

7-4-2018

Análisis de inmisión de material particulado menor o igual de 2.5 micrómetros en dos puntos estratégicos de la ciudad de Bogotá

Carolina Fonseca Guerrero
Universidad de La Salle, Bogotá

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

Citación recomendada

Fonseca Guerrero, C. (2018). Análisis de inmisión de material particulado menor o igual de 2.5 micrómetros en dos puntos estratégicos de la ciudad de Bogotá. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1100

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.

ANÁLISIS DE INMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO MENOR O IGUAL DE 2.5
MICRÓMETROS EN DOS PUNTOS ESTRATEGICOS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ

CAROLINA FONSECA GUERRERO

UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
BOGOTÁ
2019

ANÁLISIS DE INMISION DE MATERIAL PARTICULADO MENOR O IGUAL DE 2.5
MICRÓMETROS EN DOS PUNTOS ESTRATEGICOS DE LA CIUDAD

CAROLINA FONSECA GUERRERO

Trabajo de investigación para optar al título de: Ingeniera ambiental y sanitaria

DIRECTOR:
JORGE EDUARDO PACHÓN
Ing. Químico
PhD.

UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
BOGOTÁ
2019

Agradecimientos

A Dios por siempre estar cuidándome y estar en todo momento en mi vida guiándome por el mejor camino hasta llegar a esta carrera; a las mujeres de mi vida mi mamá y mi hermana, porque son uno de los grandes motores de mi vida que me han apoyado para no desfallecer; a mis formadores porque gracias a ellos he llegado al punto en el que me encuentro; a mis familiares, mi novio y compañeros por las vivencias compartidas y que de alguna u otra manera aportaron en mi crecimiento profesional. Hoy culmina una parte muy importante de mi vida, un escalón en mi crecimiento personal y profesional, pero es el inicio de muchos retos y desafíos más grandes, pero con sacrificio y apoyo moral de ustedes lograre cumplirlos.

Esta investigación no hubiese sido posible sin el **acuerdo de cooperación AC No 2 celebrado entre Ecopetrol y la Universidad de La Salle, cuyo objetivo es la ampliación de conocimiento en la temática de calidad de aire**, al PhD. Jorge Pachón y todo el equipo de trabajo que aportó conocimientos, dedicando tiempo para la realización de este proyecto.

Contenido

1. OBJETIVOS.....	11
Objetivo general	11
Objetivos específicos	11
2. INFORMACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	12
3. ANTECEDENTES.....	14
4. SINOPSIS METODOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN	18
5. MÉTODOS Y MATERIALES	19
5.1. Planeación y ejecución de campañas de campo	19
5.2. Equipos muestreadores	19
5.3. Equipos e insumos de campo	21
6. RELACIÓN DE ACTIVIDADES Y DETALLES.....	24
7. COMPENDIO DE RESULTADOS	30
7.1. Primera fase: Caracterización del sector donde se encuentran ubicados los puntos de monitoreo	30
7.1.1. Estación de colegio de La Salle	30
7.1.2. Estación de Bomberos Fontibón	33
7.2. Segunda fase: Medición de concentraciones de material particulado PM2.5	36
7.3. Tercera fase: Identificación de las procedencias de emisiones de concentración de material particulado PM2.5.....	37
7.3.1. Toma de datos de monitoreo de RMCAB y validación de resultados	37
7.3.2. Análisis temporal	40
7.3.3. Análisis espacial.....	45
7.3.4. Rosa de vientos.....	49
7.3.5. Rosa de contaminantes.....	52
7.4. Cuarta fase: Análisis de excedencias.....	55
8. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE CONOCIMIENTO Y LA DESCRIPCIÓN DEL IMPACTO ACTUAL O POTENCIAL	58
9. DESCRIPCIÓN DEL IMPACTO ACTUAL O POTENCIAL	59
10. CONCLUSIONES	60
11. RECOMENDACIONES	62
12. ANEXOS	63
13. BIBLIOGRAFÍA	64

Listado de Tablas

Tabla 1. Perfil de los investigadores del proyecto	13
Tabla 2. Equipos empleados para el monitoreo de material particulado menor o igual de 2.5 micrómetros	20
Tabla 3. Porcentajes de captura de muestras de PM _{2.5}	37
Tabla 4. Índice Bogotano de Calidad del Aire.....	42
Tabla 5. Promedio de concentraciones de PM _{2.5} de los muestreos de las estaciones de calidad del aire	45

Listado de Figuras

Figura 1. Investigadores del proyecto	12
Figura 2. Metodología	18
Figura 3. Materiales y equipos.....	23
Figura 4. Programación de muestreos.....	24
Figura 5 . Actividades de trabajo en campo en Bomberos Fontibón del equipo Wilbur.....	25
Figura 6. Actividades de trabajo en campo en Bomberos Fontibón del equipo URG.....	25
Figura 7. Actividades de trabajo en campo Colegio Salle equipo Hivol.....	26
Figura 8. Actividades para el acondicionamiento de los filtros no impactados previo al muestreo.	27
Figura 9. Actividades de la verificación y validación del muestreo de los filtros impactados.....	28
Figura 10. Ubicación geoespacial en la ciudad de Bogotá de los puntos monitoreados	30
Figura 11. Usos del suelo en la zona del Colegio de La Salle.....	31
Figura 12. Comportamiento espaciotemporal de las concentraciones promedio anuales de PM _{2.5} en Bogotá 2014-2017 en la zona del colegio de La Salle	32
Figura 13. Ubicación de equipos de monitoreo dentro del Colegio de La Salle.	33
Figura 14. Usos del suelo en la zona de Bomberos Fontibón	33
Figura 15. Industrias aledañas al punto de monitoreo de Bomberos Fontibón.....	34
Figura 16. Comportamiento espaciotemporal de las concentraciones promedio anuales de PM _{2.5} en Bogotá 2014 - 2017 en la zona de bomberos Fontibón.	35
Figura 17. Comportamiento espaciotemporal de las concentraciones promedio anuales de PM _{2.5} en Bogotá 2014-2017 en la zona de bomberos Fontibón	36
Figura 18. Georreferenciación de las estaciones de referencia – RMCAB.....	38
Figura 19. Validación para colegio de La Salle con la estación de la RMCAB “Guaymaral”.	39
Figura 20. Validación para Bomberos Fontibón con la estación de la RMCAB "Puente Aranda"	40
Figura 21. Variación temporal de las concentraciones de PM _{2.5}	41

Figura 22. Porcentajes del flujo vehicular de la zona de Colegio de La Salle	43
Figura 23. Porcentajes del flujo vehicular de la zona de Bomberos Fontibón	43
Figura 24. Distribución de los tipos de vehículo por tipo de combustible en Bogotá.....	44
Figura 25. Distribución de emisiones por tipo de combustible (Ton) año 2015	44
Figura 26. Variación promedio en el ciclo semanal de las concentraciones de PM _{2.5}	45
Figura 27. Análisis espacial mediante el método de IDW.....	47
Figura 28. Vías importantes del punto de Bomberos Fontibón.....	48
Figura 29. Vías importantes del punto de Colegio de La Salle	48
Figura 30. Rosa de vientos de Colegio de La Salle.....	50
Figura 31. Histograma de velocidades en el colegio de La Salle	50
Figura 32. Rosa de vientos de Bomberos Fontibón.....	51
Figura 33. Histogramas de velocidades del punto de Bomberos Fontibón.	52
Figura 34. Rosa de contaminantes de la zona del colegio de La Salle	53
Figura 35. Histograma de concentraciones de la zona de Colegio de La Salle	53
Figura 36. Rosa de contaminantes de la zona de Bomberos Fontibón	54
Figura 37. Histogramas de concentraciones de la zona de Bomberos Fontibón.....	55
Figura 38. Evaluación de excedencias para colegio de La Salle.....	56
Figura 39. Evaluación de excedencias para Bomberos Fontibón.....	57

Resumen

Este estudio se realiza en marco del acuerdo de cooperación N° 02 derivado del convenio N° 5224377 entre la Universidad de la Salle y ECOPETROL S. A, cuyo objetivo es el análisis y caracterización química de dos contaminantes a nivel atmosférico; PM10 y PM2.5, en el cual la Universidad realiza campañas de muestreo enfocadas en el monitoreo del material particulado de inmisión, material particulado susceptible a la resuspensión y contaminantes provenientes de los exostos de los automóviles. Este documento presenta el análisis de inmisión de material particulado PM10 en dos puntos estratégicos de la ciudad de Bogotá durante el periodo de 22 de mayo hasta el 12 de septiembre.

La contaminación atmosférica se convirtió en un problema de salud ambiental tanto a nivel nacional como internacional, por la presencia de elementos perjudiciales, debido a la gran emisión de fuentes fijas y móviles. En Bogota, se ha establecido que las fuentes móviles son responsables de la mayor parte de las emisiones a la atmósfera, ya sea en forma directa en la combustión o indirecta por la resuspensión. Por esta razón, el presente trabajo busca analizar las concentraciones de material particulado 2.5 en dos puntos estratégicos de la ciudad de Bogotá.

El proyecto se compone de una campaña de campo en donde se realiza el monitoreo de PM_{2.5} en dos puntos de la ciudad: el colegio de La Salle que se encuentra ubicado al nororiente de la ciudad y Bomberos Fontibón que se encuentra ubicado al occidente, los cuales se seleccionaron teniendo en cuenta diferentes criterios como el tipo de uso del suelo y la influencia de las principales fuentes de emisión de contaminantes.

Los datos de concentraciones de material particulado PM_{2.5}, se obtuvieron por medio de campañas de campo por medio de equipos muestreadores TE-Wilbur, HI-Vol y URG ubicados en estos puntos por 49 muestras, que se realizó el análisis gravimétrico de los filtros impactados y no impactados para lograr la obtención de las concentraciones. Para identificar las procedencias de las fuentes de material particulado se realizó a partir de análisis de la rosa de vientos y una validación de datos por comportamiento con las estaciones de la Red de Monitoreo de calidad de Aire (RM CAB) más cercanas al punto seleccionado.

De acuerdo con los resultados, se determina que debido al uso de suelo para el colegio de La Salle es una zona de fondo, es decir, se encuentra en una zona netamente residencial y sin fuentes de contaminación significativas, sin embargo se encuentra influenciado por vías importantes como la carrera 7, carrera 9, y calle 170. Por otra parte, en el punto de Bomberos Fontibón, es una zona con uso residencial, comercial e industrial, sin embargo, también se encuentran industrias mayormente alimenticias, metalmecánicas, galvanoplastia, plásticos, entre otras, además de ser una localidad vecina de Puente Aranda ya que en esta localidad es en donde más se concentra la actividad industrial además de presentar las principales vías de la ciudad con un mayor flujo vehicular como la calle 13, calle 17 y la avenida ciudad de Cali.

En concordancia con el análisis espacial según la interpolación realizada por el software de ArcGis, el punto de Bomberos Fontibón tiene concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ de $19.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que en el punto del colegio de La Salle se encuentra con concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ $7.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por la razón del uso de suelo y las fuentes contaminantes cercanas a los puntos de monitoreo. Según para el análisis temporal se observa un descenso de concentraciones para los fines de semana ya que hay un cese de actividades en la ciudad.

Palabras clave: Inmisión, calidad del aire, uso de suelo, fuentes móviles, fuentes fijas.

Abstract

This study is carried out within the framework of cooperation agreement No. 02 derived from agreement No. 5224377 between the Universidad de la Salle and ECOPETROL S. A, whose objective is the analysis and chemical characterization of two pollutants at atmospheric level; PM10 and PM2.5, in which the University carries out sampling campaigns focused on the monitoring of particulate matter of inmission, particulate material susceptible to resuspension and pollutants coming from the exostos of automobiles. This document presents the PM10 particulate matter inmission analysis at two strategic points in the city of Bogotá during the period from May 22 to September 12.

Air pollution became an environmental health problem both nationally and internationally, due to the presence of harmful elements, due to the large emission of fixed and mobile sources. In Bogota, it has been established that mobile sources are responsible for most of the emissions to the atmosphere, either directly in combustion or indirectly through resuspension. For this reason, the present work seeks to analyze the concentrations of 2.5 particulate material in two strategic points of the city of Bogotá.

The project consists of a field campaign where PM2.5 monitoring is carried out in two points of the city: the La Salle school located north-east of the city and Fontibón Firefighters located to the west, which were selected taking into account different criteria such as the type of land use and the influence of the main sources of emission of pollutants.

