Universidad de La Salle
Ciencia Unisalle

Ingeniería Ambiental y Sanitaria | Facultad de Ingeniería

1-1-2016

Evaluación del impacto de los buses híbridos del sistema de transporte masivo en la calidad del aire sobre la Carrera Séptima

Paula Alejandra Ospina Tovar
Universidad de La Salle, Bogotá

Maira Alejandra Rodríguez Rodríguez
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria

Citación recomendada

Ospina Tovar, P. A., & Rodríguez Rodríguez, M. A. (2016). Evaluación del impacto de los buses híbridos del sistema de transporte masivo en la calidad del aire sobre la Carrera Séptima. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/413

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Ambiental y Sanitaria by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LOS BUSES HÍBRIDOS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO EN LA CALIDAD DEL AIRE SOBRE LA CARRERA SÉPTIMA

PAULA ALEJANDRA OSPINA TOVAR
MAIRA ALEJANDRA RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
BOGOTÁ, D.C. 2016

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del Director: Ingeniero Luis Barreto

_____

Firma del Jurado 1

_____

Firma del Jurado 2

Bogotá, D.C. Marzo 2016

DEDICATORIA

A Dios por ser la guía de mi camino, por ser la fuerza interior que me ha llevado a culminar una de las etapas más importantes de mi vida, por darme el regalo de la vida y brindarme la oportunidad de crecer al lado de una familia maravillosa.

A mis padres porque con su lucha incansable, sus valores, su amor y su apoyo incondicional, guiaron mi camino hacía la formación de una profesional integral.

A mi hermana menor por ser un regalo de la vida, la cual es mi motor para ser una mejor persona cada día, siendo para ella una guía en su camino.

A mi compañera de tesis, por ser además mi amiga, brindándome su apoyo incondicional y paciencia en la realización de este proyecto.

Maira Alejandra Rodríguez Rodríguez.

Dios, por brindarme la salud para que cada día luche por el complimiento de mis metas, por ser la luz guía en cada uno de los momentos tristes y especialmente por permitirme cultivar mis valores y ser mejor persona.

A mis padres, porque son la fuente de inspiración en mi crecimiento personal y profesional, por su apoyo incondicional y amor que me acompaña en los momentos tanto alegres como tristes de la vida.

A mi hermano mayor que nunca me abandona en cada momento y acompañarme en este proceso de formación como profesional

A mi compañera de tesis que me apoyó y colaboró en cada uno de los momentos difíciles para el desarrollo del trabajo.

Paula Alejandra Ospina Tovar

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 1
2 OBJETIVOS 3
2.1 Objetivo general 3
2.2 Objetivos específicos 3
3 MARCO TEÓRICO 4
3.1 Contaminación atmosférica 4
3.2 Buses híbridos 5
3.3 Influencia de factores meteorológicos 5
3.4 Contaminación atmosférica a micro escala – Cañón urbano 6
3.5 Inventario de emisiones 9
3.5.1. EMEP/EEA Guìa de Inventario de Emisiones de la Agencia Europea Medio Ambiental 9
3.5.2. Guía para la Preparación de Inventarios de Emissión - Nueva Zelanda 10
3.5.3. Centro de Información para Inventarios y Factores de Emisiòn de la EPA 10
3.6 Estándar de emisión euro para vehículos 10
3.7 Modelado en cañón urbano 11
3.7.1. ENVI-met 3.1 13
3.8. Antecedentes 13
4. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO 19
4.1 Geografía de la zona 20
4.2 Fuentes de emisión móviles sobre la carrera séptima. 22
5 MARCO NORMATIVO 24
6 METODOLOGÍA 26
6.1 Estadística descriptiva y correlacional de los datos 26
6.2 Recolección y composición de aforos vehiculares 27
6.3 Estimación de las emisiones para MP10 28
6.4 Modelamiento en cañón urbano 30
7 RESULTADOS Y ANÁLISIS 32

7.1 Estadística descriptiva y correlacional 32
7.1.1. Estadística descriptiva 32
7.1.2. Estadística correlacional 40
7.2 Aforos vehiculares y parque automotor 43
7.3 Cálculo de emisiones 49
7.3.1. Emisiones para MP10 por tecnología EURO y tipo de combustible 49
7.4.2. Emisiones horarias calculadas y Simulación en ENVI-met 3.1 52
7.5 Modelamiento en cañón urbano 53
7.5.1. Geografía Urbana de la zona para simulación ENVI-met 3.1 53
7.5.2. Concentración de MP10 y comparación de puntos de medición (Calle 45 y Calle 33) 54
7.5.3 Validación del modelo 56
8 CONCLUSIONES 60
9 RECOMENDACIONES 63
10 BIBLIOGRAFIA 64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estándares de emisión Euro para vehículos (g/Km) 10
Tabla 2. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio 24
Tabla 3. Límites máximos de emisión permisibles para vehículos livianos y medianos accionados con gasolina en prueba dinámica 25
Tabla 4. Límites máximos de emisión permisibles para vehículos pesados accionados con gasolina en prueba dinámica 25
Tabla 5. Caracterización de los vehículos que transitan por la carrera séptima. 27
Tabla 6. Revisión de datos de contaminantes monitoreados en la calle 45 32
Tabla 7. Promedios mensuales de contaminantes en la calle 45 33
Tabla 8. Revisión de datos meteorológicos medidos en la calle 45 34
Tabla 9. Revisión de contaminantes monitoreados Calle 33 34
Tabla 10. Promedio Mensuales. Calle 33 35
Tabla 11. Revisión de datos meteorológicos Monitoreados Calle 33 35
Tabla 12. Correlación parcial de variables meteorológicas y contaminantes en la carrera 7 con calle 45 41
Tabla 13. Correlación parcial de variables meteorológicas y contaminantes en la carrera 7 con calle 33 42
Tabla 14. Aforo de los Buses Híbridos del SITP sobre la Carrera 7 47
Tabla 15. Emisiones de la Calle 45 – Sin buses híbridos 50
Tabla 16. Emisiones de la Calle 45 – Con buses híbridos 50
Tabla 17. Emisiones de la Calle 33 – Sin buses híbridos 51
Tabla 18. Emisiones de la Calle 33 – Con buses híbridos 51
Tabla 19. Emisiones horarias Escenario 1 – Calle 45 SIN buses híbridos 52
Tabla 20. Emisiones horarias Escenario 2 – Calle 45 CON buses híbridos 52
Tabla 21. Emisiones horarias Escenario 3 – Calle 33 SIN buses híbridos 52
Tabla 22. Emisiones horarias Escenario 4 – Calle 33 CON buses híbridos 52
Tabla 23. Concentración de MP10 y variables meteorológicas utilizadas en ENVI-met 3.1 para la Calle 45 55
Tabla 24. Concentración de MP10 y variables meteorológicas utilizadas en ENVI-met 3.1 para la Calle 33 56

Tabla 25. Datos de concentración de MP10 SIN buses híbridos. 57
Tabla 26. Datos de concentración de MP10 CON buses híbridos 58

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Oferta de transporte público sobre la carrera séptima.....23
Gráfica 2. Diagrama de caja MP10. Calle 45.....37
Gráfica 3. Diagrama de caja SO_2. Calle 45.....37
Gráfica 4. Diagrama de caja temperatura. Calle 45 38
Gráfica 5. Diagrama de caja velocidad del viento. Calle 45.....38
Gráfica 6. Diagrama de caja MP10. Calle33.....39
Gráfica 7. Diagrama de caja SO_2. Calle 33.....39
Gráfica 8. Diagrama de caja Temperatura. Calle 33.....40
Gráfica 9. Diagrama de caja Velocidad del viento. Calle 33.....40
Gráfica 10. Flujo vehicular carrera 7 con calle 45. Marzo 16 de 2014.....44
Gráfica 11. Distribución en porcentaje de la cantidad de vehículos por categoría. Carrera 7 con calle 45 44
Gráfica 12. Flujo vehicular carrera 7 con calle 33. Mayo 29 de 2014.....45
Gráfica 13. Distribución en porcentaje de la cantidad de vehículos por categoría. 45
Gráfica 14. Relación entre los valores de MP10 Simulado y Observado para flota vehicular SIN buses híbridos 57
Gráfica 15. Relación entre los valores de MP10 Simulado y Observado para flota vehicular SIN buses híbridos 59

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Dispersión de Contaminantes en un Cañón Urbano 7
Ilustración 2. Representación gráfica del efecto Cañón Urbano.....8
Ilustración 3. Geografía urbana de la carrera 7 con calle 45.....21
Ilustración 4. Geografía urbana de la cra. 7 con calle 33.....22
Ilustración 5. Representación gráfica de cada zona en el modelo ENVI-met 3.1.....53

GLOSARIO

Bus Híbrido: Son vehículos en los cuales la energía eléctrica que los impulsa, proviene de baterías y, alternativamente, de un motor de combustión interna que mueve un generador e impulsa las ruedas directamente. Un sistema híbrido combina la propulsión de un motor eléctrico con otra fuente de energía como un motor de combustión interna, una turbina o una pila de combustible y un sistema de almacenamiento de energía. El combustible más utilizado para el motor de combustión interna es diésel de bajo contenido de azufre, aunque también se pueden utilizar otras fuentes de energía como gasolina, gas natural, biocombustibles o biogás (Callaghan & Lynch, 2005).

Calentamiento Diferencial: Propiedad que tienen las superficies para calentarse y enfriarse a tasas distintas. (Atkins & Jones, 2005)

Calidad del Aire: Se define en aire como el fluido que forma la atmósfera de la Tierra, constituido por una mezcla gaseosa cuya composición es, cuando menos, de veinte por ciento (20%) de oxígeno, setenta y siete por ciento (77%) de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua, en relación volumétrica (Decreto 948 de 1995).

Cañón Urbano: Es una calle relativamente estrecha con edificios alineados de forma continua a lo largo de ambos lados. (Ahmad, Khare, & Chauddry, 2005).

Emisiones: Descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, provenientes de una fuente fija o móvil. (MAVDT, 2010)

ENVI-met: es un modelo CFD (Dinámica Computacional de fluidos), desarrollado para diseñar y evaluar las diferentes interacciones a micro escala, del diseño urbano y sus diferentes superficies donde tienen influencia factores meteorológicos y antrópicos como la contaminación. (Chaparro, Gonzales, Ortiz, & Torrijos, 2014)

Fuente de Emisión: Actividad, proceso u operación, realizado por los seres humanos, o con su intervención, susceptible de emitir contaminantes al aire. (MAVDT, 2010)

Fuente Móvil: Es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse. Son fuentes móviles los automóviles, buses, camiones, motocicletas, los motociclos y los ciclomotores. (MAVDT, 2010)

Humedad Relativa: Es la relación, expresada en porcentaje, entre la cantidad de vapor de agua realmente existente en la atmosfera y la que existiría si el aire estuviera saturado a la misma temperatura. Esta relación se obtiene a partir de la tensión de vapor actual y la tensión máxima de saturación. (Ayllón, 1995)

Óxidos de Azufre (SO_x): El dioxido de azufre y el trioxido de azufre son los oxidos dominantes del azufre presentes en la atmosfera. El dioxido de azufre es un gas incoloro, no flamable y no explosivo que produce una sensacion gustatoria a concentraciones de 0.3 a 1.0 ppm en el aire. El dioxido de azufre se convierte parcialmente a trioxido de azufre o acido sulfurico y a sus sales mediante procesos fotoquimicos o cataliticos en la atmosfera. El trioxido de azufre forma acido sulfurico con la humedad del aire. (Wark & Warner, 2006)

El monóxido de carbono (CO): El monoxido de carbono es un gas inodoro e incoloro. Es muy estable y tiene una vida media en la atmosfera de 2 a 4 meses. El monóxido de carbono es el contaminante del aire más abundante en la capa inferior de la atmósfera, sobre todo en el entorno de las grandes ciudades. Es un gas incoloro, inodoro e insípido y su punto de ebullición es de -192° C. Presenta una densidad del 96.5 por ciento de la del aire, siendo un gas muy ligero que no es apreciablemente soluble en agua. Es inflamable y arde con llama azul, aunque no mantiene la combustión. El monoxido de carbono es un veneno que inhalado priva a los tejidos del cuerpo del oxigeno necesario. (Wark & Warner, 2006)

Los óxidos de nitrógeno (NOx): De los seis o siete oxidos de nitrogeno, el oxido nitrico (NO) y el dioxido de nitrogeno (N_2O) son importantes contaminantes del aire. El dioxido de nitrogeno actua como un fuerte irritante y a iguales concentraciones es más dañino que el NO. Sin embargo, a concentraciones encontradas en la atmosfera, el NO_2 es solo potencialmente irritante y potencialmente relacionado con la fibrosis pulmonar cronica. (Wark & Warner, 2006)

Material particulado (PM): Particula es un termino que se emplea para describir las materias solidas y liquidas, dispersas y arrastradas por el aire, mayores que las moleculas individuales (las moleculas miden aproximadamente 0,0002 µm de diametro) pero menores de 500 µm (1 µm = 1 micrón = 10^{-4} cm). Una porcion de las particulas

introducidas en la atmosfera por las actividades del hombre sirven como nucleos, lluvia o nieve. (Wark & Warner, 2006)

ABREVIATURAS

EMC: Error Cuadrático Medio.

ENVI-met 3.1: Modelo de dinámica computacional de fluidos, ENVI-met 3.1.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

MP10: Material Particulado menor a 10 micras.

SO_2: Dióxido de azufre.

CO: Monóxido de Carbono.

SVCA: Sistema de Control y Vigilancia de Calidad del Aire.

$\mu g/m^3$: Microgramos sobre metro cúbico.

mg/m*h: Miligramo sobre metro por hora.

mg/m*s: Miligramos sobre metro por segundo.

RESUMEN

El presente proyecto busca determinar el cambio generado en la calidad del aire por la inclusión de los buses híbridos de Transmilenio sobre la carrera séptima; partiendo de la recolección de datos de la Unidad Móvil de Calidad del Aire del IDEAM que fue ubicada en dos escenarios, el primero en la carrera 7 con calle 45 (diciembre de 2013 a mayo 20 de 2014) y el segundo en la carrera 7 con calle 33 (mayo 27 de 2014 a septiembre de 2014), la cual monitorea: material particulado menor a diez micras MP10, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Así mismo esta unidad móvil mide variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento. Adicionalmente se obtuvo información de los aforos vehiculares de cada zona para tener una distinción por tipología de los vehículos, identificando aquellos que generan un mayor aporte a la contaminación atmosférica e identificando a su vez el impacto de los buses híbridos sobre la carrera séptima. A partir de esta recolección se realizó un análisis estadístico descriptivo y correlacional para determinar la influencia de las variables meteorológicas en el comportamiento de los contaminantes; se observó que la velocidad del viento y la temperatura son variables importantes en el fenómeno de dispersión en un cañón urbano, siendo actores importantes en la mezcla vertical observada en horas de la tarde donde los valores de contaminantes alcanzan sus picos mínimos y las variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento sus picos máximos. Finalmente se generaron dos escenarios (sin buses híbridos y con buses híbridos) en cada punto de medición (calle 45 y calle 33), para establecer el impacto el impacto que ha tenido la implementación de este sistema de transporte en la calidad del aire sobre la carrera séptima en la ciudad de Bogotá, esto con ayuda de simulaciones para 10 días, de los cuales se tomaron 3 horas pico en la mañana, realizadas con el modelo ENVI-met, el cual toma como base las emisiones de MP10 y las condiciones meteorológicas específicas. A partir de esto se observó una reducción baja de las emisiones de MP10 en los escenarios con buses híbridos, esto se puede atribuir a que la flota de 200 vehículos híbridos es muy baja para que se experimente una reducción significativa de emisiones de los contaminantes.

ABSTRACT

This project seeks to determine the change generated in air quality by including hybrid buses of Transmilenio on the 7th race, based on the collection of data from the Mobile Unit Air Quality IDEAM which was located on two stages: First on 45 street (December 2013 to 20 May 2014) and the second on 33 street (May 27 to september of the 2014) which monitors: particulate matter less tan ten microns PM10, nitrogen oxides, sulfur dioxide and carbón monoxide. Also this mobile unit measured meteorological variables such as temperature, relative humidity, wind and speed direction. Addiotionally information was obtained to vehicular traffic to each zone to have a distinction by tye of vehicle, identifying in turn the impact of hybrid buses on the 7th race. From this collection a descriptive and correlational statistical analysis was performed to determine the influence of meteorological variables on the behavior of pollutants. it was observed that the wind speed and temperature are important variables in the phenomenon of dispersion in an urban canyon, being major players in the observed in the afternoon where pollutant values reach their minimum peaks and weather variables such as vertical mixing temperature, relative humidity and wind speed their peaks Finally, two scenarios were generated (without hybrid buses and hybrid buses) at each measurement point (45 Street and 33 Street), to establish the impact the impact it has had the implementation of this transport system on air quality on seventh Avenue in the city of Bogota, that with the help of simulations for 10 days, which took 3 peak hours in the morning, made with the ENVI-met model, which builds on emissions PM10 and weather conditions specific. From this low emissions reduction MP10 in scenarios with hybrid buses observed, this can be attributed to the fleet vehicles 200 is very low hybrids for a significant reduction of emissions of pollutants is experienced.

1 INTRODUCCIÓN

En las grandes ciudades como Bogotá, el impacto sobre calidad del aire está asociada, principalmente, a la emisión por diferentes fuentes como las móviles, siendo estas las que más impacto generan. La contaminación se presenta principalmente por las altas concentraciones de material particulado inferior a 10 micras, MP10, sujeta a la combustión particularmente de diésel con altas concentraciones de azufre, en el mismo. La ciudad de Bogotá cuenta con el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire - SVCA - de Bogotá, el cual permite recolectar información sobre la concentración de contaminantes de origen antropogénico y natural, así como el comportamiento de los factores meteorológicos que regulan la distribución de los mismos en la atmósfera de la ciudad. De igual manera, el IDEAM, la Secretaría Distrital de Ambiente y TRANSMILENIO suscribieron el Convenio Interadministrativo No. 026 de 2010 (IDEAM) – No. 176 de 2010 (TRANSMILENIO), para "Coordinar y ejecutar las actividades tendientes a apoyar la realización de una investigación para evaluar las condiciones actuales de la calidad del aire, estableciendo metodologías, protocolos y procedimientos necesarios para realizar el monitoreo, control y seguimiento de la calidad del aire en corredores de transporte público en Bogotá". Bajo la necesidad de generar una contribución que minimice el impacto generado sobre la calidad del aire, Transmilenio con el Sistema de Transporte Integrado (SITP) de Bogotá ha venido implementando los buses híbridos, que funcionan con un motor eléctrico y un motor de combustión interna (diésel con bajo contenido en azufre). Dicha inclusión se comenzó a realizar a partir del año 2014, en el mes de junio con una flota de 200 buses que se encuentran circulando por los corredores viales de la ciudad, principalmente sobre la Carrera Séptima

Partiendo de esta premisa el presente proyecto tiene como finalidad realizar una evaluación sobre la posible contribución que se pueda generar a partir de la inclusión de los buses híbridos en el impacto en la calidad del aire, específicamente los que transitan sobre la carrera séptima, para esto, además de la recopilación de información, se cuenta con el apoyo del IDEAM, quienes proveen los datos necesarios para el análisis estadístico descriptivo y correlacional que corrobore las conclusiones generadas,

igualmente la utilización del modelo ENVI-met que permita simular y visualizar el efecto Cañón Urbano generado sobre cada zona de estudio, a partir de las emisiones de MP10 y las variables meteorológicas presentes en cada punto de medición (calle 45 y calle 33).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar el impacto producido en la calidad del aire por el sistema de transporte masivo híbrido que transita sobre la carrera séptima.

2.2 Objetivos específicos

2.2.1. Establecer la influencia de los factores meteorológicos medidos en la dispersión de los contaminantes monitoreados sobre la carrera séptima.

2.2.2. Evaluar y analizar el comportamiento de los contaminantes emitidos por las fuentes móviles que transitan por la zona de estudio, teniendo en cuenta los resultados generados por el modelo ENVI-met.

2.2.3. Establecer el impacto en la calidad del aire por los vehículos híbridos sobre la carrera séptima.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica se define como la presencia en la atmosfera de uno o más contaminantes o sus combinaciones, en cantidades tales y con tal duración que sean o puedan afectar la vida humana, de animales, de plantas, o de la propiedad, que interfieran en el goce de la vida, la propiedad o el ejercicio de las actividades (Wark & Warner, 2006). En la ciudad de Bogotá unas de las principales fuentes corresponden a las fuentes móviles que corresponden al transporte automotor público, particular y de carga.

Las emisiones producidas por los automotores no sólo se limitan a las que salen del tubo de escape, también hay que tener en cuenta el escape de gas de los pistones que pueden generar monóxido de carbono o hidrocarburos, el sistema de combustible donde las emisiones pueden emerger desde el carburador, la entrada del aire de la inyección de combustión y el tanque de combustible, emisiones producidas por el desplazamiento del automotor en un camino con polvo o material particulado, el desgaste de los neumáticos que aportan a partículas suspendidas, el desgaste de los frenos, etc. Para un motor de cuatro tiempos accionado por gasolina, se presentan emisiones de CO por el mismo proceso interno de combustión incompleta; sin embargo, esto dependerá de si la mezcla aire/combustible es rica o pobre. El material particulado, además de ser producto de la combustión, depende de los desgastes del motor, el aceite lubricante y la dilución. Para un motor que funciona con diesel, el sistema de combustión es más eficiente ambientalmente pues en términos de contaminación por CO, como la mezcla es pobre y consume menos combustible, va a producir menos CO y CO_2 que un motor a gasolina. El problema radica en la presencia de azufre en el combustible, sin embargo, ya se han estado tomando medidas mundiales para erradicar el combustible con este elemento (Tyler, Bohórquez, Suescún, & Velásquez, 2013).

Son producto de las nombradas combustiones los siguientes contaminantes: Dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas suspendidas (MP), hidrocarburos (HC) y dióxido de azufre (SO_2). Las emisiones de fuentes móviles son una causa importante en la degradación de la calidad del aire, debido a que la flota de transporte público se caracteriza por su alto aporte a las

emisiones de Material Particulado, SO_2 y NO_x. Según el inventario de emisiones de fuentes móviles, para el 2008 este sector aportaba cerca del 40% de las emisiones de Material Particulado y más del 20% de las emisiones de NO_x.

Otras variables que están involucradas en la producción de contaminantes como: la edad de los automotores los cuales definen en ellos mismos la tecnología que se está utilizando y los comportamientos de conducción, estos componentes son los que precisan que tipo de decisión se debe tomar para mejorar la calidad del aire en la ciudad.

3.2 Buses híbridos

Ante esta situación los vehículos híbridos proporcionan una alternativa a la producción de emisiones, ya que el motor eléctrico es el responsable de la propulsión del vehículo lo que permite una velocidad constante del motor diesel. Como el motor diesel no es utilizado para manejar el vehículo, la aceleración y el estilo de conducir no son relevantes en estos tipos de vehículos y las emisiones son reducidas (Tyler, Bohórquez, Suescún, & Velásquez, 2013).

Diferentes empresas fabricantes ofrecen alternativas de marcas para buses híbridos, en Bogotá se adoptó el Volvo 7700 híbrido tiene un ahorro de combustible de hasta el 30%. Pueden contribuir a mejorar la calidad del aire y reducir las emisiones de gases efecto invernadero. Así mismo, el uso de buses de alta capacidad contribuye a mejorar el uso del espacio público, ya que un bus biarticulado puede transportar la misma cantidad de pasajeros que 100 vehículos particulares, contribuyendo de esta manera a reducir los niveles de congestión y ruido. (Lema, 2012)

De acuerdo a estudios realizados en Nueva York y Manhattan, se observó que las emisiones del transporte híbrido eran 97% más bajo para CO, 36% menos para NO_x, 43% más bajo para HC, 50% más bajo para PM, y el 19% más bajo para CO2. (Hallmark, Wang, Qui, & Sperry, 2012)

3.3 Influencia de factores meteorológicos

Estos contaminantes son transportados por el viento hasta llegar al receptor, durante ese transporte ocurren dos procesos: mezcla por turbulencia y estiramiento de la columna de humo, además se presentan movimientos serpenteantes (lo que significa que la pluma no puede seguir una verdadera línea recta entre la fuente y el receptor, pero puede deambular un poco sobre esa línea, ya que la dirección del viento fluctúa de su

valor medio durante el tiempo de tránsito entre los dos puntos), la suma de estos procesos se llama difusión. (Vallero, 2008). Estos procesos dependen, igualmente, de diversos factores meteorológicos los cuales son principalmente: temperatura, velocidad y dirección del viento, y precipitación.

La velocidad del viento es el parámetro más importante en la renovación del aire sobre la superficie y en el transporte de los diversos contaminantes. La velocidad del viento puede afectar en gran medida la concentración de contaminantes de la zona, de modo que, a mayor velocidad del viento, menor concentración de contaminantes; por lo cual, si se presenta un viento moderado o fuerte en la superficie, se dará una buena mezcla favoreciendo la dispersión de los contaminantes disminuyendo así su concentración. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2010).

