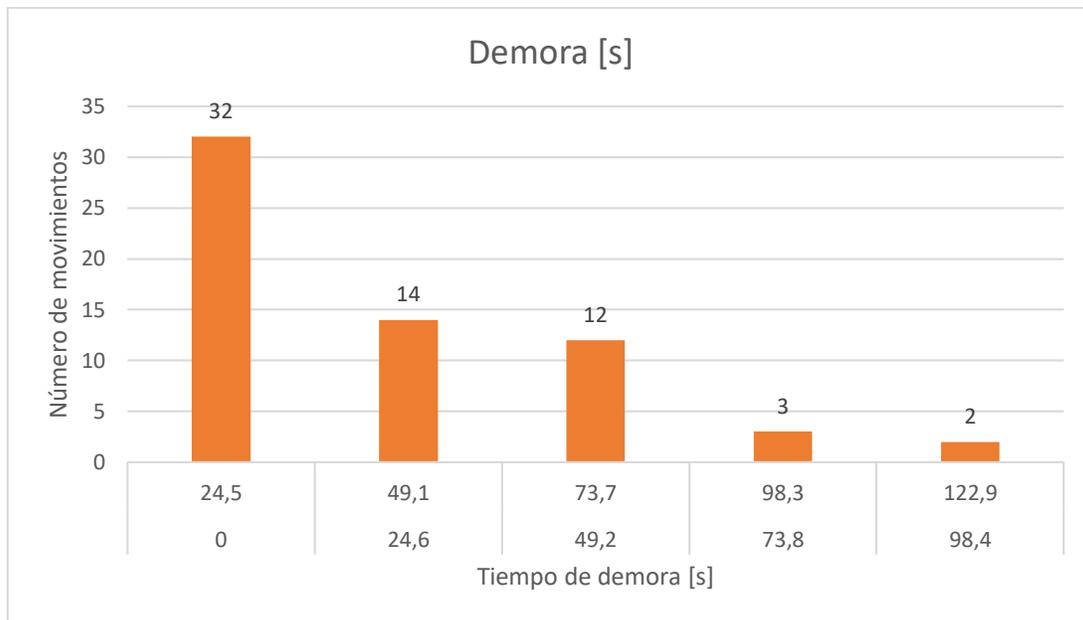


Figura 37: Demora para el escenario real **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

4.2.3. Longitud máxima de la cola

Considerando que la longitud de una cuadra varía entre 100 y 150 metros, se hace evidente la tendencia a superar estas longitudes debido a las colas de espera como se muestra en la Figura 38, lo que genera conflictos para el acceso a vías y predios y mayores problemas en la interacción entre usuarios de vehículos que se reusan a ceder el paso. Así mismo las intersecciones semaforizadas se encuentran distanciadas a más de 500 metros lo que motiva a los peatones a no usar los cruces seguros.

Para contrarrestar estos efectos se propone:

- Limitar el número de accesos a predios, industrias y demás edificaciones presentes a lo largo del corredor de la Calle 13, disminuyendo el conflicto que se genera en la circulación para estos puntos específicos de detención. Estos predios pueden en su mayoría habilitar un ingreso por una vía secundaria y manejar las colas de espera mientras se realiza el ingreso lejos de una vía principal con alto tráfico.
- Generar cruces seguros para los peatones como mínimo cada 300 o 400 metros, de manera que se disminuya el riesgo de atropello que genera el efecto cortina cuando los peatones cruzan la calle entre la corriente vehicular.

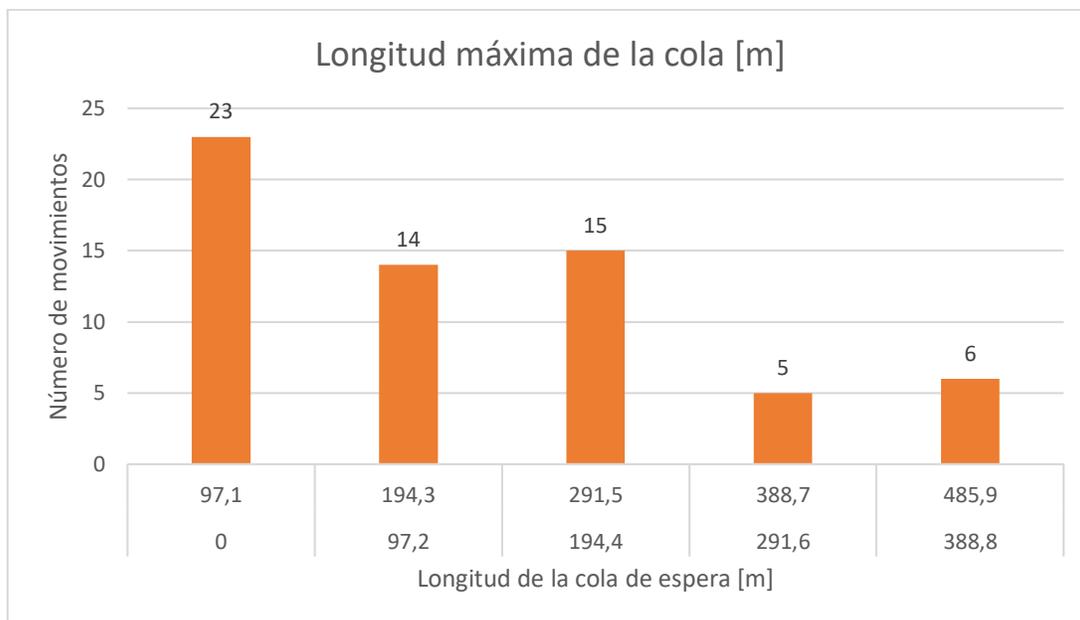


Figura 38: Longitud máxima de la cola para el escenario real **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

4.3. Aspectos ambientales

En los aspectos ambientales se presenta la cantidad de emisiones generadas por los vehículos que transitan por la zona y la concentración de emisiones que permanecen en el ambiente como mínimo durante la hora de máxima demanda.

4.3.1. Emisiones de contaminantes

Es importante mencionar que el parámetro de emisiones se analizará en el siguiente capítulo debido a que este por sí solo no representa una fuente importante de información, puesto que solo indica la cantidad de contaminantes que son emitidos a la atmósfera desde cualquier fuente. Sin embargo, estos valores se tomarán como línea base para identificar la reducción de emisiones de cada escenario propuesto.

Tabla 13: Emisiones de contaminantes para el escenario real

EMISIONES	SITUACIÓN INICIAL
CO ₂ [Kg/hora]	17569,90
NO _x [Kg/hora]	105,43
PM ₁₀ [g/hora]	4930,81

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

En cuanto a la participación de las emisiones de contaminantes por tipo de vehículo en la Figura 39 se representa que los camiones concentran el 54.7% de las emisiones de óxido de nitrógeno y el 36% de material particulado, mientras que los automóviles el 40.4% de dióxido de carbono.

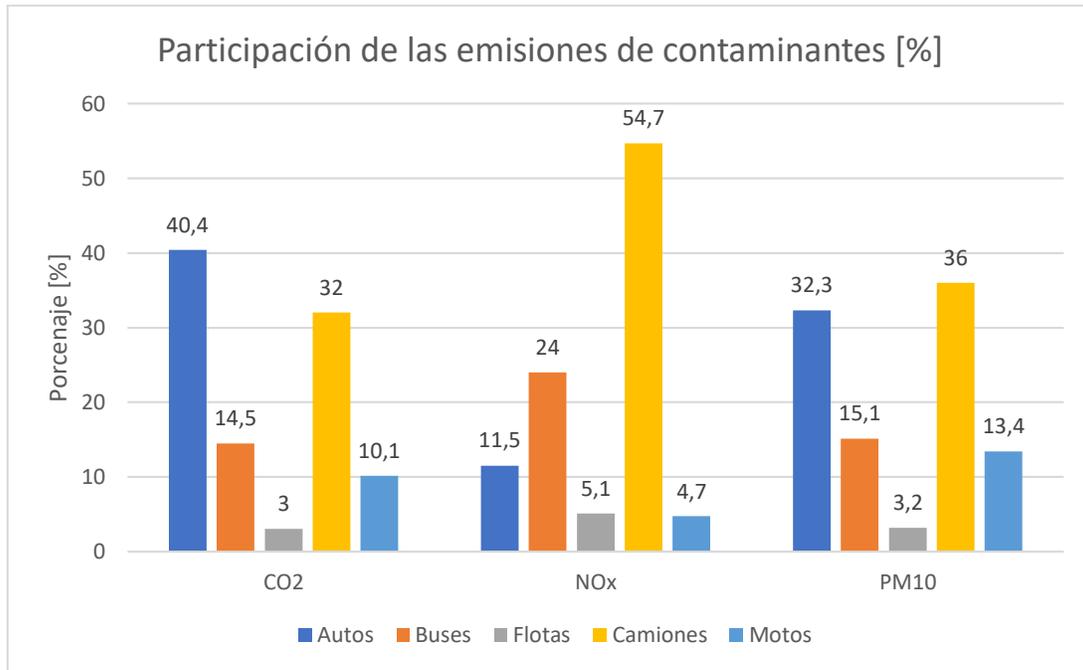


Figura 39: Porcentaje de participación de las emisiones de contaminantes por tipo de vehículo **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

4.3.2. Concentración de contaminantes

De acuerdo a los parámetros presentados en el numeral 2.1.5 se evidencia que para la hora de simulación la concentración de óxido de nitrógeno excede el límite permisible y podría considerarse que supera el nivel de prevención, por lo cual se evidencia la necesidad de la reducción de emisiones en el corredor.

Tabla 14: Concentraciones de contaminantes para el escenario real

CONCENTRACIONES	SITUACIÓN INICIAL
CO ₂ [µg/m ₃]	86990
NO _x [µg/m ₃]	495,2
PM ₁₀ [µg/m ₃]	19,77

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA MITIGACIÓN DE EMISIONES DE LA CALLE 13 ENTRE AV. BOYACÁ Y PEAJE RÍO BOGOTÁ

5.1. Escenario propuesto 1

Como se describió en el numeral 2.2.3.1, el primer escenario propuesto comprende la optimización de los ciclos semafóricos para hacer más eficiente el tiempo de circulación por el corredor. Mediante la opción de optimización de los tiempos semafóricos que ofrece PTV Vissim se maximizo el tiempo de verde de los semáforos que componen el sector.

Los principales afectados en este escenario son los peatones, dado que el tiempo de cruce de las intersecciones se fracciona, obligándolos a detenerse en el separador de la calzada para poder cruzar las vías.

5.1.1. Aspectos operacionales

5.1.1.1. Nivel de Servicio

Pese a que se designó un mayor tiempo de verde para los vehículos, el nivel de servicio descendió con respecto al escenario inicial como se muestra en la Figura 40 por lo cual se comprueba la maximización del tiempo de verde efectivo para los vehículos no genera mejoras operacionales al sector. Adicionalmente esta opción perjudica a los peatones al aumentar los tiempos de cruce de las intersecciones lo que puede conllevar problemas de seguridad vial.

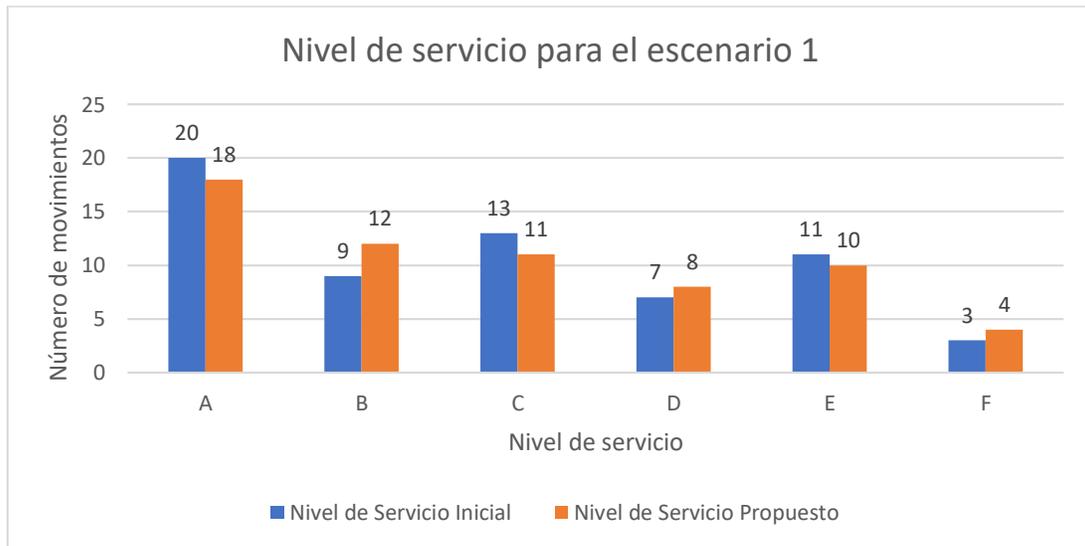


Figura 40: Nivel de Servicio para el escenario propuesto 1 **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

5.1.1.2. **Tiempos de demora**

Dado que los tiempos de verde se aumentaron para los vehículos, era de esperar que los tiempos de demora descendieran, sin embargo lo evidenciado en los resultados de la simulación (Ver Figura 41) es lo contrario, dado que existe un mayor conflicto en las intersecciones al disminuirse el tiempo de despeje para todos los movimientos.

En base a los resultados obtenidos, el aumento de los tiempos de verde de los semáforos no conlleva a una disminución de los tiempos de demora por lo cual en términos operacionales no genera beneficios esta medida.