The PM2.5 particulate material concentrations data were obtained through field campaigns by TE-Wilbur, HI-Vol and URG sampling equipment located at these points for 49 samples, which performed the graviemntic analysis of the filters impacted and not impacted to obtain the concentrations. To identify the sources of the sources of particulate material was made from analysis of the rose of winds and a validation of data by behavior with the stations of the Air Quality Monitoring Network (RM CAB) closest to the selected point.

According to the results, it is determined that due to the use of land for the school of La Salle is a bottom area, that is, it is in a purely residential area and without significant sources of pollution, however it is influenced by roads important as race 7, race 9, and street 170. On the other hand, at the Fontibón Firefighters, is an area with residential, commercial and industrial use, however, are also mostly food industries, metalworking, electroplating, plastics , among others, in addition to being a neighboring town of Puente Aranda since in this town it is where industrial activity

concentrates the most as well as presenting the main roads of the city with a greater traffic flow such as 13th street, 17th street and the avenue city of Cali.

In agreement with the spatial analysis according to the interpolation made by the ArcGis software, the Fontibón Firefighters point has average PM_{2.5} concentrations of 19.51 µg / m³ while at the La Salle school point it has average PM₂ concentrations. 7.43 µg / m³ for the reason of the use of soil and polluting sources near the monitoring points. According to the temporal analysis there is a decrease in concentrations for weekends as there is a cessation of activities in the city.

Keywords: immission, air quality, use of land, mobile sources, fixed sources.

1. Objetivos

Objetivo general

Analizar las concentraciones de material particulado menor o igual a 2.5 micrómetros en dos puntos estratégicos de la ciudad de Bogotá en el periodo de 22 de mayo hasta el 12 de septiembre de 2018.

Objetivos específicos

Caracterizar la zona de ubicación de los puntos de monitoreo de material particulado $PM_{2.5}$.

Evaluar la variabilidad espacio temporal de la concentración de $PM_{2.5}$ en los puntos de muestreo.

Identificar las posibles que aportan a los niveles fuentes de material particulado menor o igual de 2.5 micrómetros por medio de la interpretación de la rosa de vientos y rosa de contaminantes.

2. Información del proyecto de investigación

El presente documento se encuentra enmarcado dentro del Acuerdo de Cooperación No 2, derivado del Convenio No 5224377 entre la Universidad de La Salle y Ecopetrol, en este se encuentran dos componentes fuertes, campañas de campo y modelación. El presente documento estará enfocado al primero.

Que tiene por objeto “Desarrollo de actividades conjuntas para la ampliación del conocimiento en la temática de calidad de aire a través de la caracterización química especializada de material particulado para la ciudad de Bogotá en exosto de vehículo y a nivel atmosférico PM_{10} y $PM_{2.5}$ y resuspendido por medio de campañas de campo en cuatro puntos estratégicos de Bogotá, la determinación de fuentes del material particulado mediante métodos de análisis numérico y análisis con escenarios de calidad de aire utilizando el Sistema Integrado de Modelación de Calidad de Aire de Bogotá (SIMCAB)”.

En la Figura 1 se presentan las personas que se encuentran dentro del proyecto.

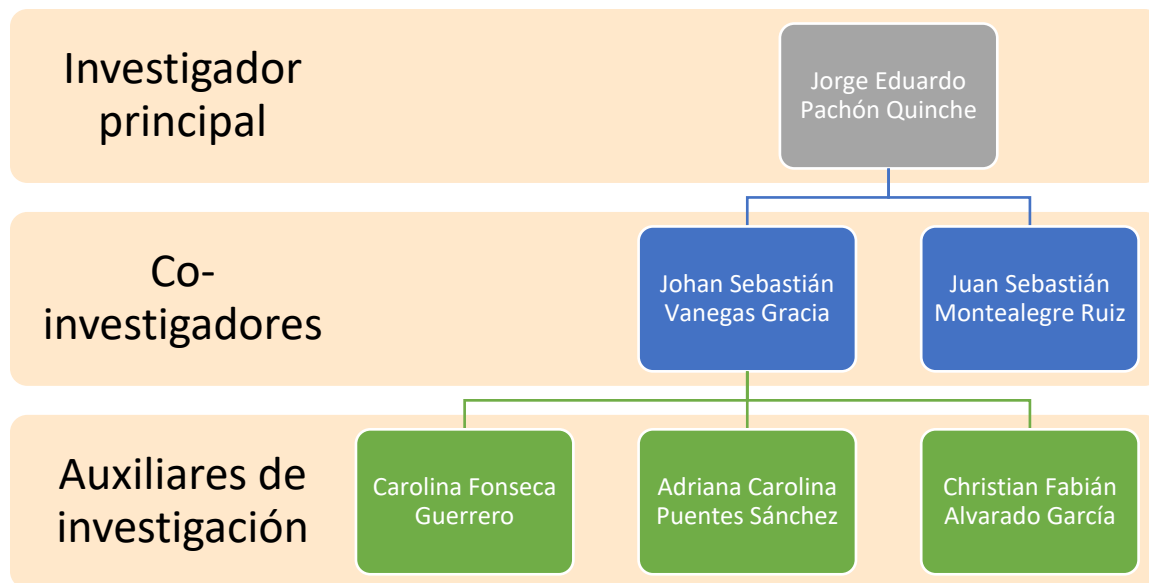


Figura 1. Investigadores del proyecto

Fuente: Autor

Los miembros del proyecto poseen el siguiente perfil profesional y sus funciones se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Perfil de los investigadores del proyecto

Miembros	Perfil profesional y funciones
Jorge Eduardo Pachón jpachon@unisalle.edu.co	Ph.D. In Environmental Engineering, con experiencia en modelos de calidad del aire, investigaciones relevantes al tema de calidad de aire, Co-autor del libro: "La calidad del aire en las ciudades: un reto mundial". Dentro del presente proyecto su función principal es planificar, ejecutar y organizar las decisiones orientadas a la ejecución del proyecto, analizar con atención los informes o reportes presentados por los miembros de este.
Johan Sebastián Vanegas Gracia johansvanegas66@unisalle.edu.co	Ingeniero ambiental y sanitario de la universidad de La Salle, con experiencia en Sistema de Información geográfica y modelos de la calidad del aire. Dentro del presente proyecto su función principal es establecer los criterios de selección de puntos de monitoreo para así realizar la logística y de la caracterización química del material particulado.
Juan Sebastián Montealegre Ruiz Mjuan16@unisalle.edu.co	Ingeniero ambiental y sanitario de la universidad de La Salle, con experiencia en monitoreos de contaminantes atmosféricos y modelos de calidad del aire. Dentro del presente proyecto su función principal es la actualización de inventarios de emisiones de la ciudad y de la modelación de estrategias para mejorar la calidad del aire.
Carolina Fonseca Guerrero Cfonseca18@unisalle.edu.co	Estudiantes de ingeniería ambiental y sanitaria de la Universidad de La Salle. Dentro del presente proyecto su función principal es realizar actividades en campo y en laboratorio, acompañados de analizar las concentraciones de material particulado por medio de la caracterización de la zona de los puntos monitoreo, examinando espacio temporalidad de la concentración e identificando las fuentes de material particulado por medio de la rosa de vientos. Estas funciones son presentadas y guiadas por los co-investigadores e investigador principal
Adriana Carolina Puentes Sánchez Apuntes71@unisalle.edu.co	
Christian Fabián Alvarado García Calvarado26@unisalle.edu.co	

Fuente: Autor

3. Antecedentes

El notable deterioro de la calidad del aire en Bogotá y su directa relación con problemas de salud respiratoria y cardíaca, ha generado una creciente preocupación por parte de autoridades ambientales y de salud pública de la ciudad. Esta situación se explica, en parte, por el acelerado crecimiento económico que se ha presentado en Bogotá, este crecimiento se ve manifestado en una mayor demanda de energía, así como en un acelerado consumo de combustibles fósiles (Gaitan , Cancino, & Behrentz, 2007).

Uno de los contaminantes que más preocupa en Bogotá es el material particulado con diámetro menor o igual a 2.5 micras, también llamado $PM_{2.5}$, ya que por su tamaño diminuto pueden entrar directamente al sistema respiratorio por la inhalación del receptor causando efectos negativos. Sin embargo, algunas zonas de la ciudad siguen presentando niveles de concentración anual excediendo la norma vigente de los límites máximos permisibles y más importante aún, el límite considerado como seguro por la Organización Mundial de la Salud, cuyo valor es de $25 \mu g/m^3$ para una exposición de 24 horas (OMS, 2006).

En una investigación realizada en el 2010 realizado por la Universidad de Medellín y la Universidad CES para la Secretaría de Salud del municipio de Medellín durante el período comprendido entre diciembre de 2006 y noviembre de 2007, en donde establecía la asociación entre la concentración de varios contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín y la presencia de patologías respiratorias en niños escolarizados. Se trató de un estudio observacional, analítico, de cohorte, en una población de niños con edad igual o inferior a cinco años. En el estudio se encontró que los niños que residían en zonas de Medellín con altos niveles de $PM_{2.5}$, PM_{10} , hollín y plomo en el aire aumentan el riesgo de sufrir infecciones respiratorias o crisis asmáticas en un 49.3% (Herrera Torres, Echeverri Londoño, Maya Vasco, & Ordoñez Molina, 2010)

la deficiente calidad del aire, desde 1997 la ciudad de Bogotá cuenta con una red de monitoreo de calidad de aire (RMCAB), esta se encarga de hacer seguimiento en tiempo real de las concentraciones de los distintos contaminantes, y diversas variables meteorológicas. Para el año 2016 la RMCAB estaba conformada por trece (13) estaciones de monitoreo de las cuales doce (12) son fijas y una (1) es móvil. Están ubicadas en sitios diversos de la ciudad, dotadas con equipos automáticos que permiten realizar un monitoreo continuo de las concentraciones de

contaminantes criterio: material particulado (PM_{10} , $PM_{2.5}$), y gases contaminantes (SO_2 , NO_2 , CO , O_3) (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016).

Según informes de la calidad anual de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) desde el 2014 al 2017, el comportamiento de $PM_{2.5}$ registra que las mayores concentraciones para un tiempo de exposición anual se presentan en las estaciones ubicadas en la zona suroccidental, estaciones como Kennedy y Carvajal. Por otro lado, las menores concentración promedio se registran en la zona orientada como lo es Guaymaral, Usaquén y San Cristóbal. En cuanto al comportamiento semanal se observan mayores concentraciones los días jueves y viernes y las menores concentraciones los fines de semana, lo cual está asociado a las variaciones de la actividad industrial a la reducción del tráfico vehicular (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017).

El material particulado $PM_{2.5}$ proviene principalmente de la combustión, en estas se establece las fuentes móviles y fijas. En las fuentes fijas se tiene en cuenta la tecnología, el combustible y el tipo de vehículo; puesto que todas esas variables influyen.

En la ciudad de Medellín la participación de la contribución de $PM_{2.5}$, es principalmente por los camiones con 538 toneladas por año en el 2015, es decir un 35% del total de las emisiones. Por parte de las emisiones por el tipo de combustible, el diésel es el principal aportante de NO_x y $PM_{2.5}$ con el 69% y 80% de las emisiones de estos contaminantes. Las características particulares de los motores de ciclo otto (gasolina) y de los motores de ciclo diésel hacen que los primeros presenten una eficiencia menor respecto a los segundos. Ahora bien, pese a que los motores diésel tienen mayor eficiencia que los motores a gasolina, presentan zonas más ricas en combustible que otras, como consecuencia de que no hay una mezcla previa de éste con el aire. De esta forma, hay zonas con combustible que no alcanza a quemarse completamente y ello conduce a la formación de material particulado (Universidad Pontificia Bolivariana, 2013).

El aporte principal de material particulado según inventarios de emisión de fuentes móviles de Bogotá por categoría vehicular son los camiones, con un aporte aproximadamente de 36.4% al total de las emisiones, seguido de buses de transporte público con 29.1%, motos con 7.4% y microbuses con 7.1%. Los vehículos particulares y Transmilenio compartieron el mismo nivel de emisión de PM (3.8 %), mientras que el transporte especial y de turismo y los taxis aportan los menores valores (2.0 % y 0.3 % respectivamente). En cuanto a la distribución vehicular para un día hábil y para fin de semana, se evidencia el predominio de los vehículos ligeros en las vías de Bogotá con una proporción de 65% para un día hábil y 74% para un fin de semana, seguido de

las motocicletas con el 18% para un día hábil y 13% para un fin de semana (SDA & Universidad de la Salle, 2014).