Otro factor influyente en los movimientos de las masas de aire es la temperatura siendo el gradiente de temperatura el que condiciona el movimiento ascendente o descendente de una capa, si la temperatura baja bruscamente, la atmósfera se vuelve inestable, lo que facilita la dispersión de los contaminantes. Por el contrario, la estabilidad atmosférica en la capa de aire favorece la aparición del fenómeno llamado inversión térmica que impide la dispersión de los contaminantes y conduce a niveles altos de contaminación. Cuando se emiten contaminantes al aire en esas condiciones, se acumulan debido a que los fenómenos de transporte y difusión ocurren demasiado lentos, que podrían provocar episodios de contaminación atmosférica con consecuencias graves para la salud de las personas. (Perez, Alonso López, & García Calabuig, 1990)

3.4 Contaminación atmosférica a micro escala – Cañón urbano

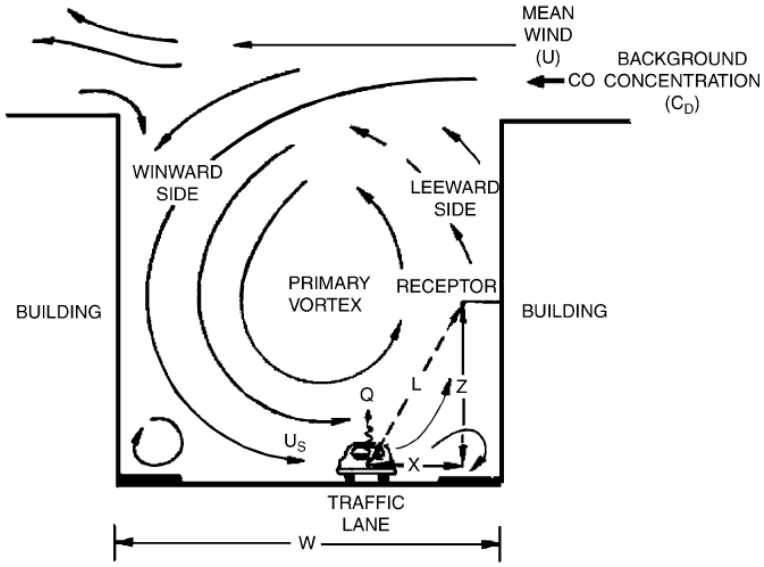
El término cañón o corredor urbano idealmente se refiere a una calle relativamente estrecha con edificios alineados de forma continua a lo largo de ambos lados. (Ahmad, Khare, & Chauddry, 2005). Sin embargo, el aumento en las emisiones de las fuentes vehiculares y la escasa ventilación natural se facilita la gran acumulación de contaminantes en las intersecciones de las calles de un cañón urbano, afectando a la población residente y los peatones en las inmediaciones de las calles.

- Ventilación de un cañón urbano:

El flujo de viento de un cañón urbano puede analizado de formas: (1) el *sinóptico* se produce encima de las condiciones de viento en el techo de las edificaciones y (2) el

flujo del viento local dentro la cavidad del cañón. Dependiendo del viento sinóptico (o velocidad de flujo libre), se pueden identificar tres condiciones principales de dispersión: (i) condiciones de poco viento, inferiores a 1.5 m/s; (ii) perpendicular o cerca de flujo perpendicular para vientos mayores a 1.5 m/s soplando en un ángulo de más de 30° a los ejes del cañón, y (iii) paralelo o cerca al flujo paralelo para vientos de más de 1.5 m/s que soplan de todas las otras direcciones. En el caso de flujo perpendicular, el lado a contra viento del cañón se suele llamar de sotavento y hacia la dirección del viento: barlovento. (Vardoulakis, Pericleous, Gonzalez-Flesca, & E.A Fisher, Modelling Air Qualityin Street Canyons: A review, 2003).

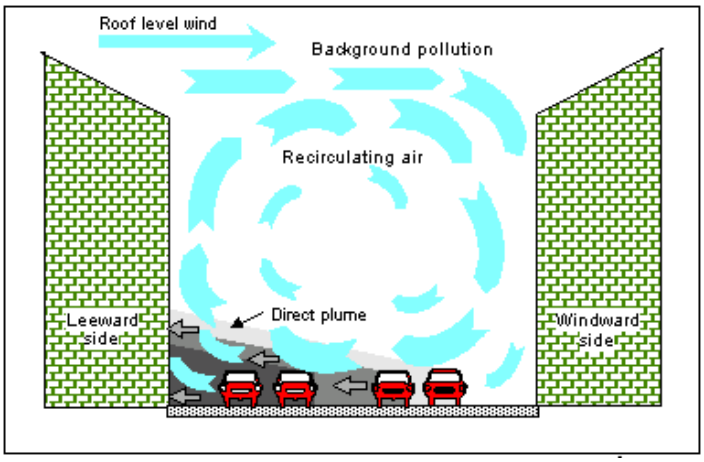
Ilustración 1. Dispersión de Contaminantes en un Cañón Urbano



Fuente: Vardoulakis, 2003

La corriente de viento dentro del cañón puede ser perpendicular, paralela o a cierto ángulo respecto el eje longitudinal del cañón. En caso de una corriente perpendicular al eje del cañón, se genera un solo vórtice y es conducido por la corriente de aire ambiental. La dirección de la velocidad del viento medida a lo largo del cañón es casi siempre opuesta a la dirección del viento en el exterior del cañón. En cuanto a las corrientes paralelas, estas generan un viento dominante a lo largo del eje del cañón, con posibles elevaciones, subidas a lo largo de las paredes del cañón. (Energía en el medio ambiente urbano , 2014).

Ilustración 2. Representación gráfica del efecto Cañón Urbano



Fuente: Department of Environmental Science, Aarhus University

- Dispersión de Contaminantes en un cañón urbano

La dispersión de los contaminantes gaseosos generalmente depende de la relación en la que la calle intercambia aire verticalmente con el nivel del techo y lateralmente con la conexión entre calles. En cañones regulares, la ventilación es mínima y relativamente ineficaz en la eliminación de contaminantes. El aumento de las concentraciones se da generalmente a sotavento debido a la acumulación de contaminantes transportados localmente por el gran vórtice de viento que cubre la mayor parte del cañón. Podrían crearse puntos calientes de contaminación menores en pequeñas cavidades donde los fenómenos de recirculación adicionales pueden tomar lugar. (Hunter, G.T, & Watson, 1992) En condiciones de viento perpendiculares las concentraciones son generalmente un factor de dos veces mayor para el sotavento que para el lado de barlovento. Diversos experimentos de visualización de flujo han demostrado que la fuerza de los vórtices del cañón varía, y, como resultado, los contaminantes son arrastrados periódicamente fuera del cañón. Es más probable que ocurran concentraciones máximas a nivel de la calle cuando el viento sinóptico es paralelo al eje de la calle. (Riain, Fisher, C.J, & Littler, 1998)

Los vientos sinópticos bajos, crean una situación meteorológica que favorece la contaminación del aire incorporado en zonas urbanas Hay evidencia de que cuando la velocidad del viento sinóptico es inferior a aproximadamente 1,5 m/s; el vórtice de

viento dentro del cañón tiende a desaparecer y el aire se estanca en la calle. En ese caso, la turbulencia mecánica inducida por vehículos en movimiento, así como las condiciones de estabilidad atmosférica podrían desempeñar un papel significativo en la dispersión de contaminantes. Se espera que las partículas finas y especialmente las ultrafinas se dispersen en el aire como gases. Las partículas de mayor tamaño, sin embargo, se ven muy afectadas por la gravedad y por lo tanto pueden tener un tiempo de residencia más corto en el aire. (Hunter, G.T, & Watson, 1992)

3.5 Inventario de emisiones

El inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos es un instrumento estratégico de gestión ambiental ya que permite identificar quiénes son los generadores de emisiones y su aporte de contaminantes a la atmósfera por sector. (SERMANAT, 2011). El desarrollo de un inventario completo de emisiones es un paso importante en un proceso de gestión de la calidad del aire. Los inventarios de emisiones se utilizan para ayudar a determinar las fuentes significativas de contaminantes del aire, establecer tendencias de las emisiones a través del tiempo, el objetivo de las medidas reglamentarias, y estimar la calidad del aire a través de modelos de dispersión ordenador (EPA, 2015).

Un factor de emisión puede utilizarse para estimar las emisiones cuando los datos reales de emisiones no está disponible. En la mayoría de casos, estos factores son simplemente promedios de todos los datos disponibles de calidad aceptable, y se supone por lo general que sea representativo de los promedios a largo plazo para todas las instalaciones en la categoría de fuente. (EPA, 2015).

3.5.1. EMEP/EEA Guìa de Inventario de Emisiones de la Agencia Europea Medio Ambiental

En Europa, la tercera edición de la guía de inventario de emisiones (realizado por el grupo de trabajo de la Agencia Europea Medio Ambiental de las Naciones Unidos sobre los inventarios de Emisiones y Proyecciones), ofrece una guía completa de la metodología de inventario de emisiones atmosféricas. (EPA, 2015). Esta guía para elaborar inventarios de emisiones atmosféricas. Proporciona una orientación clara sobre la estimación de emisiones procedentes de fuentes de emisión naturales y antropogénicas. Se ha diseñado para facilitar la presentación de los inventarios de

emisiones de los paises firmantes del Convenio de Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Larga distancia (LRTAP), así como para la preparación de informes en virtud de la Directiva europea sobre techos nacionales de emisión. (EEA, 2013).

3.5.2. Guía para la Preparación de Inventarios de Emissión - Nueva Zelanda

Nuevaa Zelanda también tiene una Guía para la Elaboración de Inventarios de Emisiones, que es una guía paso a paso para la preparación de inventarios de emisiones que contiene información sobre el propósito, proceso, la metodología y la aplicación de las investigaciones de los inventarios de emisiones. (Wilton, 2001)

3.5.3. Centro de Información para Inventarios y Factores de Emisiòn de la EPA

Contiene información sobre los inventarios de emisiones, factores de emisión, software y herramientas utilizadas para los inventarios de emisiones y el modelamiento de las mismas. Se crea una visión general de la categoría de fuentes móviles y métodos específicos para identificar, estimar las emisiones, establecer y mantener un inventario útil. En la documentación de EPA AP-42 existe información sobre la Compilación de Factores de Emisión de Contaminantes del aire. (EPA, 2015)

3.6 Estándar de emisión euro para vehículos

Existen estándares de emisiones en el mundo para las fuentes móviles como las EURO y las dadas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Las normas EURO tienen estándares de concentración para CO, Hidrocarburos, NO_x, MP10 y empezaron a regir desde 1992. Clasifican las fuentes móviles en encendido por chispa o por compresión, entre otras clasificaciones. En Colombia todavía se manejan tecnologías Euro II y III y en algunos casos de transporte masivo articulado, se tienen buses con Euro IV (Tyler, Bohórquez, Suescún, & Velásquez, 2013).

Tabla 1. Estándares de emisión Euro para vehículos (g/Km)

Estándar	Año	CO	THC	NOX	MP
EURO I	1992	9,1	1,98	14,4	0,648
EURO II	1998	7,2	1,98	12,6	0,270
EURO III	2000	3,8	1,188	9,0	0,180
EURO IV	2005	2,7	0,828	6,3	0,036
EURO V	2008	2,7	0,828	3,6	0,036
EEV		2,7	0,450	3,6	0,036
EURO VI	2013	2,7	0,234	0,7	0,018

Fuente: Exhaust emissions of Transit Buses (Cooper, Arioli, Carrigan, & Jain, 2012)

La guía de Inventario de Emisiones de la Contaminación del aire EMEP/EEA proporciona una serie de directrices que permiten aplicar métodos de estimación de emisiones en los estudios de contaminación del aire para Europa, se ha venido actualizando durante algún tiempo y ahora es una herramienta esencial que permite la compilación de elementos comparables y consistentes. (EEA, 2013)

3.7 Modelado en cañón urbano

Los modelos son útiles en la evaluación de la calidad del aire en un área determinada y la gestión del tráfico, la planeación urbana, la interpretación de los datos de vigilancia, predicción de la contaminación, estudios de exposición, etc. Los modelos pueden ser clasificados en grupos de acuerdo a sus condiciones físicas o principios matemáticos (por ejemplo, a escala reducida, caja, Gauss, CFD) y su nivel de complejidad (por ejemplo, la detección, semi empírico, numérico). (Vardoulakis, Pericleous, Gonzalez-Flesca, & E.A Fisher, Modelling Air Qualityin Street Canyons: A review, 2003).

- Modelos de pluma gaussianos

Estos son conjuntos de ecuaciones que describen el campo tridimensional de concentración generada normalmente por una fuente puntual. Suponen que las concentraciones de una fuente que emite continuamente son proporcionales a la tasa de emisión, inversamente proporcional a la velocidad del viento, y que el tiempo promedio de las concentraciones de contaminantes en horizontal y vertical están bien descritas por distribuciones de Gauss (es decir, en forma de campana). En su forma más simple, el modelo de la columna de Gauss asume que no existen procesos químicos y que el material contaminante llega al suelo en la parte superior de la capa de mezcla. (Boubel, Fox, B, & Stern, 1994)

- CALINE 4

CALINE4, la última versión de la serie CALINE de modelos de dispersión de contaminantes, es uno de los modelos más validados disponibles para evaluar el impacto de vehículo el tráfico en carretera (Benson, 1984). Aunque CALINE4 es capaz de manejar cañón o intersección situaciones, se ha utilizado en relativamente pocos estudios de calidad del aire urbano. El modelo utiliza la teoría de pluma gaussiana para simular la dispersión de los contaminantes emitidos por una fuente de línea. Este se

divide en una serie de elementos, que se modelan como fuentes de línea finitos equivalentes situadas normal a la dirección del viento. La región directamente sobre la carretera, llamada la zona de mezcla, se trata como una zona de emisión uniforme y turbulencia. Dentro de la zona de mezcla, la turbulencia inducida vehículo (tanto mecánico y térmico) se tiene en cuenta. (Coe, Eisinger, & Prouty, 1998)

- TNO y CAR

TNO-Tráfico es un modelo de tipo pluma gaussiana que describe la dispersión de contaminantes de los tubos de escape de los vehículos, basado en un amplio programa de experimentos de túneles de viento que abarcaba un gran número de diferentes configuraciones de calle, incluyendo cañones urbanos e intersecciones. En este modelo, el tráfico está representado por fuentes de línea divididas en serie de fuentes puntuales pequeñas. CAR (o CAR-International) es una versión simplificada del mismo modelo, en el que se clasificaron únicamente las configuraciones de la calle más representativos. Para cada tipo de calle (por ejemplo, autopista, carretera urbana, etc.) se especifica una relación fuente-receptor como una función de la distancia entre el receptor y el eje de la calle. CAR utiliza velocidades de viento anual promedio y se supone que no hay una dirección predominante del viento. Por lo tanto, el usuario obtiene los mismos promedios anuales y percentiles en cada lado de la calle. En todos los casos, el efecto de los árboles y los vehículos en movimiento en la velocidad del viento a nivel de calle se toma en cuenta. Este modelo no se debe confundir con CAR-FMI, que es un modelo de código de línea de Gauss para el cálculo de la contaminación procedente de las redes de carreteras. (Harkonen, Valkomen, Rantakrans, & Jalkanen, 1995)

- Modelos tipo CFD (Dinámica Computacional de Fluidos)

El término CFD generalmente se utiliza para describir el análisis de los sistemas que implican flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados (por ejemplo, reacciones químicas) mediante métodos numéricos basados en informática. Las predicciones de los modelos de dispersión son, en la mayoría de los casos, la meteorología, la geometría de la calle, la ubicación del receptor, el volumen de tráfico y los factores de emisión. La adquisición y el pre-tratamiento de estos datos es una parte importante para cualquier estudio de modelado, ya que el rendimiento de un modelo depende en gran medida de la calidad de las entradas. (Gosman, 1999).

3.7.1. ENVI-met 3.1

ENVI-met es un modelo no hidrostático tridimensional para la simulación de las interacciones tierra-planta-aire sobre todo dentro de los entornos urbanos. Está diseñado a micro escala con una resolución horizontal típica de 0,5 a 10 m y un marco de tiempo típico de 24 a 48 horas con un paso de tiempo de 10 segundos máximo. Esta resolución permite analizar las interacciones a pequeña escala entre los edificios individuales, superficies y plantas. Este modelo incluye: La reflexión y la re-radiación de la construcción de los sistemas y la vegetación. Cálculo de los parámetros biometeorológicos como temperatura media. Los edificios, la vegetación, los suelos / superficies y fuentes contaminantes se pueden colocar en el interior del área del modelo. Además de las superficies naturales y artificiales, el modelo también es capaz de manejar los cuerpos de agua. (Bruse, 1998)

3.8. Antecedentes

En una contextualización sobre el análisis del impacto de los contaminantes generados por fuentes móviles en la calidad del aire, se tomaron como referencia diferentes estudios que aplicaron ciertos métodos (estimaciones de factor de emisión, inventarios de emisiones, funcionamiento del bus híbrido y cañón urbano), los cuales sirvieron como principio para elaborar el documento y organizar los análisis de resultados obtenidos.

- Inventarios de emisión y estimación de factores de emisión

Como primer artículo científico sobre las emisiones de las fuentes móviles, se tomó el estudio realizado en la ciudad de California, de los autores Guihua Wang, Song Ba, Joan M. Ogden, pertenecientes al departamento especializado de estudios ambientales en la universidad de California. El objetivo principal consistió en realizar una identificación de las contribuciones de contaminantes que generan los motores de vehículos en carretera para la ciudad de Sacramento. Inicialmente se utilizó un modelo denominado SACMET2005, el cual provee información acerca de la demanda de viajes del área metropolitana (tiempo de viaje, volumen y velocidad de tráfico). Como estos datos fueron dados para la red de transporte de la ciudad, posteriormente, se trabajó con un segundo modelo, denominado DTIM4.02 (*Direct Impact Travel Model*) el cual permite generar para cada hora el inventario de emisión en una cuadrícula del mapa de la

ciudad, para enfrentarlo con las distribuciones espaciales y temporales de las emisiones del motor de los vehículos. Finalmente, basados en el anterior procedimiento denominado SACMET/DTIM, los resultados de la contribución del motor de los vehículos en carretera son de 30,6% COVs, el 34,4% NO_X y 4,4% para MP10. Así que, Independientemente de cualquiera de los métodos utilizados, se refleja que, las fuentes móviles tienden a tener una gran proximidad con los monitores de calidad del aire en las zonas urbanas. Estos resultados indican que la contribución al impacto de la calidad de aire por parte de las fuentes móviles en MP10 es de alto grado (Wang, Bai, & Ogden, 2009).

Se trabajó un artículo sobre inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá, realizado por Paula Rodríguez, la información necesaria fue recopilada en dos etapas: Primero información acerca del tamaño y distribución de la flota de Bogotá con sus respectivos Factores de Actividad (FA en km/año), posteriormente se realizaron 202 experimentos de mediciones directas de emisiones, utilizando técnicas en tiempo real y bajo condiciones reales de operación de los vehículos. Para establecer los Factores de Emisión (FE), se estableció una metodología que constaba de cuatro etapas: (1) Selección de las categorías vehiculares, (2) selección de la ruta (3) selección de los vehículos y programación de pruebas y (4) desarrollo de las campañas de campo (vehículos livianos y pesados), seguidamente se pasó a realizar el inventario de emisiones. Durante estas pruebas cada vehículo (14 en total) fue monitoreado con ACPM calidad Bogotá y posteriormente con ACPM importado (de bajo contenido de azufre). En particular, aquellos vehículos que exhibieron un mayor FE al ser evaluados con ACPM convencional fueron precisamente los mismos en los que se observaron las mayores reducciones en las emisiones de MP Las reducciones de las emisiones observadas por efecto del bajo contenido de azufre se mostraron consistentes con la masiva documentación disponible en la literatura técnica y científica acerca de los impactos que el contenido de azufre tiene sobre los niveles de emisión de material particulado. (P. A Rodríguez, 2009). Este artículo permitió evaluar la reducción del Material Particulado de los buses con bajo contenido de azufre.

Para el año 2011 se realizó un estudio que incluyó a cuatro ciudades de Latinoamérica: Bogotá, Buenos Aires, Santiago y Sao Paulo, donde participaron

diferentes autores como: Laura Gallardo, Jerónimo Escribano, Laura Dawidowski, Néstor Rojas, Maria de Fátima Andrade y Mauricio Osses de diferentes universidades pertenecientes a los países que participaron en el estudio. El objetivo principal fue comparar las relaciones molares de CO y NO_X de los estudios generados en los últimos 10 a 15 años, para esto se utilizaron los datos promediados por hora compilados por las redes oficiales de vigilancia en Bogotá, Santiago y Sao Paulo. Para el caso de buenos aires debido a la falta de acceso a los datos históricos, se complementó un año de datos oficiales con los datos recogidos en un sitio de monitoreo localizado en frente de una carretera, estos datos estuvieron sujetos a diversos controles de calidad. Como resultados obtenidos, en todas las ciudades en los últimos 10 a 15 años las relaciones molares de CO y NO_X muestran una disminución sustancial, aunque junto con los estudios anteriores, sugieren que las emisiones de NO_x actuales están sobreestimadas en un factor de 3% para Santiago, 20% para Sao Paulo y Buenos Aires, para el caso de Bogotá la sobreestimación de valores es dada para el CO. (Gallardo, y otros, 2012). Este artículo se tuvo en cuenta para determinar qué tan sobreestimados podrían ser los resultados utilizando datos entregados por redes de monitoreo.

Se referenció un estudio el cual tiene como tema central la incidencia que existe entre la restricción vehicular del pico y placa en la emisión del MP10, ayudados del modelo CALINE 4, la zona donde se realizó el estudio fue sobre la calle 80 en las intersecciones entre la Av. 68 y la Av. Boyacá. Se realizó un aforo vehicular durante siete días en el que se determinó que el flujo vehicular que transita por la zona de estudio se compone de cuatro (4) grupos: automóviles con un 90-93% de circulación, transporte pesado con un porcentaje de circulación entre 4-5%, seguido del público con un porcentaje que oscila entre el 1-2% y finalmente Transmilenio con una circulación que varía entre el 2-3%. Haciendo un análisis de la influencia que tienen los factores meteorológicos como velocidad del viento y estabilidad atmosférica, se evidencia el incremento del MP10 en un 28.67%. Los resultados de concentración de MP10 arrojados por el modelo, muestran claramente que, aunque por la calle 80 de la ciudad de Bogotá transita el 90% de vehículos de tipo liviano, los vehículos de tipo pesado que son 10%, emiten en todos los tiempos considerados concentraciones de MP10 muy cercanas a las generadas por los de tipo liviano. Esto se debe principalmente al tipo de

combustible que utilizan (Carabalí & Hernandez, 2009). Este artículo permitió generar una hipótesis sobre la concentración del MP10 con respecto a la flota vehicular que transita sobre una zona de estudio.

Otro estudio que es importante tener presente para el análisis del impacto de las fuentes móviles en la calidad del aire urbano, es un estudio del año 2012 en la que se tuvo como finalidad determinar la relación que existe entre el material particulado (MP10) y los sólidos sedimentables totales (SST), para esto se establecieron selectivamente puntos de muestreo en 3 avenidas con gran confluencia y composición vehicular en la ciudad de Bogotá (Carrera 30, Avenida 68 y Avenida Boyacá), allí se tomaron 6 muestras para evaluar y 2 más en la estación de Las Aguas en un periodo de 30 días; se utilizaron los datos registrados por una unidad móvil que se encuentra ubicada en la calle 63 con Avenida Boyacá, el tiempo estimado para esta medición fue de 4 meses. Finalmente, los datos obtenidos para sólidos sedimentables determinan la variabilidad del parámetro en las zonas de estudio, estos valores fueron dependientes en gran medida del material soluble encontrado, que al tiempo tenía relación con la precipitación; respecto al material insoluble se determinó la posibilidad de su asociación con las fuentes móviles (Noguera & Bernal, 2012).

- Vehículos Híbridos

De acuerdo a la inclusión de los vehículos híbridos en Bogotá, son pocos los estudios realizados enfocados al impacto generado por los mismos en la calidad del aire, sin embargo se tuvo en cuenta un estudio del año 2011; en la cual se abordan las ventajas y desventajas de los vehículos híbridos en aspectos financieros, operacionales y ambientales, las mayores limitaciones se ven reflejadas en los costos de adquisición y de operación debido a que es una nueva tecnología, pero en cuanto al aporte a calidad del aire en los corredores viales se puede observar que además de la reducción de emisiones de CO2 los Buses Híbridos Eléctricos también logran reducciones significativas en la emisión de contaminantes atmosféricos locales como material particulado (PM), óxido nitroso (NO_x), hidrocarbonados (HC) y monóxidos de carbono (CO). Estas reducciones se deben en gran medida al menor consumo de combustible de tecnología hibrida eléctrica, pero también se ven favorecidos por otras mejoras tecnológicas propias de los vehículos diésel más modernos, tales como

motores más eficientes, instalación de filtros y sistemas post-tratamiento de las emisiones (Lema, 2012).

Otro artículo sobre los buses híbridos y que se tuvo en cuenta para la obtención de las emisiones de los mismos, fue el de los autores, Shauna L. Hallmark, Bo Wang and Yu Qui y Bob Sperry, realizado en el año 2012 para el mes de octubre. En el cual se evaluaron principalmente los costos y beneficios que se le han atribuido a los buses híbridos frente a los buses tradicionales, como se encuentra en la literatura. Se incluyeron unos resultados de un proyecto de demostración que comparó el consumo y combustible de 12 buses híbridos y 7 buses de control para la agencia de transportes de Ames (Iowa). Según lo investigado existe una cantidad numerosa de estudios que indican una reducción sustancial de contaminantes emitidos por los buses híbridos más que los buses tradicionales, por ejemplo, en uno de los resultados indicaron la reducción de MP10 para cada una de las rutas en un 50%, 77% y 99% respectivamente. Se concluye al final del artículo que a pesar de los beneficios de costos en los buses híbridos aún analiza la dificultad de recuperar los costos de capital inicial en la inclusión de cierta cantidad de buses vehiculares híbridos. (Hallmark, Wang, Qui, & Sperry, 2012).

- Cañón Urbano

En un estudio que realizan estudiantes de Maestría en Ingeniería Ambiental, Julián Torrijos, Carolina Gonzales, Rafael Chaparro y Edison Ortíz de la Universidad Nacional de Colombia, se utilizó el modelo ENVI-met 3.1, para visualizar el efecto Cañón Urbano por medio del comportamiento de la simulación del material particulado, de la carrera 13 entre calles 35–38 en la ciudad de Bogotá; el escenario seleccionado para realizar la modelación fue el día sin carro 6 de febrero de 2014, ya que circularon solo buses de transporte público, vehículos de carga pesada y los accionados con Diésel. Previamente se hizo la recopilación de información importante como el área del lugar, factores meteorológicos (velocidad del viento, dirección del viento y humedad relativa) y emisiones de material particulado en re suspensión; así como datos entregados por la unidad móvil Sagrado Corazón de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire. Con la corrida del modelo se logró identificar el vórtice de altas concentraciones generado en el edificio del banco de Bogotá, la reducción de concentraciones de material particulado se

observó cuando corrieron el modelo teniendo en cuenta el sistema de control de emisiones (Chaparro, Gonzales, Ortiz, & Torrijos, 2014). A partir de la información de este artículo se obtuvieron los parámetros para la utilización del modelo presentado en este trabajo, ENVI.met 3.1.

4. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Carrera 7 actualmente es una vía tipificada por el POT como V3 y perteneciente a la malla arterial de la ciudad, la cual cuenta con tres carriles de circulación por sentido con un separador central entre 1 y 3 metros de ancho, con andenes restrictivos y de ancho variable para la circulación peatonal. La regularización del tráfico sobre el corredor se realiza principalmente con intersecciones semafóricas relativamente continuas (2 a 3 cuadras de distancia), lo que genera que la circulación sea discontinua y con bajas velocidades de operación (Illera, Echeverry, Martínez, & M., 2013).

El corredor de la Carrera 7 tiene unas características particulares de movilidad que deben tenerse en cuenta:

- Presenta 3 carriles de circulación para el tráfico mixto en cada sentido en el tramo comprendido entre las Calles 34 y 100. Maneja un volumen vehicular en los periodos de máxima demanda de 2.800 veh/h/sentido, del cual, el 10% está representado por el transporte público colectivo.
- Se realiza una operación de manejo de tráfico mediante un reversible (sentido sur- norte) entre las 17:00 y 20:00 horas de Lunes a Viernes, en el tramo comprendido entre la Calle 32 a la Calle 92.
- Para el reversible cuenta con vías de apoyo como las avenidas Caracas y Circunvalar, así como las Carreras 5, 11 y 13.
- Hace parte de la red de Ciclovías de la ciudad, por lo que cada domingo se restringe el la circulación del tráfico mixto y transitan sobre el corredor más de 1.500.000 ciudadanos. Sobre este corredor se localiza gran parte de la actividad financiera, comercial y de servicios, por lo cual el sector se considera parte del centro expandido (Illera, Echeverry, Martínez, & M., 2013).

La ubicación que se seleccionó para realizar la simulación del comportamiento dentro de un cañón urbano, fue la carrera séptima, más específicamente en dos zonas, ya que allí fue donde se mantuvo en funcionamiento la estación móvil del IDEAM.

En el primer escenario la unidad móvil estuvo localizada sobre el costado sur-norte del tramo vial que comprende la calle 45, en el cual se tomaron datos desde el 1 de

Diciembre del año 2013 hasta el 20 de Mayo del 2014, fecha en la cual fue trasladada la estación debido a construcciones viales que posteriormente se han venido realizando en esa cuadra.

Apartir del 27 de Mayo de 2014, la unidad móvil comenzó a funcionar sobre el costado sur-norte del tramo vial que comprende la calle 33 hasta la fecha, en este segundo escenario los datos son tomados desde la fecha hasta el 31 de Octubre del 2014.

4.1 Geografía de la zona

Como la estación móvil del IDEAM estuvo localizada en dos zonas, se tomó un registro fotográfico para realizar un levantamiento de la geografía urbana presente, teniendo en cuenta el tipo de edificios que la componen, tipo de suelo y vegetación presente.

Calle 45:

La carrera séptima con calle 45 localizada en el sector de chapinero en Bogotá, cuenta con establecimientos comerciales, residenciales y la Universidad Javeriana, la cual ocupa gran parte de la calle hacia el costado Norte-Sur. La unidad móvil comenzó a funcionar en esta zona a partir de diciembre del año 2013, los datos se registran hasta el día 20 de mayo de 2014, ya que a partir del 21 de mayo se trasladó para la calle 33, debido a que empezaron a realizar obras viales en la calle 45.

Ilustración 3. Geografía urbana de la carrera 7 con calle 45

<table>
<tr>
<td>Esquina carrera 7 con calle 45. Obra civil en operación.

Costado Sur, de la calle 45, sobre el andén se estuvieron realizando obras civiles mientras se realizaba la toma de datos por la Estación Móvil.</td>
<td>Pontificia Universidad Javeriana

Esquina de la Universidad Javeriana sobre la Calle 45 sobre el costado Norte.</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2">Estación móvil del IDEAM

La estación móvil se ubicó en el costado en el costado Norte-Sur, en la esquina de la calle 45. Frente al lote desocupado.</td>
</tr>
</table>

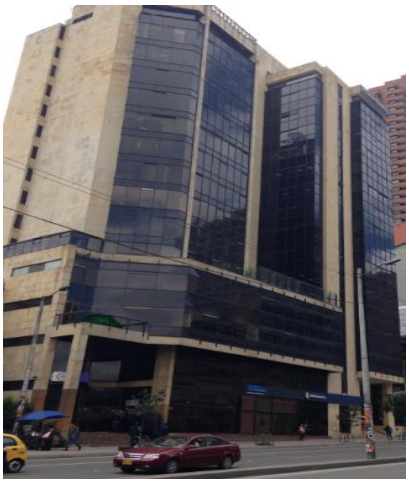
Fuente: Autores.

Calle 33:

La carrera séptima con calle 33 localizada en el centro de Bogotá en la localidad Santa Fé, cuenta con diferentes establecimientos comerciales, residenciales y entidades públicas que componen la geografía urbana de la zona, la estación móvil del IDEAM se trasladó desde la 45 en la mitad del mes de mayo de 2014, así que los datos registrados son a partir del día 27 de mayo hasta el 31 de octubre del 2014, periodo de tiempo en el que se mantuvieron funcionando los equipos.

Ilustración 4. Geografía urbana de la cra. 7 con calle 33

<table>
<tr>
<td>Notaria 38. Esquina calle 33.

Calle 33, sobre el costado Norte, lugar donde se ubicó la estación móvil y se realizó la toma de datos</td>
<td>Edificio Coltefinanciera
 
Edificio Ubicado en la esquina de la calle 33, costado Sur, uno de los más altos de la zona.</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2">Estación móvil del IDEAM

La estación móvil del IDEAM para el segundo periodo estuvo localizada entre la notaria 38 y el Subway, sobre el costado Sur.</td>
</tr>
</table>

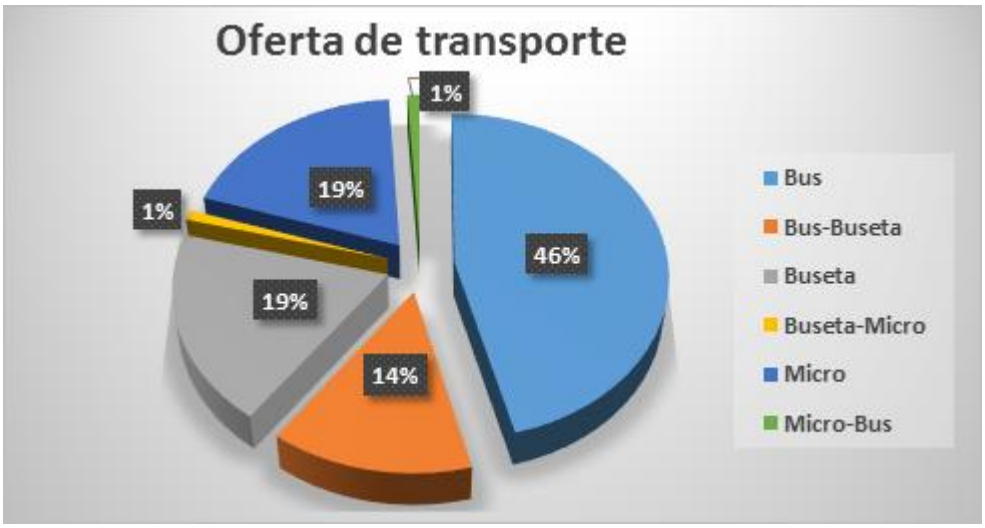
Fuente: Autores

4.2 Fuentes de emisión móviles sobre la carrera séptima.

Frente a la operación del transporte público colectivo, la Carrera 7 cuenta con un alto número de rutas de transporte público (114 rutas aproximadamente), debido a que en conjunto con la Carrera 10 operan como un solo corredor de transporte garantizando

la movilidad y accesibilidad de los usuarios del borde oriental que circulan sentido sur y el norte y viceversa por el borde oriental. (Illera, Echeverry, Martínez, & M., 2013).

Gráfica 1. Oferta de transporte público sobre la carrera séptima



Fuente: Base de datos del sistema de rutas actuales. SDM. 2013

5 MARCO NORMATIVO

- **Resolución 610 de 2010**

Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión; la presente resolución establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión para todo el territorio nacional en condiciones de referencia, en la cual se desarrollan los niveles máximos permisibles de contaminantes en la atmósfera; los procedimientos para la medición de la calidad del aire, los programas de reducción de la contaminación del aire y los niveles de prevención, alerta y emergencia y las medidas generales para su mitigación, norma aplicable a todo el territorio nacional.

ARTÍCULO 4º. Niveles Máximos Permisibles para Contaminantes Criterio. En la Tabla 2 se establecen los niveles máximos permisibles a condiciones de referencia para contaminantes criterio, los cuales se calculan con el promedio geométrico para PST y promedio aritmético para los demás contaminantes (Tabla 2):

Tabla 2. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio

Contaminante	Límite máximo permisible (µg/m3)	Tiempo de Exposición
MP10	50	Anual
	100	24 horas
SO_2	80	Anual
	250	24 horas
	750	3 horas
NO_2	100	Anual
	150	24 horas
	200	1 horas
CO	10.000	8 horas
	40.000	1 hora

Fuente: Resolución 610 de 2010

- **Resolución 910 de 2008**

La presente resolución establece los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes que deben cumplir las fuentes móviles terrestres, reglamenta los requisitos y certificaciones a las que están sujetos los vehículos y demás fuentes móviles, sean importadas o de fabricación nacional, y se adoptan otras disposiciones.

ARTÍCULO 19. Límites máximos de emisión permisibles para vehículos con motor a gasolina. (Tabla 3 y Tabla 4)

Tabla 3. Límites máximos de emisión permisibles para vehículos livianos y medianos accionados con gasolina en prueba dinámica

CATEGORIA	SUBCATEGORIA		CO	HC	HCNM	NOx
			(g/Km)			
LDV	--		2,11	0.25	0,16	0,25
LDT	LLDT	LDT1	2,11	--	0,16	0,25
		LDT2	2,73	--	0,20	0,44
	HLDT	LDT3	2,73	0.20	--	0,44
		LDT4	3,11	0.24	--	0,68

Fuente: Resolución 910 de 2008.

Tabla 4. Límites máximos de emisión permisibles para vehículos pesados accionados con gasolina en prueba dinámica

CATEGORIA	SUBCATEGORIA	CO	HC	NOx
		(g/BHP-h)		
HDV	LHDGE	14,4	1,1	4,0
	HHDGE	37,1	1,9	4,0

Fuente: Resolución 910 de 2008.

6 METODOLOGÍA

El método de este trabajo se fundamentó en:

- El desarrollo de un análisis estadístico descriptivo y correlacional,
- En las simulaciones realizadas con el modelo de dinámica computacional de fluidos ENVI-met.

Los datos usados en este trabajo corresponden a las mediciones de las concentraciones de MP10, CO, NO_X, y SO_2, y las variables meteorológicas: velocidad y dirección del viento, temperatura, y humedad relativa, obtenidas en la Unidad Móvil de calidad del aire del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (automática). Además, se utilizaron los registros de aforos vehiculares realizados por la Secretaría Distrital de Movilidad, Sección de Control y Vigilancia, así como la caracterización vehicular del parque automotor de Bogotá hasta el año de 2015.

6.1 Estadística descriptiva y correlacional de los datos

Los datos horarios de las concentraciones y de las variables meteorológicas, se tomaron de la unidad móvil de medición de la calidad de aire del IDEAM (automática), la cual ha tenido dos ubicaciones sobre la carrera séptima; la primera sobre la calle 45 y la segunda sobre la calle 33. Para la primera zona se tuvo en cuenta el periodo comprendido desde el 1 de diciembre de 2013 hasta el 20 de mayo de 2014; para la segunda zona se tuvo en cuenta el periodo comprendido entre el 27 de mayo de 2014 y el 31 de octubre de 2014.

Estos valores de concentración de contaminantes pasaron por una revisión siendo este un proceso que permite determinar si los datos resultantes de la etapa de monitoreo son confiables, representativos y de calidad, para lo cual por medio de filtros se eliminaron valores negativos y valores con error por calibraciones realizadas.

Luego de determinar cuáles datos fueron válidos se generó la estadística descriptiva para analizar el comportamiento típico de un día al mes, utilizando los programas estadísticos SPSS (licenciado para la Universidad de La Salle) y MiniTab (versión de prueba) se realizaron los diagramas de caja con sus tablas correspondientes, las cuales contienen información acerca de las variables estadísticas como: la media, la desviación estándar, el intervalo intercuartílico, mínimos, máximos, límites superior e

inferior y los valores atípicos. Para realizar el análisis se escogieron las gráficas más representativas de acuerdo a la cantidad de datos válidos durante el mes y aquellas que registraron menos dispersión de datos, para los contaminantes de MP10 y SO_2, este análisis se complementó observando las gráficas de las variables meteorológicas como temperatura y velocidad del viento importantes e influyentes en el comportamiento de dichos contaminantes dentro del cañón urbano. De igual manera, para obtener mayor veracidad de la incidencia de la meteorología sobre los contaminantes, se generó una tabla de correlación en la que numéricamente fue posible destacar aquellas variables en las que existe mayor relación y por lo tanto justificar los valores obtenidos en la medición.

6.2 Recolección y composición de aforos vehiculares

Para determinar el impacto en la calidad del aire de los vehículos que circulan sobre la carrera séptima y establecer además una comparación con los buses híbridos duales de Transmilenio, fue necesario diferenciar la información obtenida como se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5. Caracterización de los vehículos que transitan por la carrera séptima.

CARACTERIZACIÓN										
Tipo	Automóvil	Colectivo	Buseta/ busetón	Bus	Campero	Camioneta	Camión de 2 ejes pequeño	Camión de 2 ejes grande	Motos	Bus híbrido
Combustible	Diesel – Gasolina									
Tecnología	EURO I – EURO II – EURO III – EURO IV									

Fuente: Secretaría de Movilidad. Dirección de Vigilancia y Control.

La información de los aforos vehiculares sobre la carrera séptima en sus dos intersecciones fue entregada por la Dirección de vigilancia y control de la Secretaría de Movilidad, en los cuales se hace una división por tipo de vehículo desde motos hasta vehículos de carga de más de 5 ejes, pero de acuerdo a la frecuencia y representatividad se tuvieron en cuenta solo las 9 categorías con mayor circulación que transitan en el área de estudio como se muestra en la tabla 5. Para el caso de los buses híbridos la información de la frecuencia de los mismos en horas picos fue entregada por Transmilenio S.A.

Como en los aforos vehiculares no se establece información sobre tipo de combustible ni modelo, fue necesario basarse en la información del parque automotor de Bogotá; este cuenta con una clasificación de 8 tipos de combustibles, de los cuales solo se tuvo en cuenta diésel y gasolina para el área de estudio, para esto se creó una relación entre el número total de vehículos en Bogotá y el número de vehículos sobre la carrera séptima en sus dos intersecciones (calle 45 y calle 33), buscando la proporcionalidad de acuerdo a la clasificación anteriormente establecida.

La base para establecer a qué tipo de tecnología EURO pertenecen los vehículos que circulan sobre la carrera séptima, fue necesario de igual manera el parque automotor de Bogotá ya que este proporciona la cantidad de vehículos de cada modelo. A partir de esta información se hizo una nueva clasificación para que de esta manera se hallara la emisión de todos los vehículos en las dos intersecciones de estudio siendo comparables con los buses híbridos de Transmilenio.

De esta manera se establece una comparación entre el flujo vehicular que circula sobre la carrera séptima en sus dos puntos de medición y el comportamiento de los contaminantes.

6.3 Estimación de las emisiones para MP10

Seguidamente se pasó a establecer los datos de emisión para MP10 ya que fue necesaria esa información para la alimentación del modelo, sin embargo, una de las restricciones de ENVI-met 3.1 es que en lo que respecta a contaminantes, solo modela partículas suspendidas menores a 10 micras y CO2 (información con la que no se cuenta). En cuanto a las emisiones de los demás contaminantes (SO2, CO y NOX) no se generó un análisis de las emisiones debido principalmente a dos condiciones: 1. El modelo tiene como restricción el cálculo únicamente para partículas suspendidas. 2. El análisis principal se enfocó en la comparación de los buses tradicionales con los buses híbridos. De igual manera se realizaron emisiones de MP10 para gasolina, ya que dentro de la guía se encontraron estos factores de emisión.

De acuerdo a la guía de Inventario de emisiones de la Agencia Ambiental Europea “EEA/EMEP”, se seleccionaron los factores de emisión de MP10 teniendo en cuenta la información de la tabla 5, ya que en la guía estos valores se encuentran clasificados por tecnología EURO y combustible, se tomó como supuesto que los buses

híbridos se clasifican en la tecnología EURO IV. Luego de esta minuciosa selección, se pasó a generar los cálculos, en los que no fue posible tener en cuenta la velocidad de los vehículos, ya que en la guía las ecuaciones para hallar el factor de emisión no se encontraban disponibles en su totalidad y el margen de error de esas ecuaciones es bastante alto como para tener certeza en el resultado final.

Finalmente se utilizó la ecuación (1) en la que se obtuvo el valor de emisión de cada tipo de vehículo.

$$(1)\ \ \boldsymbol{FE} * \boldsymbol{\#Veh} = \boldsymbol{E}$$

FE: Factor de Emisión seleccionado de la Guía de Inventario de Emisiones de la Agencia Europea.

#Veh: Número de vehículos

E: Emisión calculada

Finalmente se obtuvieron dos tablas de emisión por cada tipo de combustible Gasolina y Diésel hasta este punto.

Para la comparación de ambos puntos de medición (Calle 45 y Calle 33) se requirió la generación de diferentes escenarios, no solamente por la geografía urbana distinta sino por la inclusión de los buses híbridos en el mes de mayo del 2014, en total se generaron cuatro escenarios de emisión:

1) Flota vehicular tradicional Sin buses Híbridos – Calle 45.
2) Flota vehicular tradicional Con buses híbridos – Calle 45.
3) Flota vehicular tradicional Sin buses híbridos – Calle 33.
4) Flota vehicular tradicional Con buses híbridos – Calle 33.

Esto fue posible teniendo en cuenta la información de uno de los antecedentes en el que se muestra un porcentaje aproximado de la reducción del consumo de combustible del Diésel por parte de los buses híbridos el cual es 70%, lo que finalmente permitió hacer comparables los dos puntos de medición (Calle 45 y Calle 33).

Seguidamente, se pasó a generar emisiones horarias ya que el modelo así lo requirió, se seleccionaron las horas 6:00 am, 7:00 am y 8:00 am; principalmente por que las condiciones meteorológicas en las mañanas son mucho más estables y el flujo vehicular es mayor. Las ecuaciones (2), (3) y (4) muestran los cálculos que se realizaron para obtener estas emisiones.

$$(1)\ \ VehT = \frac{\#\,Veh1 * \sum Veh(D+G)}{Tveh}$$

$$(2)\ \ E = \frac{\sum \#\,VehT * E}{\sum Veh(D+G)}$$

$$(3)\ \ E_F = \frac{E}{3.600}$$

#Veh$_1$: Número de vehículos horarios. (6:00 am, 7:00 am, 8:00 am).

∑T$_{veh}$: Sumatoria del aforo de vehículos horarios (desde las 6:00 am hasta las 7:00 pm)

∑Veh$_{(D+G)}$: Sumatoria del aforo de vehículos por tipología EURO y combustible (Diésel + Gasolina)

Veh$_T$: Relación de vehículos totales y horarios.

E$_T$: Emisión resultante de la suma de emisiones por tipología EURO y combustible (Diésel + Gasolina) en mg/m*h

E: Emisión horaria en mg/m*h

E$_F$: Emisión final en mg/m*s

3600: Equivalente de segundos en una hora

6.4 Modelamiento en cañón urbano

Para la alimentación de ENVI-met, fue necesario llevar a cabo una serie de pasos: Primero se realizó la representación gráfica del terreno definiendo variables como: Tamaño y altura de la grilla, tipo de material de las edificaciones, cobertura vegetal, tipo de suelo, localización de las fuentes de emisión (vehículos) y receptor (Unidad Móvil). Luego en una ventana de configuración se registraron los valores a modelar: fecha y hora de simulación, velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa. Finalmente, en otra ventana se colocó la emisión calculada.

Ya con la obtención final de los datos de concentración de MP10, estos se pasaron a analizar y comparar según: la inclusión o exclusión de los buses híbridos y las variables meteorológicas utilizadas. Finalmente se hizo una validación estadística y así determinar el margen de error del modelo frente a los resultados generados y los medidos. En la ecuación (4), se muestra el cálculo del error cuadrático medio del modelo.

$$\textbf{(4)}\ ECM = \sqrt{\frac{\sum(VP_M - VP_{Obs})^2}{n}}$$

ECM: Error Cuadrático Medio

VP_M: Valor de concentración de MP10 simulado por el modelo ENVI-met 3.1

VP_{Obs}: Valor de concentración de MP10 medido por la estación móvil del IDEAM

n: Total del número de datos. (15 horas).

Finalmente se generaron gráficas de dispersión de puntos que relacionan los datos simulados con los observados y así determinar si hubo un cambio frente a la emisión de MP10 generada a partir de la simulación del modelo.

7 RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 Estadística descriptiva y correlacional

7.1.1. Estadística descriptiva

Calle 45 – Contaminantes (1 diciembre 2013 – 20 mayo 2014)

La Unidad Móvil de calidad de aire del IDEAM durante el primer periodo tuvo su respectiva calibración para el buen funcionamiento la primera semana del mes de febrero de 2014, por lo cual, los datos de los meses de diciembre de 2013 y enero de 2014 presentan alto porcentaje de pérdidas y datos erróneos.

Como se muestra en la Tabla 5 para el caso del MP10 el número de datos validos con relación a los demás contaminantes es menor, presentándose por debajo del 75%, lo cual dificulta su análisis ya que no cuenta con la representatividad necesaria, esto debido a que en los meses de enero y febrero la gran mayoría de los datos se identificaron como faltantes. En cuanto a los datos máximos el mayor registrado es el de NO_X, en los meses de febrero y marzo en algunos días se registraron datos significativamente más altos que superan los 300 µg/m^3.

Tabla 6. Revisión de datos de contaminantes monitoreados en la calle 45

Contaminante	Número de datos válidos	Porcentaje válido	Mínimo	Fecha mínimo	Máximo	Fecha Máximo
MP10 (µg/m^3)	3042	72.2	1.0	12/01/13	302.0	03/31/13
CO (mg/m^3)	3764	91.8	0.0	12/20/13	5.1	12/07/13
SO_2 (µg/m^3)	3816	93.1	0.0	12/01/13	27.9	12/03/13
NO_x (µg/m^3)	3789	92.4	0.0	01/06/14	328.7	01/13/14

Fuente: Estación Móvil IDEAM

En la Tabla 7 se observan los promedios mensuales de los contaminantes, que resultan ser constantes, a excepción de los NO_X en el mes de Mayo (1-20) debido a que los días de registro para este mes en su gran mayoría fueron de cero; en cuanto al SO_2 el menor dato de concentración se presentó en el mes de Diciembre debido a que en su gran mayoría valores que oscilan entre 0,0 y 0,20 µg/m^3 se registraban a lo largo del día

pero sobre todo en horas de las 12:00 a las 18:00, en cuanto a los valores más altos presentados en el mes de Mayo se presentaron valores hasta 13 µg/m^3 en horas desde las 7:00 hasta las 9:00, con día atípico el 4 de este mes con valores de 10 a 13 µg/m^3 en horas de la madrugada de las 24:00 a las 3:00.

Tabla 7. Promedios mensuales de contaminantes en la calle 45

MES	MP10 (µg/m^3)	CO (mg/m^3)	SO_2 (µg/m^3)	NO_x (µg/m^3)
Diciembre 2013	61.02	0.93	1.18	95.05
Enero 2014	59.63	0.44	2.65	62.03
Febrero 2014	80.41	1.37	3.42	14.93
Marzo 2014	76.41	1.33	2.95	13.56
Abril 2014	54.85	1.22	3.76	11.78
Mayo 2014	58.28	1.32	5.34	0.19

Fuente: Estación Móvil IDEAM

Las concentraciones por la meteorología característica de la zona y por sus fuentes de emisión varían a lo largo del periodo, pero un aspecto de gran influencia en el comportamiento fue las calibraciones de los equipos de medición.

Calle 45 – Variables Meteorológicas

En la Tabla 8, en este punto de medición, la cantidad de datos de velocidad y dirección del viento, fueron menores respecto a las otras variables meteorológicas, casi el 6% fueron descartados, esto es debido a que, en los meses de diciembre, enero y hasta el 5 de febrero, se registraron valores demasiado bajos, por debajo de 0,5 m/s, que a su vez durante el día se repiten, siendo esto un comportamiento que no va acorde a la meteorología de la zona, así mismo no fue posible hacer una corrección con la estación más próxima de la secretaria distrital de ambiente, ya que también que encontraron datos erróneos o faltantes en su historial. En cuanto a los demás meteorológicos la gran mayoría se encuentra por encima del 90%, confirmando que los equipos funcionaron correctamente. El mes más caluroso de este periodo fue marzo con temperaturas que superaban los 24°C en horas de la tarde, así mismo los valores de velocidad del viento más altos fueron en el mismo mes en horas de 1 a 2 pm.