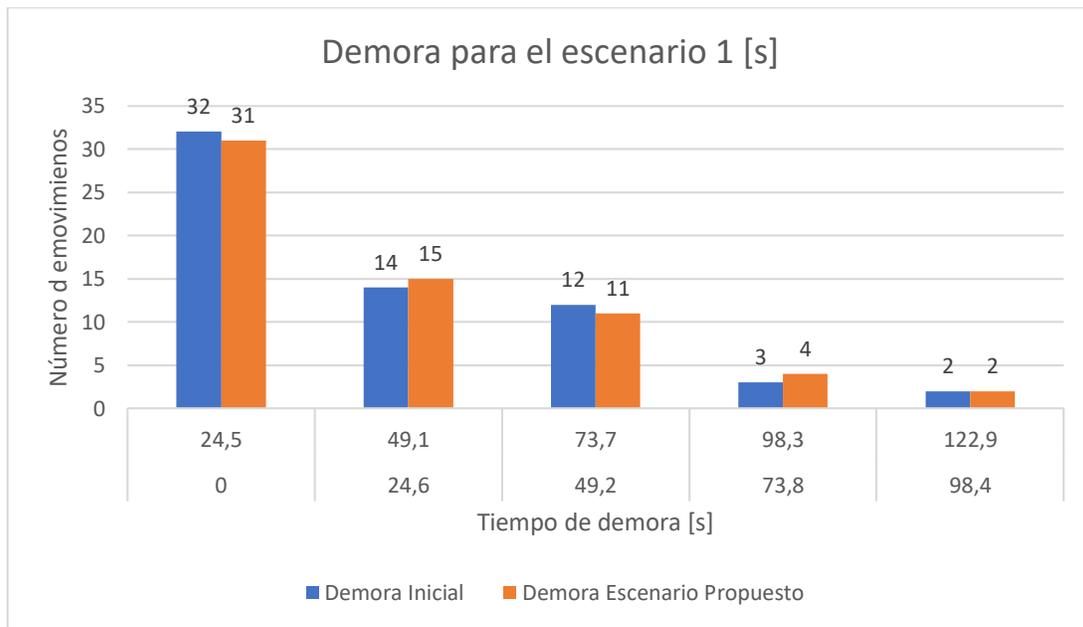


Figura 41: Demora para el escenario propuesto 1 Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

5.1.1.3. **Longitud máxima de la cola**

La longitud de la cola se mantuvo exactamente igual que la presentada en el escenario real como se puede evidenciar en la Figura 42, por lo cual no se encuentra ningún beneficio del cambio de la programación semafórica para la reducción de las colas de espera.

Sin embargo, en caso de implementarse la optimización del tiempo de verde no se van a aumentar las colas de espera para los movimientos establecidos en el corredor de estudio.

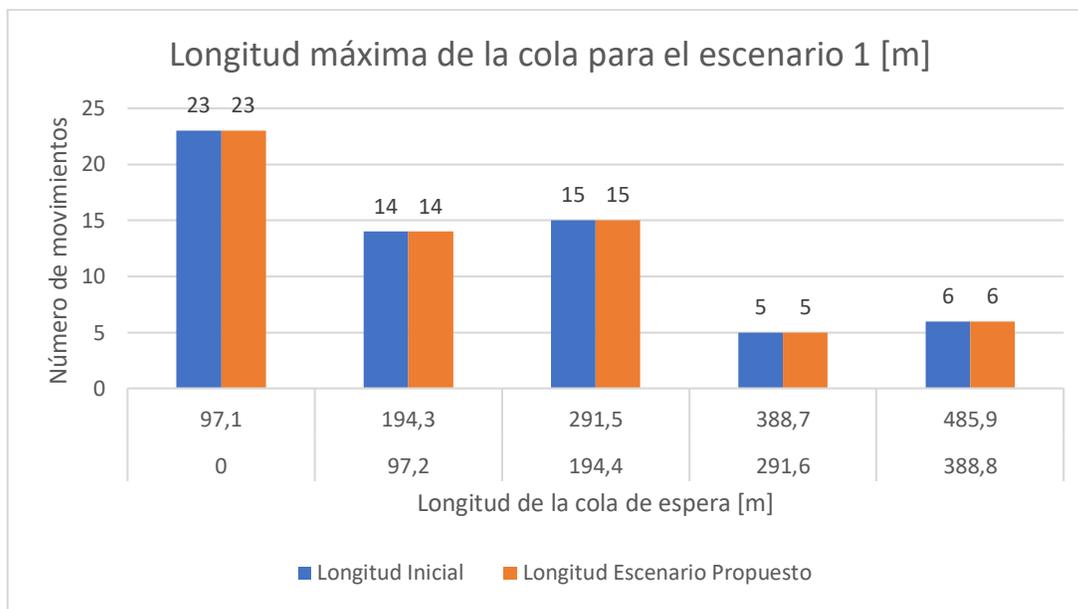


Figura 42: Longitud máxima de la cola para el escenario propuesto 1 **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

5.1.2. Aspectos ambientales

5.1.2.1. Emisiones de contaminantes

La cantidad de contaminantes que son emitidos al medio ambiente aumentaron con respecto a la situación inicial debido al conflicto que se presenta en las intersecciones con el cambio de los tiempos semafóricos. Este aumento se ve representado en mayores acciones de frenada y puesta en marcha del vehículo.

Tabla 15: Emisiones de contaminantes para el escenario propuesto 1

EMISIONES	SITUACIÓN INICIAL	ESCENARIO PROPUESTO
CO ₂ [Kg/hora]	17569,90	17652,28
NO _x [Kg/hora]	105,43	106,08
PM ₁₀ [g/hora]	4930,83	4948,67

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

Para el escenario propuesto se evidencia que los camiones son los que más emisiones aportan al sector de estudio, seguido por los automóviles (Ver Figura 42). La distribución es prácticamente igual al escenario real dado que no se presentaron cambios significativos en los tiempos de desplazamiento.

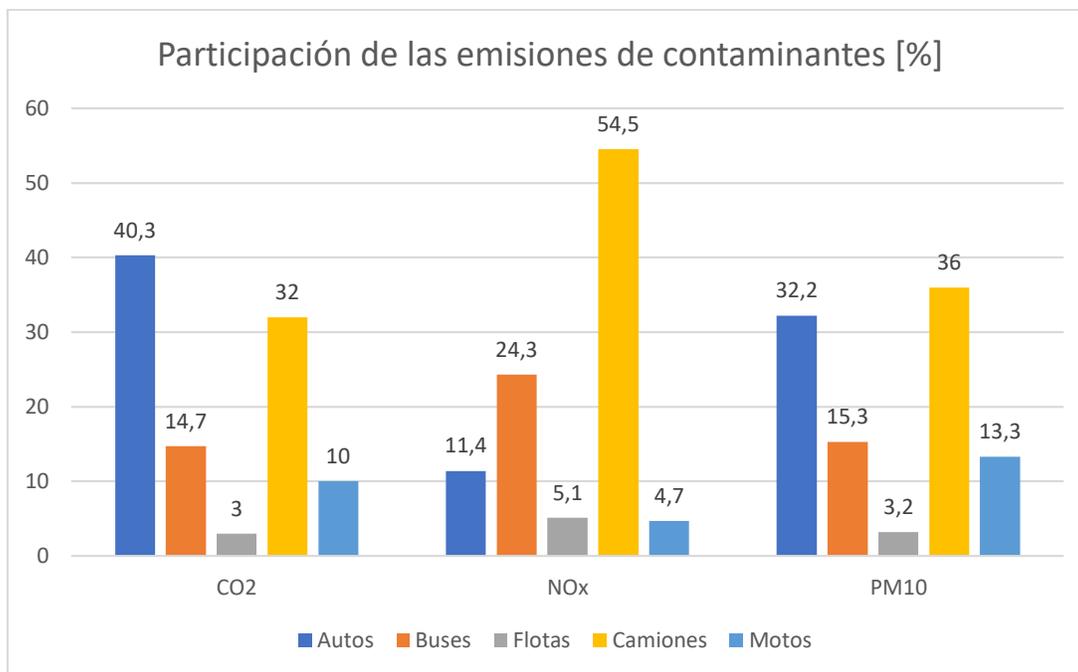


Figura 43: Porcentaje de participación de las emisiones de contaminantes por tipo de vehículo para el escenario 1 Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

5.1.2.2. Concentración de contaminantes

Con las mejoras propuestas para los tiempos de semáforos, fue posible lograr una reducción del 14% de la concentración de dióxido de carbono en el medio ambiente y del 12% de material particulado. Considerando que hay una leve reducción en la concentración de contaminantes, para ser una medida de muy bajo costo puede ser viable para otros corredores con menor volumen vehicular.

Pese a que las emisiones se ven incrementadas levemente como se indica en el numeral 5.1.2.1, la concentración de las emisiones se disminuye debido a la reducción de los tiempos de detención en los semáforos; logrando así que su concentración en el medio ambiente sea menor.

Sin embargo, los valores obtenidos para el escenario propuesto siguen sobrepasando los límites permisibles establecidos para la región.

Tabla 16: Concentraciones de contaminantes para el escenario propuesto 1

CONCENTRACIONES	SITUACIÓN INICIAL	ESCENARIO PROPUESTO
CO ₂ [µg/m ₃]	86990	74860
NO _x [µg/m ₃]	495,2	491,5
PM ₁₀ [µg/m ₃]	19,77	17,42

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

5.2. Escenario propuesto 2

Para desarrollar el escenario 2 se tienen en cuenta las consideraciones presentadas en el numeral 2.2.3.2.

5.2.1. Aspectos operacionales

5.2.1.1. Nivel de Servicio

De acuerdo con los resultados obtenidos que se resumen en la Figura 44, la situación más favorable en términos de movilidad para el corredor de estudio la representa la migración del 30% de los usuarios de vehículo particular al sistema de transporte público colectivo. Sin embargo, existen movimientos que se ven afectados aumentando mínimamente el nivel de servicio E debido al ingreso de buses de mayor tamaño y sus respectivas paradas para ascenso y descenso de pasajeros.

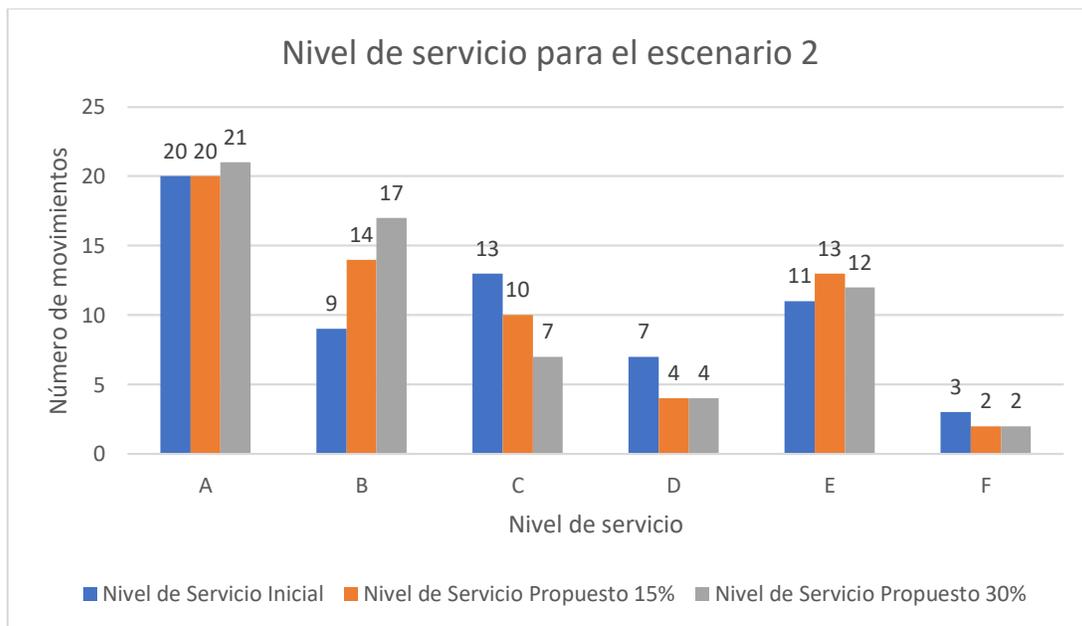


Figura 44: Nivel de Servicio para el escenario propuesto 2 Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

5.2.1.2. Tiempos de demora

Se observa una tendencia a la disminución de tiempos de demora con los escenarios propuestos, lo se debe cual a la reducción de vehículos en el corredor de estudio.

Los resultados consolidados en la Figura 45, vislumbran como el fomento del transporte público mejora los tiempos de viaje para todos los usuarios del corredor.

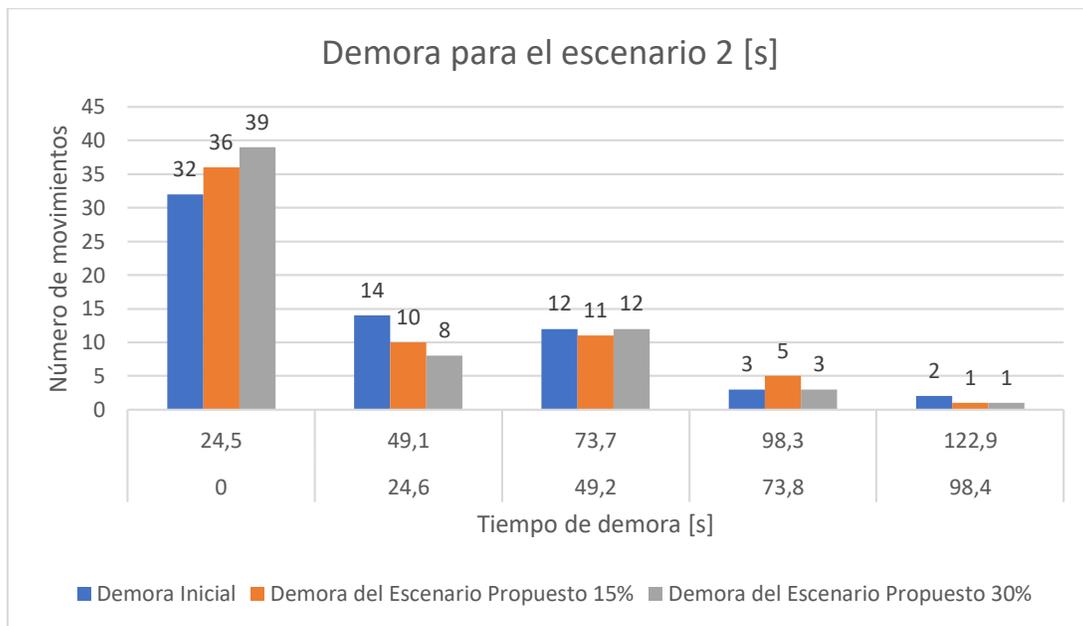


Figura 45: Demora para el escenario propuesto 2 Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

5.2.1.3. Longitud máxima de la cola

El comportamiento de las colas de espera se asemeja al de los tiempos de demora, concentrándose para las dos alternativas propuestas en longitudes menores a los 200 metros (Ver Figura 46).