Por otra parte, es innegable la importancia de determinar la procedencia del material particulado, según un estudio realizado por (García & Rojas, 2016) con el uso del software Openair® se analizaron los registros de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, velocidad y dirección de los vientos de 10 estaciones de la RMCAB en el año 2009-2011, con esto se encontró la influencia de fuentes locales y regionales, determinando altas concentraciones de material particulado relacionadas con velocidades de viento superiores a 5 m/s procedentes del occidente, lo cual sugirió un transporte regional de contaminantes desde los municipios vecinos del occidente de la ciudad (Soacha, Funza, Mosquera, Madrid), hacia su centro geográfico. Estos municipios concentran actividad industrial y transporte pesado de bienes desde y hacia Bogotá. Las fuentes con contribuciones más altas dentro de la ciudad fueron aquellas que usan carbón como combustible y las fuentes móviles que transitan sobre las vías principales, sin embargo, concluyen que con vientos débiles los niveles de contaminación son más altos dentro de la ciudad.

Investigaciones previas se han realizado como “Análisis preliminar de la caracterización y la contribución de fuentes de material particulado PM_{10} en el aire ambiente de Bogotá” en donde establecieron cuatro puntos de muestreo teniendo en cuenta los resultados los inventarios de emisión, la tendencia de la calidad del aire en la ciudad, las características de las zonas de estudio, la meteorología, así como las condiciones logísticas del punto, en donde establecieron: Zona de fondo (Colegio de La Salle), zona residencial-comercial (Bomberos-Fontibón), zona industrial (Secretaría de ambiente) y zona de tráfico (Sevillana), para así identificar las fuentes de emisión de PM_{10} a partir de las variables meteorológicas mediante análisis espacial y químico. Se obtuvieron resultados de las principales fuentes emisoras del material particulado, son el uso de combustibles fósiles, el polvo fugitivo, combustión de carbón, mineral y aerosoles secundarios, con aportes de 25.7%, 29.8%, 9.5%, 24.3% y 10.3% respectivamente, logrando identificar un 85% del material analizado (García Villegas & Parra Garcés, 2017).

Por otra parte, se encuentra el estudio realizado por (Castañeda Velandia & Mendez Alcazar, 2018) en donde buscaba identificar la relación entre la concentración de PM_{10} atmosférico vs la carga de sedimento en la vía para observar que tanto influye la presencia del uno con respecto al otro y poder comprender si inciden en la calidad de aire de la ciudad. Para este propósito, se tomaron datos obtenidos mediante muestreos tanto de material particulado en los cuatro puntos mencionados anteriormente como del material en resuspensión, así como datos de la RMCAB.

La representación y el análisis de esta información se realizó mediante Sistemas de información geográfica (ArcGIS) permitiendo la visualización espacial, temporal y la manipulación de datos, tanto encontrados, como los tomados por la red, y con el software “IBM SPSS Statistics”, en el cual se encontró que no hay una relación que permita identificar un modelo ARIMA, permitiendo identificar algunas variables que pudieron ser posibles fuentes de error.

4. Sinopsis metodológica de la investigación

La metodología empleada en el proyecto se compone de cuatro fases. Inicialmente se realizó una identificación y caracterización de los lugares de monitoreo para conocer las variables que allí afectan a la calidad del aire. La segunda fase fue proceder con la operación de los equipos para la medición de las concentraciones de material particulado de 2.5 micrómetros donde fue indispensable la calibración periódica de los equipos. Posteriormente, en la tercera fase se obtuvieron las concentraciones se procedió a identificar la procedencia de estas en donde también se realizó la validación de los datos y finalmente con base al análisis espacio temporal de los resultados y finalmente, se evalúan las excedencias registradas en el periodo de campaña.

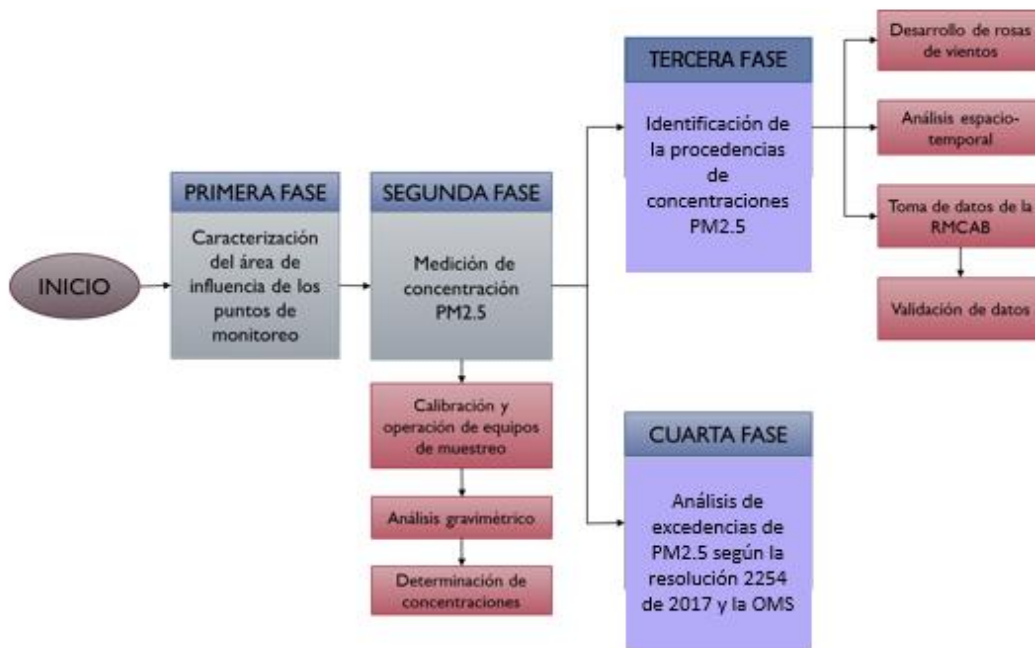


Figura 2. Metodología
Fuente: Autor

5. Métodos y materiales

5.1. Planeación y ejecución de campañas de campo

Una vez caracterizados los dos puntos para el monitoreo de material particulado a nivel atmosférico (Colegio Salle como zona de fondo o bajas concentraciones como se ilustra en la Figura 13 y Bomberos Fontibón como zona residencial-comercial como en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se realizó el diseño de la campaña de campo e instalación de los diferentes equipos a emplear, condiciones operativas y rutinarias de la campaña.





Para la programación de las campañas de campo se tuvo en cuenta el Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire para diferentes propósitos que se presentan a continuación establecido bajo la Resolución 650 del 2010 por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, que establece:

- Condiciones de seguridad de los equipos de muestreo donde se debe contar con la seguridad, iluminación y electricidad requerida y de los operadores, que debe contar con los materiales de seguridad y el curso para manejo de alturas avanzado.
- Exposición de muestreadores y sensores para mediciones representativas como la distancia de fuentes locales, evitar zonas cubiertas, estancamientos locales, distancia a vías entre otros aspectos (MAVDT, 2010).
- Condiciones de logística para la operación y mantenimiento de los equipos
- Manejo de muestras y cadenas de custodia
- Análisis de la información generada por las campañas de campo

5.2. Equipos muestreadores

A continuación, se describen aspectos generales de los equipos de muestreo utilizados durante la campaña de campo. En la se presentan de manera gráfica los equipos por punto de monitoreo y el periodo de tiempo de operación en cada uno.

Tabla 2. Equipos empleados para el monitoreo de material particulado menor o igual de 2.5 micrómetros

PUNTO DE MONITOREO		PM _{2.5}					
Colegio de La Salle	HiVol PM _{2.5} VFC (High-vol)						
							
	Fuente: (enviroequip, s.f.)						
	Desde			Hasta			
22/05/2018			12/09/2018				
Bomberos-Fontibón	TE-URG (Low-Vol)		TE-WILBUR (Med-Vol)(equipo 1)		TE-WILBUR (Med-Vol) (equipo 2)		
							
	Fuente: (Corporación DAMAR S.A.C., 2017)		Fuente: (Corporación DAMAR S.A.C., 2017)		Fuente: (Corporación DAMAR S.A.C., 2017)		
	Desde	Hasta	Desde	Hasta	Desde	Hasta	
	9/08/2018	12/09/2018	22/05/2018	14/07/2018	22/05/2018	3/06/2018	

Fuente: Autor.

- **Hi-Vol PM_{2.5} VFC:** El muestreador de aire de alto volumen (Hi-Vol) PM_{2.5} es un instrumento de referencia federal diseñado para la recolección de partículas en el

ambiente con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 μm a diferentes tasas de flujo comprendidas entre 1,019 y 1,699 m^3/min con un filtro de cuarzo de cuadrado de 20 x 20 cm. Su sistema de muestreo está fundamentado en la entrada de material particulado con tamaño selectivo, de forma que solo se depositen fracciones de $\text{PM}_{2.5}$ en el filtro de impactación dispuesto para tal fin. Actualmente, existen en el mercado diversas referencias de muestreadores de aire de alto volumen $\text{PM}_{2.5}$ tales como Hi-Vol $\text{PM}_{2.5}$ MFC y/o Hi-Vol $\text{PM}_{2.5}$ VFC, a través de su sistema de orificios críticos con diámetro predeterminado, la colección de partículas a una tasa de flujo constante durante el tiempo total de muestreo (Ecopetrol & Universidad de La Salle, 2017)

- **TE-URG (med-vol):** Un muestreador de partículas de medio volumen (Med-Vol) URG-3000ABC es un instrumento diseñado para la recolección simultánea de material particulado presente en la atmosfera con diámetro aerodinámico de 10 μm y 2,5 μm , a una tasa de flujo máxima total de 66 L/min. Es necesario recalcar que, el muestreo representativo de material particulado $\text{PM}_{2.5}$ es realizado por medio de un sistema diferencial para la succión de partículas con tamaño específico que opera a un caudal constante de 32 L/min (flujo volumétrico controlado por manifold de orificios críticos) y se encuentran acoplado (de forma autónoma) a un sistema de conducción encargado de transportar el flujo a dos impactadores destinados a la colección de la muestra, es decir dos de cuarzo circulares de 47 mm para PM_{10} y dos de $\text{PM}_{2.5}$ (Ecopetrol & Universidad de La Salle, 2017)
- **TE-WILBUR (med-Vol):** Es un sistema de muestras de aire de bajo volumen que puede configurarse para TSP, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ así como cualquier otro dispositivo de separación de partículas con un caudal entre 1-25 LPM, este equipo está diseñado para funcionar en cualquier entorno utilizando un filtro de cuarzo circular de 47 mm, superando todas las especificaciones de rendimiento establecidas por la US-EPA para la recogida de partículas de bajo volumen. El caudal volumétrico es controlado a través de un medidor de caudal másico integrado y sensores de temperatura y presión a bordo (Sanambiente, 2016).

5.3. Equipos e insumos de campo

Para la toma de muestras se requiere filtros de cuarzo de dos tamaños diferentes (filtro circular de 47 mm y filtro cuadrado de 20 x 20 cm) dependiendo el equipo. Estos filtros

cuentan con una preparación previa en el laboratorio donde se debe garantizar el máximo cuidado con guantes de nitrilo, tapabocas, cofia y bata limpia, al manipularlos para evitar contaminación con diversos factores. En el laboratorio se hizo uso de la mufla y los desecadores para el acondicionamiento de los filtros. En el cuarto de control se cuenta con un deshumidificador para mantener el ambiente regulado con una humedad entre 47% y 53% y temperatura ambiente entre 20 ± 2 específica por esta razón se cuenta con un salón controlado.

Para la fase de muestreo en campo se requiere de neveras para el transporte de filtros y geles refrigerantes para mantener la cadena de frío. Se debe transportar a campo cadenas de custodia para toma de datos de inicio y finalización del muestreo, cartas de flujo para instalar en el Hi-vol, un manómetro, un medidor de flujo volumetrico "Tetracal" para verificar los caudales del equipo URG, y elementos de protección personal como botas de seguridad, casco, guantes y tapabocas. A continuación, en la Figura 3 se encuentran los equipos, insumos y materiales que fueron necesarios para el trabajo en campo y en laboratorio.



Figura 3. Materiales y equipos
Fuente: Autor

6. Relación de actividades y detalles

- ✓ Caracterización de los puntos estratégicos en la ciudad de Bogotá para determinar el material de inmisión de tamaño inferior de 2.5 micrómetros

Para la determinación de los puntos de monitoreo se realizó una revisión de las características de los usos del suelo y una revisión de las concentraciones de material particulado si la zona corresponde a fondo urbano, zona residencial comercial, zona de alto tráfico y/o zona industrial. Además, en trabajo en campo se identificaron las principales características de los usos del suelo de los puntos de monitoreo.