Tabla 8. Revisión de datos meteorológicos medidos en la calle 45

Factor Meteorológico	Número de datos válidos	Porcentaje válido	Mínimo	Fecha mínimo	Máximo	Fecha Máximo
Humedad Relativa (%)	4062	99.04	19.0	1/08/2014	87.5	12/01/2013
Velocidad del viento (m/s)	3873	94.44	0.9	2/22/2014	10.3	3/27/2014
Temperatura(°C)	4063	99.07	8.5	1/10/2014	24.7	3/29/2014
Precipitación(mm)	4063	93.80	0.0	12/01/2013	185.0	01/05/2014

Fuente: Estación Móvil IDEAM

Calle 33 – Contaminantes (27 mayo 2014 – 31 octubre 2014)

En la Tabla 9, los datos de NO_x tuvieron la mayor cantidad de datos perdidos en comparación con los otros tres contaminantes, esto es debido a que en el mes de octubre en las tres primeras semanas estos datos se registran como faltantes, en comparación con el anterior periodo hubo mayores pérdidas de datos a partir de junio, ya que la estación realmente empezó a hacer un registro confiable de datos a partir del mes de Julio. El dato máximo registrado es para NO_x, a diferencia del periodo anterior, en este periodo el registro de datos altos (entre 300 y 400) se presentaron para algunos días en cada mes.

Tabla 9. Revisión de contaminantes monitoreados Calle 33

Contaminante	Número de datos válidos	Porcentaje válido	Mínimo	Fecha mínimo	Máximo	Fecha Máximo
MP10 ($\mu g/m^3$)	3379	89.2	0.0	06/01/14	335.0	07/09/14
CO (mg/m^3)	3736	98.7	0.0	10/21/14	6.8	10/08/14
SO_2 ($\mu g/m^3$)	3308	87.4	0.0	05/27/14	27.5	05/28/14
NO_x ($\mu g/m^3$)	3174	83.8	0.0	06/16/14	451.6	10/23/14

Fuente: Estación Móvil IDEAM

La Tabla 10, presenta los promedios de cada contaminante por mes, para el caso del CO y el SO_2 los datos son muy bajos esto debido a que existen muchos datos de cero y el SO_2 registró datos faltantes hacia la mitad del mes de agosto (12 al 22), en el caso del NO_x a pesar de que se registran datos muy altos (entre 300 y 400), la mayoría oscila

entre 30 y 60, además para el mes de septiembre se registran gran cantidad de datos faltantes y a partir del día 16 de este mes, los datos son bajos, que van de 1 a 9.

Tabla 10. Promedio Mensuales. Calle 33

MES	MP10 ($\mu g/m^3$)	CO (mg/m^3)	SO_2 ($\mu g/m^3$)	NO_x ($\mu g/m^3$)
Mayo 2014	52.60	0.99	1.97	39.79
Junio 2014	55.44	0.74	1.24	62.95
Julio 2014	47.46	0.73	1.23	19.74
Agosto 2014	44.87	0.76	2.65	16.86
Septiembre 2014	50.83	0.88	1.24	6.67
Octubre 2014	61.71	1.84	3.49	129.55

Fuente: Estación Móvil IDEAM

Calle 33 – Variables Meteorológicos

En este punto de monitoreo (ver Tabla 11) en su gran mayoría los datos se tomaron como válidos ya que los equipos meteorológicos funcionaron correctamente en casi todos los meses, como sucedió el punto de medición de la Calle 45, siendo en su totalidad representativos ya que más del 90% fueron válidos.

Tabla 11. Revisión de datos meteorológicos Monitoreados Calle 33

Factor Meteorológico	Número de datos válidos	Porcentaje válido	Mínimo	Fecha mínimo	Máximo	Fecha Máximo
Humedad Relativa (%)	3742	98.83	0.0	09/09/2014	97.5	09/22/2014
Velocidad del viento (m/s)	3742	98.83	0.0	09/09/2014	11.0	08/02/2014
Temperatura(°C)	3742	98.83	0.0	09/09/2014	23.7	09/26/2014
Precipitación (mm)	3742	99.1	0.0	05/27/2015	52.0	10/10/2014

Fuente: Estación Móvil IDEAM

- *Relación entre variables meteorológicas y contaminantes (diagramas de caja)*

Las variables meteorológicas presentes en una zona son de gran influencia en el análisis del comportamiento de los contaminantes, debido a que definen directamente el mismo. Las fuentes móviles de emisión son el punto de partida, así que para entender el fenómeno de dispersión de contaminantes en la atmosfera es necesario que se tenga en cuenta variables meteorológicas como temperatura y velocidad del viento.

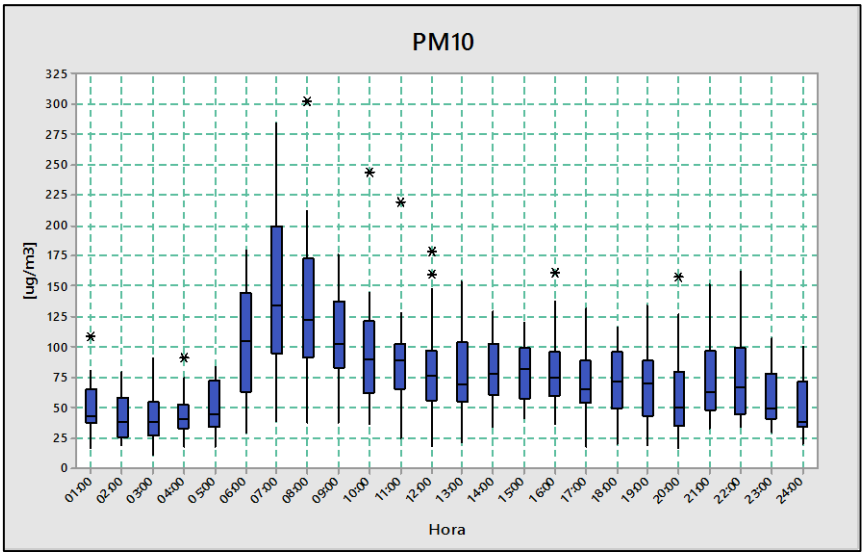
En las gráficas 2, 3, 6 y 7 se muestra el comportamiento horario de los contaminantes SO_2 y MP10 para un día laboral, para ambos puntos de medición (Calle 45 y Calle 33). Se observa que todos tienen tendencias similares en picos máximos y mínimos, esto puede atribuirse a que los elementos azufrados generan partículas secundarias en la atmósfera, por lo cual el comportamiento más no las concentraciones puede ser similar, dichos máximos se observaron entre las 6: 00 am hasta las 9:00 am, esto debido al gran número de vehículos que circulan en este escenario durante estas horas de la mañana, en el caso del punto de medición de la Calle 45, sin embargo en el punto de medición de la Calle 33 el flujo de vehículos es menor así que la geografía urbana de la zona puede tener mayor influencia sobre los contaminantes generando turbulencia mecánica debido a la rugosidad de los edificios más altos y por lo tanto mayor presencia del contaminante en la zona.

En cuanto a las variables meteorológicas que se pueden observar en las gráficas 4, 5, 8 y 9, también hay comportamientos similares en ambos puntos de medición (Calle 45 y Calle 33). La temperatura, aunque no afecte directamente el comportamiento del MP10 y el SO_2, puede ayudar a que se lleve a cabo la mezcla vertical. En horas de la mañana es más baja dificultando que la masa de aire pueda mezclarse verticalmente para su dispersión, en caso contrario en horas de la tarde a partir de las 12:00 pm donde se presenta mayor temperatura las concentraciones a su vez presentan picos bajos. Finalmente, la velocidad del viento, que tiene relación inversamente proporcional al comportamiento del MP10, presenta los valores más altos se observan a partir de la 1:00 pm, siendo otro índice de dispersión de contaminantes en la atmosfera debido a que facilita que la turbulencia aumente y así dicha masa de aire experimente mezcla y se arrastre lejos de su emisor.

Calle 45

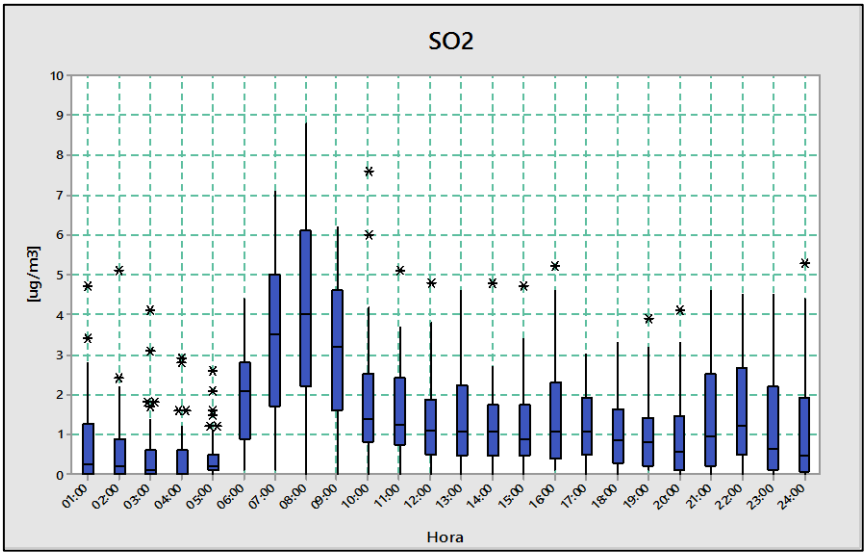
El comportamiento de los contaminantes es variable de acuerdo al entorno donde se realice la dispersión y a la época del año, por lo cual, para el periodo de diciembre de 2013 y mayo 20 de 2014, se escogió el mes con un comportamiento típico, este fue marzo de 2014, los diagramas de caja se presentan a continuación:

Gráfica 2. Diagrama de caja MP10. Calle 45



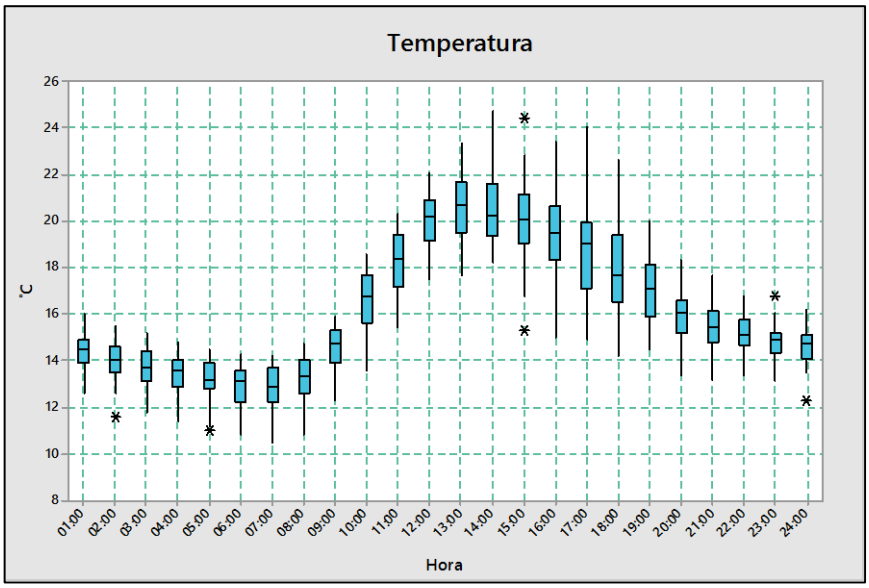
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM

Gráfica 3. Diagrama de caja SO_2. Calle 45



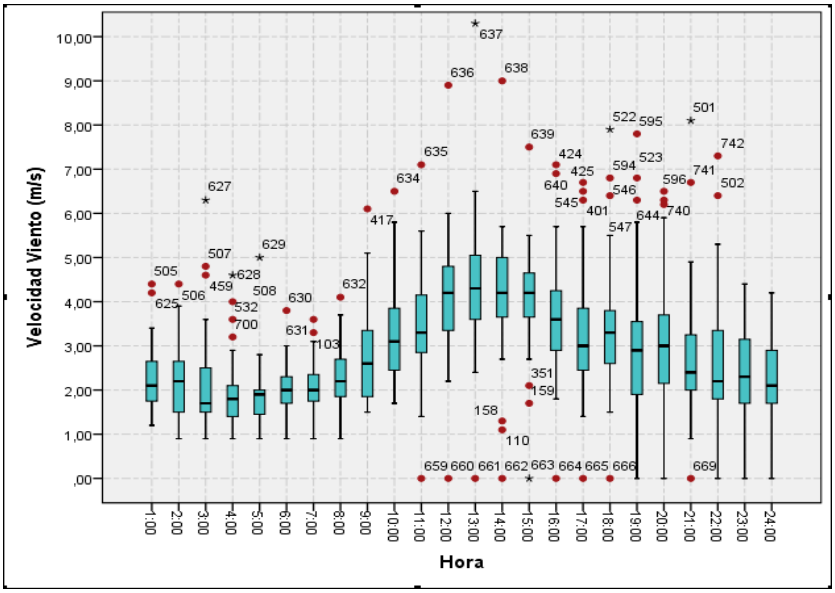
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM

Gráfica 4. Diagrama de caja temperatura. Calle 45



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM

Gráfica 5. Diagrama de caja velocidad del viento. Calle 45

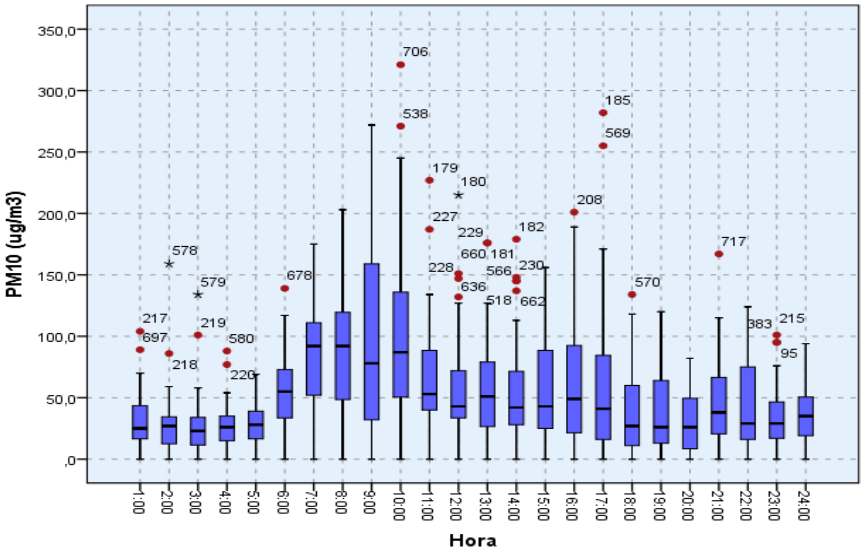


Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM

Calle 33

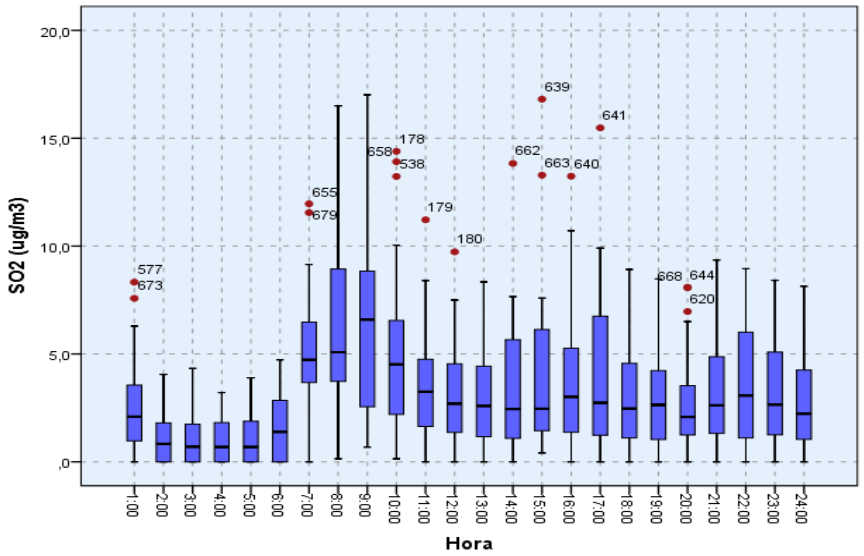
El comportamiento de los contaminantes es variable de acuerdo al entorno donde se realice la dispersión y a la época del año, por lo cual, para el periodo del 27 mayo de 2014 al 31 de octubre de 2014, se escogió el mes con un comportamiento típico, este fue octubre de 2014, los diagramas de caja se presentan a continuación:

Gráfica 6. Diagrama de caja MP10. Calle33



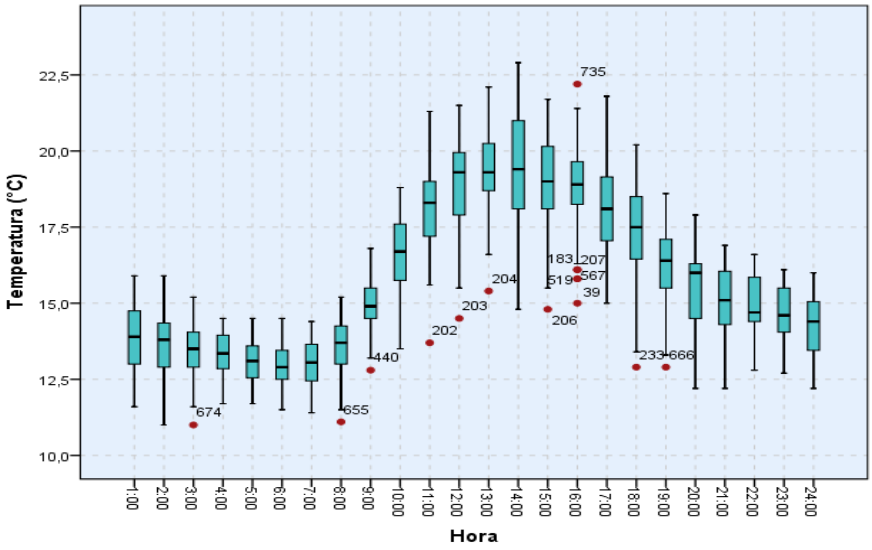
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM

Gráfica 7. Diagrama de caja SO_2. Calle 33



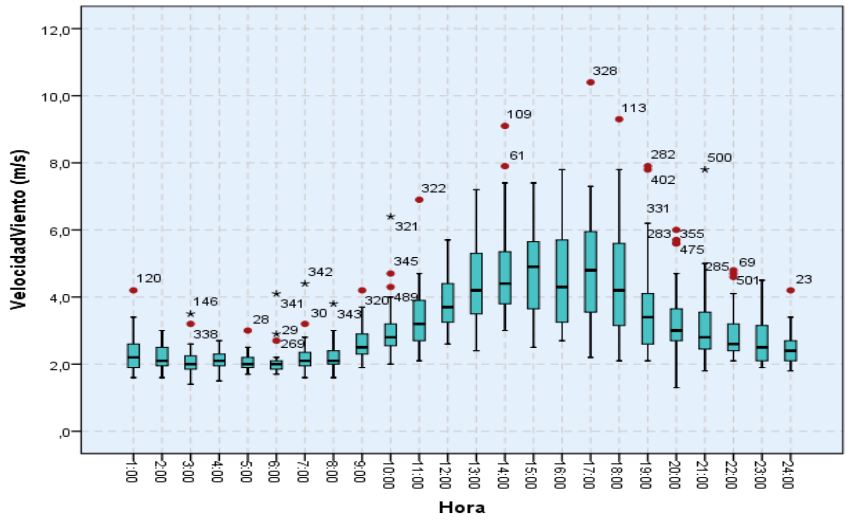
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM

Gráfica 8. Diagrama de caja Temperatura. Calle 33



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM

Gráfica 9. Diagrama de caja Velocidad del viento. Calle 33



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM

7.1.2. Estadística correlacional

Por medio de la correlación parcial se estableció la relación entre variables meteorológicas como velocidad del viento, dirección del viento y precipitación con los contaminantes MP10 y SO_2.

Teóricamente de 0.0 a 0.25 la relación es casi nula y que de 0.76 a 1.00 existe una relación muy fuerte entre sí. Por la complejidad del comportamiento de cada

variable que va ligada además a su entorno (geografía urbana) y a su inestabilidad en sí, no se puede esperar que exista una relación 100% lineal entre variables que en la realidad están fuertemente relacionadas.

Calle 45

Los datos utilizados para la siguiente correlación parcial son los monitoreados durante el periodo del 1 de diciembre 2013 al 20 de mayo 2014.

Tabla 12. Correlación parcial de variables meteorológicas y contaminantes en la carrera 7 con calle 45

Variables de control		SO2	PM10	Velocidad Viento	Precipitación	Dirección Viento
SO2	Correlación	1,000	,663	-,257	,023	,117
	Significación (bilateral)		,000	,000	,331	,000
	gl	0	1812	1812	1812	1812
PM10	Correlación	,663	1,000	-,151	,019	-,001
	Significación (bilateral)	,000		,000	,419	,967
	gl	1812	0	1812	1812	1812
Velocidad Viento	Correlación	-,257	-,151	1,000	-,035	-,060
	Significación (bilateral)	,000	,000		,137	,011
	gl	1812	1812	0	1812	1812
Precipitación	Correlación	,023	,019	-,035	1,000	-,017
	Significación (bilateral)	,331	,419	,137		,466
	gl	1812	1812	1812	0	1812
Dirección Viento	Correlación	,117	-,001	-,060	-,017	1,000
	Significación (bilateral)	,000	,967	,011	,466	
	gl	1812	1812	1812	1812	0

Fuente: Programa estadístico SPSS

La relación más alta se dio entre SO_2 y MP10, siendo esta de un 66%, dicha relación complementa lo observado en los diagramas de caja, debido a que durante el día los dos presentan picos altos y bajos en horas semejantes; es importante destacar que la generación de material particulado se da por otros medios como por ejemplo resuspensión además de los elementos azufrados. En cuanto a la relación con las variables meteorológicas el SO_2 y el MP10, aunque no fue fuerte, si presento una correlación del 25% y del 15% respectivamente con la velocidad del viento, esto es debido a que esta es una variable influyente en la dispersión de los contaminantes. La

velocidad del viento cuando es más alta, facilita que la dispersión llevando el contaminante lejos de su emisor y disminuyendo así su concentración. En este caso, la estación de medición, aunque se encontraba cerca de la vía, no tenía una barrera (edificios) que dificultara el paso del viento desde el noroccidente hacia la carrera 7, ayudando en el arrastre de los mismos. En cuanto a la precipitación, se presenta la relación más bajo con respecto a las demás variables, esto se debe a que no se presenta de manera frecuente o típica durante el día, solo por periodos en el año, disminuyendo así una relación directa entre los contaminantes y la misma. La dirección del viento es una variable, aunque influyente no se puede relacionar directamente con las demás, esto se atribuye a que la escala de medición es diferente y su ascendencia o descendencia no representa relación en una correlación lineal.

Calle 33

Los datos utilizados son durante el periodo del 27 mayo 2014 al 31 octubre 2014.

Tabla 13. Correlación parcial de variables meteorológicas y contaminantes en la carrera 7 con calle 33

Variables de control		SO2	PM10	Velocidad Viento	Dirección Viento	Precipitación
SO2	Correlación	1,000	,090	-,151	,107	,018
	Significación (bilateral)		,000	,000	,000	,335
	gl	0	2856	2856	2856	2856
PM10	Correlación	,090	1,000	-,192	,036	-,008
	Significación (bilateral)	,000		,000	,051	,666
	gl	2856	0	2856	2856	2856
Velocidad Viento	Correlación	-,151	-,192	1,000	-,016	-,010
	Significación (bilateral)	,000	,000		,379	,578
	gl	2856	2856	0	2856	2856
Dirección Viento	Correlación	,107	,036	-,016	1,000	,002
	Significación (bilateral)	,000	,051	,379		,913
	gl	2856	2856	2856	0	2856
Precipitación	Correlación	,018	-,008	-,010	,002	1,000
	Significación (bilateral)	,335	,666	,578	,913	
	gl	2856	2856	2856	2856	0

Fuente: Programa estadístico SPSS

Para este punto de medición, las condiciones de geografía urbana se ven marcadas por edificaciones de mayor altura con relación a la calle 45, siendo influyente en el comportamiento de los contaminantes. En este caso el SO_2 y MP10 se relacionan en un 9%; una causa es el fenómeno de turbulencia mecánica ya que puede estar interfiriendo en el comportamiento del MP10, cuando el choque del viento con las barreras presentes cambia los valores de las concentraciones en tiempo real, esto debido a que la estación de monitoreo se encuentra muy cerca de la carrera séptima y del muro de la Notaria 38, puede cambiar el comportamiento típico durante el día.

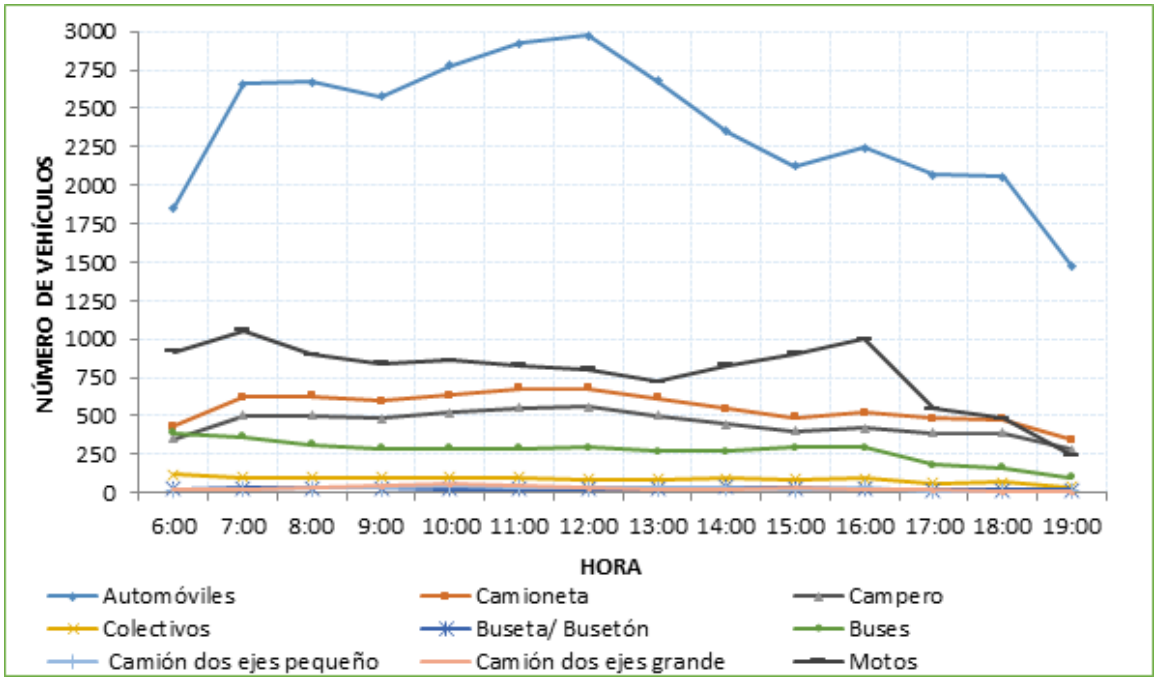
La velocidad del viento se relación en un 19% y 15% con el SO_2 y el MP10 respectivamente, aunque son bajos porcentajes, se observa de igual manera su influencia en el comportamiento de dichos contaminantes. De la misma manera como se observa en la tabla 12, la dirección del viento y la precipitación presentan las mismas condiciones bajo las cuales dificulta la relación lineal con las demás variables.