En términos operacionales, esta situación permitiría generar cruces peatonales seguros más frecuentes sin afectar los tiempos de despeje de las intersecciones.

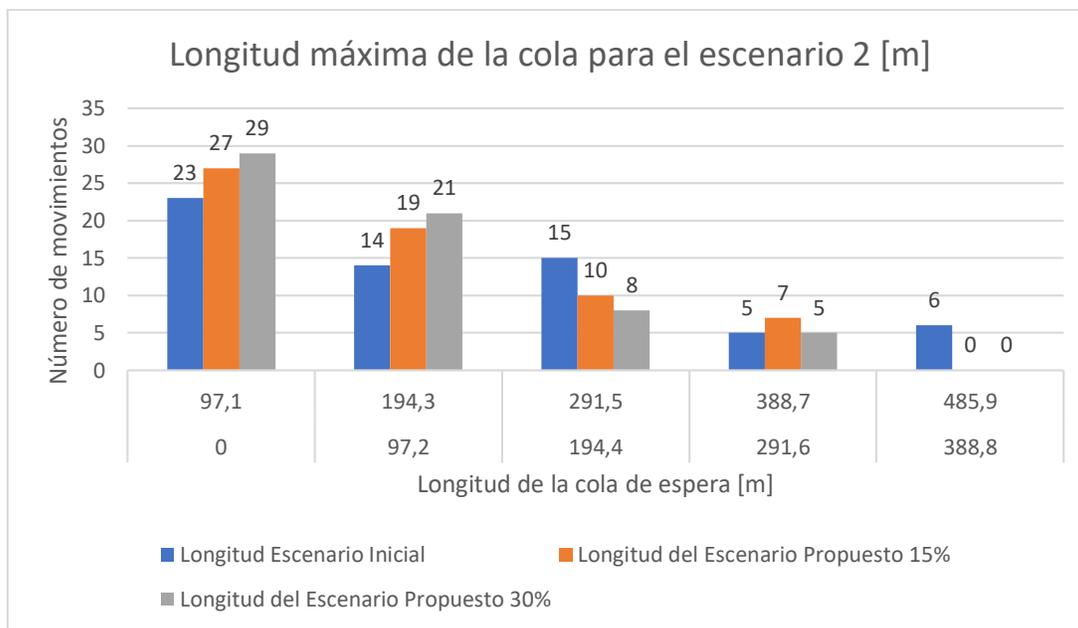


Figura 46: Longitud máxima de la cola para el escenario propuesto 2 **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

5.2.2. Aspectos ambientales

5.2.2.1. Emisiones de contaminantes

Si se considera la disminución de vehículos en el corredor, el nivel de emisiones disminuye en función de los menores tiempos de frenado y puesta en marcha; por lo anterior esta alternativa resulta ser bastante viable para su implementación dado el bajo costo que tendría.

Tabla 17: Emisiones de contaminantes para el escenario propuesto 2

EMISIONES	SITUACIÓN INICIAL	ESCENARIO PROPUESTO (15%)	ESCENARIO PROPUESTO (30%)
CO ₂ [Kg]	17569,90	16090,03	13749,51
NO _x [Kg]	105,43	102,06	91,47
PM ₁₀ [g]	4930,83	4589,53	3976,89

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

Cada escenario respectivamente, logra una reducción del 8% y 22% de dióxido de carbono, lo cual se atribuye en mayor medida a la reducción de vehículos; por lo cual son apropiadas según el criterio del Protocolo de Kyoto para la reducción de CO₂. Así mismo, la disminución de material particulado se presenta en 7% y 19% para cada escenario y por último el 3% y 13% de reducción para el óxido de nitrógeno.

El mayor porcentaje de reducción de emisiones de contaminantes se presenta en el caso 2; cuando el 30% de los usuarios de vehículos migran al transporte público. Esta alternativa de bajo costo requiere de articulación de las políticas públicas de todos los sectores, dado que es necesario fortalecer el sistema de transporte público para que pueda cubrir la demanda de viajes de los usuarios.

En cuanto a la participación por tipo de vehículo en la emisión de contaminantes, sigue presentándose una predominancia de los camiones seguido por el automóvil, incluso presentándose una reducción del 15 y 30% de estos últimos.

Los resultados consolidados discriminando el tipo de vehículo para cada alternativa propuesta en el escenario 2 se presentan en la Figura 47 y Figura 48 respectivamente.

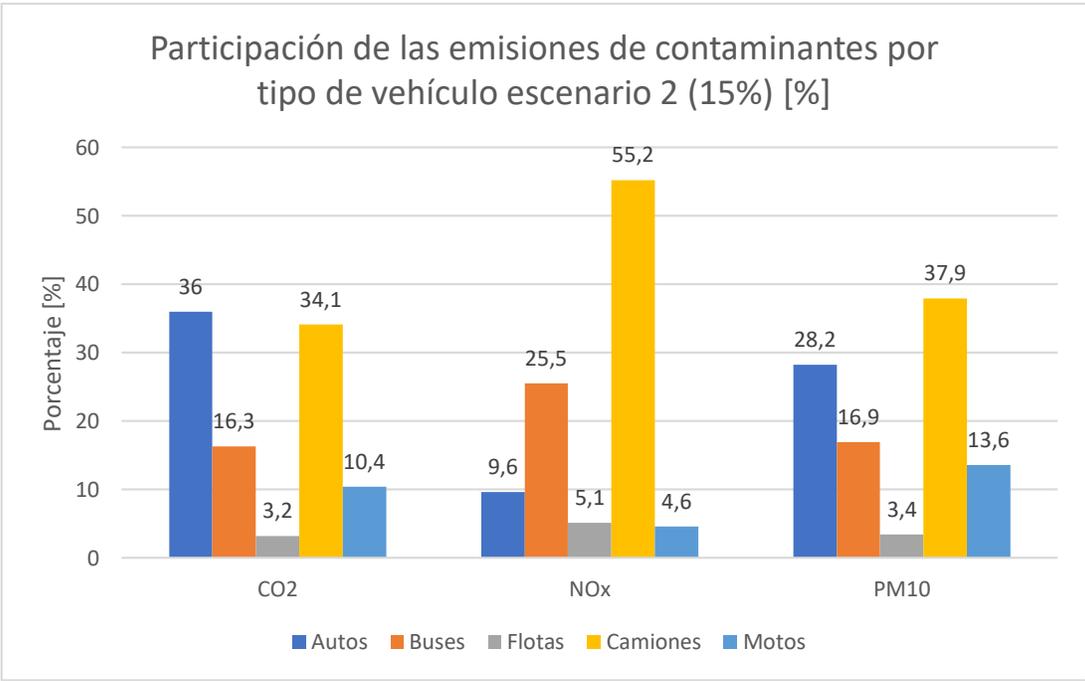


Figura 47: Porcentaje de participación de las emisiones de contaminantes por tipo de vehículo para el escenario 2 (15%) Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

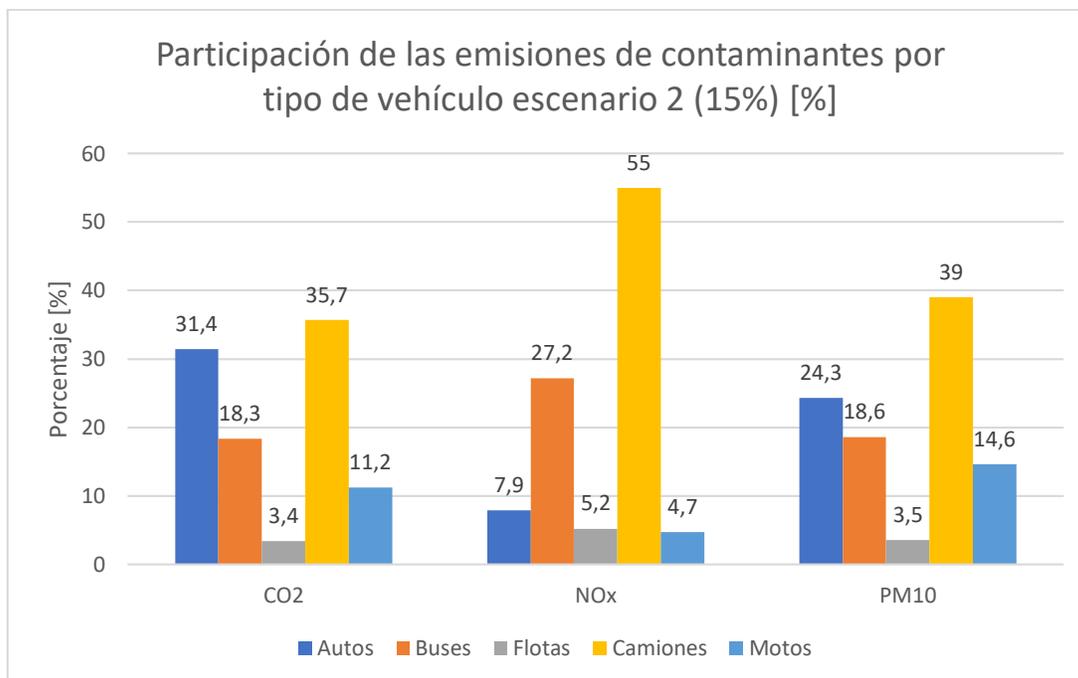


Figura 48: Porcentaje de participación de las emisiones de contaminantes por tipo de vehículo para el escenario 2 (30%) Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

5.2.2.2. Concentración de contaminantes

Considerando las anteriores alternativas, las concentraciones de contaminantes presentan una reducción en promedio del 38%, sin embargo aun cuando el número de vehículos particulares disminuyó de manera importante, los límites permisibles de concentración de contaminantes siguen sin cumplirse. Lo anterior se debe a diferentes factores como: la tecnología obsoleta de los buses de transporte público y las flotas intermunicipales que incluso eliminando varios automóviles y reemplazándolos por un bus resultan tener unos factores de emisión bastante altos; los cuales se presentan en la Tabla 2.

Otro factor a considerar es la poca disposición de los usuarios de motocicleta a migrar al transporte público, debido al bajo costo de los trayectos y que evitan la congestión haciendo maniobras de adelantamiento entre los vehículos por falta de medidas de regulación efectivas. Por último, existe la flota de vehículos de carga que al transitar en medio de la congestión y por sus tecnologías pasadas tienen una alta participación en las emisiones del corredor.

La información consolidada para las alternativas propuestas en el escenario 2 y la situación inicial se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18: Concentraciones de contaminantes para el escenario propuesto 2

CONCENTRACIONES	SITUACIÓN INICIAL	ESCENARIO PROPUESTO (15%)	ESCENARIO PROPUESTO (30%)
CO ₂ [µg/m ₃]	86990	51720	50450
NO _x [µg/m ₃]	495,2	324,9	329,6
PM ₁₀ [µg/m ₃]	19,77	11,94	11,7

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

5.3. Escenario propuesto 3

El escenario propuesto 3 afecta directamente la infraestructura existente tal como se menciona en el numeral 2.2.3.3, dado que se propone incrementar de tres a cinco carriles por sentido el corredor de la Calle 13 o Avenida Centenario, como muestra la Figura 49.

Este escenario cuenta con diferentes alternativas complementarias que son descritas en el numeral 2.2.3.3 y a mayor profundidad en el Capítulo VI.



Figura 49: Simulación Intersección Carrera 128 para el escenario propuesto 3 *Fuente: Elaboración propia usando PTV Vissim, 2017*

5.3.1. Aspectos operacionales

5.3.1.1. Nivel de Servicio

Con la información presentada en la Figura 50, es claro que el nivel de servicio para todo el corredor aumenta con la incorporación de dos carriles adicionales por sentido, lo cual se ve reflejado en el aumento de movimientos clasificados como A y B y la disminución de E y F.

Esta propuesta a pesar de ser la más costosa de implementar, genera beneficios para la movilidad del sector previendo el crecimiento acelerado que se está presentando en las ciudades dormitorio que se comunican a través de esta vía.