- ✓ Participar las campañas de campo que implican la puesta de los filtros, la programación de muestreos, el mantenimiento de equipos, la recolección y el transporte de estos al laboratorio

La programación de los muestreos determinó el periodo de tiempo de muestreo iniciando el 22 de mayo de 2018 y finalizando el 12 de septiembre del mismo año. Donde se buscaba monitorear día de por medio buscando representar todos los días para tener representatividad de la actividad de zona en la semana, con muestras de 24 horas.

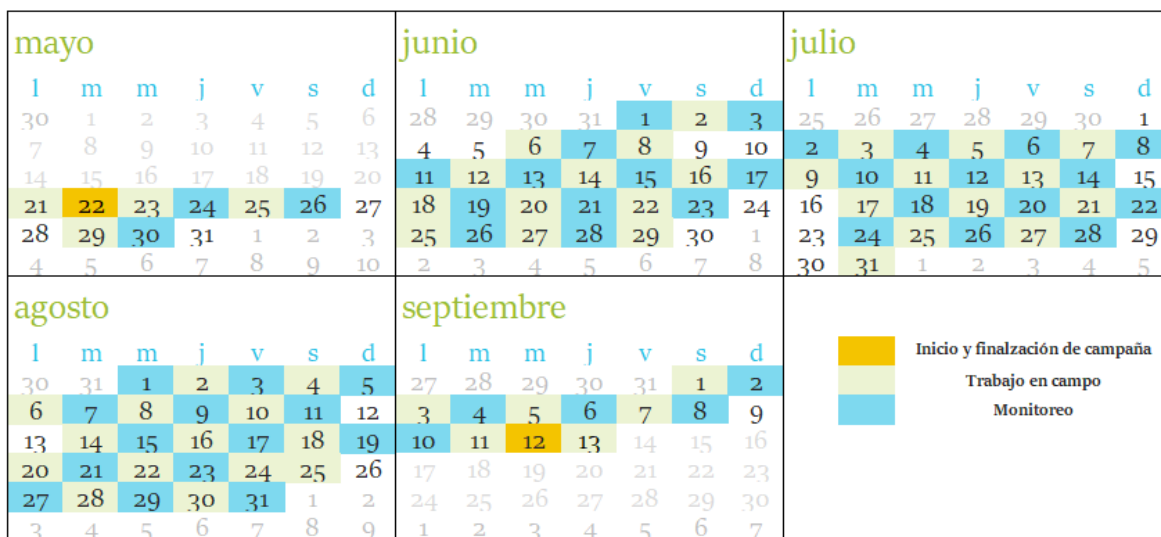


Figura 4. Programación de muestreos

Fuente: Autor.

El trabajo en campo se iniciaba en el laboratorio Centro Tecnológico Ambiental y Sostenible (CTAS) de la Universidad de La Salle donde se preparaba la nevera con los geles refrigerantes y los filtros sin impactar.

En la estación de Bomberos Fontibón se realizaba las siguientes actividades como se encuentra en la Figura 5 con el equipo del Wilbur y Figura 6 con el equipo URG.



Figura 5 . Actividades de trabajo en campo en Bomberos Fontibón del equipo Wilbur

Fuente: Autor.

Luego se procedía con el equipo URG. Para esto, se iniciaba verificando que el tiempo de muestreo efectivamente fuera de 24 horas. Luego con un tetracal¹ que es conectado a un sistema de conducción encargado de dirigir el flujo a cuatro impactadores destinados a la colección de la muestra de cada uno, y registrar las condiciones atmosféricas en la cadena de custodia, procediendo a retirar los filtros impactados. Finalmente, se guardaban en la nevera y se instalaban los filtros no impactados.



Figura 6. Actividades de trabajo en campo en Bomberos Fontibón del equipo URG

Fuente: Autor.

Finalizado el trabajo en campo en Bomberos Fontibón, se continuaba en el Colegio de La Salle en donde se contaba con un Hivol, donde se realiza un registro fotográfico y tomando

¹ Equipo usado para medir flujos volumétricos, temperatura ambiente y presión atmosférica mediante la utilización un efecto venturi que permite medir de 0.1 a 30 LPM.

los datos de interés en campo (condiciones ambiente y el tiempo de muestreo) en la cadena de custodia. Se almacenaba el filtro impactado en la nevera y se instalaba el filtro no impactado. Se programaba el equipo para muestreo de 24 horas de 12:00 am a 12:00 am del siguiente día y se instalaba una nueva carta de flujo. De igual manera se registraban datos en la cadena de custodia como se muestra en la Figura 7.

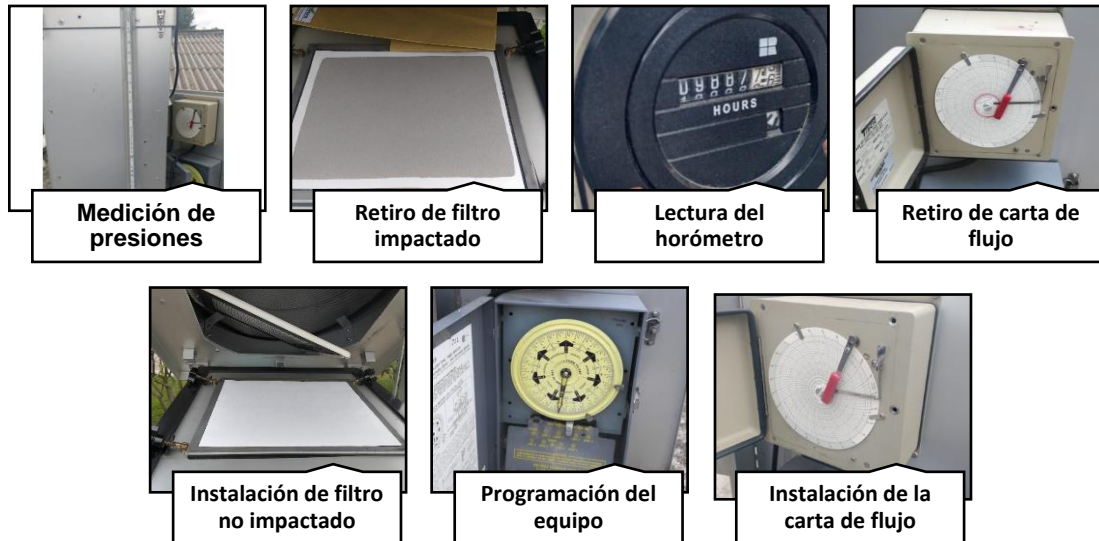


Figura 7. Actividades de trabajo en campo Colegio Salle equipo Hivol.

Fuente: Autor.

Estas actividades se encuentran detalladamente en el anexo 1, numeral 2.1.5 Desarrollo metodológico de muestreo.

✓ Realizar un análisis gravimétrico de los filtros acondicionados e impactados de $PM_{2.5}$. Esta actividad se realizaba en el laboratorio de calidad del aire del Centro Tecnológico Ambiental y Sostenible (CTAS) en la universidad de LaLa Salle, en la Figura 8 y Figura 9 muestran las actividades relacionadas. El acondicionamiento de los filtros previo al muestreo consta desde la obtención de equipos y materiales destinados para la realización de los muestreos hasta el acondicionamiento y pesajes de los filtros no impactados. Esta actividad del análisis gravimétrico se tiene las precauciones de realizarlas en un cuarto de control por medio de un deshumificador con condiciones controladas de humedad de $50 \pm 5\%$ y temperaturas de $20^\circ C \pm 2^\circ C$.

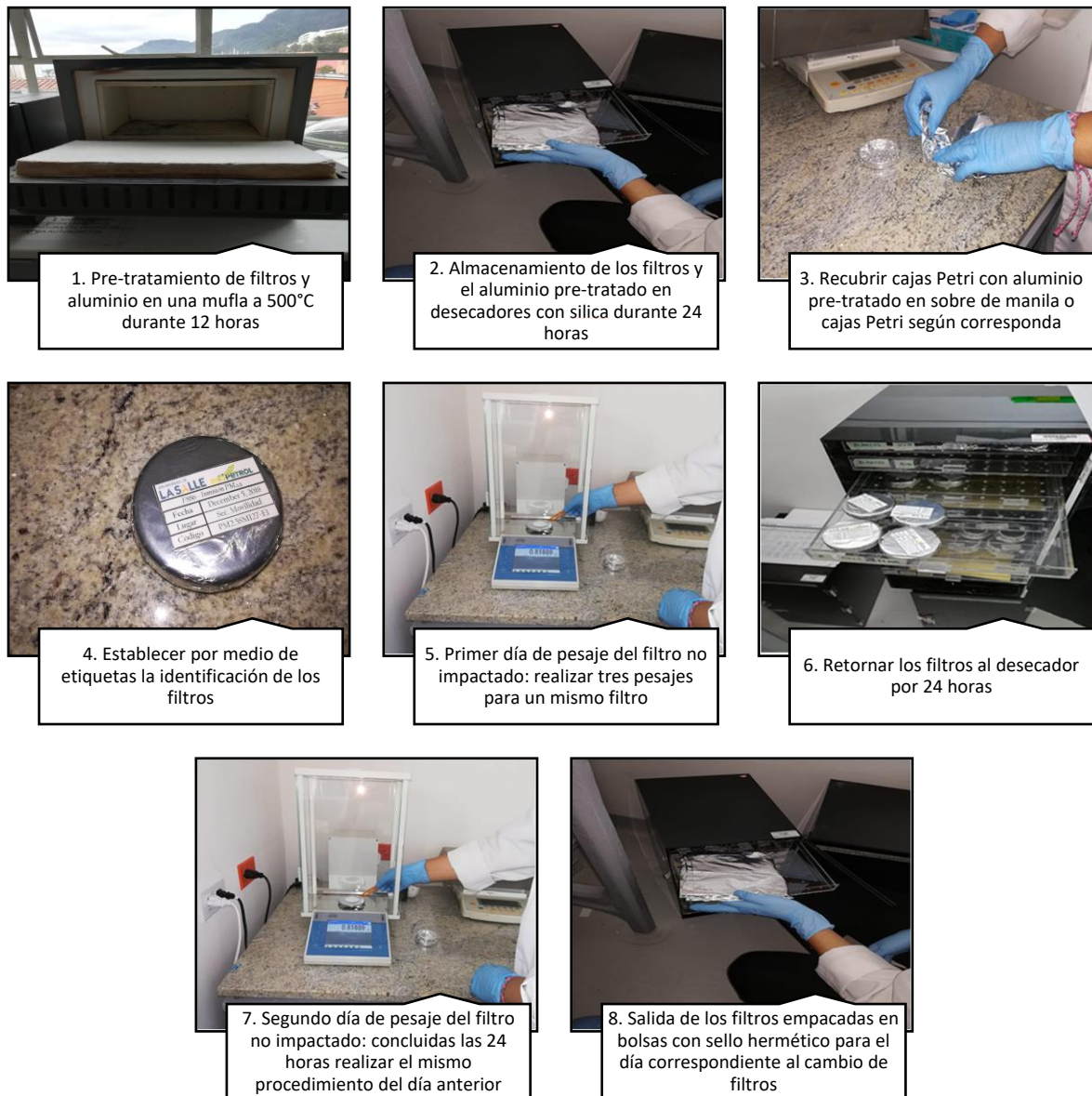


Figura 8. Actividades para el acondicionamiento de los filtros no impactados previo al muestreo.

Fuente: Autor.

Posterior al muestreo se involucran nuevamente actividades como la verificación y validación del muestreo por medio de la evaluación gravimétrica de los filtros impactados como se muestra en la Figura 9. Se encuentra de manera explícita en el anexo 1, numeral 2.1.5 Desarrollo metodológico de muestreo



1. Recepción de filtros impactados al laboratorio, junto con las cadenas de custodia.



2. Acondicionamiento de los filtros impactados en el desecador de silica por 24 horas.



3. Primer día de pesaje del filtro impactada: realizar tres pesajes para un mismo filtro



4. Retornar los filtros al desecador por 24 horas



5. Segundo día de pesaje del filtro impactado: concluidas las 24 horas realizar el mismo procedimiento del día anterior



6. Salida de los filtros impactados a la caracterización química por medio de bolsas de sello hermético



7. Almacenamiento de muestras en una nevera a 4°C

Figura 9. Actividades de la verificación y validación del muestreo de los filtros impactados

Fuente: Autor.

- ✓ Evaluar la variabilidad espacio temporal de la concentración de $PM_{2.5}$ en los puntos de muestreo

Para la construcción de la rosa de los vientos se usa el programa Wplot creado por Lakes Environmental, las cuales son georreferenciadas en Google Earth y que permiten definir la procedencia de emisiones de concentración de material particulado. En segundo lugar, se

desarrollan series temporales en función de las concentraciones y con ayuda de mapas de concentraciones para finalmente realizar el análisis espaciotemporal. En esta fase, es importante contar con los datos suministrados por la RMCAB de velocidad del viento, dirección del viento y precipitación para la construcción de la rosa de vientos.