7.2 Aforos vehiculares y parque automotor

El parque automotor de Bogotá cuenta con 2'052.103 vehículos, de los cuales el 92% está compuesto por vehículos de servicio particular, el 7% por vehículos de servicio público y el 1% por vehículos de servicio oficial; todo esto presentando un aumento de casi el 12% anual, resultando a largo plazo un problema desde diferentes puntos de vista para los ciudadanos. Las zonas analizadas se caracterizan por alta circulación, debido a que en ellas se encuentran centros comerciales, universidades y oficinas; con relación al parque automotor de Bogotá, la cantidad de vehículos en los dos puntos de medición representan el 7,1%.

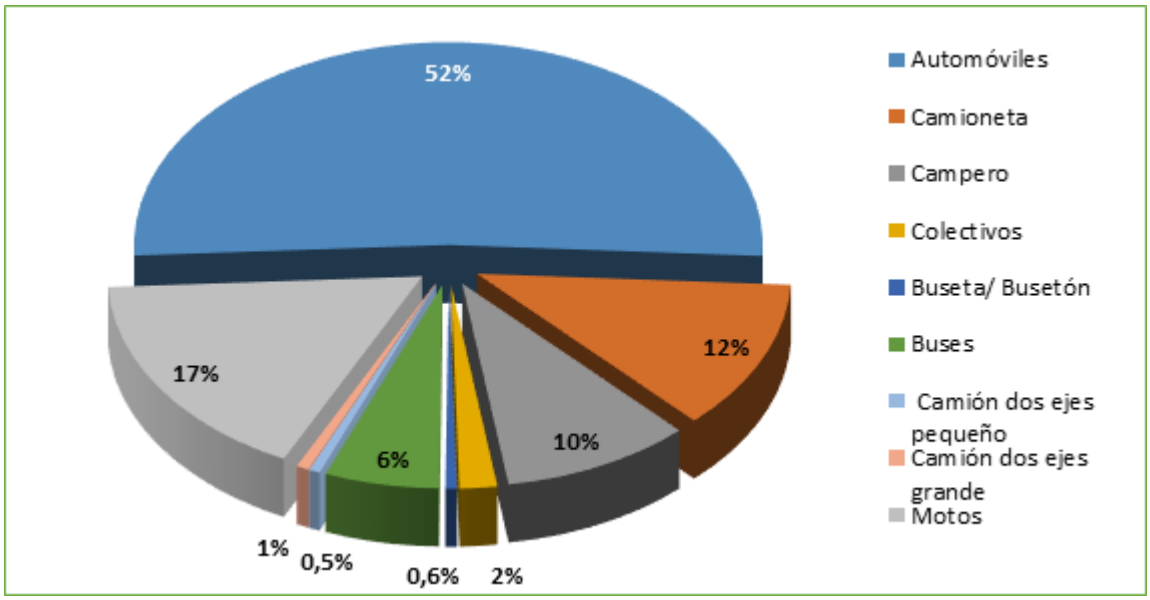
A continuación, en las gráficas 10 y 11 se presenta el flujo vehicular sobre la carrera séptima con calle 45, en el primer escenario en cual no había implementación de los buses híbridos. El total del flujo vehicular fue de 65.138 vehículos.

Gráfica 10. Flujo vehicular carrera 7 con calle 45. Marzo 16 de 2014



Fuente: Dirección de Control y Vigilancia. Secretaria de Movilidad.

Gráfica 11. Distribución en porcentaje de la cantidad de vehículos por categoría. Carrera 7 con calle 45

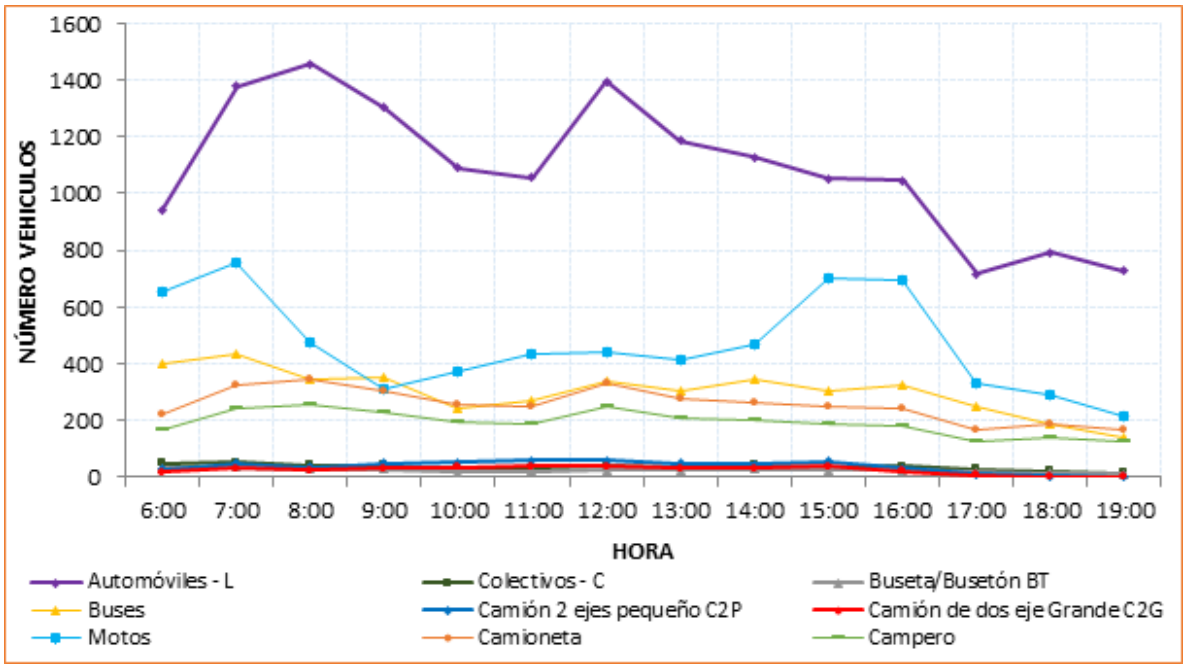


Fuente: Dirección de Control y Vigilancia. Secretaria de Movilidad.

A continuación, en la tabla 12, se presenta el flujo vehicular sobre la carrera séptima con calle 33, en el segundo escenario ya existe implementación de 200 de

vehículos duales, sin contar los buses híbridos el total del flujo vehicular fue de 34.772 vehículos.

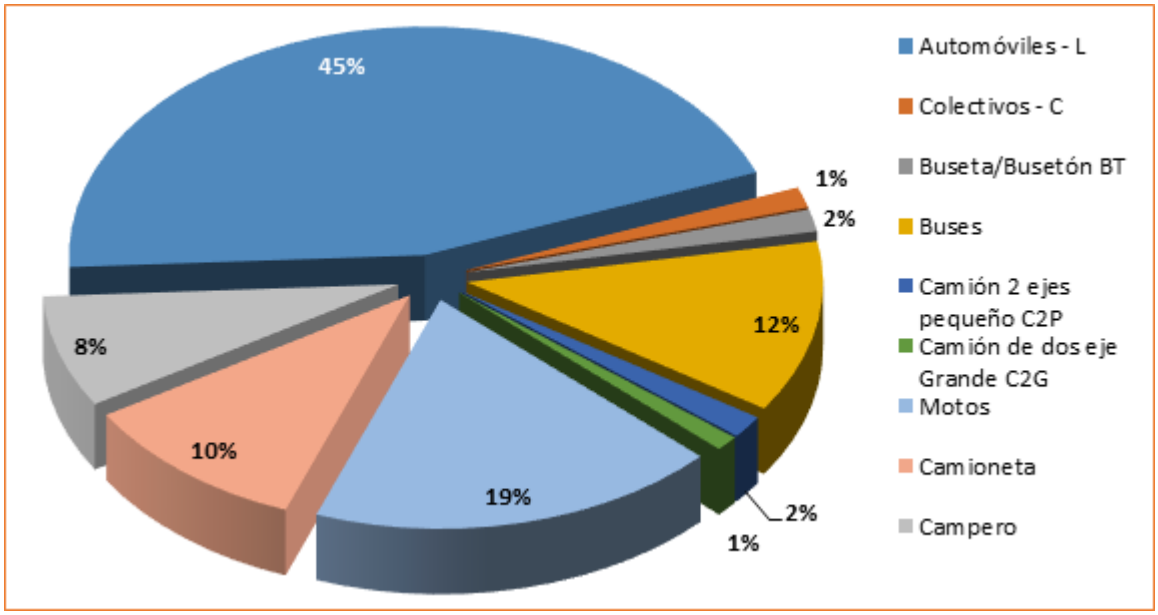
Gráfica 12. Flujo vehicular carrera 7 con calle 33. Mayo 29 de 2014



Fuente: Dirección de Control y Vigilancia. Secretaria de Movilidad.

Gráfica 13. Distribución en porcentaje de la cantidad de vehículos por categoría.

Carrera 7 con calle 45



Fuente: Dirección de Control y Vigilancia. Secretaria de Movilidad.

Existe una la diferencia entre los dos puntos de medición, porque en el punto de medición de la calle 45 (zona 1) transitan más de 30.000 vehículos con relación a la zona 2 (calle 33), mayor que el punto de medición de la calle 33. Esto se debe a que en la zona 1, se presenta un gran flujo de vehículos que circulan por la calle 45 y que a su vez se incorporan en el flujo de la carrera séptima, de ese punto a la calle 33 existen tres intersecciones importantes como son la calle 39, la calle 36 y la calle 34 en las cuales se realizan los mayores desvíos hacia otras vías disminuyendo así el flujo en la zona 2, por la cual además por ser estrecha es poco el flujo vehicular que allí se observa.

En cuanto a la cantidad de cada tipo de vehículos su comportamiento es muy similar, la mayor cantidad se centra en automóviles y motos, por otro lado las camionetas y camperos en la zona 1 están muy por encima casi un 6%, de los buses que es la categoría de servicio público con mayor porcentaje, en cambio en la zona 2 estas mismas 3 categorías están casi a la par, y los buses se presentan por encima en casi un 2%, los cuales en ambos zonas por la circulación y las rutas de servicio existentes se presentan en casi la misma cantidad.

La zona estudiada se caracteriza por ser un punto de encuentro de gran cantidad de personas, primero porque en ella se encuentran universidades como la Pontificia Universidad Javeriana, la Universidad Distrital, la Universidad Gran Colombia (Facultad de Ingeniería Civil) y la Universidad Piloto, centros comerciales como El San Martín, oficinas, notarias, colegios y conjuntos residenciales, de igual manera al encontrarse sobre la carrera séptima es una zona por la cual transita gran cantidad de vehículos no solo por ser un destino de llegada sino porque esta vía es una de las principales de la ciudad.

El comportamiento observado en los diagramas de caja de los contaminantes se relaciona con su fuente de emisión en este caso los vehículos, comparando con los aforos obtenidos los picos máximos y mínimos presentados se relacionan directamente entre sí. De acuerdo al pico y placa los máximos deben estar entre las 6:00 am a 8:00 am y de 6:00 pm a 8:00 pm que es el tiempo en que los vehículos con restricción salen a circulación y se puede notar el aumento con relación a los demás, pero lo que realmente definió el pico más significativo entre 7:00 am y 8:00 am son las actividades de los

habitantes, es decir, la mayoría de los habitantes empiezan su actividad diaria a partir de las 7:00 am por lo cual el desplazamiento es necesario en estas horas de la mañana.

En cambio, en la noche, aunque también es necesario el desplazamiento a sus hogares, los habitantes se desplazan a otros lugares para realizar actividades diferentes. Un ejemplo de las universidades es que en la noche hay un esparcimiento en la misma zona a bares o lugares para cenar, así como cierto porcentaje estudia en la noche disminuyendo así el uso de algún tipo de vehículo sea público o privado, por lo cual ya en el periodo de 9:00 pm a 10:00 pm se presenta un pequeño aumento mostrando el ultimo desplazamiento de la población. Así mismo en la caracterización de los vehículos los porcentajes más altos se atribuyen a los automóviles (50%) y a vehículos pequeños privados, pero también a servicio público como los buses, siendo estos los más usados por la población. Por otro lado, el pico de las 12 m, se debe a que es la hora donde la mayoría de la gente sale a almorzar o a realizar diferentes diligencias, alterando la constante en el tránsito de vehículos.

También es necesario establecer la cantidad de buses híbridos que circulan sobre la carrera séptima, siendo otro punto de partida para el análisis realizado. A continuación, se presentan los aforos horarios de los buses duales realizados en las zonas estudiadas, estos se ejecutaron en las horas de mayor flujo vehicular y en las cuales se presenta mayor demanda del servicio, es decir, desde las 6:00 am hasta las 9:00 am y desde las 4:00 pm hasta las 8:30 pm, los datos fueron tomados de los reportes realizados por Transmilenio; se obtuvieron datos de acuerdo a la frecuencia de 6 rutas del Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá-SITP.

Tabla 14. Aforo de los Buses Híbridos del SITP sobre la Carrera 7

HORA	HÍBRIDOS
6:00	121
7:00	144
8:00	128
16:00	110
17:00	122
18:00	123
19:00	116
20:00	158
TOTAL	**925**

Fuente: Transmilenio

La cantidad de buses híbridos se mantiene casi constante de acuerdo a las rutas de servicio público establecidas, generando una alta circulación de los mismos la cual llega casi a los 1.000 buses en las horas de mayor demanda del servicio. De 6:00 am a 8:00 am los ciudadanos se desplazan a los diferentes lugares donde realizan sus respectivas actividades, desde las 4:00 pm los estudiantes de universidades y colegios empiezan con la mayor demanda en el servicio en el viaje a su hogar, ya para las 5:00 pm en adelante los trabajadores se desplazan de igual manera a sus hogares.

- *Relación entre aforos vehiculares y contaminantes:*

Basado en el comportamiento diario del flujo vehicular sobre el área de estudio, el cual presenta dos picos máximos durante el día, en la mañana a las 7:00 am y al mediodía, se esperaría que de igual manera los picos máximos de MP10 o SO_2 presentaran el mismo comportamiento, pero las variables meteorológicas juegan un papel importante en dicha situación. El pico de las 7:00 am del flujo vehicular se asemeja con el de los contaminantes primero porque los vehículos son los directos emisores y se hace directa relación y porque además variables como temperatura y velocidad del viento presentan los valores mínimos en su comportamiento, esto hace que se presente estabilidad en la atmosfera dificultando que la masa de aire en la cual se contienen los gases y el material particulado no pueda ascender rápidamente si no que por el contrario se concentre en la parte baja de la atmosfera, registrándose así los valores más altos. De igual manera se presenta un alto flujo acompañado de poca circulación por congestiones en la vía, en la cual se presenta baja velocidad y que los vehículos deban frenar y arrancar con mayor frecuencia siendo este un factor de más altas emisiones.

En cuanto al segundo pico del día que se presenta al mediodía, las condiciones meteorológicas cambian, por lo cual, la relación entre el flujo vehicular y las concentraciones de los contaminantes se vuelve inversa, esto se puede atribuir a que la temperatura y la velocidad del viento tienden a presentar picos máximos facilitando que haya una dispersión más rápida por medio de la mezcla vertical en la atmosfera, ayudando a la masa de aire a ascender. Así mismo, aunque el flujo vehicular es alto, la circulación a esa hora del día es más rápida y los vehículos no tienden a generar congestión.

La diferencia significativa en la cantidad de vehículos en los dos puntos de medición, se ve reflejada en los valores de concentraciones de contaminantes como MP10, que tiene un promedio para el primer periodo de 65,10 ug/m^3 y para el segundo periodo 52,15 ug/m^3, de acuerdo a esto se esperaría que para el segundo punto de medición la concentración fuera más baja ya que la disminución de la flota vehicular es casi a la mitad, pero la geografía urbana entra a cambiar dicha condición; edificios de mayor altura se encuentran en la calle 33, formando barreras que pueden generar el efecto de cañón urbano; cuando la corriente de aire entra al cañón no sigue la dirección normal de la misma para que se observe un arrastre si no que por el contrario se encuentra con barreras que forman vórtices, los cuales transportan los contaminantes dentro del cañón y no hacía afuera.

7.3 Cálculo de emisiones

7.3.1. Emisiones para MP10 por tecnología EURO y tipo de combustible

En las tablas 13 a la 16 se muestran las emisiones para MP10, calculadas multiplicando los aforos vehiculares (Anexo 3) y los factores de emisión seleccionados (Anexo 5). Las tablas se encuentran divididas por escenarios según la inclusión o no de los buses híbridos, para esto se tuvo en cuenta el aporte del combustible de los híbridos (70% Diésel y 30% eléctrico) ya que no se contó previamente con información real para los buses que transitan sobre la carrera séptima. Es posible observar que tanto para la calle 45 como para la calle 33 hay una reducción mínima sobre el total de emisión, esto puede deberse principalmente a que el total de buses híbridos que se encontraban en tránsito para el año 2014 no superaba una cantidad de 200 y según los aforos la circulación diaria no supera los 1000 buses, mientras que los buses tradicionales tienen una circulación de más de 4000 vehículos diarios.

- *Escenario 1: Flota vehicular tradicional SIN buses híbridos – Calle 45*

Tabla 15. Emisiones de la Calle 45 – Sin buses híbridos

EMISIÓN (mg/m*h) – Escenario 1					
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**	
Automóviles - L	0,00	0,22	0,20	0,25	
Colectivos - C	1,09	2,59	10,26	16,70	
Camioneta	0,92	1,40	6,16	10,24	
Campero	24,91	29,26	9,73	2,63	
Buseta/Busetón - BT	0,82	6,55	7,02	3,27	
Buses - B	48,15	195,20	80,63	**52,29***	
Camión dos ejes pequeño-C2P	2,06	1,34	2,43	0,34	
Camión dos ejes grande-C2G	3,02	0,42	3,35	1,66	
Motos-M	-	-	-	-	
SUMA	80,97	236,98	119,78	87,38	**525,10**

Fuente: Autores.

*Este dato es la emisión generada por los buses tradicionales SIN tener en cuenta los híbridos ya que para este periodo no se encontraban en circulación.

- *Escenario 2: Flota vehicular tradicional CON buses híbridos – Calle 45*

Tabla 16. Emisiones de la Calle 45 – Con buses híbridos

EMISION (mg/m*h) – Escenario 2					
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**	
Automóviles - L	0.00	0.22	0.20	0.25	
Colectivos - C	1.09	2.59	10.26	16.70	
Camioneta	0.92	1.40	6.16	10.24	
Campero	24.91	29.26	9.73	2.63	
Buseta/Busetón - BT	0.82	6.55	7.02	3.27	
Buses - B	48.15	195.20	80.63	**42.46***	
Camión dos ejes pequeño-C2P	2.06	1.34	2.43	0.34	
Camión dos ejes grande-C2G	3.02	0.42	3.35	1.66	
Motos-M	-	-	-	-	
SUMA	80.97	236.98	119.78	77.56	**515.28**

Fuente: Autores.

- *Escenario 3: Flota vehicular tradicional SIN buses híbridos – Calle 33.*

Tabla 17. Emisiones de la Calle 33 – Sin buses híbridos

EMISION (mg/m*h) – Escenario 3					
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**	
Automóviles - L	0.000	0.11	0.000	0.094	
Camioneta	0.336	1.08	4.914	8.038	
Campero	0.168	0.38	3.159	4.270	
Buseta/Busetón - BT	64.186	75.02	25.047	6.422	
Colectivos - C	0.000	2.22	2.652	1.227	
Buses - B	47.060	193.71	80.100	**51.967***	
Camión dos ejes pequeño-C2P	9.546	1.71	3.509	0.488	
Camión dos ejes grande-C2G	2.412	0.10	2.819	1.417	
Motos-M	-	-	-	-	
SUMA	123.71	274.33	122.200	64.10	**594,16**

Fuente: Autores.

- *Escenario 4: Flota vehicular tradicional CON buses híbridos – Calle 33*

Tabla 18. Emisiones de la Calle 33 – Con buses híbridos

EMISION (mg/m*h)					
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**	
Automóviles - L	0.000	0.11	0.000	0.094	
Camioneta	0.336	1.08	4.914	8.038	
Campero	0.168	0.38	3.159	4.270	
Buseta/Busetón - BT	64.186	75.02	25.047	6.422	
Colectivos - C	0.000	2.22	2.652	1.227	
Buses - B	47.060	193.71	80.100	**42.144***	
Camión dos ejes pequeño-C2P	9.546	1.71	3.509	0.488	
Camión dos ejes grande- C2G	2.412	0.10	2.819	1.417	
Motos-M	-	-	-	-	
SUMA	123.71	274.33	122.200	64.10	**584,34**

Fuente: Autores.

*Este dato representa la emisión de la flota vehicular tradicional CON los buses híbridos que iniciaron a circular durante este periodo de medición. Se tuvo en cuenta el aporte del combustible de Diésel por parte de los híbridos el cual es 70% y el aforo de los mismos.

7.4.2. Emisiones horarias calculadas y Simulación en ENVI-met 3.1

En las tablas 17 a la 20 Se muestran los resultados del cálculo de emisiones para los cuatro escenarios que van a ser modelados en ENVI-met 3.1. Los valores que tienen las unidades de mg/m*s fueron los que se utilizaron para el modelo por requerimiento del mismo. Al observar las tablas y haciendo una comparación del cambio que hubo con la emisión, se puede decir que la reducción es significativamente baja de un 0.8%. Esto pudo deberse, no solamente a la baja cantidad de buses híbridos que ingresaron a circular, sino que también se tomó como supuesto que estos entraron a reemplazar antiguas rutas de buses tradicionales, sin embargo, no se contó con el número exacto de buses que se reemplazaron.