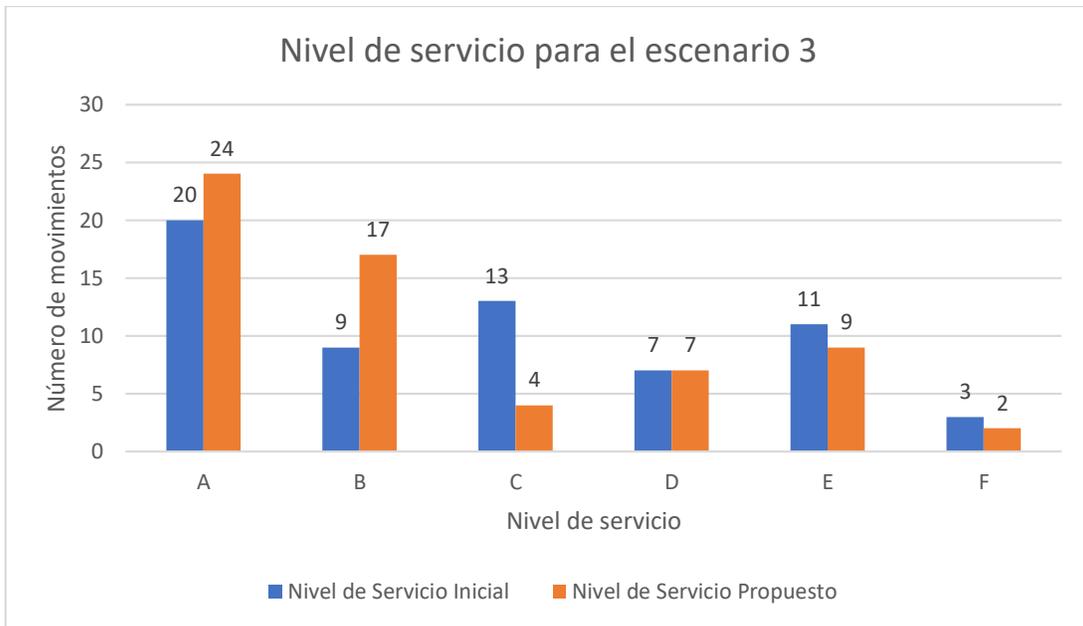


Figura 50: Nivel de Servicio para el escenario propuesto 3 **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

5.3.1.2. Tiempos de demora

Las demoras que experimentan los vehículos se ven reducidas casi a cero para el rango de 74 a 123 segundos (Ver Figura 51), lo que se traduce en mejoras operacionales para la vía y posibilidad de incremento del tráfico debido a la nueva capacidad que ofrece el corredor.

Adicionalmente, el mayor número de movimientos se concentran en tiempos de espera de menos de 25 segundos lo cual reafirma la eficiencia de esta medida para el tráfico actual de la zona de estudio.

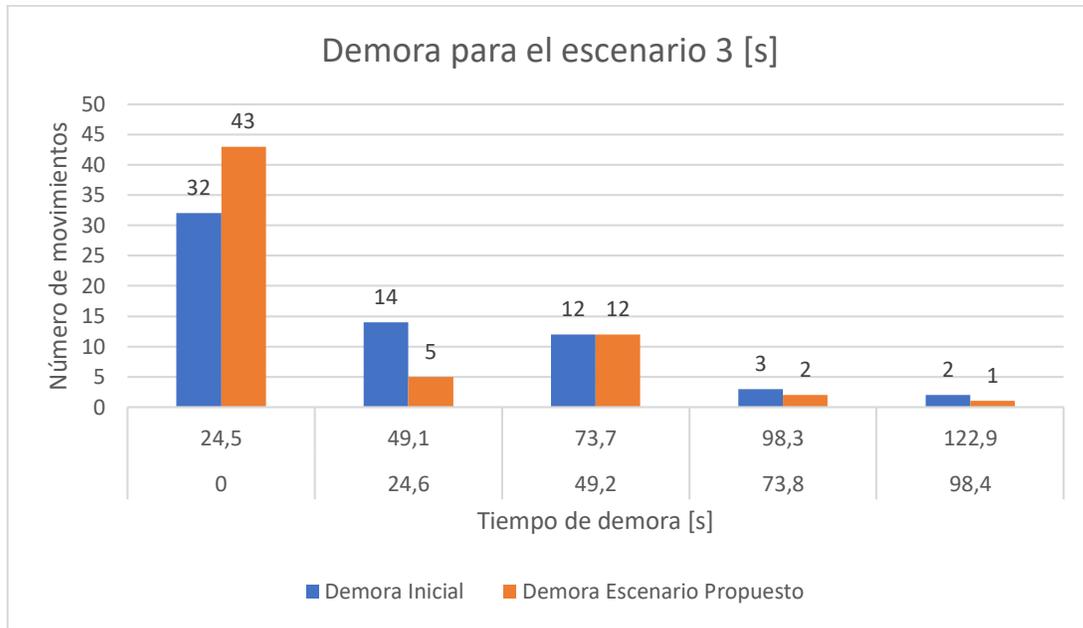


Figura 51: Demora para el escenario propuesto 2 **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

5.3.1.3. Longitud máxima de la cola

La longitud de las colas de espera se concentra en su mayoría en menos de 194 metros, lo cual es menor que la longitud de una cuadra. Esta distribución permite generar pasos peatonales seguros evitando el entrecruzamiento de peatones con los vehículos motivados por las largas distancias hasta el siguiente paso seguro.

En la Figura 52 se presenta la distribución de la longitud máxima de la cola de espera para los 5 intervalos definidos.

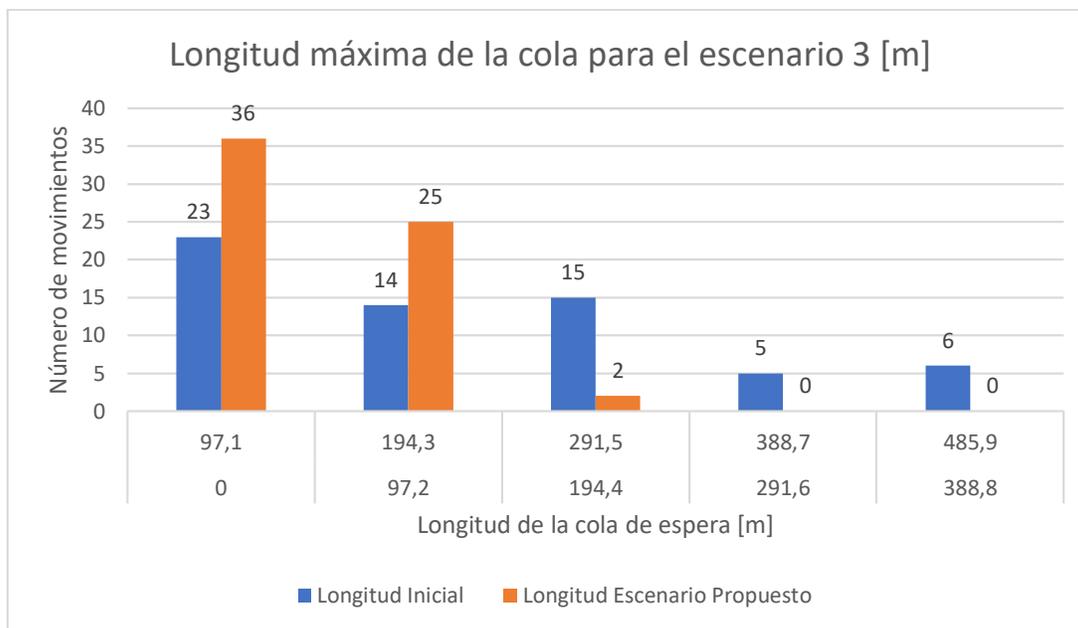


Figura 52: Longitud máxima de la cola para el escenario propuesto 3 **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

5.3.2. Aspectos ambientales

5.3.2.1. Emisiones de contaminantes

Este escenario en términos ambientales, es el que mayor reducción de contaminantes presenta, dado que en promedio el 33% de todos los contaminantes se ven disminuidos con respecto al escenario inicial.

Una vez más es posible evidenciar que el mayor aporte de contaminantes se concentra en los vehículos de carga que transitan por la zona, seguido de los automóviles (Ver Figura 53).

Tabla 19: Emisiones de contaminantes para el escenario propuesto 3

EMISIONES	SITUACIÓN INICIAL	ESCENARIO PROPUESTO
CO ₂ [Kg]	17569,90	11684,58
NO _x [Kg]	105,43	69,85
PM ₁₀ [g]	4930,83	3329,91

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

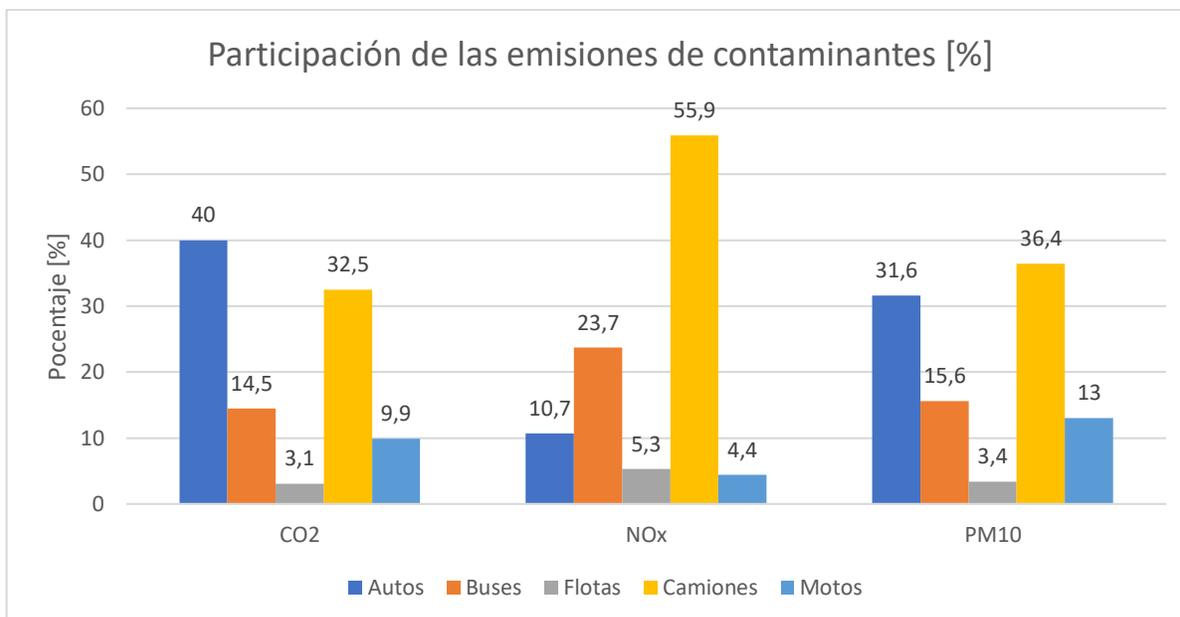


Figura 53: Porcentaje de participación de las emisiones de contaminantes por tipo de vehículo para el escenario 3 Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

5.3.2.2. Concentración de contaminantes

La propuesta presentada logra generar una reducción de casi el 40% de la concentración de dióxido de carbono en la atmosfera, en cuanto a material particulado menor a 10 micras existe una reducción del 37% y del 19% para el óxido de nitrógeno.

Pese a la notable reducción de inmisiones causadas por el tráfico del escenario real en la infraestructura propuesta, los valores siguen superando los límites permisibles para una hora y podrían estar superando los niveles de prevención, alerta y emergencia si esta situación continuara por un periodo de 8 horas. Es importante mencionar que los valores presentados únicamente corresponden a las emisiones generadas por las fuentes móviles, por lo cual al cuantificar las emisiones generadas por las industrias ubicadas en el sector los valores serán mayores.

Tabla 20: Concentraciones de contaminantes para el escenario propuesto 3

CONCENTRACIONES	SITUACIÓN INICIAL	ESCENARIO PROPUESTO
CO ₂ [µg/m ₃]	86990	52670
NO _x [µg/m ₃]	495,2	400,8
PM ₁₀ [µg/m ₃]	19,77	12,41

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

5.4. Análisis comparativo de todos los escenarios

La aplicación de la microsimulación se realizó para la situación actual y tres escenarios que como se mencionó en el numeral 2.2 para cumplir con el objetivo de esta investigación que era mostrar las bondades de los modelos de simulación; específicamente en el cálculo de las emisiones producto del transporte. En este apartado se analiza cómo se modifican los aspectos operacionales y medioambientales a nivel de emisiones y concentraciones a través de la comparación de los diferentes escenarios propuestos dando respuesta a la pregunta de investigación, además de presentar las condiciones generales identificadas que contribuyen a la degradación del medio ambiente.

5.4.1. Aspectos operacionales

5.4.1.1. Nivel de Servicio

En este aspecto el escenario que ofrece un mejor nivel de servicio para el tráfico actual del corredor es aquel que incluye la ampliación de la infraestructura disponible para transitar por el sector, seguido de la migración del 30% de los usuarios de automóvil hacia el sistema integrado de transporte público SITP como se aprecia en la Figura 54.

5.4.1.2. Tiempos de demora

En cuanto a la demora que experimentan los vehículos debido a la congestión de la zona, los escenarios 2 y 3 presentan una mejora notable concentrando estos tiempos cercanos al minuto (Ver Figura 55). Es importante aclarar que hay un límite en la reducción de la demora considerando que el sector cuenta con varios semáforos instalados que permiten la movilidad segura y ordenada en las diferentes intersecciones de la zona.

La única manera de reducir los tiempos de demora al mínimo para el corredor de estudio, es la implementación de intersecciones a desnivel o elevadas a cambio de las semaforizadas que son las que manejan el volumen más alto de vehículos.

5.4.1.3. Longitud máxima de la cola

La reducción de las colas de espera es notable para los mismos escenarios que los tiempos de demora, por lo cual es viable la implementación de medidas de incentivo del uso del transporte público y la ampliación de la capacidad vehicular del corredor.

En la Figura 56 se presenta el resumen de la longitud máxima de la cola de espera para todos los escenarios contemplados.