- ✓ Realizar un análisis de excedencias de los puntos de monitoreo y su comparación $PM_{2.5}$ con los datos de la Red de Monitoreo de la ciudad

En la última fase se realiza la toma de datos de la RMCAB de las diferentes estaciones para comparar el comportamiento espaciotemporal y validar los resultados obtenidos. Para esto, es necesario tener en cuenta las concentraciones suministradas por la red de las estaciones Guaymaral para el punto del Colegio La Salle y Puente Aranda para el punto de monitoreo de Bomberos Fontibón. Finalmente, se identifican los muestreos que exceden la resolución 2254 de 2017 y la OMS se analiza las causas de dichas excedencias

- ✓ Preparar un manuscrito para publicación en una revista científica

Redactar un manuscrito para publicación en una revista científica dando a conocer los aspectos técnicos de la campaña de campo llevada a cabo, así como, descripción de los equipos de monitoreo ambientales empleados, metodologías aplicadas en recolección, resultados del desarrollo de la campaña y las conclusiones (anexo 5).

7. Compendio de resultados

7.1. Primera fase: Caracterización del sector donde se encuentran ubicados los puntos de monitoreo

Los puntos de monitoreo establecidos se encuentran ubicados estratégicamente tal como lo indica el Centro Lasallista de Investigación y Modelación Ambiental, con base al análisis del comportamiento espaciotemporal de las concentraciones promedio anuales en $PM_{2.5}$ de 2012 a 2016 y usos de suelo, para identificar las zonas o puntos en la ciudad de Bogotá con altas y bajas concentraciones y de esta manera seleccionaron puntos de monitoreo de diferentes sectores: industrial, de fondo, tráfico y tráfico industrial. Para el presente proyecto se monitoreo dos de los puntos seleccionados, localizados espacialmente como muestra en la Figura 10.



Figura 10. Ubicación geoespacial en la ciudad de Bogotá de los puntos monitoreados

Fuente: Adaptado de Google Earth

7.1.1. Estación de colegio de La Salle

El primer punto de monitoreo se encuentra ubicado en El Colegio de La Salle, en la zona nororiente de la ciudad, localidad de Usaquén exactamente en la Calle 170 #12-10. Tal como se define en el Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá se designa al área de monitoreo del colegio en mayor proporción de actividad residencial, es decir un lugar que proporciona

alojamiento permanente a las personas. También se encuentra zona residencial con comercio y servicios y zonas industriales en menor proporción, tal como se observa en la Figura 11. Además, en la localidad de Usaquén el POT define área minera, encontrando canteras activas ubicadas al suroriente del punto de monitoreo y se encuentran vías principales como la carrera 45 (Autopista Norte), la carrera séptima, carrera novena y la calle 170 que pueden ser fuentes de las concentraciones obtenidas por el tráfico vehicular de estas vías.



Figura 11. Usos del suelo en la zona del Colegio de La Salle
Fuente: (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2013) Modificado por autor.

El punto de monitoreo del Colegio de La Salle se designa como Zona Fondo Urbano, por estar ubicado en zonas que representan niveles normales de exposición, es decir, está alejado de vías de alto flujo vehicular o procesos de combustión, asentamientos industriales y/o comerciales, entre diversas fuentes; pero si por la contribución al régimen de los vientos, como se ilustra en la Figura 11. Además, según la Secretaría Distrital de Ambiente, en los informes anuales de calidad del aire en los años 2014 al 2017 es donde se registran concentraciones moderadas de material particulado $PM_{2.5}$ en esta zona de la ciudad, con respecto al Índice Bogotano de Calidad del Aire ($12 - 35 \mu g/m^3$), como se muestra en la Figura 12 (estrella morada).

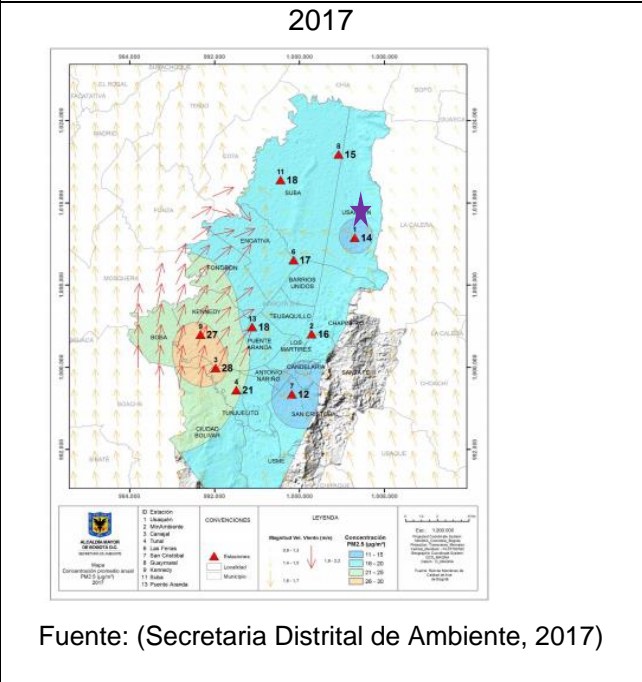
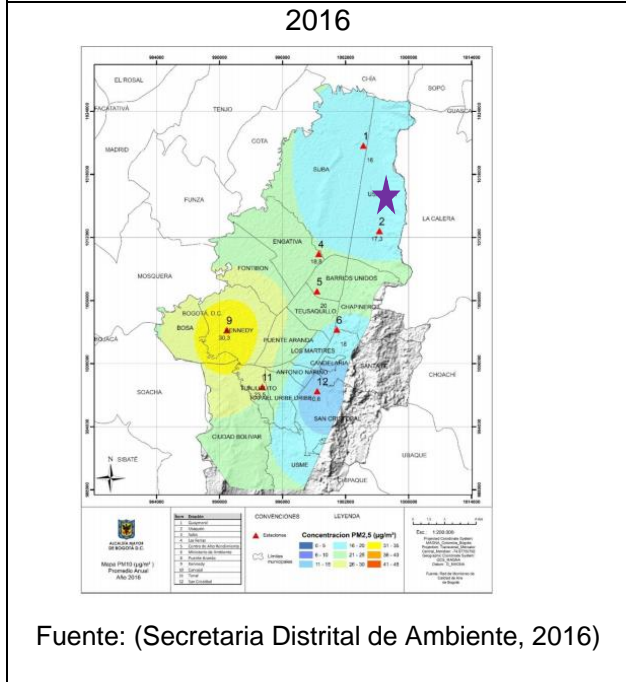
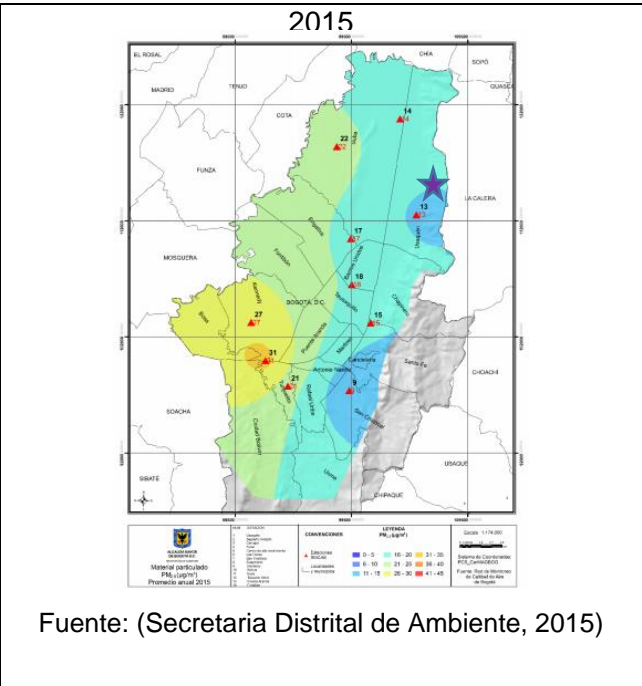
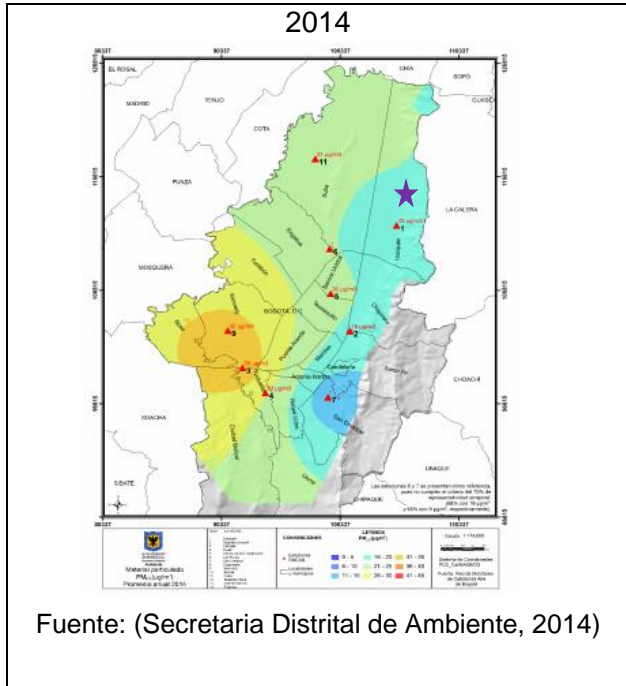


Figura 12. Comportamiento espaciotemporal de las concentraciones promedio anuales de PM2.5 en Bogotá 2014-2017 en la zona del colegio de La Salle

En la Figura 13 se muestra el punto de monitoreo de Colegio de La Salle por su vista frontal y lateral.



Figura 13. Ubicación de equipos de monitoreo dentro del Colegio de La Salle.
Fuente: Autor

7.1.2. Estación de Bomberos Fontibón

El segundo punto de monitoreo se encuentra ubicado en la estación de Bomberos Alexander Martín Segura, exactamente en la Calle 17 #96G-64 en la localidad de Fontibón. De acuerdo con lo establecido en el Plan de Ordenamiento Territorial se define el sector como un área de actividad industrial. Dentro de la zona se encuentra también áreas de zona de comercio aglomerado, zona residencial con comercio y servicios y zona de servicios e industria, tal como se observa en la Figura 14.



Figura 14. Usos del suelo en la zona de Bomberos Fontibón
Fuente: (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2013) Modificado por autor.

Esta zona es hoy uno de los centros industriales más importantes de la capital, pues es sede de fábricas embotelladoras, fábricas de empaques, ensambladoras de carrocerías, fábricas de pinturas en donde se produce asfalto (Secretaría de Hacienda, 2014). Además, se encuentran industrias de frigoríficos, fábricas de bebidas gaseosas, industrias caseras de reconstrucción de baterías, talleres mecánicos, soldadores y laminadores, industria de madera y procesos de galvanoplastia. Estas industrias se encuentran ubicadas alrededor del punto de monitoreo, tal como se muestra en la Figura 15.