Tabla 19. Emisiones horarias Escenario 1 – Calle 45 SIN buses híbridos

Hora	Número de vehículos	Emisión (mg/m*h)	Emisión (mg/m*s)
6:00 am	3572	77,06	0,0214
7:00 am	4576	98,72	0,0271
8:00 am	4425	95,47	0,0265

Fuente: Autores

Tabla 20. Emisiones horarias Escenario 2 – Calle 45 CON buses híbridos

Hora	Número de vehículos	Emisión (mg/m*h)	Emisión (mg/m*s)
6:00 am	3572	76,42	0,0212
7:00 am	4576	97,91	0,0272
8:00 am	4425	94,68	0,0263

Fuente: Autores

Tabla 21. Emisiones horarias Escenario 3 – Calle 33 SIN buses híbridos

Hora	Número de vehículos	Emisión (mg/m*h)	Emisión (mg/m*s)
6:00 am	2295	71,80	0,0199
7:00 am	3021	94,54	0,0263
8:00 am	3665	114,68	0,0319

Fuente: Autores

Tabla 22. Emisiones horarias Escenario 4 – Calle 33 CON buses híbridos

Hora	Número de vehículos	Emisión (mg/m*h)	Emisión (mg/m*s)
6:00 am	2295	72,51	0,0201
7:00 am	3021	95,47	0,0265
8:00 am	3665	115,81	0,0322

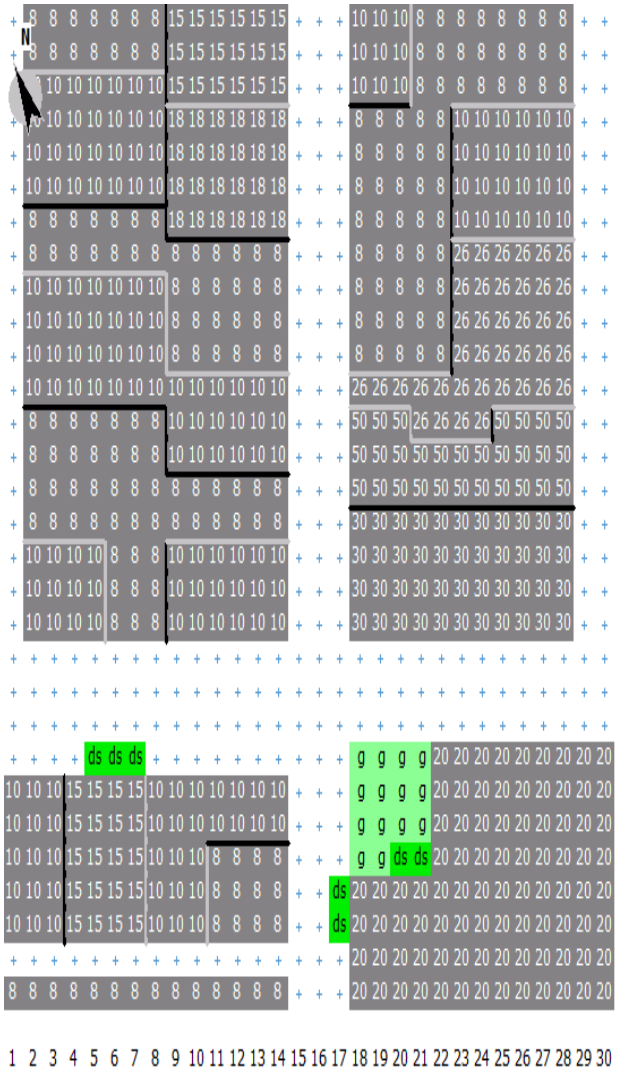
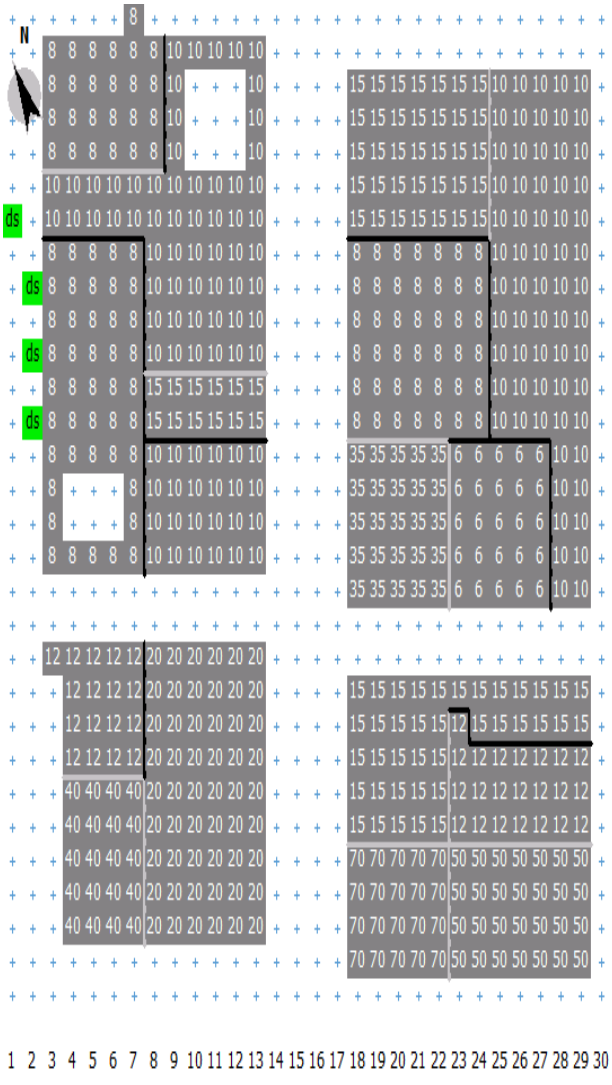
Fuente: Autores

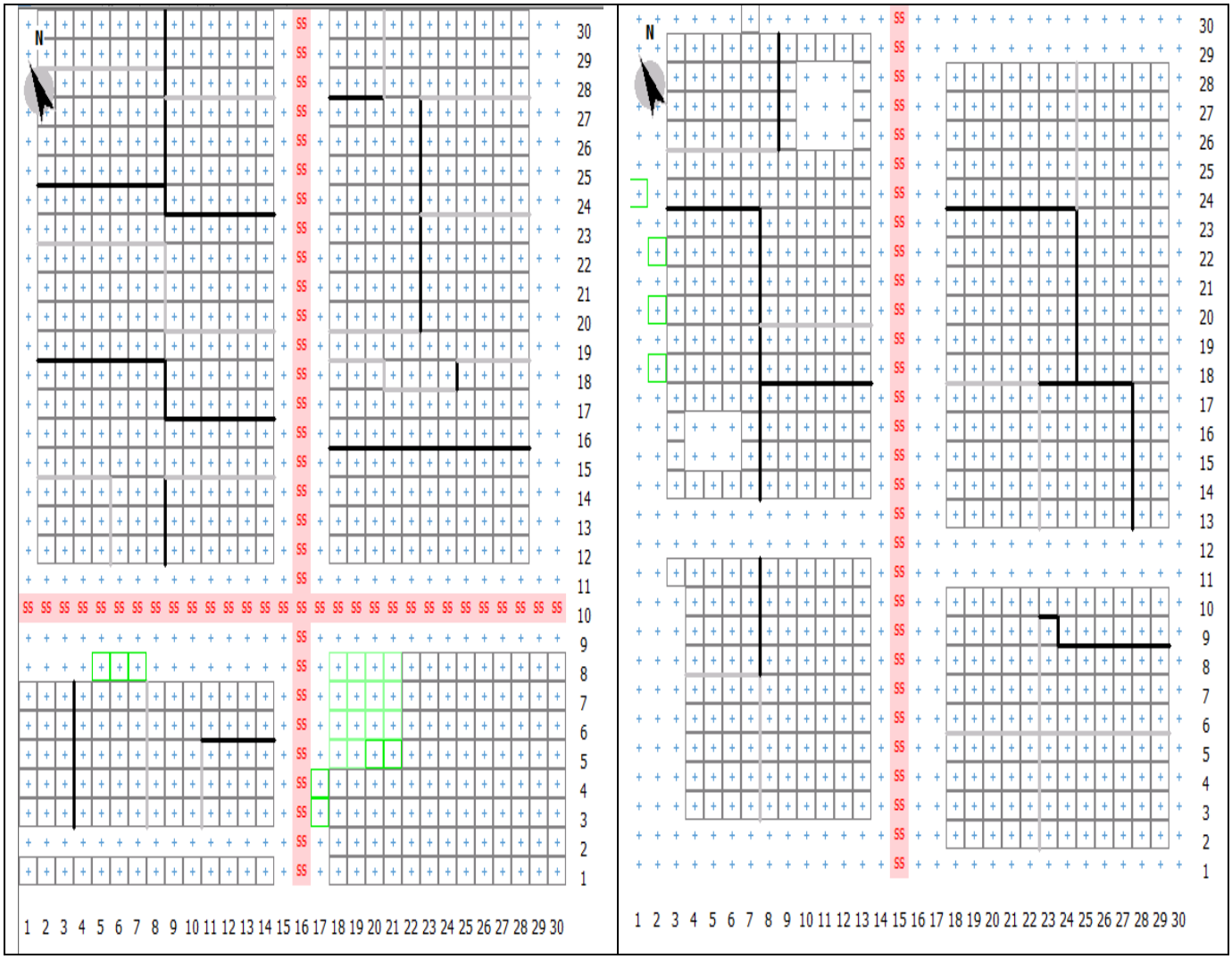
7.5 Modelamiento en cañón urbano

7.5.1. Geografía Urbana de la zona para simulación ENVI-met 3.1

En la Ilustración 5 se muestra un grupo de imágenes las cuales representan gráficamente la geografía urbana de cada una de las zonas. Inicialmente se determinó el tamaño de la grilla de 30x30 metros, se hizo una corrección del Norte de 30° según la dirección del viento. En los cuadros a y b se muestran las edificaciones y la cobertura vegetal presente. Las figuras c y d ilustran las fuentes móviles que transitan en cada calle.

Ilustración 5. Representación gráfica de cada zona en el modelo ENVI-met 3.1

a. Edificaciones de la zona Calle 45	b. Edificaciones de la zona Calle 33
	
c. Fuentes Móviles Calle 45	**d. Fuentes Móviles Calle 33**



Fuente: Modelo ENVI-met 3.1 y Autores.

7.5.2. Concentración de MP10 y comparación de puntos de medición (Calle 45 y Calle 33)

Las tablas 21 y 22 muestran, las concentraciones de MP10 calculadas por el modelo ENVI- met 3.1 así como también los datos de las variables meteorológicas utilizadas como datos de entrada. En las columnas 3 y 4 se observa que las concentraciones son altas a pesar del dato de emisión utilizado en la corrida el cual fue muy bajo, comparando ambos escenarios (Sin buses híbridos y Con buses híbridos) se observa que la disminución de concentraciones dada por parte del combustible de los buses híbridos son demasiado bajas casi imperceptibles, la velocidad del viento es la variable que mayor influencia tiene sobre los resultados ya que es posible observar que a medida que este

valor disminuye la concentración MP10 aumenta y viceversa así que tanto la concentración de MP10 como la velocidad del viento tienen una relación inversamente proporcional.

Tabla 23. Concentración de MP10 y variables meteorológicas utilizadas en ENVI-met 3.1 para la Calle 45

FECHA	HORA	MP10 (µg/m^3) Sin buses Híbridos	MP10 (µg/m^3) Con buses Híbridos	Humedad Relativa (%)	Velocidad del Viento (m/s)	Dirección del viento (°)	Temperatura (°C)
02/13/2014	06:00	726,9803	726,9772	68,00	2,10	343,00	12,20
02/13/2014	07:00	550,8686	550,8663	67,90	2,60	346,00	12,60
02/13/2014	08:00	614,2350	614,2325	61,70	2,20	159,00	12,50
02/06/2014	06:00	408,3901	408,3884	70,10	2,70	69,00	12,90
02/06/2014	07:00	746,1069	746,1039	69,60	1,80	132,00	12,70
02/06/2014	08:00	595,0739	595,0715	57,20	2,20	196,00	13,10
03/17/2014	06:00	814,9655	814,9621	82,00	1,20	90,00	13,10
03/17/2014	07:00	521,9897	521,9875	77,30	2,00	144,00	13,30
03/17/2014	08:00	519,6943	519,6923	46,90	2,60	186,00	13,60
04/05/2014	06:00	606,7755	606,7729	70,20	2,50	84,00	13,70
04/05/2014	07:00	440,5889	440,5871	70,40	3,10	139,00	14,50
04/05/2014	08:00	446,6121	446,6139	47,40	2,10	101,00	15,50
05/06/2014	06:00	450,5435	450,5417	70,40	1,60	341,00	13,30
05/06/2014	07:00	449,3111	449,3093	72,40	2,10	344,00	12,80
05/06/2014	08:00	387,7704	387,7689	72,70	3,00	343,00	12,70

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM y ENVI-met 3.1

Tabla 24. Concentración de MP10 y variables meteorológicas utilizadas en ENVI-met 3.1 para la Calle 33

FECHA	HORA	MP10 (µg/m^3) SIN buses Híbridos	MP10 (µg/m^3) CON buses Híbridos	Humedad Relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (°)	Temperatura (°C)
7/27/2014	06:00	1180,2296	1180,225	67,00	2,20	346,00	12,40
7/27/2014	07:00	835,4003	835,3969	63,50	2,50	343,00	13,40
7/27/2014	08:00	456,6373	456,6345	63,60	2,60	258,00	13,80
8/15/2014	06:00	371,0201	371,0187	61,60	3,90	306,00	13,90
8/15/2014	07:00	322,9044	322,9032	62,50	4,50	308,00	14,00
8/15/2014	08:00	244,3965	244,3950	49,00	4,80	258,00	14,60
9/20/2014	06:00	726,8070	726,8042	68,90	2,10	329,00	13,60
9/20/2014	07:00	599,6895	599,6871	72,30	2,20	332,00	13,20
9/20/2014	08:00	473,2078	473,2049	73,70	2,10	324,00	13,40
10/13/2014	06:00	540,5212	540,5190	62,50	2,90	298,00	13,70
10/13/2014	07:00	401,6752	401,6736	87,00	2,50	313,00	15,00
10/13/2014	08:00	440,0279	440,0253	23,50	2,40	302,00	16,30
10/10/2014	06:00	716,0155	716,0126	76,10	1,70	309,00	13,00
10/10/2014	07:00	603,8713	603,8689	71,60	2,20	253,00	13,70
10/10/2014	08:00	507,5660	507,5629	44,20	2,40	256,00	14,50

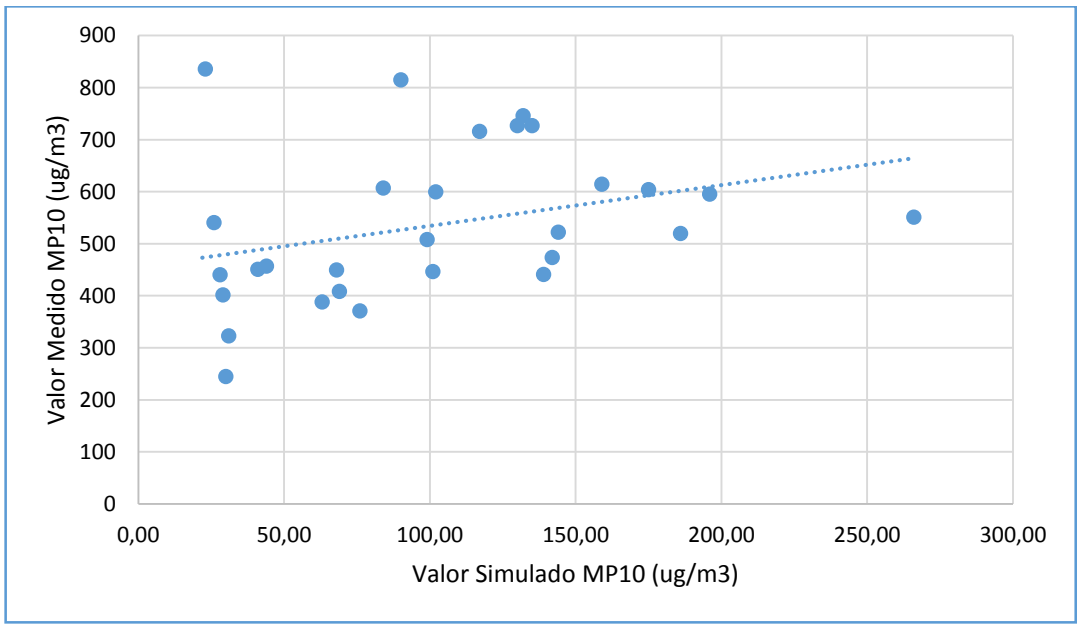
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM y ENVI-met 3.1

7.5.3 Validación del modelo

En la tabla 23 y 24 se observan los datos de concentración de MP10 medidos y simulados, tanto para la flota vehicular con buses híbridos como la flota vehicular sin buses híbridos, para ambos casos se puede ver que existe una gran diferencia entre ambas concentraciones, lo que nos permite decir que existe una sobreestimación en los datos de entrada de la alimentación del modelo, además que la emisión simulada es muy baja. Además de esto la localización exacta de los receptores en el terreno de ENVI-met 3.1 cuenta con unas coordenadas respectivas y los resultados arrojados por el modelo son hechos sobre unas coordenadas estándar así que estas se aproximaron al lugar donde se colocó la estación móvil. Las gráficas 14 y 15 representan la relación existente entre los

valores de concentración de MP10 Simulados y Medidos, así que se observa que hay una gran dispersión entre los datos y no es posible determinar en realidad lo que está sucediendo en cada uno de los puntos de medición (Calle 45 y Calle 33), además el valor de Error Cuadrático Medio (ECM) determinar que el modelo está sobreestimando los resultados finales de concentración en más de un 100%. Finalmente analizando ambos casos (Tanto flota vehicular con buses híbridos como la flota vehicular sin buses híbridos), no es posible observar si existe cambio alguno que pueda determinar si realmente hay un aporte en la reducción de emisión de MP10 por parte de los buses híbridos.

Gráfica 14. Relación entre los valores de MP10 Simulado y Observado para flota vehicular SIN buses híbridos



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM y ENVI-met 3.1

R=0,1055

Tabla 25. Datos de concentración de MP10 SIN buses híbridos.

VALORES DE MP10 SIN FLOTA VEHICULAR DE BUSES HÍBRIDOS					
FECHA	**HORA**	**MP10 (µg/m^3) Valor Simulado**	**MP10 (ug/m3) Valor Medido**	**(Mpsim-Mpobs)**	**Potencia**
02/13/2014	6:00	726,9803	135,00	591,98	350440,67
02/13/2014	7:00	550,8686	266,00	284,87	81150,11
02/13/2014	8:00	614,235	159,00	455,24	207238,90
2/06/2014	6:00	408,3901	69,00	339,39	115185,64
2/06/2014	7:00	746,1069	132,00	614,11	377127,28
2/06/2014	8:00	595,0739	196,00	399,07	159259,97
03/17/2014	6:00	814,9655	90,00	724,97	525574,97
03/17/2014	7:00	521,9897	144,00	377,99	142876,21
03/17/2014	8:00	519,6943	186,00	333,69	111351,88
4/05/2014	6:00	606,7755	84,00	522,78	273294,22
4/05/2014	7:00	440,5889	139,00	301,59	90955,864
4/05/2014	8:00	446,6121	101,00	345,61	119447,72
5/06/2014	6:00	450,5435	41,00	409,54	167725,87
5/06/2014	7:00	449,3111	68,00	381,31	145398,15
5/06/2014	8:00	387,7704	63,00	324,77	105475,81
7/27/2014	6:00	1180,2296	22,00	1158,23	1341495,8
7/27/2014	7:00	835,4003	23,00	812,40	659994,24
7/27/2014	8:00	456,6373	44,00	412,64	170269,54
8/15/2014	6:00	371,0201	76,00	295,02	87036,859
8/15/2014	7:00	322,9044	31,00	291,90	85208,178
8/15/2014	8:00	244,3965	30,00	214,40	45965,859
9/20/2014	6:00	726,807	130,00	596,81	356178,59
9/20/2014	7:00	599,6895	102,00	497,69	247694,83
9/20/2014	8:00	473,2078	142,00	331,21	109698,60
10/13/2014	6:00	540,5212	26,00	514,52	264732,06
10/13/2014	7:00	401,6752	29,00	372,68	138886,80
10/13/2014	8:00	440,0279	28,00	412,03	169766,99
10/10/2014	6:00	716,0155	117,00	599,02	358819,56
10/10/2014	7:00	603,8713	175,00	428,87	183930,59
10/10/2014	8:00	507,566	99,00	408,57	166926,17

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM y ENVI-met 3.1

ECM = 495,28

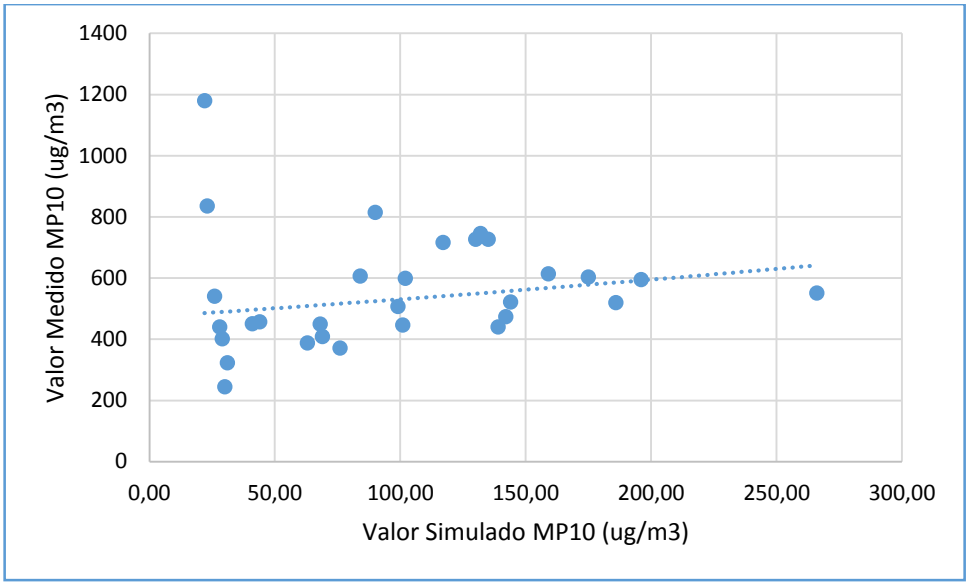
Tabla 26. Datos de concentración de MP10 CON buses híbridos

FECHA	HORA	MP10 (µg/m^3) Con buses Híbridos	MP10 (ug/m3) Medido	(Mpsim-Mpobs)	Potencia
02/13/2014	6:00	726,9772	135,00	591,98	350437,0053
02/13/2014	7:00	550,8663	266,00	284,87	81148,80888
02/13/2014	8:00	614,2325	159,00	455,23	207236,6291
2/06/2014	6:00	408,3884	69,00	339,39	115184,4861
2/06/2014	7:00	746,1039	132,00	614,10	377123,6
2/06/2014	8:00	595,0715	196,00	399,07	159258,0621
03/17/2014	6:00	814,9621	90,00	724,96	525570,0464
03/17/2014	7:00	521,9875	144,00	377,99	142874,5502
03/17/2014	8:00	519,6923	186,00	333,69	111350,5511
4/05/2014	6:00	606,7729	84,00	522,77	273291,505
4/05/2014	7:00	440,5871	139,00	301,59	90954,77889
4/05/2014	8:00	446,6139	101,00	345,61	119448,9679
5/06/2014	6:00	450,5417	41,00	409,54	167724,404
5/06/2014	7:00	449,3093	68,00	381,31	145396,7823
5/06/2014	8:00	387,7689	63,00	324,77	105474,8384
7/27/2014	6:00	1180,225	22,00	1158,23	1341485,151
7/27/2014	7:00	835,3969	23,00	812,40	659988,7231
7/27/2014	8:00	456,6345	44,00	412,63	170267,2306
8/15/2014	6:00	371,0187	76,00	295,02	87036,03335
8/15/2014	7:00	322,9032	31,00	291,90	85207,47817
8/15/2014	8:00	244,395	30,00	214,40	45965,21603
9/20/2014	6:00	726,8042	130,00	596,80	356175,2531
9/20/2014	7:00	599,6871	102,00	497,69	247692,4495
9/20/2014	8:00	473,2049	142,00	331,20	109696,6858
10/13/2014	6:00	540,519	26,00	514,52	264729,8014
10/13/2014	7:00	401,6736	29,00	372,67	138885,6121
10/13/2014	8:00	440,0253	28,00	412,03	169764,8478
10/10/2014	6:00	716,0126	117,00	599,01	358816,095
10/10/2014	7:00	603,8689	175,00	428,87	183928,5334
10/10/2014	8:00	507,5629	99,00	408,56	166923,6433

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM y ENVI-met 3.1

ECM = 495.27

Gráfica 15. Relación entre los valores de MP10 Simulado y Observado para flota vehicular SIN buses híbridos



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM y ENVI-met 3.1

R=0,1055

8 CONCLUSIONES

- Basados en la estadística descriptiva, por medio de los diagramas de caja se observó que la temperatura y la velocidad del viento son influyentes en el comportamiento del MP10 y SO_2; los picos máximos de concentraciones se encuentran en las horas de la mañana, donde la atmosfera es estable con temperatura baja y una velocidad del viento mínima, dificultando la dispersión de dichos contaminantes en la atmosfera, caso contrario se observa en la tarde de 12:00 m a 2:00 pm, donde los valores máximos de temperatura y velocidad del viento se registran, situación que facilita un movimiento vertical de la masa de aire presentándose así una disminución en las concentraciones de los contaminantes.
- Según la correlación parcial, la velocidad del viento es la variable de mayor influencia en el comportamiento del MP10 y el SO_2; para la calle 45 se presentó del 25% y del 15% respectivamente y para la calle 33 se presentó del 15% y del 19% respectivamente, caso contrario se observó con la precipitación y la dirección del viento, ya que para el caso de la precipitación su comportamiento no es frecuente de manera diaria, esta se presenta de acuerdo a situaciones concretas o por la época del año, disminuyendo así la relación lineal entre los contaminantes y la misma, en cuanto a la dirección del viento siendo una variable influyente, observó una relación por debajo del 0,1% debido a que las escalas de medición son diferentes y no se puede ver por medio de la estadística la relación real.
- El flujo vehicular es un factor influyente en el comportamiento de los contaminantes, este presentó para las dos zonas de estudio dos picos máximos durante el día, relacionándose el pico de mañana con el pico máximo en las concentraciones de los contaminantes, dicho comportamiento se atribuye, además a la congestión generada por el alto flujo, en la cual se observa disminución de la velocidad y que los vehículos deban frenar y arrancar con mayor frecuencia, pero es la meteorología la que define la dinámica en la dispersión de los contaminantes, esto re puede ver reflejado al mediodía donde de igual manera existe un alto flujo vehicular en la zona, pero las concentraciones por el contrario disminuyen, ya que los altos valores en la temperatura y la velocidad del viento facilitan que haya una dispersión en la atmosfera.

- En cuanto al efecto de cañón urbano, predomina la formación de vórtices sobre el punto de medición de la calle 33, debido a la geografía urbana se caracteriza por tener edificios de mayor altura con respecto al punto de medición de la calle 45, esto favorece la turbulencia mecánica y por lo tanto que la ventilación del cañón sea más lenta.
- En cuantos a los resultados obtenidos a partir de la estimación de emisiones para MP10, hubo una incertidumbre alta ya que al hacer exclusión de la velocidad media de los vehículos no se obtiene realmente datos aproximados para fuentes móviles, dificultando el valor real de las mismas, además los factores de emisión se clasificaron de acuerdo a la tecnología EURO y el tipo de combustible de los vehículos, incluso esta información se utilizó para obtener valores en la Guía Ambiental Europea para la estimación de emisiones, el cual se encuentra definido para combustibles extranjeros, además los días elegidos para hacer la simulación se basaron en similitudes respecto a las variables meteorológicas y no respectivamente a los aforos vehiculares ya que finalmente se trabajó con solo dos aforos por punto de medición (Calle 45 y Calle 33) los cuales fueron compuestos con el Parque Automotor de Bogotá. Respecto al contaminante $SO_{2,}$ no se determinaron valores de emisión debido a la falta de información tanto del aporte de azufre en el combustible Diésel como factores de emisión del SO_2.
- Según los resultados tanto del modelo como de la validación del mismo no fue posible determinar exactamente la cantidad de MP10 que aporta la flota vehicular que transita sobre la carrera séptima debido principalmente a la sobreestimación (más del 400% según el error cuadrático medio) que se está generando por parte del modelo sobre los datos de entrada, además los resultados extraídos de los archivos del modelo, se aproximan a las coordenadas de localización de la estación. Gráficamente tampoco se refleja una tendencia en la concentración del MP10.
- De acuerdo a los resultados y análisis de la totalidad del estudio, no fue posible establecer realmente si hubo o no una reducción por parte del combustible de los buses híbridos sobre la calidad del aire en la carrera séptima, principalmente por la falta de información sobre el funcionamiento e implementación de los mismos,

ya que se tomaron varios supuestos para llegar a resultados concretos, como por ejemplo: se asumió que el ingreso de los buses híbridos fue en reemplazo de antiguas rutas tradicionales, el aporte del combustible Diésel-Eléctrico fue en un 70-30% respectivamente. Además, para ese año (2014) se implementaron cerca de 200 buses híbridos y según los aforos la circulación diaria de estos buses es aproximadamente 925, lo cual limita tener una comparación equitativa frente a la flota vehicular tradicional en la que diariamente se transportan más de 4000 diarios. Finalmente observando la estimación de emisiones para el MP10 tampoco fue posible observar una disminución por parte de los buses híbridos, ya que los datos reflejan una diferencia de casi 20 centésimas, determinando una gran semejanza entre los escenarios de estudio.