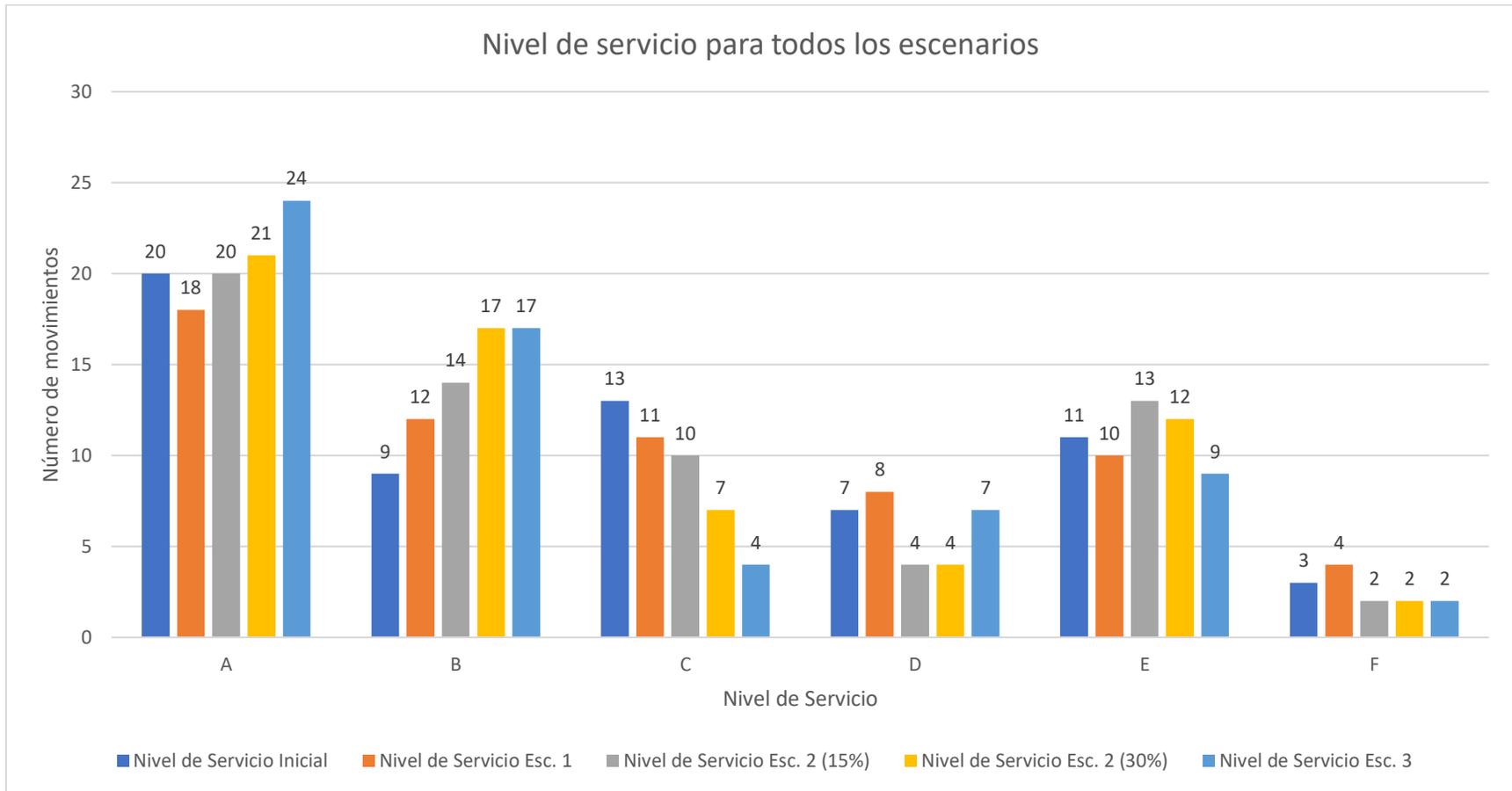


Figura 54: Nivel de Servicio para todos los escenarios propuestos **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

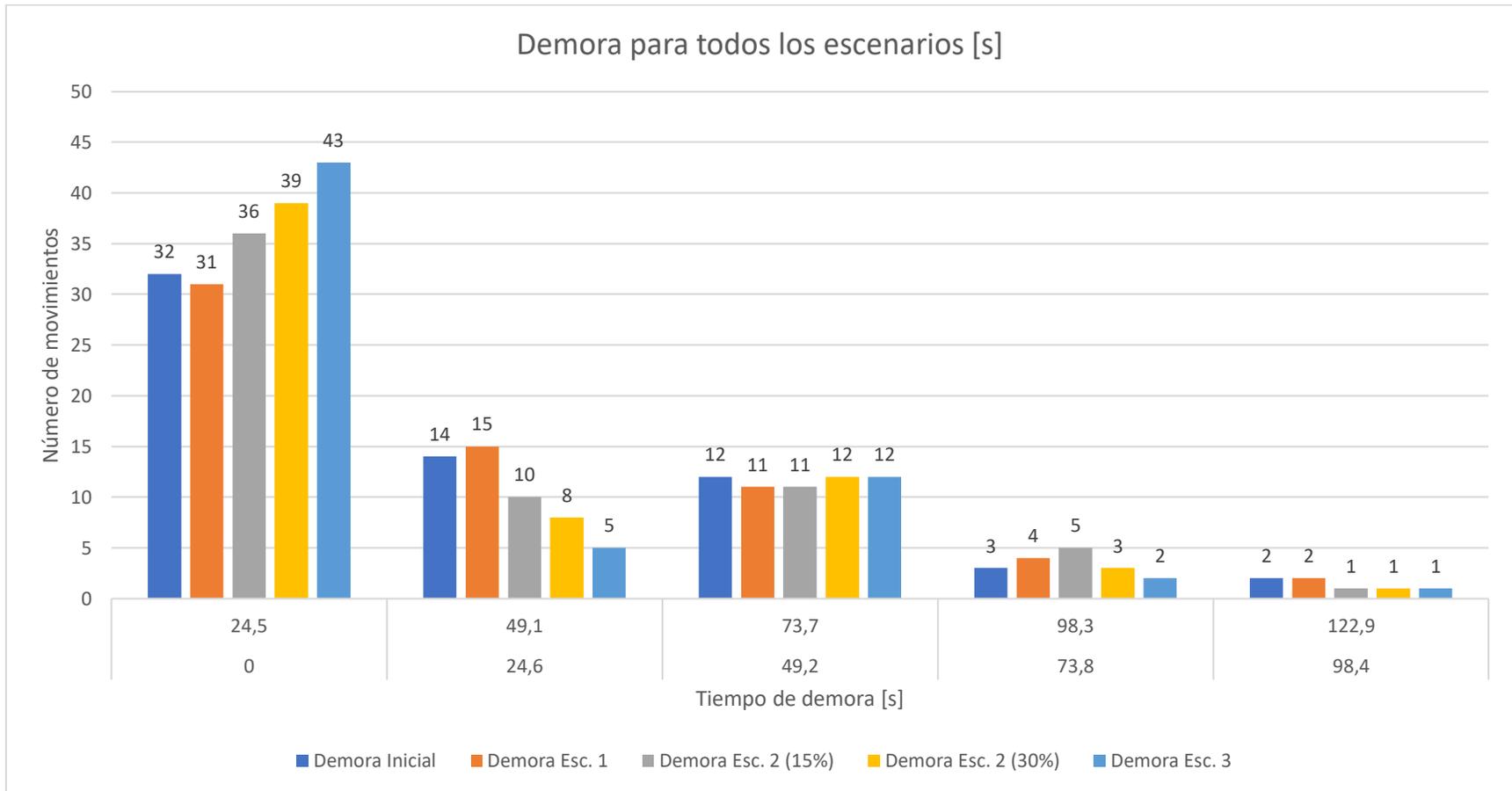


Figura 55: Demora para todos los escenarios propuestos **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

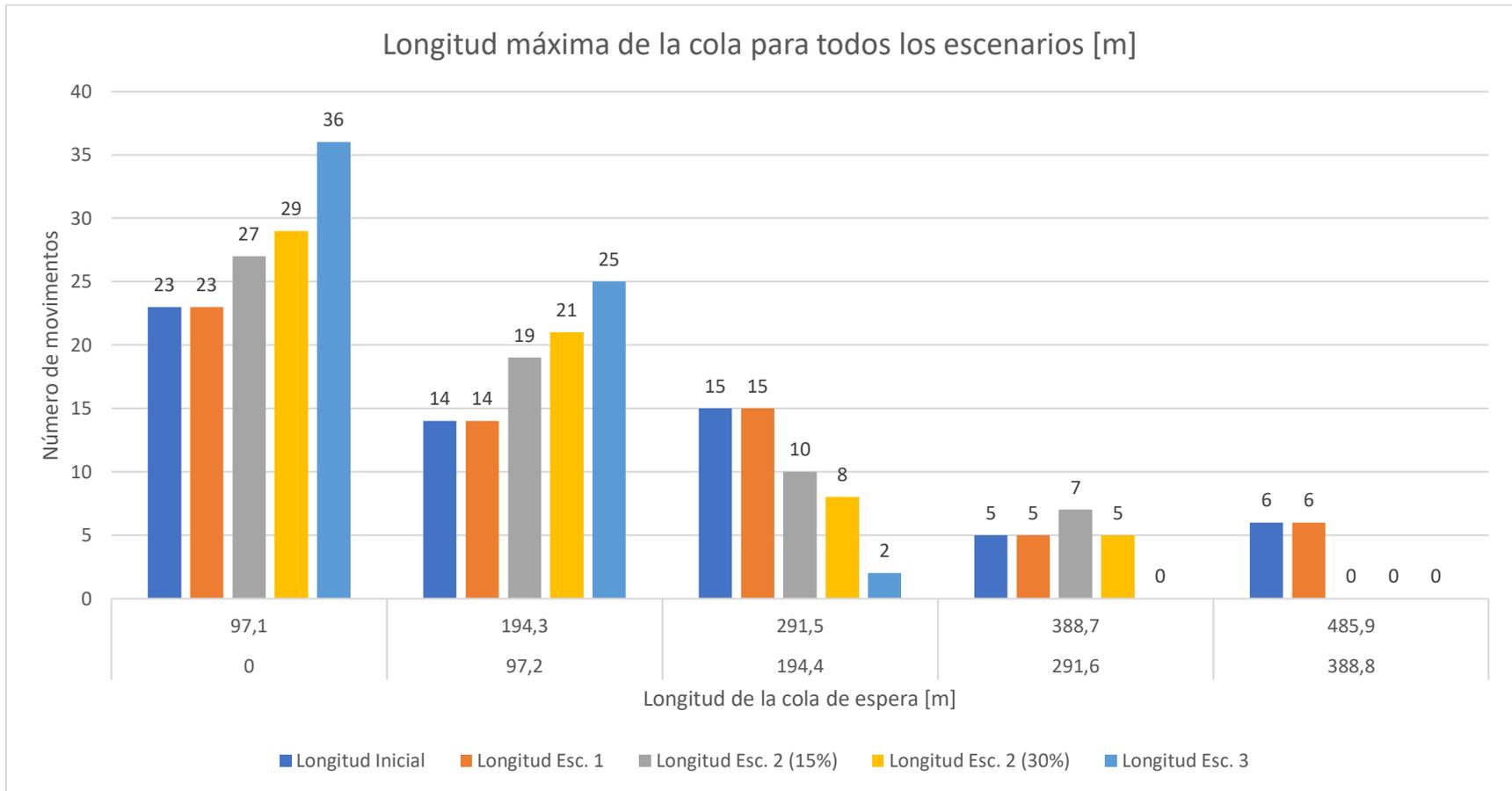


Figura 56: Longitud máxima de la cola para todos los escenarios propuestos **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV Vissim, 2017

5.4.2. Aspectos ambientales

5.4.2.1. Emisiones de contaminantes

Después de analizar los resultados de los escenarios de manera individual, es importante comparar los resultados de emisiones para identificar cuál de los escenarios propuestos presenta una mejor alternativa para hacer más sostenible la movilidad y la calidad de vida del sector.

La situación propuesta en el escenario 1 genera un leve incremento en la cantidad de emisiones, por lo que no es efectiva la modificación de los tiempos semafóricos si el objetivo es la disminución de las emisiones y concentraciones del sector, mientras que la medida es altamente efectiva si se quiere mejorar los flujos peatonales.

Considerando las dos opciones propuestas en el escenario 2, la disminución del parque vehicular liviano genera que los actuales niveles de emisiones sean menores en un 6% y 18% respecto a la situación actual. Estas alternativas conllevan al mejoramiento de la oferta de transporte público para suplir la demanda y al desincentivo del uso del vehículo particular, se podría decir que su costo de implementación es bajo y su beneficio al medio ambiente y a la movilidad alta.

Como se ve reflejado en la Tabla 21, el escenario que mayor reducción de emisiones presenta es el 3 con un 33% en promedio para los contaminantes analizados. Si bien esta alternativa contempla una alta inversión en infraestructura, los resultados positivos en reducción de emisiones podrían sopesar a largo plazo el costo de la inversión si se considera los costos de salud pública por el incremento de casos de enfermedad respiratoria.

De acuerdo con la OMS⁶ una reducción del 15% de los niveles de concentración de material particulado puede incrementar la esperanza de vida en promedio 8.6 meses. Para el caso específico del escenario propuesto 3, la reducción alcanzada es supera el doble del porcentaje relacionado por la OMS disminuyendo así los costos asociados a salud pública si se optará por su implementación.

⁶ Organización Mundial de la Salud, 2016. Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. En línea. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>.