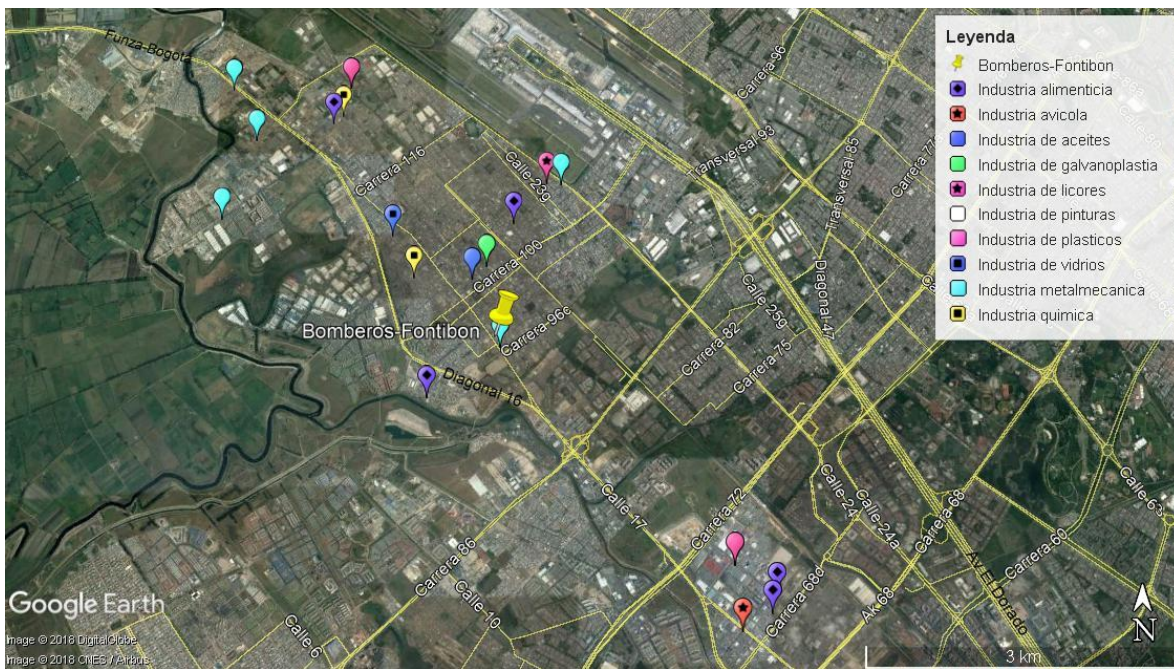


Figura 15. Industrias aledañas al punto de monitoreo de Bomberos Fontibón

Fuente: Adaptado de Google Maps

Este punto de monitoreo es establecido como estación Zona residencial, comercial e industrial ya que se encuentra influenciada por la presencia de emisiones fijas, principalmente de industrias, además que se encuentra distribuido por zona comercial considerable por la parte norte del punto de monitoreo (color morado de la Figura 14) , junto con la presencia de zona residencial (color azul). Además, que este punto se encuentra influenciado por vías sobre la calle 17 presenta un importante flujo vehicular y con nula vegetación y en algunos lugares sobre esta vía se encuentran parqueaderos sin pavimentar y suelos erosionados en separadores, la calle 26 y la carrera avenida Ciudad de Cali, en esta vía sobresale el transporte de carga (Espitia Cano & Porras Montaño, 2017), posible causa de medias a altas concentraciones de material particulado de 2.5 micrómetros evidenciadas desde el 2014 al 2017 (Figura 16; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) (estrella rosada)

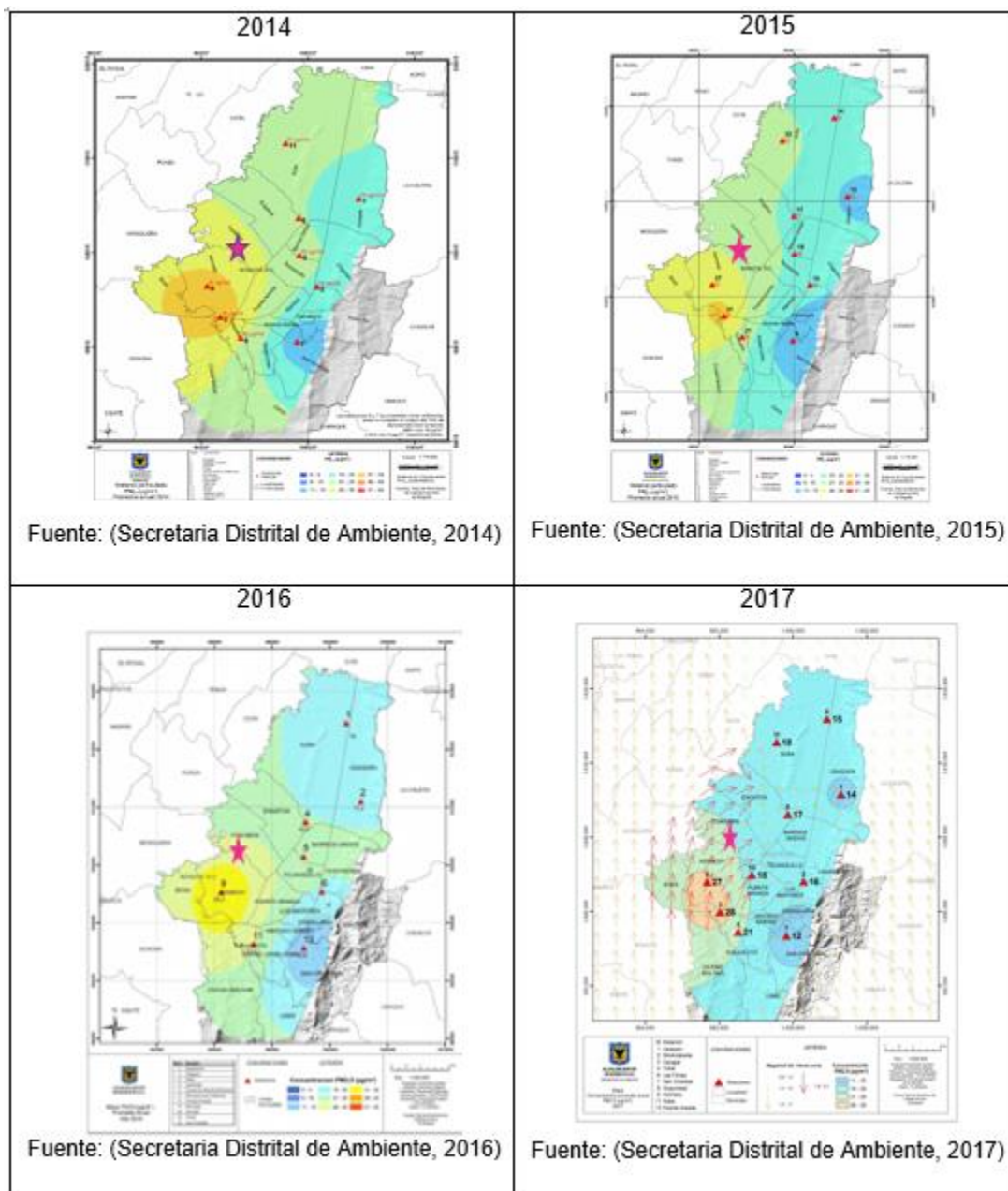


Figura 16. Comportamiento espaciotemporal de las concentraciones promedio anuales de PM2.5 en Bogotá 2014 - 2017 en la zona de bomberos Fontibón.

En la Figura 17 se muestra el punto de monitoreo de bomberos Fontibón por su vista frontal y lateral.



Figura 17. Comportamiento espaciotemporal de las concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} en Bogotá 2014-2017 en la zona de bomberos Fontibón

7.2. Segunda fase: Medición de concentraciones de material particulado PM_{2.5}

En el anexo 3, se expone el reporte con las concentraciones obtenidas mediante la campaña de campo de los dos puntos de monitoreo. Para el colegio de La Salle se logró mediante un Hi-Vol y en Bomberos-Fontibón con el equipo URG que permitió obtener dos muestras de PM_{2.5} y dos equipos Wilbur. Para este punto debido a que se contaban con tres equipos durante todo el monitoreo, para obtener una concentración representativa diaria, se procedió a determinar la media aritmética de cada muestra diaria.

Cada muestra recolectada era diferenciada por un código que representaba el lugar, el filtro correspondiente, y el contaminante es decir PM_{2.5}; la codificación empleada fue de la siguiente manera, primero el PM_{2.5}, seguido las abreviaturas del punto de muestreo que fueron expresadas de la manera siguiente: CS para Colegio de La Salle, BF para Bomberos Fontibón, y como último el número del filtro correspondiente.

Las concentraciones resultantes fueron el proceso del análisis gravímetro que se realizó en el laboratorio; los datos recolectados fueron instrumento para la realización las gráficas espaciotemporales de esta campaña, la cual da inicio el 22 de mayo de 2018 y concluye el 12 de septiembre del mismo año. En la Tabla 3, muestra los porcentajes de captura por punto de monitoreo. Es de aclarar que, debido a situaciones como fallas operativas, cortes de energía, fallas eléctricas y la ausencia del equipo, no fue posible la captura de algunos datos.

Tabla 3. Porcentajes de captura de muestras de PM_{2.5}

Porcentaje de captura de muestras PM _{2.5} por punto de monitoreo	Punto de Monitoreo	Campaña de campo	
		Muestras	Porcentaje
	Cantidad de muestras posibles...	49	100%
	COLEGIO DE LA SALLE	44	90%
	BOM. FONTIBÓN E1 - F1	37	76%
	BOM. FONTIBÓN E2 - F2	21	43%

Fuente: Autor

7.3. Tercera fase: Identificación de las procedencias de emisiones de concentración de material particulado PM_{2.5}

7.3.1. Toma de datos de monitoreo de RMCAB y validación de resultados

Para la validación de los datos obtenidos y los datos reportados por las estaciones de la RMCAB busca determinar si los datos muestreados son representativos. La RMCAB está conformada por 11 estaciones que permiten realizar un monitoreo de concentraciones de contaminantes criterio y variables meteorológicas de las cuales dos (E. Guaymaral y E. Puente Aranda) se encuentran cercanas de los puntos muestreados (Figura 18).



Figura 18. Georreferenciación de las estaciones de referencia – RMCAB

Fuente: Adaptado de Google Earth

A continuación, se presenta la validación de datos de concentraciones con las obtenidas en las campañas de monitoreo y las reportadas por las estaciones de la RMCAB en estas estaciones como se observa la Figura 19 para el colegio de La Salle se desarrolla esta validación con la estación de Guaymaral debido a que se tiene una distancia lineal de 4.09 km en comparación de la estación de Usaquén con 4.26 km, además que esta estación tiene influencia por el tráfico ya que se encuentra ubicada sobre la carrera séptima, mientras que la estación de Guaymaral es de tipo de fondo ubicada en una zona verde.

Las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas, no presentan variaciones irregulares respecto a las reportadas por la RMCAB; si bien algunos días difieren en magnitud siendo mayores las que son reportadas por la estación de RMCAB, donde podría ser que a pesar que esta estación se encuentra rodeada por zona verde se encuentra una vía principal (la autopista norte o carrera 45) con una distancia de 0.31 km, ya que es una vía importante con flujo vehicular alto, sin embargo, tiene un comportamiento similar con las medidas en este punto con concentraciones promedio de $7.43 \mu g/m^3$.

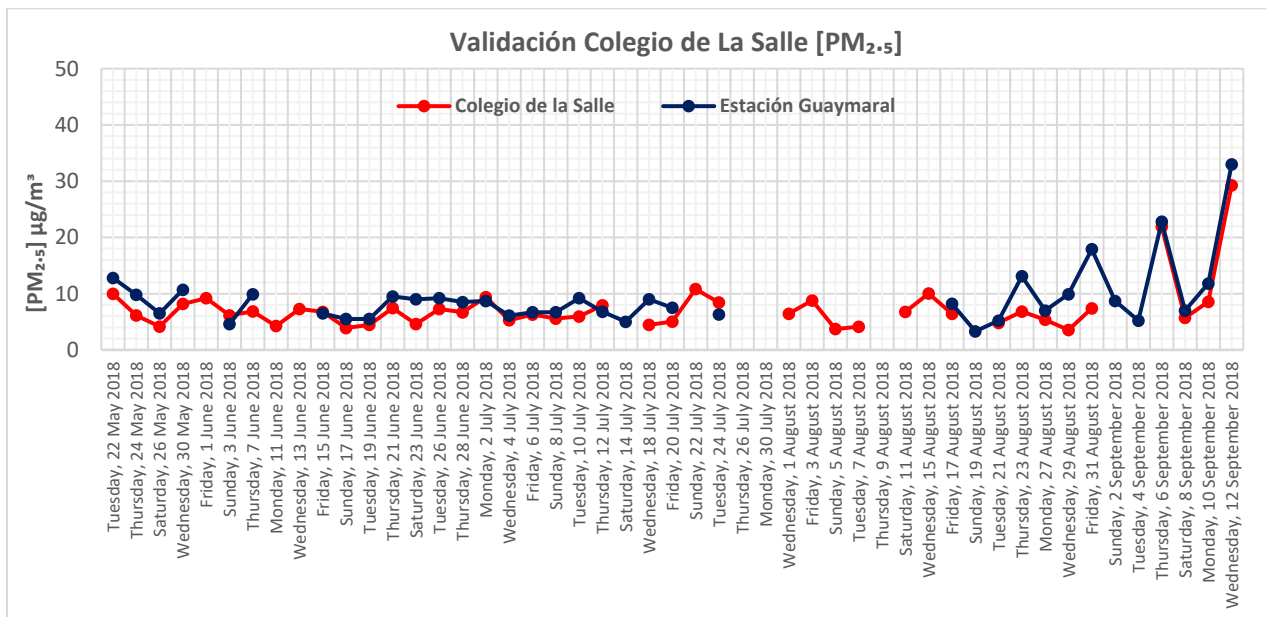


Figura 19. Validación para colegio de La Salle con la estación de la RMCAB “Guaymaral”.