9 RECOMENDACIONES

- Realizar calibraciones periódicas para que las mediciones de las concentraciones de los contaminantes y de las variables meteorológicas tengan un alto porcentaje de validez, mejorando así su análisis.
- Debido a que un análisis requiere un gran número de datos para llevarse a cabo es importante que la Unidad Móvil de calidad del aire del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (automática) tenga un periodo que supere el año en una misma ubicación, facilitando así una mayor constancia en la toma de datos generando una representatividad más alta.
- La Unidad Móvil de calidad del aire del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (automática) debe estar ubicada a una distancia considerable de los edificios y de la vía, para que su sensibilidad a cualquier variable disminuya y las mediciones puedan ser más precisas y acertadas a las condiciones reales del área de estudio.
- Se recomienda la continuidad al tema del estudio debido a que la flota de buses híbridos del sistema de transporte masivo ha aumentado, esto facilita que se pueda obtener un valor más representativo en cuanto a la contribución en la reducción de emisiones de MP10 y SO2.

10 BIBLIOGRAFIA

Ahmad, k., Khare, M., & Chauddry, K. (2005). Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections-A review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 698-717.

Assael, M., Delaki, M., & Kakosimos, K. (2008). Applying the OSPM model to the calculation of PM10 concentration levels in the historical centre of the city of Thessaloniki. *Atmospheric Environment*, 65-77.

Atkins, P., & Jones, L. (2005). *Chemical Principies. The quest for Insight.* Nueva York: Panamericana.

Autos híbridos; Funcionamiento y Características. (s.f.). Obtenido de http://www.pac.com.ve/index.php?option=com_content&view=article&id=11161:autos-hibridos-funcionamiento-y-caracteristicas&catid=54:automotriz&Itemid=77

Ayllón, T. (1995). *Elementos de metereología y climatología.* Trillas.

Callaghan, L., & Lynch, S. (Agosto de 2005). *Analysis of Electric Drive Technologies For Transit Applications: Battery Hybrid-Electric, and Fuel Cells.* Obtenido de http://www.fta.dot.gov/documents/Electric_Drive_Bus_Analysis.pdf

Carabalí, J., & Hernandez, J. (2009). Determinaciones de incidencia que tiene pico y placa en la emisión de Material Particulado en el sector de la calle 80 con intersecciones entre la Av. 68 y la Av. Boyacá. 193.

Chaparro, R., Gonzales, C., Ortiz, E., & Torrijos, J. (Dirección). (2014). *Proyecto de simulación del comportamiento del Material Particulado en un "street canyon" ubicado en la Carrera 13 entre calles 35 y 38 medainte la utilización del software CFD denominado ENVI-met* [Película].

Decreto 948 de 1995. (s.f.). *Reglamento de protección y control de la calidad del aire*. Bogotá.

EEA. (2013). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook. luxembourg.

Energía en el medio ambiente urbano . (01 de Octubre de 2014). Obtenido de http://www.new-learn.info/packages/tareb/docs/lea/lea_ch4_es.pdf

EPA, U. (25 de Noviembre de 2015). *EPA United States Environmental Protection Agency*. Obtenido de http://www3.epa.gov/airquality/aqmportal/management/emissions_inventory/

Escuela Superior de Informática. (20 de Agosto de 2014). *Correlaciones con SPSS.* Obtenido de https://www.uclm.es/profesorado/raulmmartin/Estadistica/PracticasSPSS/CORRELACION_CON_SPSS.pdf

Galatioto, F., & Bell, M. C. (2013). Exploring the processes governing roadside pollutant concentrations in urban street canyon. *Environmental Science Pollution Reserch*, 4760-4765.

Gallardo, L., Escribano, J., Dawidowski, L., Rojas, N., Andrade, M. d., & Osses., M. (2012). Evaluation Of Vehicle Emission Inventories For Carbon Monoxide and Nitrogen Oxides for Bogotá, Buenos Aires, Santiago, and São Paulo. *Atmospheric Environment*, 12-19.

Hunter, L., G.T, J., & Watson, I. (1992). An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon . *Atmospheric Environment*, 425-432.

Illera, A., Echeverry, J. A., Martínez, R., & M., E. I. (2013). *Informe técnico de tranporte para la caracterización del corredos de la Carrera séptima.* Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá; Transmilenio S.A.

Kukkonen, J., Partanen, L., Karppinen, A., Walden, J., Kartastenpaa, R., Aamio, P., . . . Berkowicz, R. (2003). Evaluation of the OSPM model combined with an urban background model against the data measured in 1997 in Runeberg Street, Helsinki. *Atmospheric Environment*, 1101-1112.

La contaminación atmosférica. (25 de Septiembre de 2014). Obtenido de http://www.jmarcano.com/recursos/contamin/catmosf2.html

Lema, S. (2012). Factibilidad para la introducción de buses híbridos en sistemas BRT en América Latina: el caso de Transmilenio de Bogotá.

Manzi, V. (2001). Estimación de los factores de emisión de las fuentes móviles de la ciudad de Bogotá.

MAVDT, M. d. (Marzo de 2010). Resolución Número 0610. Colombia.

Mazzeo, N., Venegas, L., & Martin, P. (2002). Concentraciones de monóxido de carbono y el viento en un acñón urbano. *XII Congresso Bresileiro de Metereología.*

MINAMBIENTE. (2015). *Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Recuperado el Septiembre de 2015, de https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=1801:plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-2#2-2-documentos-relacionados

Noguera, A. M., & Bernal, C. E. (2012). Caracterización de la deposición de partículas en los corredores viales de transmilenio av. Boyacá (en proyecto) y carrera 30.

Ntziachristos, L. S. (2013).

OMS. (2005). *Guía de Calidad del Aire de la OMS, relativas al PM, O3, NO2 y SO2.*

P. A Rodríguez, E. B. (2009). Actualización del Inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas. *Grupo de Estudios y Sotenibilidad Urbana y Regional (SUR)*, 17.

Pardo, A., & Ruiz, M. A. (2005). *Análisis de datos con SPSS 13 Base.* España: McGraw-Hill.

Perez, M. J., Alonso López, A., & García Calabuig, M. á. (1990). Efectos a Corto Plazo de la contaminación atmosférica sobre la mortalidad. *Revista Española de Salúd Pública* .

Peroza, A. M., Galarza, D., & Ramírez, C. (2013). Caracterización de la contaminación Atmorférica en Bogotá.

Riain, C., Fisher, B., C.J, M., & Littler, J. (1998). Flow field and pollution dispersion in a central London street. *Environmental Monitoring and Assessment*, 299-314.

Secretaría Distrital de Ambiente. (2010). *Plan decenal de descontaminación para Bogotá.* Bogotá.

SERMANAT. (Junio de 2011). Obtenido de Secretaría de Ambienta y Recursos Naturales: http://www.inecc.gob.mx/calaire-informacion-basica/551-calaire-inv-emision

Transmilenio. (14 de 12 de 2015). Obtenido de http://www.transmilenio.gov.co/es/articulos/historia

Troposfera.org. (2005). *Troposfera, Portal tematico de contaminacion atmosférica*. Obtenido de http://www.troposfera.org/conceptos/calidad-aire/

Trujillo. (Octubre de 2013). *Academia.* Obtenido de http://www.academia.edu/7571650/MODELO_DE_DISPERSION_DE_CONTAMINANTES_ATMOSFERICOS

Tyler, N., Bohórquez, J. A., Suescún, J. P., & Velásquez, J. M. (2013). *Caracterización de la Contaminación en Colombia.* University College London-Reino Unido, Universidad de Los Andes-Colombia.

Vallero, D. (2008). *Fundamentals Of Air Pollution, Fourth Edition.* Durahm, Norte de California: Elsevier inc.

Vardoulakis, S., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N., & E.A Fisher, B. (2003). Modelling Air Qualityin Street Canyons: A review. *Atmospheric Environment*(37), 155–182.

Venegas, L. E., & Mazzeo, N. A. (2010). Evaluación del desempeño de modelos de dispersión de contaminantes aplicados a cañones urbanos. 3-13.

Vitutor. (12 de Agosto de 2014). Obtenido de http://www.vitutor.com/estadistica/descriptiva/a_10.html

Wang, G., Bai, S., & Ogden, J. M. (2009). Identifying Contributions Of On-road Motor Vehicles To Urban Air Pollution Using Travel Demand Model Data. . *Transportation Research Part D*, 168-179.

Wark, K., & Warner, C. (2006). *Contaminación del aire. Origen y control.* México: Limusa.

Wilks, D. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences.*

Wilton, E. (2001). *Guide for Preparing Emissions Inventories.* Nueva Zelanda: Environet Ltd.

ANEXO 1: AFOROS VEHICULARES HORARIOS

Calle 45:

Hora	Automóviles	Camioneta	Campero	Colectivos	Buseta/ Busetón	Buses	Camiones de 2 ejes pequeño	Camiones de 2 ejes grande	Motos
6:00	1883	410	352	122	28	481	16	27	918
7:00	2695	587	504	100	30	403	24	27	1058
8:00	2710	591	506	99	32	338	31	40	902
9:00	2606	568	487	98	32	305	33	43	843
10:00	2806	611	524	102	26	304	42	57	864
11:00	2958	644	553	99	26	323	36	53	827
12:00	3001	654	561	89	28	332	29	29	805
13:00	2707	590	506	89	26	309	34	23	720
14:00	2378	518	444	92	39	300	31	23	827
15:00	2146	468	401	87	33	334	22	36	907
16:00	2269	494	424	97	25	326	36	27	999
17:00	2097	457	392	63	19	212	10	16	549
18:00	2081	453	389	71	19	183	12	7	482
19:00	1500	327	280	41	16	108	10	4	244
TOTAL	**33835**	**7372**	**6321**	**1249**	**379**	**4258**	**366**	**412**	**10945**

Fuente: Dirección y Control de Vigilancia. Secretaria de Movilidad

Calle 33:

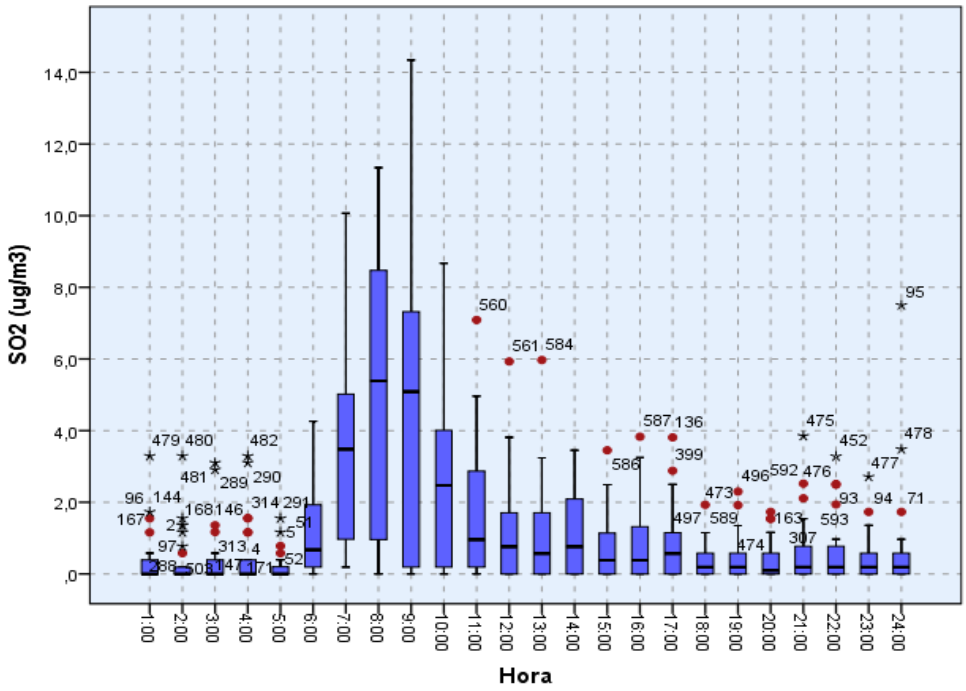
Hora	Automóviles	Campero	Camioneta	Colectivos	Buseta/ Busetón	Buses	Camión 2 ejes pequeño C2P	Camión de dos eje Grande C2G	Motos
6:00	939	166	221	48	32	403	29	19	655
7:00	1378	243	324	53	35	438	49	32	757
8:00	1458	257	343	42	28	348	37	25	476
9:00	1303	230	307	42	28	351	50	34	312
10:00	1089	192	256	29	19	242	52	35	370
11:00	1055	186	248	32	22	269	60	40	438
12:00	1397	247	329	41	27	337	61	40	443
13:00	1186	209	279	37	24	304	50	33	413
14:00	1129	199	266	42	28	347	48	32	471
15:00	1052	186	248	36	24	302	57	38	704
16:00	1046	185	246	39	26	324	32	21	694
17:00	716	126	169	30	20	248	13	9	333
18:00	791	140	186	23	15	190	4	2	291
19:00	727	128	171	17	11	137	2	1	218
TOTAL	**15267**	**2694**	**3592**	**509**	**989**	**4243**	**542**	**361**	**6575**

Fuente: Dirección y Control de Vigilancia. Secretaria de Movilidad

ANEXO 2: GRÁFICAS DE DIAGRAMA DE CAJA DE CONTAMINANTES

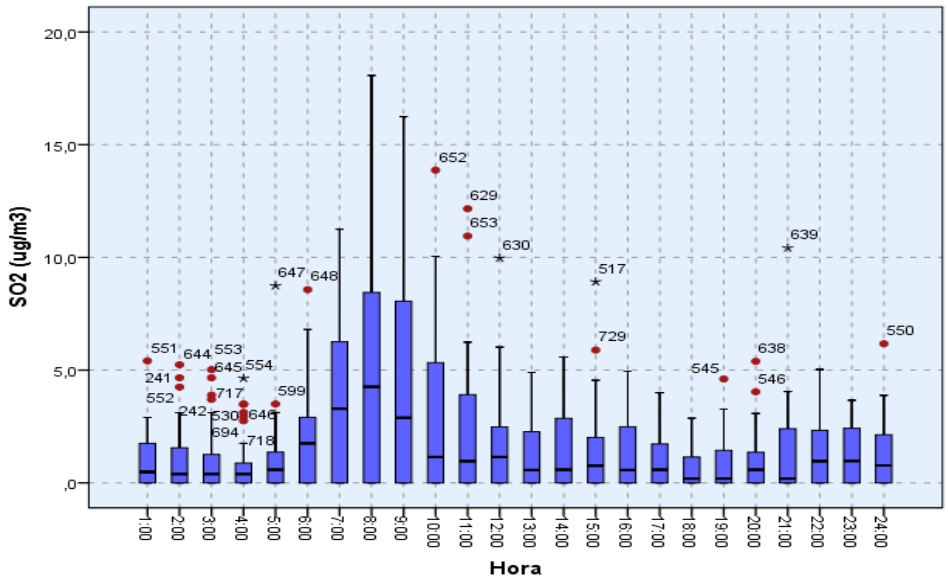
Calle 33: SO_2

JUNIO



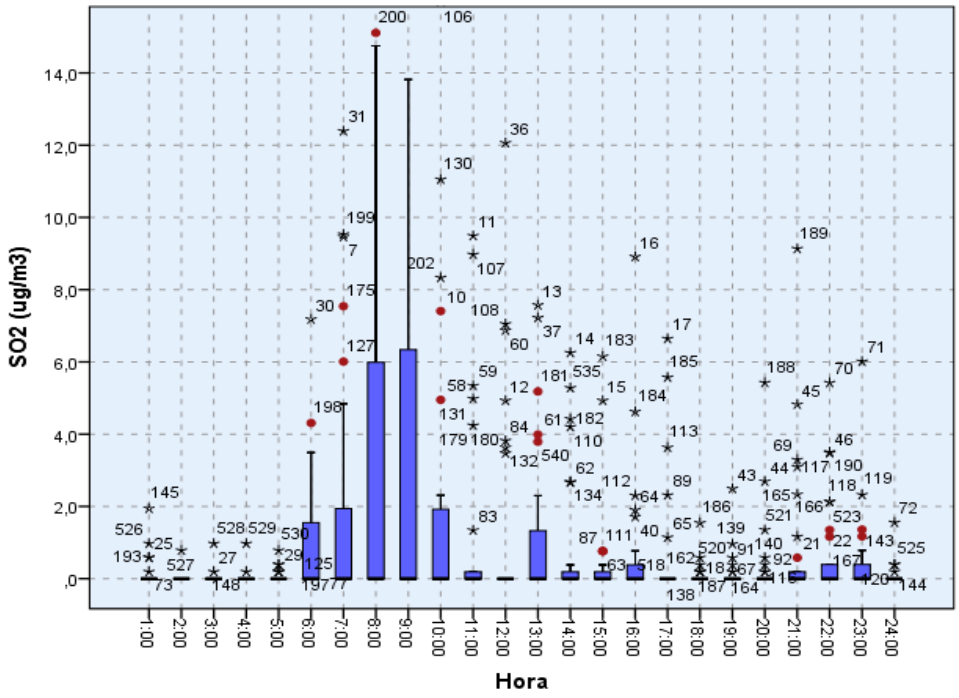
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

AGOSTO:



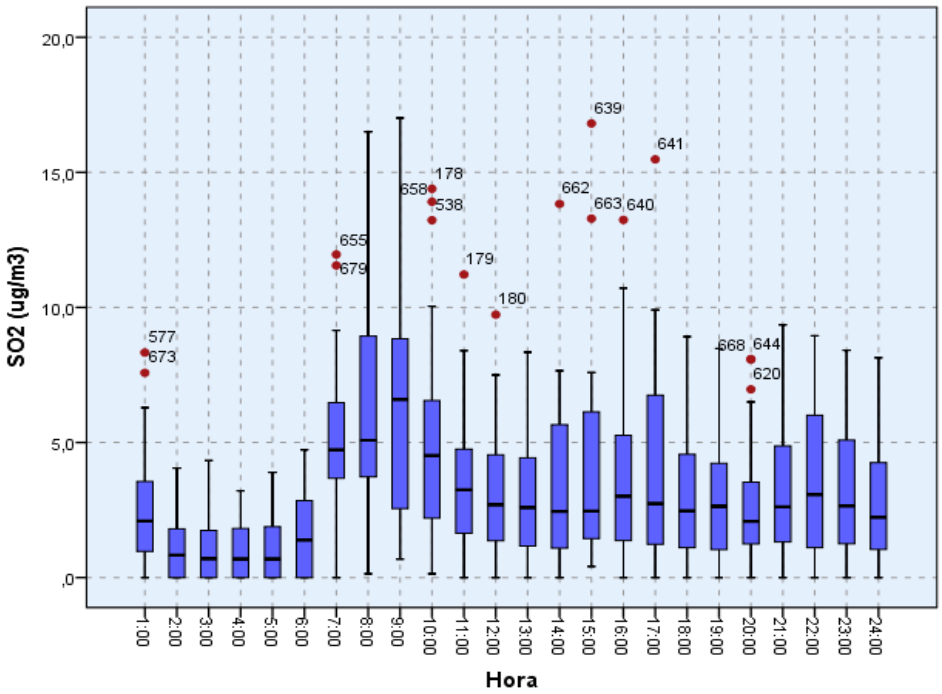
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

SEPTIEMBRE:



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

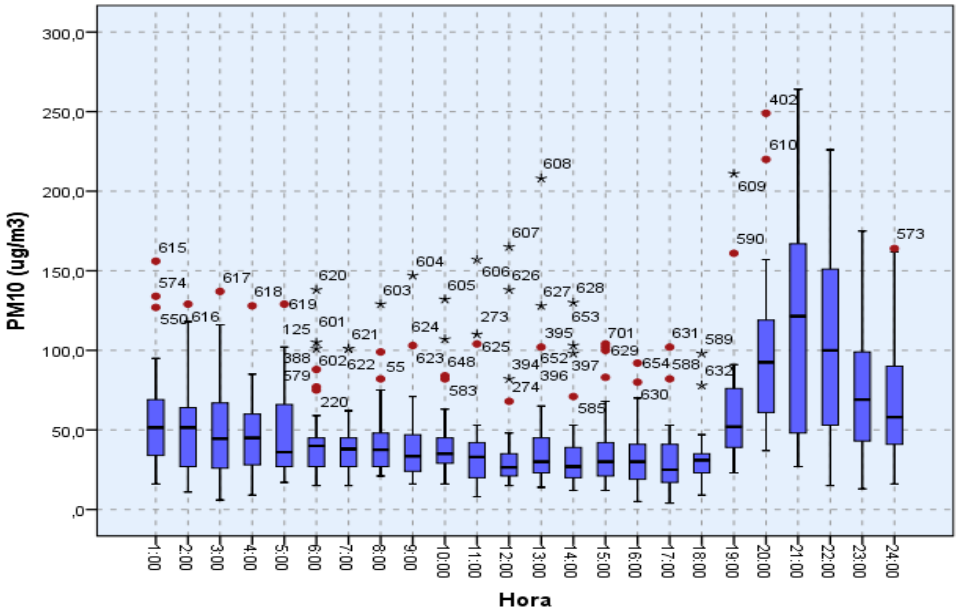
OCTUBRE:



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

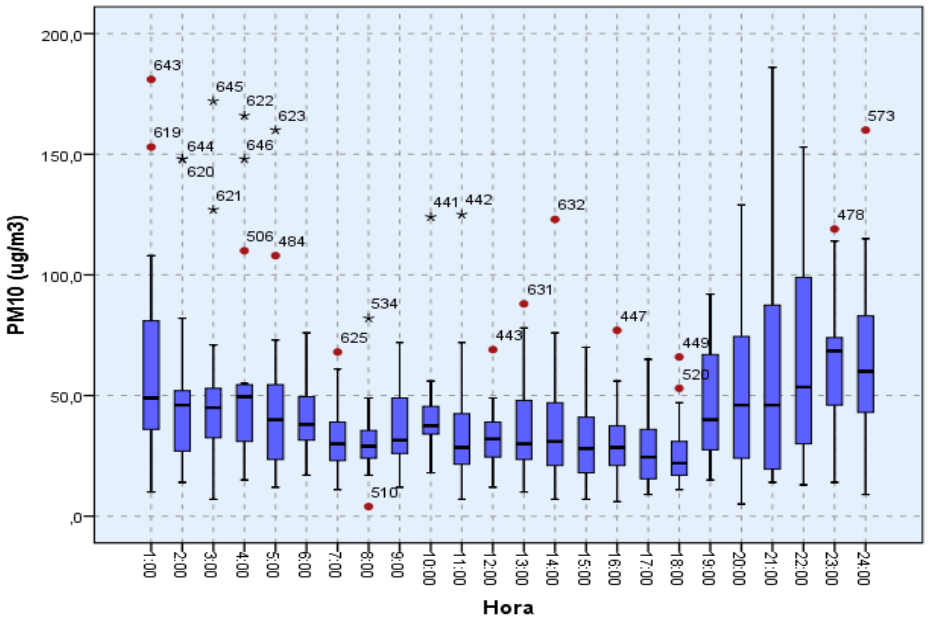
MP10

JUNIO



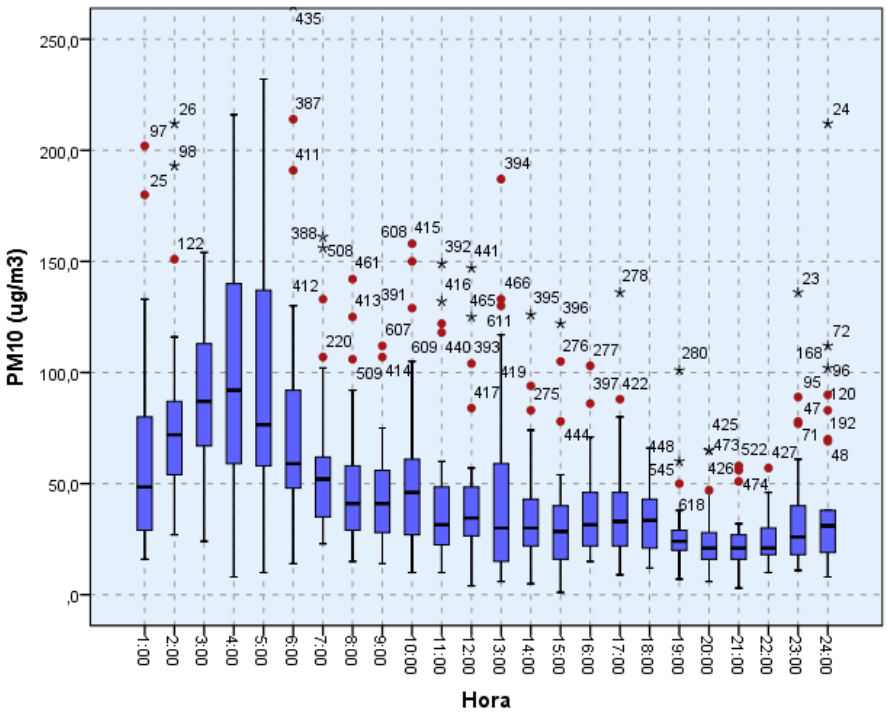
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