Tabla 21: Emisiones de contaminantes para todos los escenarios propuestos

EMISIONES	ESCENARIO INICIAL	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2 (15%)	ESCENARIO 2 (30%)	ESCENARIO 3
CO ₂ [Kg/hora]	17569,90	17652,28	16090,03	13749,51	11684,58
NO _x [Kg/hora]	105,43	106,08	102,06	91,47	69,85
PM ₁₀ [g/hora]	4930,81	4948,67	4589,53	3976,89	3329,91

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

El análisis de los diferentes escenarios permitió identificar que las emisiones de CO₂, son producto en su mayoría del uso del automóvil y de los vehículos de carga en el sector de estudio. Para este contaminante se evidencia una reducción en las dos situaciones del escenario dos debido a la reducción de vehículos particulares en el modelo (Ver Figura 57).

Las emisiones de este contaminante están estrechamente relacionadas con la distribución de la flota vehicular en la zona.

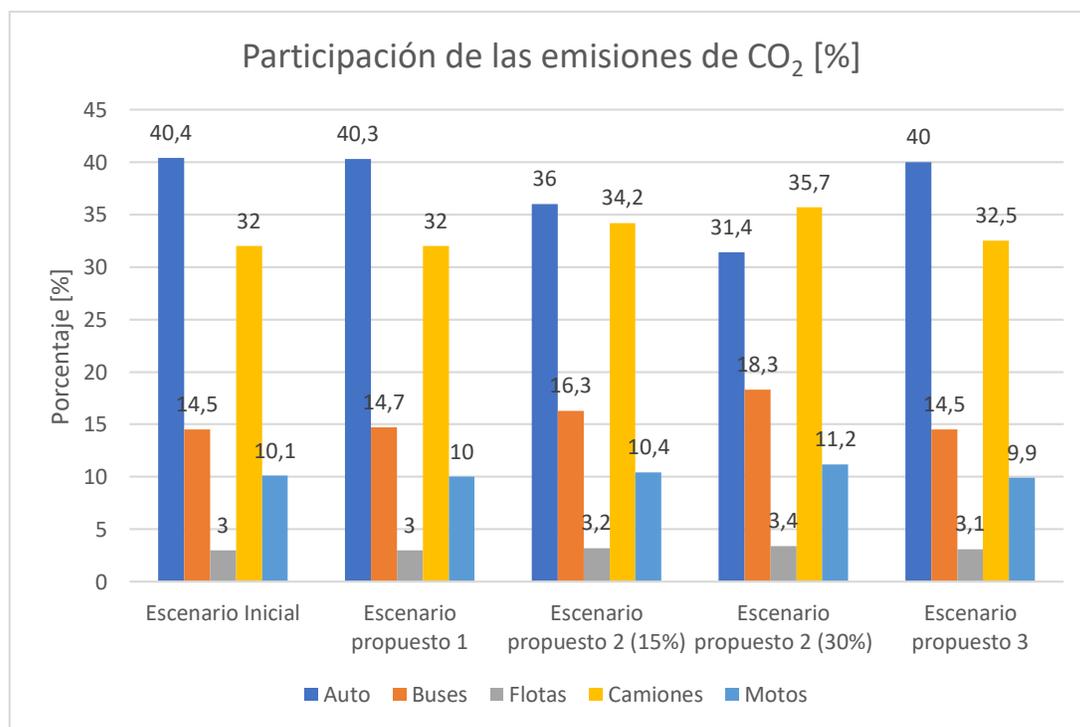


Figura 57: Porcentaje de participación de las emisiones de dióxido de carbono por tipo de vehículo para todos los escenarios Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

Como se mencionó anteriormente, la reducción de emisiones de CO₂ se alinea a los compromisos establecidos por varios países con el Protocolo de Kyoto, por lo cual se presenta en la Figura 58 gráficamente cual es la reducción de cada escenario propuesto con respecto a la reducción del 5% de la situación identificada; lo cual se traduce en 16.691 Kg de CO₂. Es claro decir que las dos propuestas del escenario 2 y la presentada en el escenario 3 logran cumplir esta meta para el corredor de estudio en la hora de máxima demanda, por lo cual es recomendable replicar estas medidas.

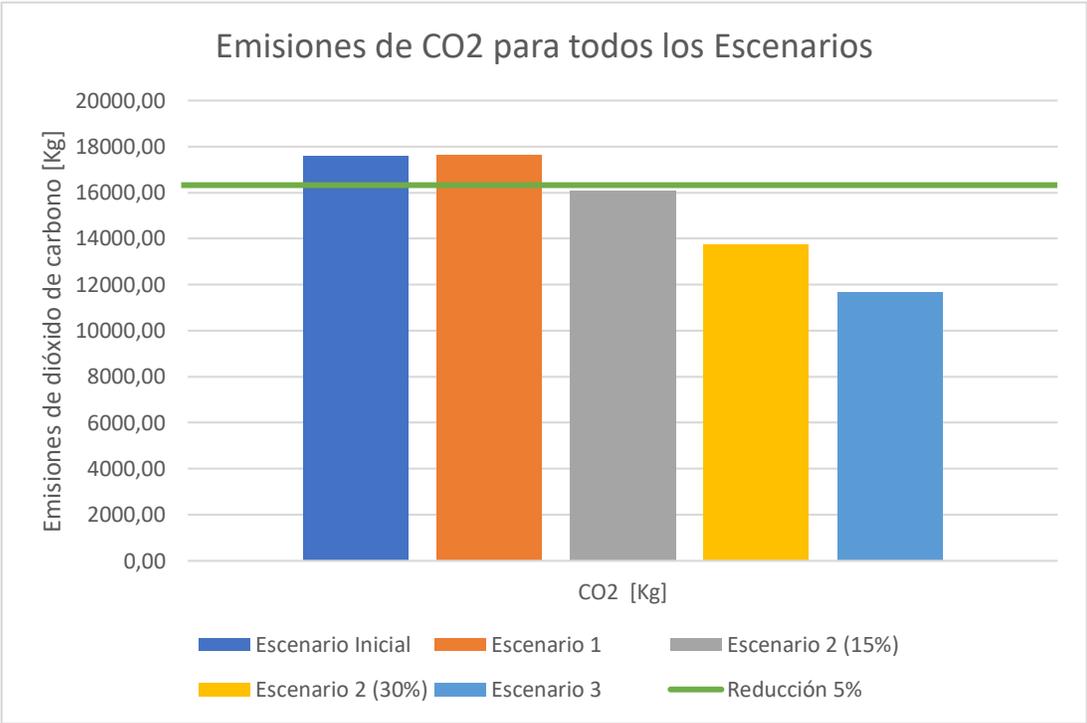


Figura 58: Emisiones de dióxido de carbono para todos los escenarios **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

Las emisiones de óxido de nitrógeno (NO_x) las producen los vehículos de carga y el transporte público debido a las tecnologías y el tipo de motor que posee el parque automotor colombiano (Ver Figura 59).

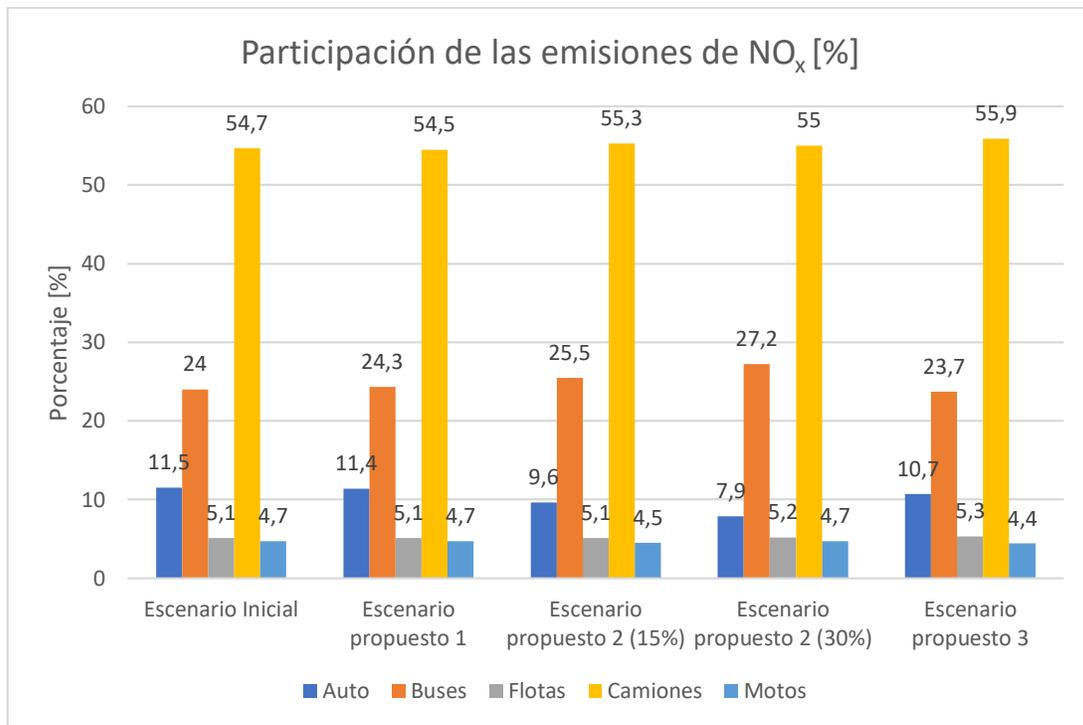


Figura 59: Porcentaje de participación de las emisiones de óxido de nitrógeno por tipo de vehículo para todos los escenarios **Fuente:** Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

En cuanto al material particulado de menos de 10 micras (PM_{10}) el mayor productor son los vehículos con combustible diésel, por lo cual los vehículos de carga tienen una alta participación como fuente de este contaminante (Ver Figura 60). Así mismo, los automóviles o vehículos particulares tienen una importante incidencia para este contaminante dada primero por su predominancia en la composición vehicular de todos los accesos y en segunda medida por la cantidad de vehículos livianos diésel que han entrado al mercado como una alternativa más económica por el costo de su combustible.

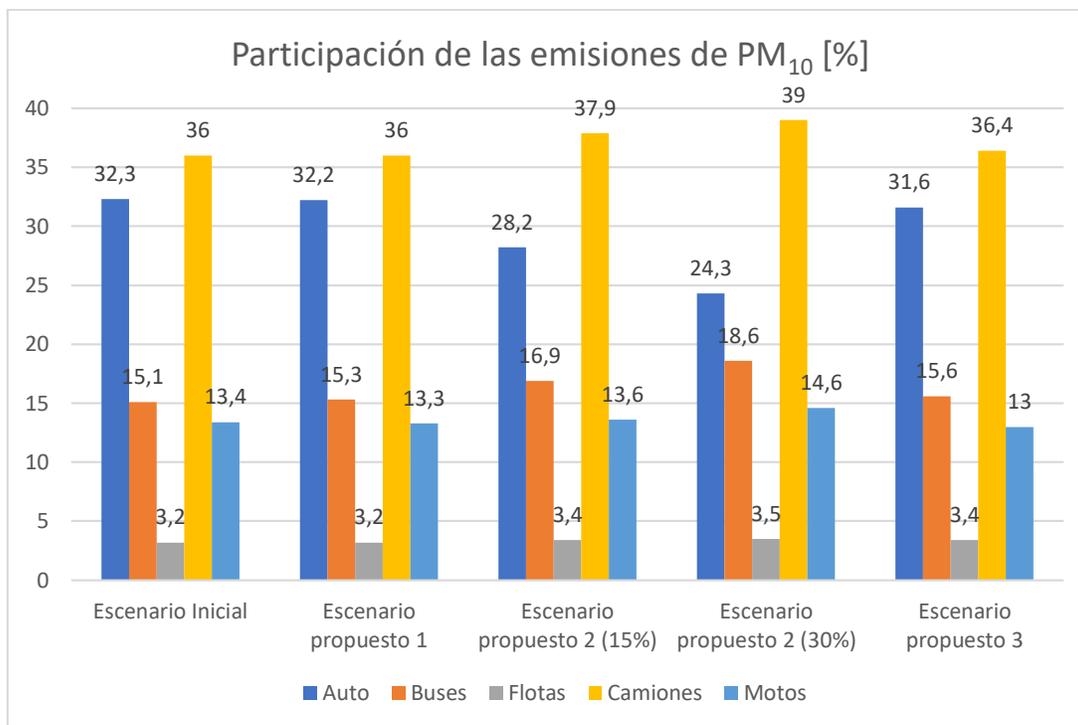


Figura 60: Porcentaje de participación de las emisiones de material particulado por tipo de vehículo para todos los escenarios Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

5.4.2.2. Concentración de contaminantes

Los límites admisibles que se utilizan en este numeral se presentan como una referencia, sin embargo no son directamente comparables debido a que la regulación establece límites permisibles de concentración de contaminantes en general y no discrimina el aporte de las fuentes móviles.

Considerando la regulación establecida para la región en temas de límites permisibles de concentración atmosférica de contaminantes, se evidencia que la zona de estudio se encuentra en una situación crítica en el período pico modelado.

En la Figura 61 se presenta el consolidado de la concentración de emisiones de CO₂ para todos los escenarios modelados, de manera que es posible evidenciar que aunque el escenario 1 presenta un incremento de emisiones, la concentración de CO₂ disminuye en un 14% al incrementar los tiempos efectivos de desplazamiento de los vehículos o tiempos de verde de los semáforos instalados en el sector. Dado que la concentración de dióxido de carbono está estrechamente relacionada con los vehículos que transitan por el sector, el escenario que ofrece la mejor alternativa es aquel que reduce la cantidad de vehículos

presentes en la zona; es decir el escenario propuesto 2 tanto en la reducción del 15% y del 30% de automóviles que son reemplazados proporcionalmente por buses del SITP.