Fuente: Autor

La Figura 20 para Bomberos Fontibón y la estación de Puente Aranda debido a que tiene una distancia lineal de 5.06 km en comparación de la estación de Kennedy con 5.36 km, además que esta estación es una estación tipo de fondo (Secretaría Distrital de Ambiente, 2018) ubicada en una zona verde, mientras que la estación de Puente Aranda es de tipo Industrial.

Para la validación del punto de Bomberos Fontibón se observan las concentraciones de PM_{2.5} de este punto y las reportadas por la RMCAB; por lo general superan en magnitud a las concentraciones registradas por la estación de Puente Aranda, debido a la influencia de las vías importantes como la calle 13, calle 17 y la carrera avenida Ciudad de Cali, ya que la influencia de fuentes móviles dependen del combustible, la tecnología y el tipo de vehículo, en proporciones de emisión del material particulado PM_{2.5}. Además, de la actividad específica desarrollada en el sector como las fuentes fijas que se encuentran en esta zona de estudio como lo son las industrias de frigoríficos, fábricas de bebidas gaseosas, industrias caseras de reconstrucción de baterías, talleres mecánicos, soldadores y laminadores, industria de madera y procesos de galvanoplastia.

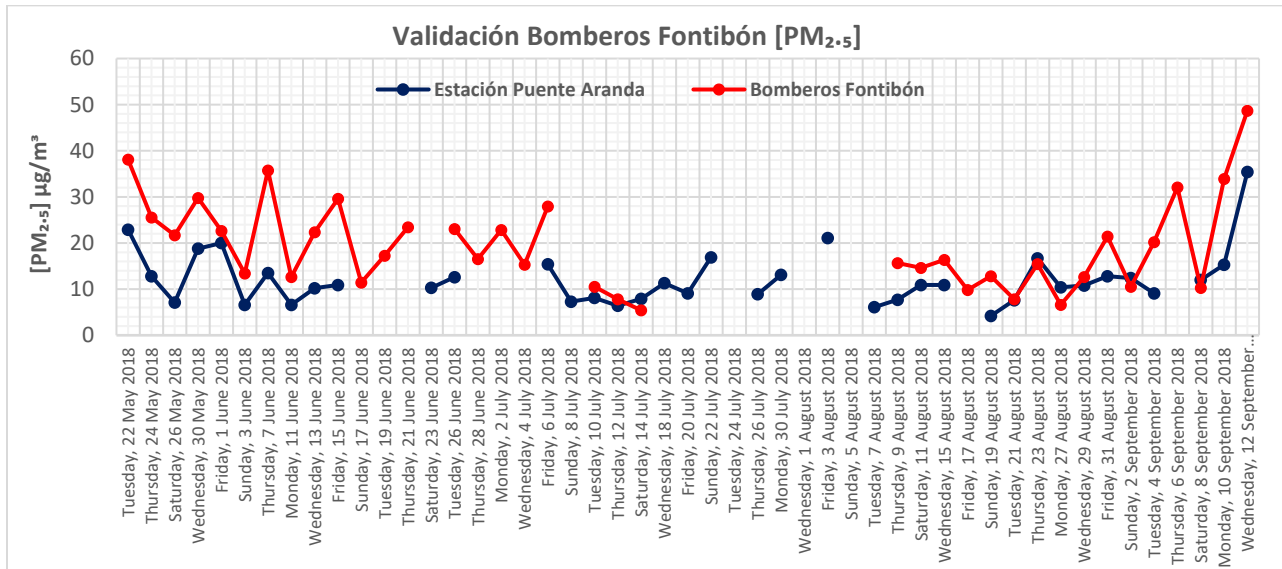


Figura 20. Validación para Bomberos Fontibón con la estación de la RMCAB "Puente Aranda"
Fuente: Autor

7.3.2. Análisis temporal

En la Figura 21 se presentan las variaciones del comportamiento temporal de PM_{2.5} registradas desde el 22 de mayo hasta el 12 de septiembre para los puntos monitoreados.

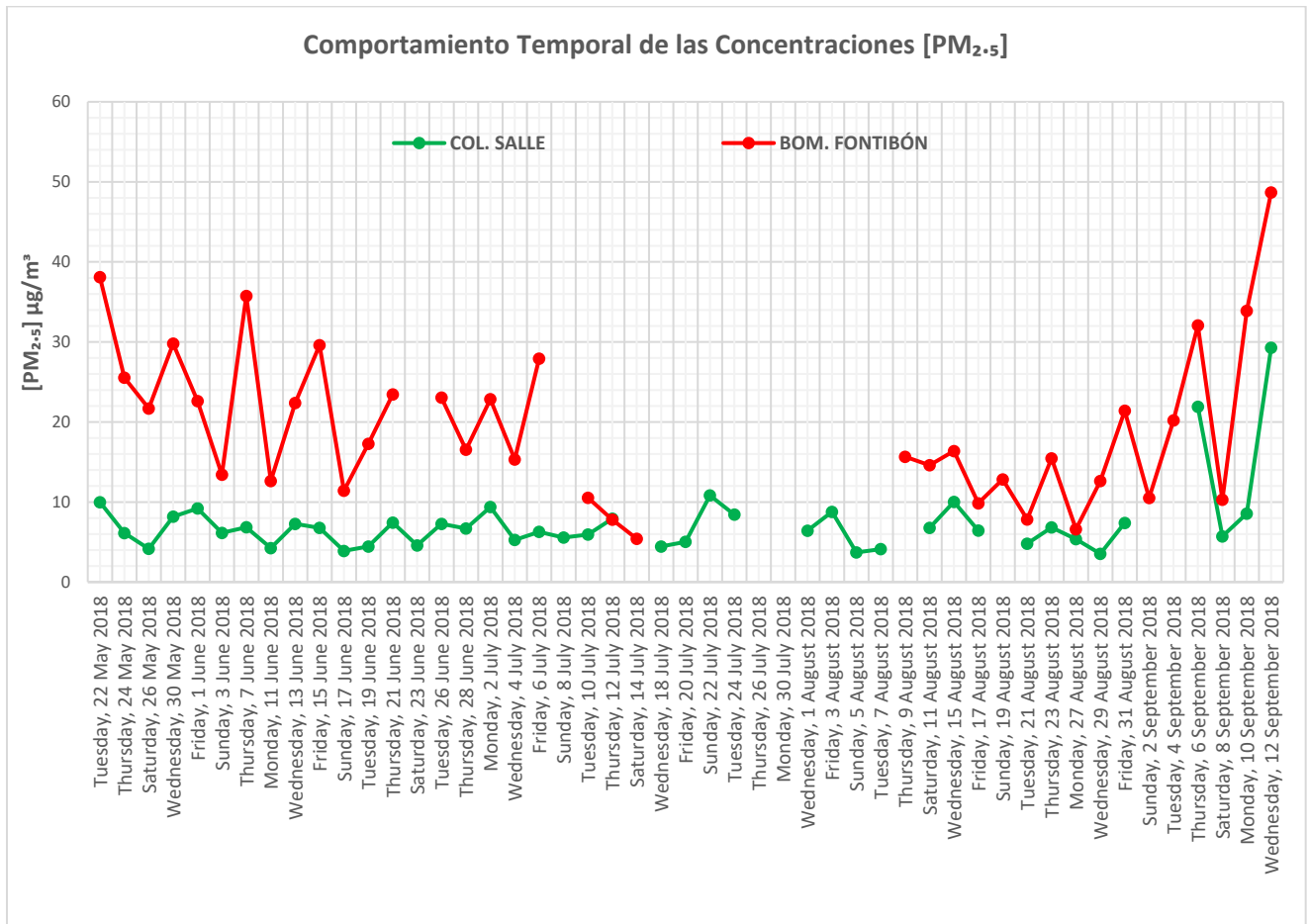


Figura 21. Variación temporal de las concentraciones de PM_{2.5}

Fuente: Autor

Los muestreos que se registraron de colegio de La Salle son poco variables en el tiempo con concentraciones promedio de 7.43 µg/m³, es decir con una calidad del aire favorable con respecto al IBOCA (Tabla 4), debido a que se encuentra influenciado en una zona residencial, sin embargo, las vías principales que rodean esta zona como la carrera 7, la carrera 9 y la calle 170.

Por otro lado, el punto de Bomberos Fontibón es el punto con una calidad del aire moderado con un promedio de 19.71 µg/m³ con respecto al IBOCA, debido a que se encuentra influenciado por la actividad residencial, industrial y comercial de esta zona, además de vías importantes como la calle 17, la calle 13 y la carrera Av. Ciudad de Cali, ya que las fuentes móviles son las que influyen considerablemente en la emisión de concentraciones de PM_{2.5}.

Tabla 4. Índice Bogotano de Calidad del Aire

Atributos del IBOCA				Rangos de concentración y tiempo de exposición para cada contaminante ¹					
Rangos numéricos	Color	Estado de calidad del aire	Estado de actuación y respuesta ²	PM10, 24h (µg/m³)	PM2.5, 24h (µg/m³)	O ₃ , 8h (µg/m³) [ppb]	CO, 8h (µg/m³) [ppm]	SO ₂ , 1h (µg/m³) [ppb]	NO ₂ , 1h (µg/m³) [ppb]
0 - 10	Azul claro	Favorable	Prevención	(0-54)	(0-12)	(0-116) [0-59]	(0-5038) [0.0-4.4]	(0-93) [0-35]	(0-100)
10,1 - 20	Verde	Moderada	Prevención	(55-154)	(12.1-35.4)	(117-148) [60-75]	(5039-10762) [4.5-9.4]	(94-198) [36-75]	(101-188)
20,1 - 30	Amarillo	Regular	Alerta Amarilla	(155-254)	(35.5-55.4)	(149-187) [76-95]	(10763-14197) [9.5-12.4]	(199-486) [76-185]	(189-677) [101-360]
30,1 - 40	Naranja	Mala	Alerta Naranja	(255-354)	(55.5-150.4)	(188-226) [96-115]	(14198-17631) [12.5-15.4]	(487-797) [186-304]	(678-1221) [361-649]
40,1 - 60	Rojo ³	Muy Mala	Alerta Roja ³	(355-424)	(150.5-250.4)	(227-734) [116-374]	(17632-34805) [15.5-30.4]	(798-1583) [305-604]	(1221-2349) [650-1249]
60,1 - 100 ⁴	Morado	Peligrosa	Emergencia	(425-604)	(250.5-500.4)	(734-938) [374-938]	(34806-57703) [30.5-50.4]	(1584-2630) [605-1004]	(2350-3853) [1250-2049]

Fuente: (Secretaria Distrital de Ambiente, 2017).

Por otro lado, el miércoles 12 septiembre se registraron las concentraciones más altas de 29.27 µg/m³ y 48.69 µg/m³ para el colegio de La Salle y Bomberos Fontibón respectivamente, excediendo este último la resolución 2254 de 2017, donde el límite máximo permisible es 37 µg/m³.

Según la cartilla de movilidad del 2015, se realizó un aforo de volúmenes por tipo de vehículos durante 24 horas continuas en vías estratégicas, donde el punto que representa el flujo vehicular de las vías que influyen a la zona de colegio de La Salle es la AK 7- AC 127, (Figura 22) donde se maneja un flujo vehicular principalmente de vehículos livianos y de motos, la mayor cantidad de este tipo de vehículos trabajan con gasolina (Figura 24), por esto, podría atribuirse a un 18% de emisiones de PM_{2.5} (Figura 25) y presentando un flujo mínimo de camiones con un porcentaje de 1.8%, con un aforo total de 91.721 vehículos.

Por otra parte, en la zona de Bomberos Fontibón, el punto representativo es la AK 86 – AC 17 (Figura 23), representando un flujo superior, ya que se obtuvo un aforo de 227.110 vehículos, en el cual, se observó un flujo representativo de vehículos livianos y motos, estos trabajan con gasolina. Sin embargo, en comparación del anterior punto tiene un flujo alto de camiones representando 12.2% de esta zona, estos trabajan con Diésel principalmente (Figura 24), donde podría atribuirse a un 87% de emisiones de PM_{2.5} (Figura 25).