AGOSTO



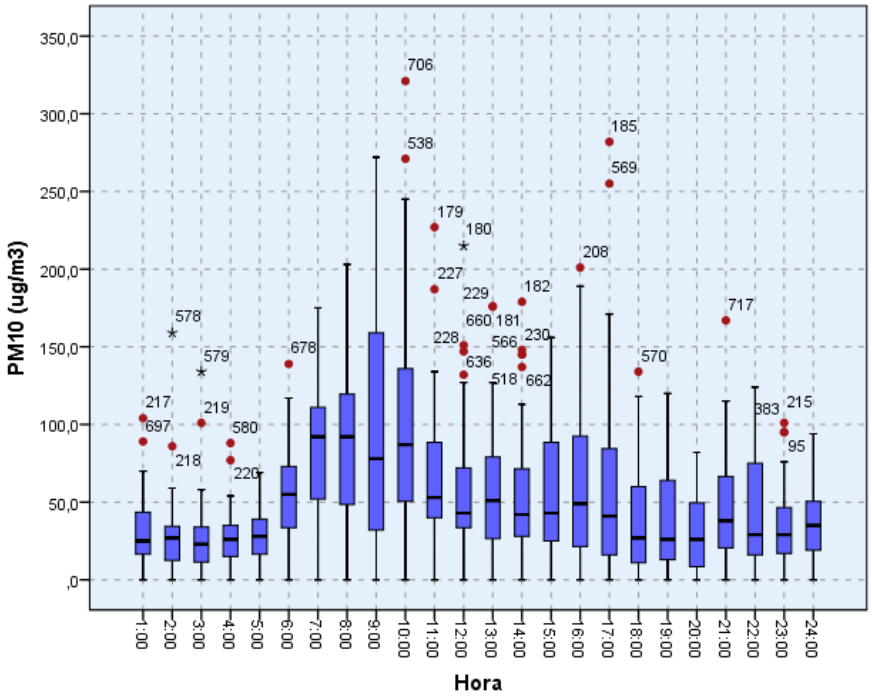
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

SEPTIEMBRE



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

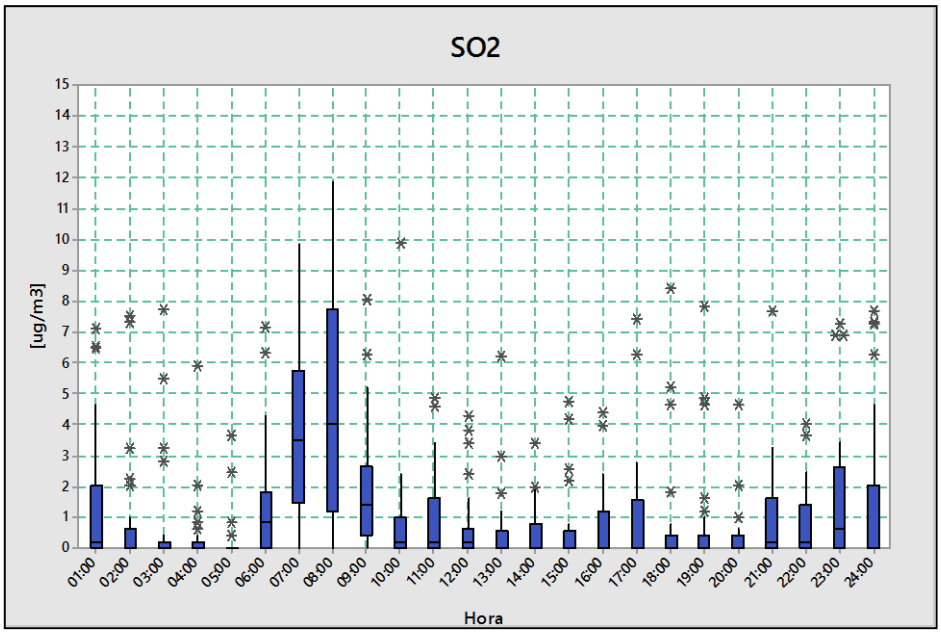
OCTUBRE



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

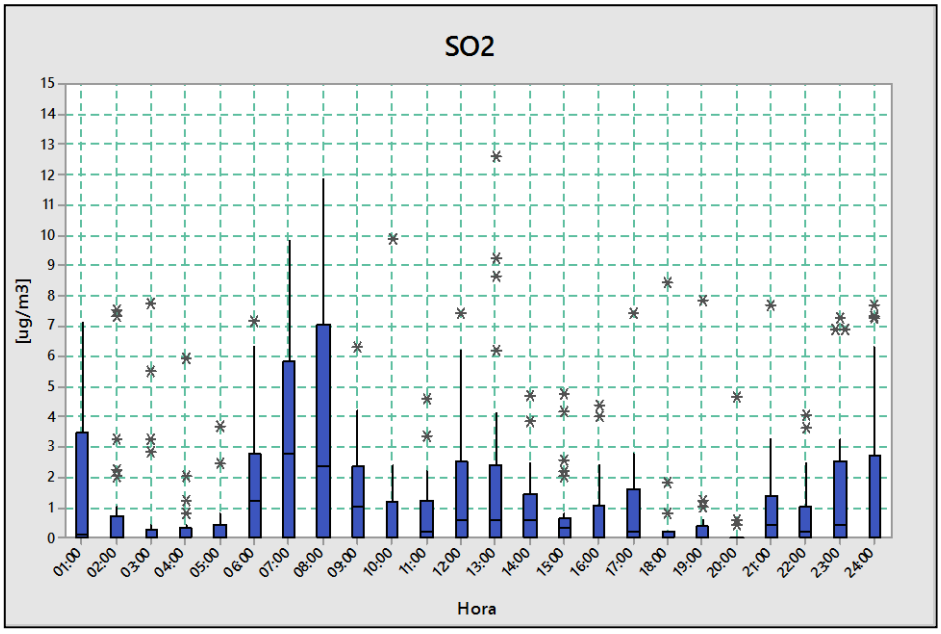
Calle 45: SO_2

DICIEMBRE



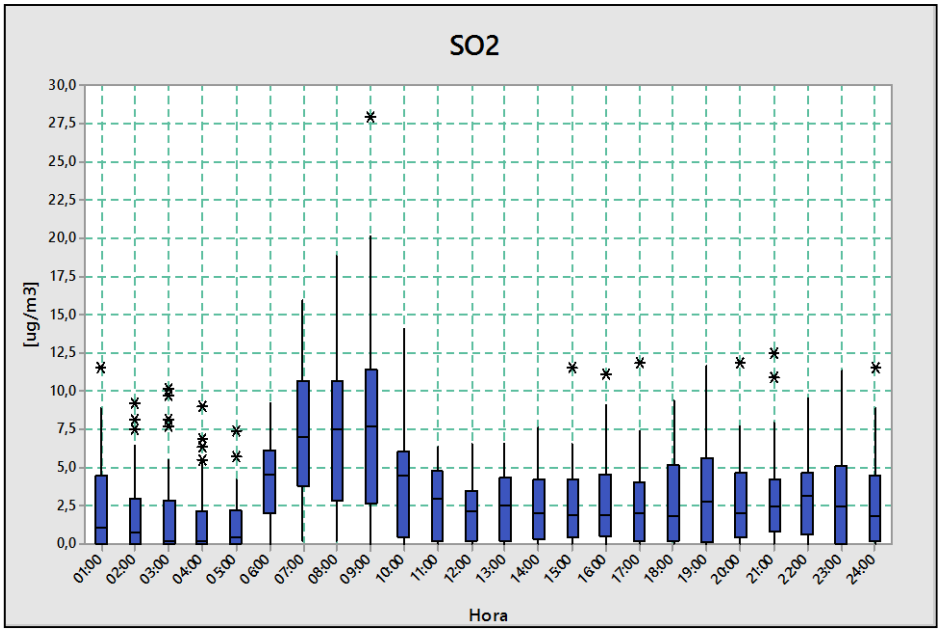
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

ENERO



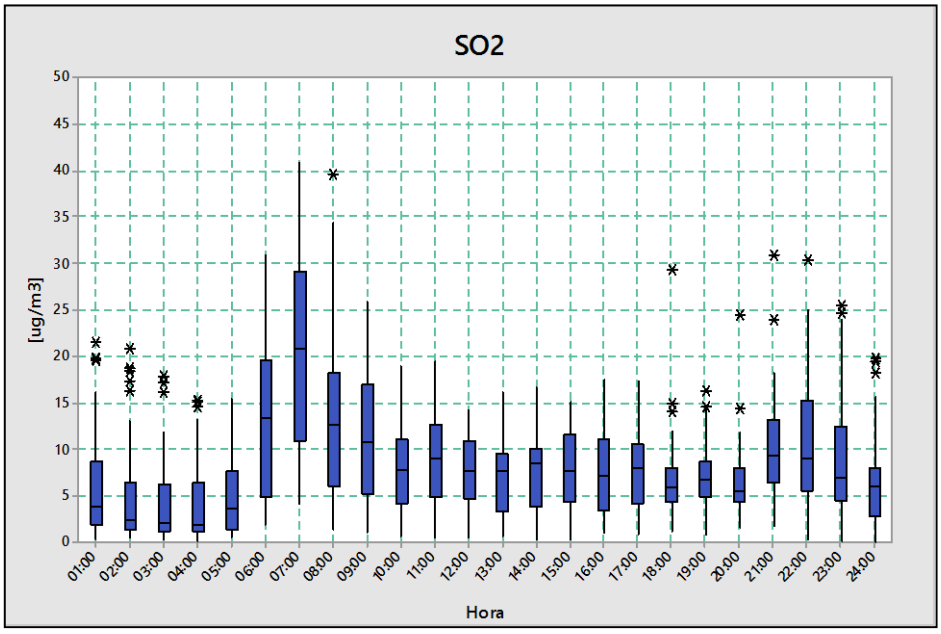
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

FEBRERO



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

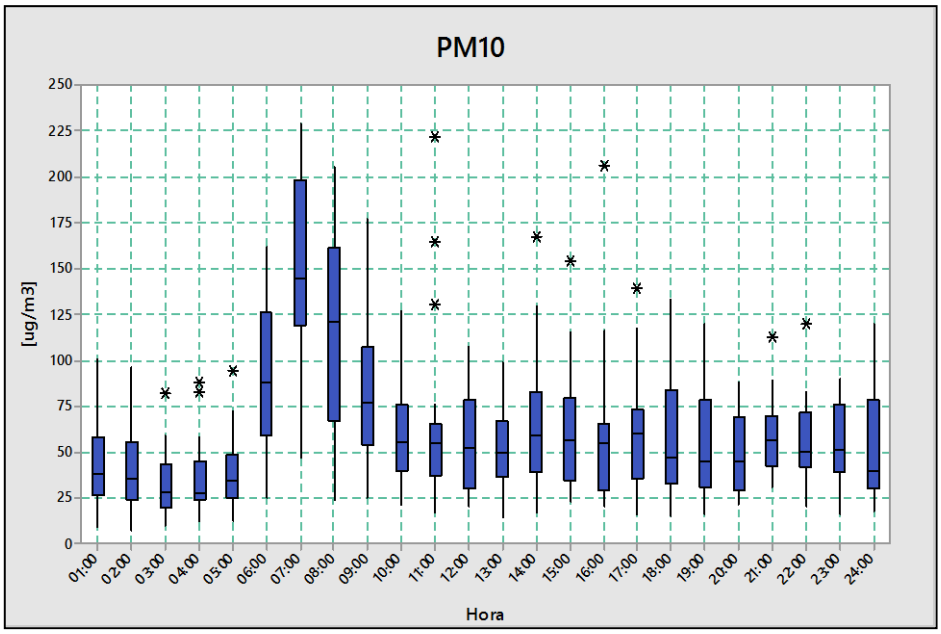
ABRIL



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

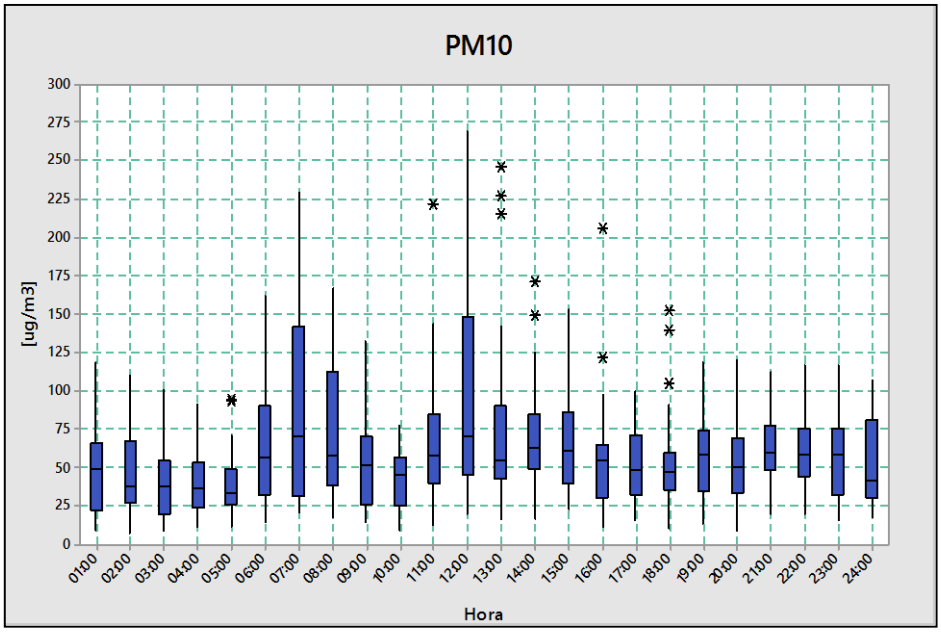
MP10

DICIEMBRE



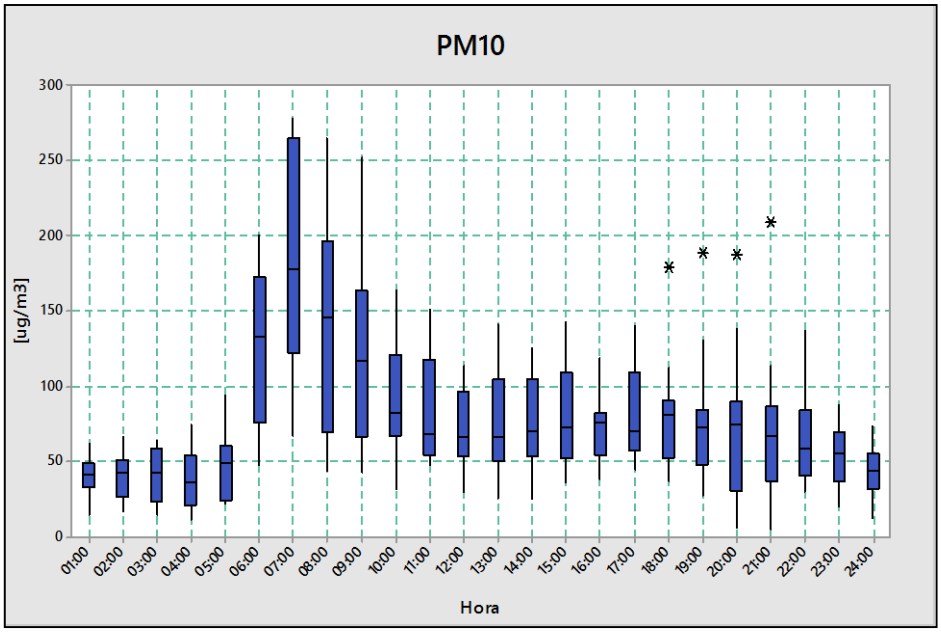
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

ENERO



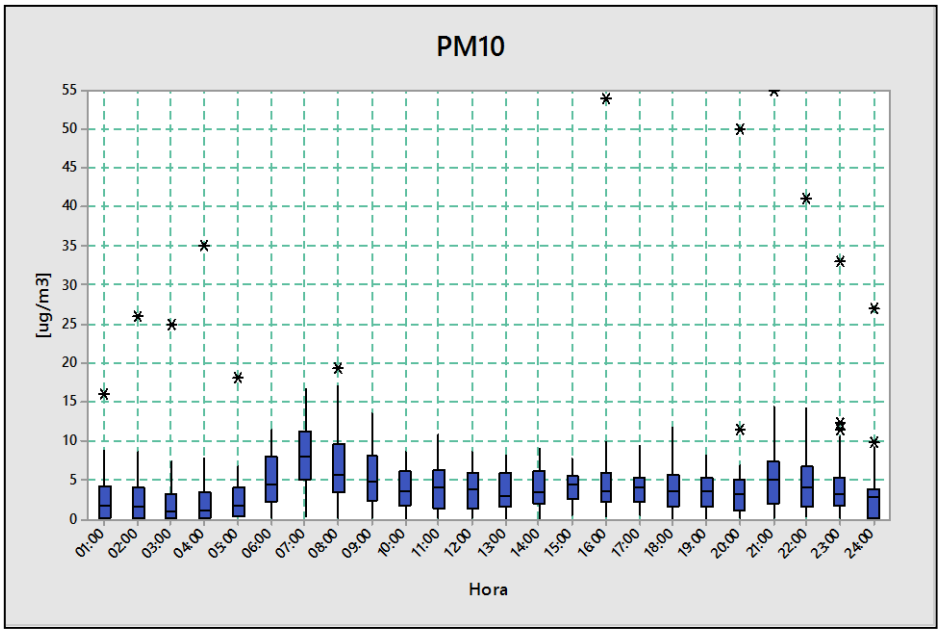
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

FEBRERO



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

ABRIL



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

ANEXO 3: AFOROS VEHICULARES POR TECNOLOGÍA EURO Y TIPO DE COMBUSTIBLE PARA DIÉSEL.

- *CALLE 45 - DIÉSEL*

Aforo Vehicular (#veh/1h) Diésel Sin Buses Híbridos (Calle 45)				
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**
Automóviles - L	0	4	5	8
Camioneta	13	48	263	532
Campero	11	26	158	326
Buseta/Busetón - BT	52	133	47	57
Colectivos - C	7	56	90	80
Buses - B	133	1183	453	1477
Camión dos ejes pequeño-C2P	16	22	43	32
Camión dos ejes grande- C2G	15	4	38	103
Motos-M	0	0	0	0

Fuente: Dirección de Control y Vigilancia Secretaría de Movilidad.

Aforo vehicular (#veh/1h) Diésel Con Híbridos (Calle 45)				
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**
Automóviles - L	0	4	5	8
Camioneta	13	48	263	532
Campero	11	26	158	326
Buseta/Busetón - BT	52	133	47	57
Colectivos - C	7	56	90	80
Buses - B	133	1183	453	**552**
Buses Híbridos	0	0	0	**925**
Camión dos ejes pequeño-C2P	16	22	43	32
Camión dos ejes grande- C2G	15	4	38	103
Motos-M	0	0	0	0

Fuente: Dirección de Control y Vigilancia Secretaría de Movilidad y Transmilenio.

- *CALLE 33 DIÉSEL*

Aforo vehicular (#veh/1h) de Diésel Sin Buses Híbridos (Calle 33)				
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**
Automóviles - L	0	2	0	3
Camioneta	4	20	126	256
Campero	2	7	81	136
Buseta/Busetón - BT	134	341	121	139
Colectivos - C	0	19	34	30
Buses - B	130	1174	450	**1468**
Camión dos ejes pequeño-C2P	74	28	62	46
Camión dos ejes grande- C2G	12	1	32	88
Motos-M	0	0	0	0

Fuente: Dirección de Control y Vigilancia Secretaría de Movilidad.

Aforo vehicular (#veh/1h) Con Buses Híbridos - DIÉSEL				
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**
Automóviles - L	0	2	0	3
Camioneta	4	20	126	256
Campero	2	7	81	136
Buseta/Busetón - BT	134	341	121	139
Colectivos - C	0	19	34	30
Buses - B	130	1174	450	**543**
Híbridos	0	0	0	**925**
Camión dos ejes pequeño-C2P	74	28	62	46
Camión dos ejes grande- C2G	12	1	32	88
Motos-M	0	0	0	0

Fuente: Dirección de Control y Vigilancia Secretaría de Movilidad.

ANEXO 4: AFOROS VEHICULARES POR TECNOLOGÍA EURO Y TIPO DE COMBUSTIBLE PARA GASOLINA

- *CALLE 45: GASOLINA*

Aforo vehicular (#veh/1h) de gasolina – Calle 45				
MODELO	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**
Automóviles - L	3291	5575	6933	12376
Camioneta	668	753	782	2912
Campero	559	1003	1405	1888
Buseta/Busetón - BT	16	5	2	3
Colectivos - C	7	98	167	492
Buses - B	22	19	24	34
Camión dos ejes pequeño-C2P	55	7	9	7
Camión dos ejes grande- C2G	5	1	6	12
Motos-M	110	301	3073	6856

Fuente: Dirección de Control y Vigilancia Secretaría de Movilidad.

- *CALLE 33: GASOLINA*

Aforo vehicular (#veh/1h) de gasolina (Calle 45)				
MODELO	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**
Automóviles - L	4242	2511	3126	5580
Camioneta	322	362	380	1416
Campero	235	422	597	801
Buseta/Busetón - BT	39	9	3	5
Buses - B	18	13	22	29
Colectivos - C	38	40	68	201
Camión dos ejes pequeño-C2P	16	5	11	7
Camión dos ejes grande- C2G	1	0	3	9
Motos-M	65	177	1844	4113

Fuente: Dirección de Control y Vigilancia Secretaría de Movilidad.

ANEXO 5: FACTORES DE EMISIÓN PARA DIÉSEL Y GASOLINA

- *CALLE 45:*

FACTOR DE EMISIÓN (mg/m) – DIÉSEL Calle 45				
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**
Automóviles - L	0.0840	0.0540	0.0390	0.0314
Camioneta	0.0840	0.0540	0.0390	0.0314
Campero	0.0840	0.0540	0.0390	0.0314
Buseta/Busetón - BT	0.479	0.220	0.207	0.0462
Colectivos - C	0.117	0.117	0.0780	0.0409
Buses - B	0.362	0.165	0.178	0.0354
Camión dos ejes pequeño-C2P	0.129	0.061	0.0566	0.0106
Camión dos ejes grande- C2G	0.201	0.104	0.088	0.0161
Motos-M	-	-	-	-

Fuente: guía de Inventario de emisiones de la Agencia Ambiental Europea "EEA/EMEP" y autores

FACTOR DE EMISIÓN (mg/m) – GASOLINA Calle 45				
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**
Automóviles - L	0.0322	0.0322	0.0066	0.00128
Camioneta	0.0322	0.0322	0.0066	0.00128
Campero	0.0322	0.0322	0.0066	0.00128
Buseta/Busetón - BT	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
Buses - B	0.016	0.016	0.016	0.016
Colectivos - C	0.0023	0.0023	0.0011	0.0011
Camión dos ejes pequeño-C2P	0.021	0.021	0.021	0.021
Camión dos ejes grande- C2G	0.021	0.021	0.021	0.021
Motos-M	0.176	0.045	0.026	0.010

Fuente: guía de Inventario de emisiones de la Agencia Ambiental Europea "EEA/EMEP" y autores

- *CALLE 33*

FACTOR DE EMISIÓN (mg/m) – DIÉSEL Calle 33				
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**
Automóviles - L	0.0840	0.0540	0.0390	0.0314
Camioneta	0.0840	0.0540	0.0390	0.0314
Campero	0.0840	0.0540	0.0390	0.0314
Buseta/Busetón - BT	0.479	0.220	0.207	0.0462
Colectivos - C	0.117	0.117	0.0780	0.0409
Buses - B	0.362	0.165	0.178	0.0354
Camión dos ejes pequeño-C2P	0.129	0.061	0.0566	0.0106
Camión dos ejes grande- C2G	0.201	0.104	0.088	0.0161
Motos-M	-	-	-	-

Fuente: guía de Inventario de emisiones de la Agencia Ambiental Europea "EEA/EMEP" y autores

FACTOR DE EMISIÓN (mg/m) – GASOLINA Calle 33				
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**
Automóviles - L	0.0322	0.0322	0.0066	0.00128
Camioneta	0.0322	0.0322	0.0066	0.00128
Campero	0.0322	0.0322	0.0066	0.00128
Buseta/Busetón - BT	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
Buses - B	0.016	0.016	0.016	0.016
Colectivos - C	0.0023	0.0023	0.0011	0.0011
Camión dos ejes pequeño-C2P	0.021	0.021	0.021	0.021
Camión dos ejes grande- C2G	0.021	0.021	0.021	0.021
Motos-M	0.176	0.045	0.026	0.010

Fuente: guía de Inventario de emisiones de la Agencia Ambiental Europea "EEA/EMEP" y autores

ANEXO 6: EMISIONES DE GASOLINA

EMISIÓN GASOLINA (mg/m*h) – CALLE 45					
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**	
Automóviles - L	105.97	179.52	45.76	15.84	
Colectivos - C	0.11	1.57	2.67	7.87	
Camioneta	21.51	24.25	5.16	3.73	
Campero	18.00	32.30	9.27	2.42	
Buseta/Busetón - BT	0.02	0.01	0.00	0.00	
Buses - B	0.05	0.04	0.03	0.04	
Camión dos ejes pequeño-C2P	1.16	0.15	0.19	0.15	
Camión dos ejes grande- C2G	0.11	0.02	0.13	0.25	
Motos-M	19.36	13.55	79.90	68.56	
SUMA	166.28	251.39	143.11	98.86	**659,63**

Fuente: Autores.

EMISIÓN GASOLINA (mg/m*h)- CALLE 33					
COMBUSTIBLE	**EURO I**	**EURO II**	**EURO III**	**EURO IV**	
Automóviles - L	136.59	80.85	20.63	7.14	
Camioneta	10.37	11.66	2.51	1.81	
Campero	7.57	13.59	3.94	1.03	
Buseta/Busetón - BT	0.04	0.01	0.00	0.01	
Buses - B	0.29	0.21	0.35	0.46	
Colectivos - C	0.09	0.09	0.07	0.22	
Camión dos ejes pequeño-C2P	0.34	0.11	0.23	0.15	
Camión dos ejes grande- C2G	0.02	0.00	0.06	0.19	
Motos-M	11.44	7.97	47.94	41.13	
SUMA	166.74	114.48	75.75	52.14	**409,10**

Fuente: Autores.