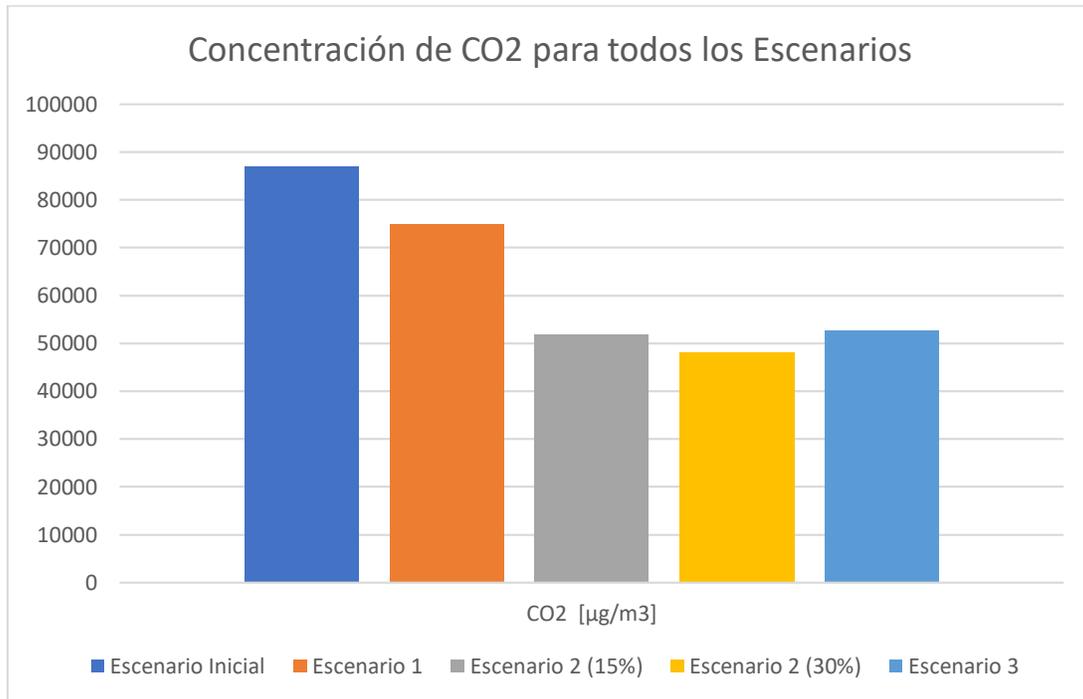


Figura 61: Concentración de dióxido de carbono para todos los escenarios propuestos

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

El óxido de nitrógeno es producto de la quema de combustible a altas temperaturas y considerando que el proceso de combustión es más eficaz a altas temperaturas la distancia de inicio del viaje tiene un factor de incidencia importante en la cantidad de emisiones del sector de estudio.

La situación presentada para el CO₂ se repite para el NO_x, donde ninguno de los escenarios logró reducir las inmisiones hasta el límite permisible y recomendado para evitar afectaciones graves a la salud. Esta información se presenta de manera resumida en la Figura 62.

El óxido de nitrógeno tuvo una leve reducción en el escenario propuesto 1, sin embargo su concentración es un valor muy cercano al real por lo cual no se considera una alternativa viable con el objetivo de la reducción de contaminantes presentes en el medio ambiente.

Las alternativas propuestas en el escenario 2 presentan una reducción entre el 27% y el 34%, sin embargo superan el límite establecido para la regulación colombiana en más de 100 µg/m₃.

El escenario propuesto número 3 representa el intermedio entre la situación inicial y la propuesta en el escenario número 2. Sin embargo, al momento de considerar el alto costo de implementación de esta propuesta no refleja una disminución muy notable.

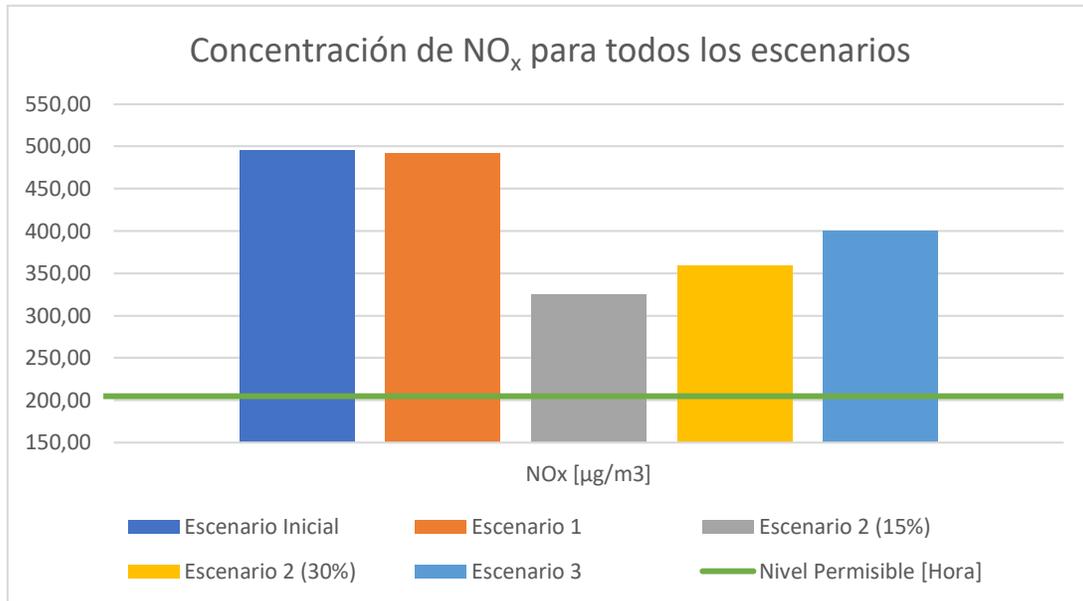


Figura 62: Concentración de óxido de nitrógeno para todos los escenarios propuestos
Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

Por último, está la concentración de material particulado menor a 10 micras o PM₁₀ (Ver Figura 63) el cuál para el corredor de estudio en sus diferentes escenarios se encuentra por debajo del límite permisible. Este contaminante es asociado principalmente por fuentes móviles a los vehículos diésel para lo cual hay una baja proporción en el sector, sin embargo a causa de las fuentes fijas; es decir industrias, chimeneas y demás actividad comercial y humana, es uno de los principales contaminantes presentes por ello sería necesario evaluar el impacto de las industrias ubicadas en el sector como contribuyentes de material particulado a la atmósfera.

Teniendo en cuenta la actividad industrial de la zona, es recomendable la reducción de las inmisiones de material particulado en la mayor medida posible para contrarrestar las generadas por las fuentes fijas del sector.

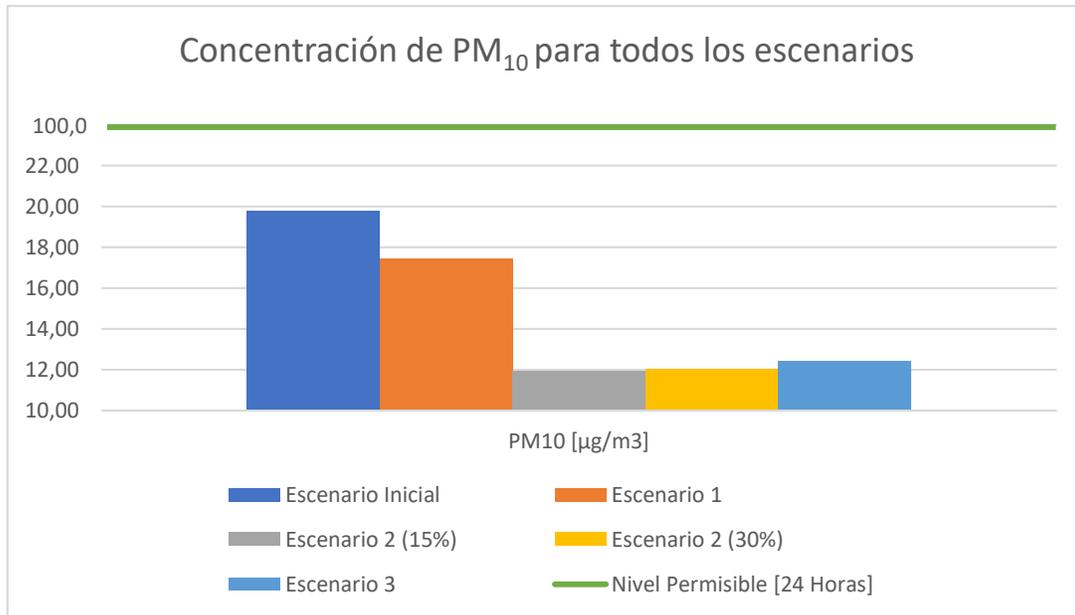


Figura 63: Concentración de material particulado para todos los escenarios propuestos
Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos de la modelación en PTV EnViVer, 2017

5.5. Condiciones generales identificadas

Como resultado de la modelación realizada para el corredor de estudio se identificó que este presenta un grave problema de contaminación ambiental debido en una parte considerable a las fuentes móviles que circulan por él durante el período estudiado. Esta situación sumada a la cantidad de industrias presentes en la zona aumenta el problema para la salud de los habitantes y trabajadores del sector.

Entre los factores de mayor incidencia en la problemática encontramos los largos recorridos que realizan los vehículos al llegar al sector de estudio, por lo que la emisión de óxido de nitrógeno es mayor respecto a los recorridos que inician en puntos cercanos a su destino. Este aspecto no sería tan relevante si la ciudad empezará a desarrollar políticas de transporte sostenible acompañadas de un uso mixto del suelo que le confirieran una estructura urbana de tipo policéntrico.

Otro factor de gran influencia es la tecnología de los buses de transporte público, como es el caso del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) cuya flota vehicular no se renovó totalmente y es obsoleta mecánicamente. Si no se realiza una renovación del parque automotor dispuesto para prestar el servicio de transporte público, será muy poco probable ver una mejora significativa en el sector.

Respecto del transporte público el servicio que se ofrece y la oferta actual no cubre todas las necesidades de desplazamiento de los ciudadanos. Por ello, se ha potenciado el uso del vehículo particular en función de la capacidad adquisitiva de los diferentes usuarios.

Además, desde hace varios años se implementan medidas disuasorias como el pico y placa que a largo plazo incrementan su uso.

En cuanto a la motocicleta, la baja inversión que representa hace que sea un vehículo muy atractivo para diferentes usuarios que encuentran positivo la reducción de los tiempos de viaje así sea realizando maniobras de entrecruzamiento con otros vehículos. Adicionalmente, si se considera los costos del viaje (tiempo de desplazamiento de acuerdo al salario de la persona, el combustible utilizado en el recorrido, el desgaste del vehículo y los mantenimientos asociados) resultan ser más bajos en algunos casos comparados a la tarifa del transporte público y si se considera que las motocicletas no pagan peaje en vías concesionadas las personas que deben cruzar el peaje cada día, se ven altamente beneficiadas.

Finalmente, si se analiza el caso de los vehículos de carga que a pesar de tener restricciones como pico y placa ambiental y horarios preestablecidos deben transitar durante el día en horas pico debido a que no existe una vía alternativa que comunique los municipios del occidente de la ciudad se hace evidente que el corredor de estudio requiere de una serie de intervenciones a nivel de políticas públicas articuladas con el conceso ciudadano.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

En cuanto al programa utilizado para la modelación del corredor de estudio permite una amplia flexibilidad para la definición de características, parámetros y condiciones propias del comportamiento del tránsito y de los conductores.

En PTV Vissim es posible crear la red vial incluyendo características como zonas de reducción de la velocidad, obstáculos que deben superar los vehículos, red semafórica, patrones de conducción, cordialidad de los conductores, modelo de los vehículos, colores, edad promedio de los conductores (relacionado con la agilidad y pericia), entre muchas otras, lo cual permite construir la red vial a la medida de lo que se necesite para recrear el corredor de estudio lo más cercano a la realidad.

La exportación de información para utilizar el módulo de emisiones de PTV EnViVer es bastante amigable con el usuario, permitiéndole modificar desde la edad de los vehículos hasta los factores de emisión de CO₂ lo cual hace que los resultados se adapten aún más a la región de estudio, haciéndolo un modelo confiable para representar la realidad de un corredor. Sin embargo, no hay control sobre el valor de emisiones de PM₁₀ y NO_x que adopta el programa dentro de los rangos que tiene establecidos gracias a la medición de factores de emisión para diferentes tipos de vehículos.

PTV EnViVer pese a ofrecer una gran cantidad de opciones que pueden ser modificadas por el usuario, pasa por alto la modificación de características como la velocidad del viento, la temperatura, horas promedio de sol y sombra, entre otras que pueden tener una significancia relevante en los resultados que arroja el modelo y en su representación de las condiciones reales.

Las emisiones pueden ser estimadas de acuerdo a los diferentes modos de transporte, lo cual evidencia la cantidad desmesurada de vehículos livianos y de carga presentes en el sector y su importante aporte a la degradación del medio ambiente y los efectos en la calidad de vida de los habitantes y trabajadores del sector.

La metodología empleada permite que personas que no sean especialistas en temas ambientales tengan la posibilidad de conocer resultados de emisiones y concentraciones de manera sencilla modificando todos los parámetros requeridos e identificando puntos críticos en la malla vial exportada desde PTV Vissim.

Otra bondad del software de modelación es que facilita evaluar vías con altos volúmenes vehiculares y corredores con una longitud considerable, por eso se puede utilizar para realizar la modelación de autopistas completas y así estimar su impacto en la movilidad y el medio ambiente de manera rápida.

Dentro de las fuentes de consultadas no se encontró información sobre reducción de emisiones en vías con altos volúmenes vehiculares a través de estrategias de gestión del tráfico, por lo cual la propuesta que se presenta en este trabajo contribuye al estado del arte sobre medidas de reducción de emisiones y puede ser evaluada en otros corredores con alta ocupación vehicular.

Los escenarios propuestos comprenden políticas de desarrollo urbano, desarrollo orientado al transporte, mejoramiento del transporte público y adopción de tecnologías para el control y monitoreo del tránsito. Dada su diversidad tanto en costo como en impacto para la reducción de emisiones, existe un lineamiento que indica de acuerdo al porcentaje de emisiones que se quiere reducir qué medida sería más adecuada adoptar, para lo cual se sugiere la siguiente interpretación:

- Si los límites de contaminantes no superan el 10%: se deben evaluar los resultados que se obtienen con la optimización de la red semafórica y el manejo de puntos críticos como acceso a predios y centros de aglomeración de personas a través de planes de manejo de tránsito. De igual manera se sugiere fomentar el uso del transporte público.
- Si los límites de contaminantes se encuentran entre el 10 y el 20%: es posible fomentar el uso del transporte público captando usuarios en función de la reducción de tiempos de viajes. Además, si se considera que los usuarios tienen una disponibilidad de pago media-alta y valoran la comodidad durante su transporte, es importante anexar a la oferta de reducción de tiempo neto de viaje la comodidad y seguridad durante el desplazamiento.
- Si los límites de contaminantes superan el 20% y existe un crecimiento acelerado de la ciudad y su flota vehicular se deben examinar diferentes medidas como: el incremento del uso del transporte público de preferencia masivo, seguido de un plan de ampliación de la red vial a corto, mediano y largo plazo que se acompañe de carriles exclusivos para vehículos de carga o vehículos con alta ocupación vehicular (según sea el caso más crítico). Hacer un estudio de disponibilidad de pago y

preferencia declarada para lograr captar ingresos que mitiguen el costo de construcción y mantenimiento de la infraestructura.

6.2. Recomendaciones

En la medida de lo posible las ciudades deben ser desarrolladas y modificadas siguiendo los principios del Desarrollo Orientado al Transporte (DOT); mezclando los usos del suelo de manera que se generen policentros de trabajo, estudio, diversión, vivienda y servicios, disminuyendo así el número de viajes que se realizan en automóvil y cambiando hacia modos activos (Caminar, pedalear), densificando la oferta de vivienda en lugares cercanos a corredores de transporte público masivo de alta calidad y en general desarrollando espacios urbanos que promuevan el cambio de modo de transporte particular.

Las nubes de humo son un claro indicio de la necesidad de renovar el parque automotor dispuesto para prestar el servicio de transporte público, el cual no tiene periodos de obsolescencia definidos.

Las medidas de pico y placa no representan una reducción eficaz de vehículos dado que en primera medida van dirigidas a personas con una capacidad de pago y endeudamiento suficiente para adquirir un segundo vehículo con el cual podrán realizar sus desplazamientos y como segunda medida no son acompañadas de mejoras en el transporte público, por lo cual los usuarios de vehículo particular que ponderan la comodidad con un factor muy alto no se ven atraídos a migrar hacia un sistema de transporte masivo como el BRT implementado en la ciudad el cual ofrece corredores de tránsito exclusivos disminuyendo los tiempos de desplazamiento.

Deben generarse campañas que mejoren la cultura ciudadana y la percepción de los usuarios hacia el transporte público, de manera que sea la mayoría quien opte por usar este servicio y no su vehículo particular.

Se recomienda implementar políticas de movilización de la carga en los horarios nocturnos donde el flujo vehicular es inferior y los tiempos de recorridos se disminuirían generando tanto beneficios económicos para todos los interesados, como ambientales y de movilidad. Esta alternativa tiene que ir acompañada de horarios y programas que garanticen el correcto descanso de los conductores para evitar problemas de seguridad vial.

Según lo evidenciado en todos los escenarios propuestos, ninguno logra la reducción de las emisiones del corredor para cumplir con la regulación establecida. Sin embargo, a corto

plazo se recomienda evaluar la factibilidad de implementación del segundo escenario propuesto para mejorar la movilidad del sector y la calidad de vida de todos los interesados.

A mediano o largo plazo se recomienda la implementación de la alternativa propuesta en el escenario 3, que considerando el rápido crecimiento de las ciudades dormitorio y su influencia en la movilidad de la ciudad se debe proveer una mayor capacidad para los usuarios del corredor. Si bien a mayor capacidad de las vías se presenta una mayor demanda, se debe considerar el nivel de servicio adecuado proyectado para el crecimiento de la población a largo plazo.

Como medidas complementarias a la propuesta en el escenario 3 se puede dedicar un carril exclusivo a los vehículos de carga en el cual no deban detenerse en las intersecciones a través de semáforos actuados por la cola de vehículos esperando, sistema de transporte público masivo con la configuración del sistema Transmilenio de la ciudad de Bogotá; reduciendo así los tiempos de viaje de los usuarios y motivando a la migración de usuarios de automóviles y motocicletas hacia el transporte público.

Otra opción complementaría es la eliminación de las flotas intermunicipales; contemplando la existencia de un sistema BRT y un terminal de transporte en los predios cercanos al peaje, de manera que muchos usuarios desistieran de usar su vehículo para ingresar y salir de la ciudad. En compañía de esta propuesta se puede considerar la construcción de parqueaderos a bajo costo ubicados antes del ingreso a Bogotá de manera que los habitantes de las ciudades dormitorio vean una mejor opción en dejar su vehículo e ingresar a la ciudad en transporte público.

Es importante no dejar de lado a los modos activos de transporte como la bicicleta y el peatón, motivo por el cual un sistema BRT puede ser una buena alternativa para el sector brindando espacios de parqueo seguros para las bicicletas. Lo anterior considerando que la distancia promedio entre la siguiente troncal de Transmilenio existente en la Av. Calle 26 y la propuesta en la Calle 13 es de 2.8 Km; lo cual permitiría una mayor cobertura del servicio y atracción de usuarios que puedan llegar caminando o en bicicleta a las estaciones del sistema.

Los conductores deben ser capacitados en temas de eco-conducción, lo cual corresponde a una política pública en desarrollo que debe ser apropiada por todas las entidades y divulgada a sus trabajadores que incluso no realicen desplazamientos con fines misionales para la entidad.

En el caso de contar con una estación de monitoreo de la calidad del aire ubicada cerca de la zona de estudio, es recomendable realizar la validación de los valores arrojados por el modelo en cuanto a la concentración y cantidad de emisiones presentes en el ambiente, de manera que sea posible diferenciar que porcentaje pertenece a las fuentes móviles que son objeto de este estudio y que porcentaje corresponde a fuentes fijas como la gran cantidad de industrias presentes en la Calle 13.

Se recomienda validar los factores de emisión de Dióxido de Carbono CO₂ que presenta el Observatorio Ambiental de Bogotá, dado que estos son ingresados al modelo como parámetro para la estimación del material particulado menor a 10 micras y del óxido de nitrógeno y puede tener implicaciones en el grado de cercanía con los resultados que están siendo evaluados.

7. BIBLIOGRAFÍA

Ayala, A. (2011). Tecnología e instrumentos para la reducción de emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero en buses: Experiencia en California. Presentación, Taller Aplicación de Estrategias Ambientales Integradas del Plan del Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá. Bogotá, Colombia.

Baldasano, J., & Millán, M. (2000). Guía para la aplicación de modelos de la calidad del aire. Barcelona (España): Grupo de trabajo sobre evaluación preliminar, posterior y modelización de la calidad del aire. LMA/UPC.

Bharadwaj, S., Ballare, S., Rohit, & Chandel, M. (2017). Impact of congestion on greenhouse gas emissions for road transport in Mumbai metropolitan region. *Transportation Research Procedia*, 25, 3538-3551.

Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. (2016). Organización Mundial de la Salud. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>.

Castillo Mosquera, M., Gandini Ayerbe, M., & Laín Beatove, S. (2012). Simulación de la ruta de transporte y dispersión de emisiones gaseosas provenientes del basurero de Navarro, Cali (Colombia). *Ingeniería Y Universidad*, 16(2), 501-516. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/477/47724934012.pdf>

Clean Air Institute. (2010). Estrategias ambientales integradas - Bogotá. Bogotá: Universidad de los Andes.

Clean Air Institute. (2013). Metodologías para la estimación de emisiones de transporte urbano de carga y guías para la recopilación y organización de datos. Washington D.C.: Clean Air Institute.

Cogua Moreno, M. (2013). Dinámica de las construcciones por usos de la localidad de Fontibón en los años 2002 y 2012. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital.

García Castro, Á., & Monzón de Cáceres, A. (2016). Efectos de la conducción eficiente en el tráfico y las emisiones mediante micro-simulación. Presentación, CIT2016 – XII Congreso de Ingeniería del Transporte. València, Universitat Politècnica de València,

Garber, N., & Hoel, L. (2005). *Ingeniería de tránsito y de carreteras*. México: Thomson.

Gavanas, N., Tsakalidis, A., & Pitsiava-Latinopoulou, M. (2017). Assessment of the marginal social cost due to congestion using the speed flow function. *Transportation Research Procedia*, 24, 250-258.

Janic, M., & Jovanovic, T. (2012). Estimating Some Social and environmental effects from rail/road substitution in the trans-european transport corridors. *Traffic & Transportation*, 24(4), 335-341.

Levy, M., Levy, H., & Solomon, S. (2000). *Microscopic simulation of financial markets*. San Diego, Calif.: Academic Press.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Política de prevención y control de la contaminación del (p. 48). Bogotá D.C.

Molina, M., & Molina, I. (2004). Megacities and Atmospheric Pollution. *Air & Waste Management Association*, 54, 644-680.

New York City Department of Transportation. (2015). Urban freight initiatives. New York: Division of Transportation Planning & Management.

Observatorio Ambiental de Bogotá. (2017). Indicadores ambientales. Bogotá.

Pájaro Zapardiel, A., & Quezada Narváez, R. (2012). Modelación del tránsito vehicular en el sector Bomba el Amparo - Sao la Plazuela, Cartagena por medio del software PTV Vissim (tesis de maestría). Maestría en Ingeniería de vías terrestres. Universidad de Cartagena.

Peñaloza, N., Rojas, N., & Belalcázar, L. (2017). Revisión de inventarios de emisiones con fines de modelización de calidad del aire en Bogotá (p. 18). Grupo De Investigación En Calidad Del Aire, Departamento De Ingeniería Química Y Ambiental. Universidad Nacional De Colombia.

Petro, F., & Konečný, V. (2017). Calculation of Emissions from Transport Services and their use for the Internalization of External Costs in Road Transport. *Procedia Engineering*, 192, 677-682.

PTV Group. (2016). PTV EnViVer (Versión 4.5.5). PTV Group.

PTV Group. (2016). PTV Vissim (Versión 9). PTV Group.

Quaassdorff, C. (2016). Aplicación del modelo de micro simulación PTV VISSIM para el cálculo de emisiones del tráfico. Presentación, Valencia.

Resolución 1111 de 2013, por la cual se modifican los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres (2013). Bogotá, Colombia.

Resolución 2154 de 2010, por la cual se ajusta el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (2010). Bogotá, Colombia.

Resolución 601 de 2006, por la cual se establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión para el territorio nacional (2006). Bogotá, Colombia.

Resolución 610 del 2010, por la cual modifica la norma de calidad del aire o nivel de inmisión para el territorio nacional (2010). Bogotá, Colombia.

Resolución 650 de 2010, por la cual se adopta el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (2010). Bogotá, Colombia.

Resolución 910 de 2008, por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres (2008). Bogotá, Colombia.

Reyes Spíndola, R., & Cárdenas Grisales, J. (2007). Ingeniería de tránsito: Fundamentos y aplicaciones (8th ed.). México: Ediciones Alfaomega.

Sánchez, B., Quaassdorff, C., Santiago, J., Borge, R., Martín, F., & de la Paz, D. et al. (2016). Effects of Traffic Emission Resolution on NO_x Concentration Obtained by CFD-RANS Modelling Over a Real Urban Area in Madrid (Spain). Presentación, HARMO 17 Conference. Budapest, Hungary.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2009). Propuesta metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades de la República Mexicana. Sanfadilla: Instituto Mexicano del Transporte.

Secretaría Distrital de Movilidad. (2017). Contrato de Monitoreo, seguimiento y planeación del tránsito y el transporte de Bogotá D.C. Avenida Centenario.

Shaheen, S., & Lipman, T. (2007). Reducing greenhouse emissions and fuel consumption. IATSS Research, 31(1), 6-20. [http://dx.doi.org/10.1016/s0386-1112\(14\)60179-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0386-1112(14)60179-5)

Smit, R. (2006). An examination of congestion in road traffic emission models and their application to urban road networks (tesis de doctorado). Environmental Planning. Griffith University.

Spiliopoulou, A., Kontorinaki, M., Papageorgiou, M., & Kopelias, P. (2014). Macroscopic traffic flow model validation at congested freeway off-ramp areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 41, 18-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.009>

Tolón-Becerra, A., Pérez-Martínez, P., Lastra-Bravo, X., & Otero-Pastor, I. (2011). A methodology for territorial distribution of CO2 emission reductions in transport sector. *International Journal Of Energy Research*, 36(14), 1298-1313. <http://dx.doi.org/10.1002/er.1871>

Toro, M., Ramírez, J., Quinceno, R., & Zuluaga, C. (2001). Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión CORINAIR. *ACODAL*, 191, 42-49.

United States General Accounting Office. (2003). *Strategies Needed to Address Planning and Financing Limitations*. Washington, D.C.

University College London – Universidad de los Andes. (2013). *Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia*. Bogotá.

Zegeye, S., De Schutter, B., Hellendoorn, J., Breunese, E., & Hegyi, A. (2013). Integrated macroscopic traffic flow, emission, and fuel consumption model for control purposes. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 31, 158-171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2013.01.002>

Zhang, K., Batterman, S., & Dion, F. (2011). Vehicle emissions in congestion: Comparison of work zone, rush hour and free-flow conditions. *Atmospheric Environment*, 45(11), 1929-1939.