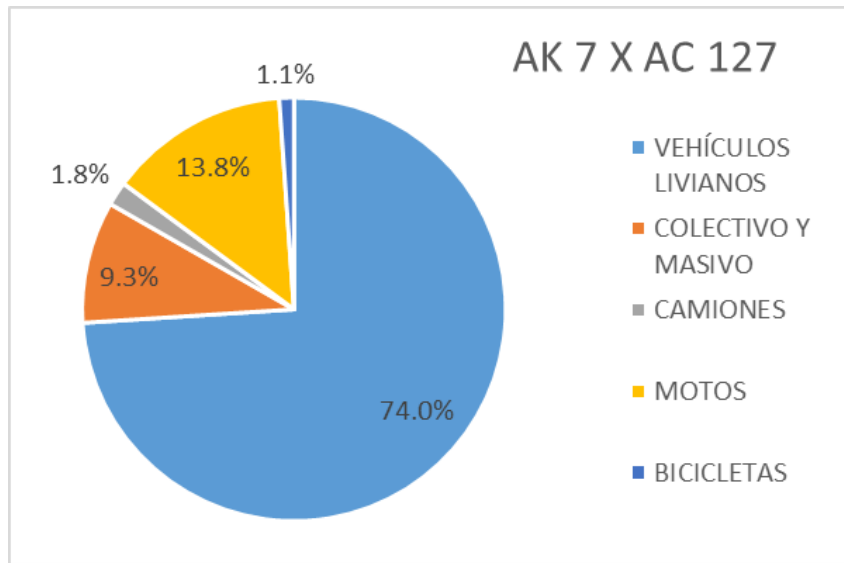


Figura 22. Porcentajes del flujo vehicular de la zona de Colegio de La Salle
 Fuente: (Secretaria de movilidad de Bogotá, 2015)

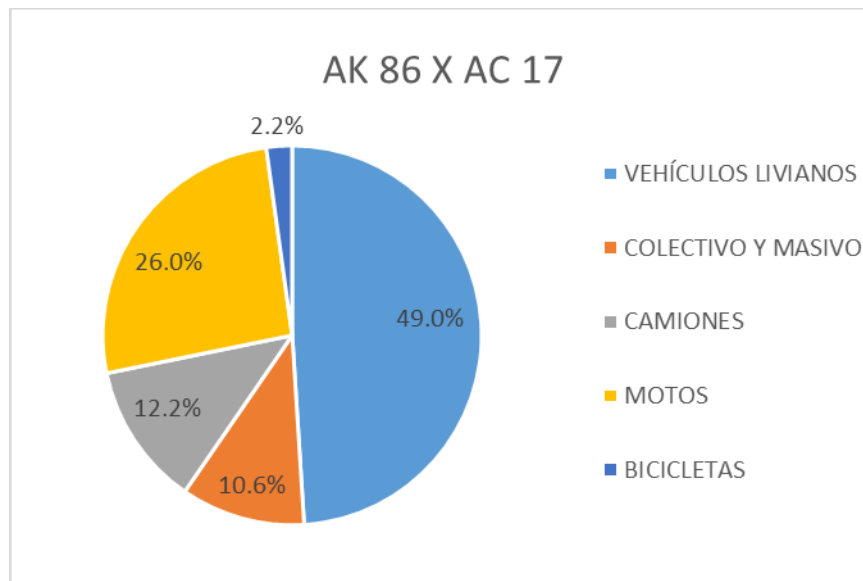


Figura 23. Porcentajes del flujo vehicular de la zona de Bomberos Fontibón
 Fuente: (Secretaria de movilidad de Bogotá, 2015)

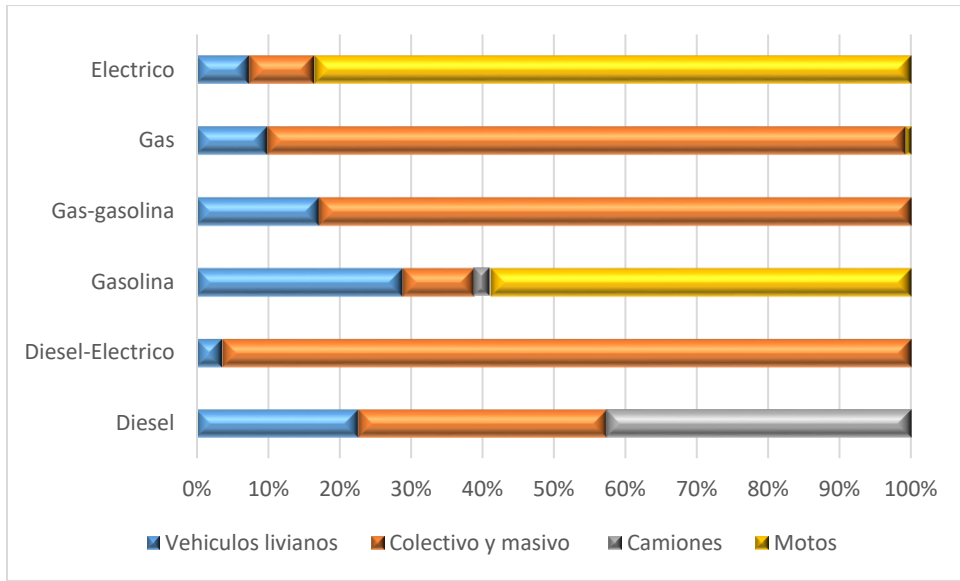


Figura 24. Distribución de los tipos de vehículo por tipo de combustible en Bogotá.
Fuente: (Secretaria de movilidad de Bogotá, 2015)

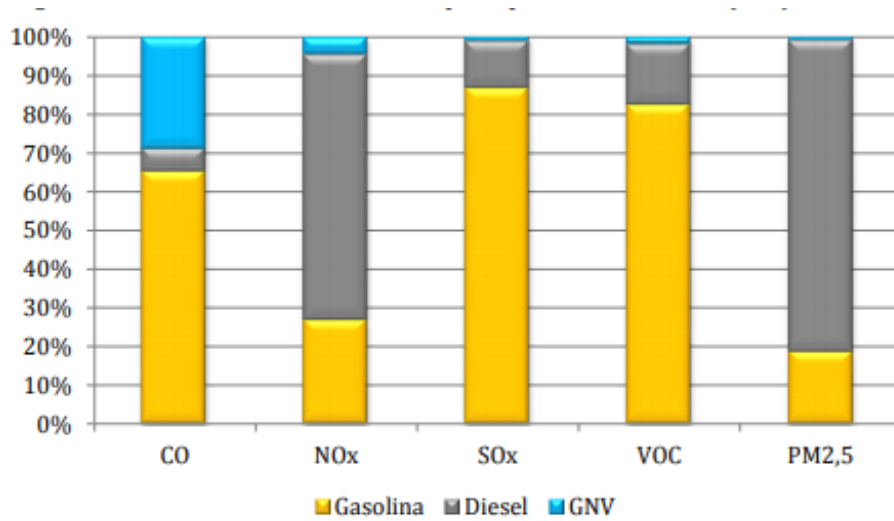


Figura 25. Distribución de emisiones por tipo de combustible (Ton) año 2015
Fuente: (Universidad Pontificia Bolivariana, 2013)

Según la Figura 26 se presenta la variación promedio en el ciclo semanal, determinando para el colegio de La Salle (color azul) los días con mayor concentración de material particulado $PM_{2.5}$ son los días miércoles y jueves. Por otra parte, Bomberos Fontibón (color naranja) son los días miércoles y viernes.

Las menores concentraciones ocurren los fines de semana para ambos puntos monitoreados. Este comportamiento puede ser causado posiblemente por el comportamiento de la ciudad, dado

que el tráfico vehicular, la actividad laboral y de actividades se reducen los fines de semana (Secretaria Distrital de Ambiente, 2017).

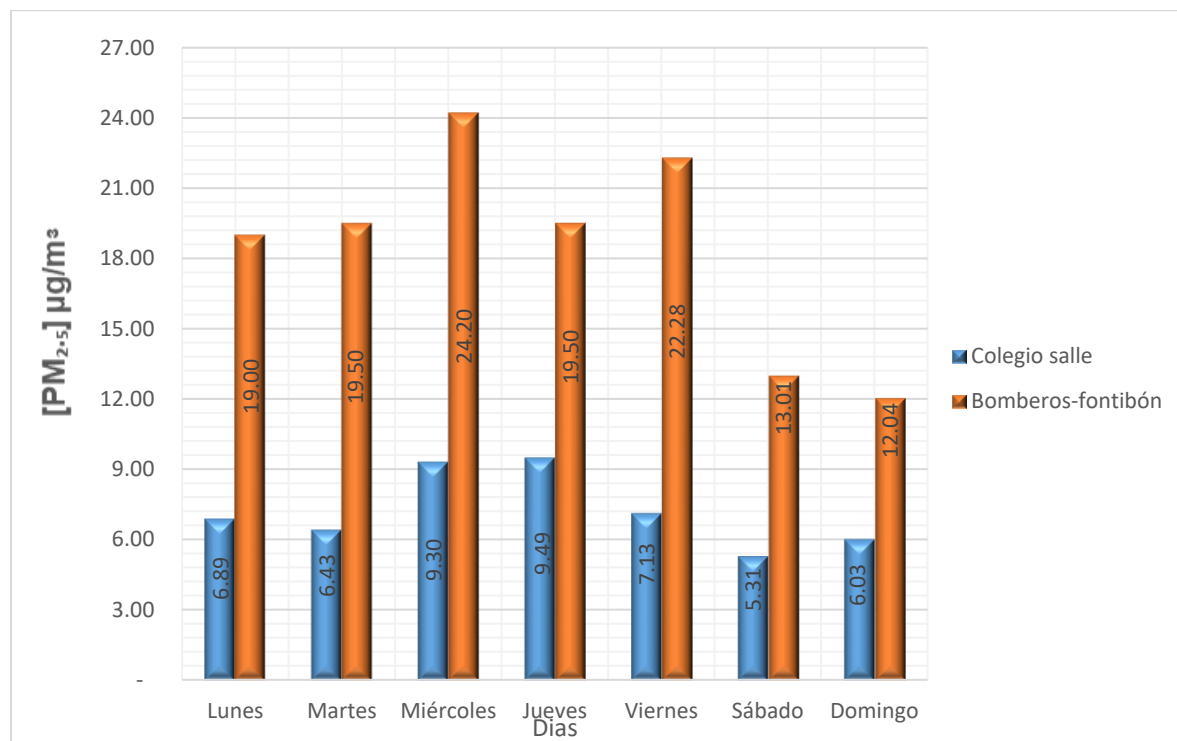


Figura 26. Variación promedio en el ciclo semanal de las concentraciones de PM_{2.5}

Fuente: Autor

7.3.3. Análisis espacial

Para el desarrollo del análisis espacial se realizó una interpolación de las concentraciones PM_{2.5}, tomando los datos de todas las estaciones de la RMCAB, calculando las concentraciones promedio durante el tiempo de ejecución del proyecto mediante el software de ArcGis con la herramienta de IDW.

Tabla 5. Promedio de concentraciones de PM_{2.5} de los muestreos de las estaciones de calidad del aire

Punto	Nombre	Tipo de estación	Promedio [PM _{2.5}] µg/m ³
1	Puente Aranda	Industrial	11.6
2	Kennedy	De fondo	18.5
3	Carvajal	Tráfico - industrial	28.9
4	Las ferias	Tráfico	8.8

5	Guaymaral	De fondo	9
6	Usaquén	De fondo	7.3
7	Suba	De fondo	11.2
8	Tunal	De fondo	12.7
9	Centro de alto rendimiento	De fondo	8.6
10	San Cristóbal	De fondo	5.3
11	Colegio de La Salle	De fondo	7.43
12	Bomberos Fontibón	Comercial- residencial	19.51

Fuente: (RMCAB, 2018)

Dentro de los resultados obtenidos con base a los promedios tomados del 22 de mayo al 12 de septiembre de 2018 (Figura 27) se encuentra que la zona más afectada por las altas concentraciones de $PM_{2.5}$ es la zona suroccidental, es decir, los puntos 2, 3 y 12 en un rango de concentraciones de 15.9 a 28.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que comprenden las localidades de Kennedy, Tunjuelito y Fontibón esta tendencia puede deberse de forma preliminar a las zonas con mayor cantidad de vías importantes y la influencia de zona industrial.

Las zonas con resultados con concentraciones más bajas son los puntos 4, 5, 6, 9, 10 y 11 que corresponden a las localidades Suba, Teusaquillo, Barrios Unidos, zona norte de San Cristóbal y Usaquén en un rango de concentraciones de 5.3 a 15.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ posiblemente por zonas verdes o con baja influencia de la contaminación por fuentes móviles y fijas. A pesar de que estas concentraciones durante la ejecución del proyecto no se encuentran promedios que sobrepasen la resolución 2254 de 2017, en el punto 3 es el único punto que sobrepasa los límites permisibles de la OMS.

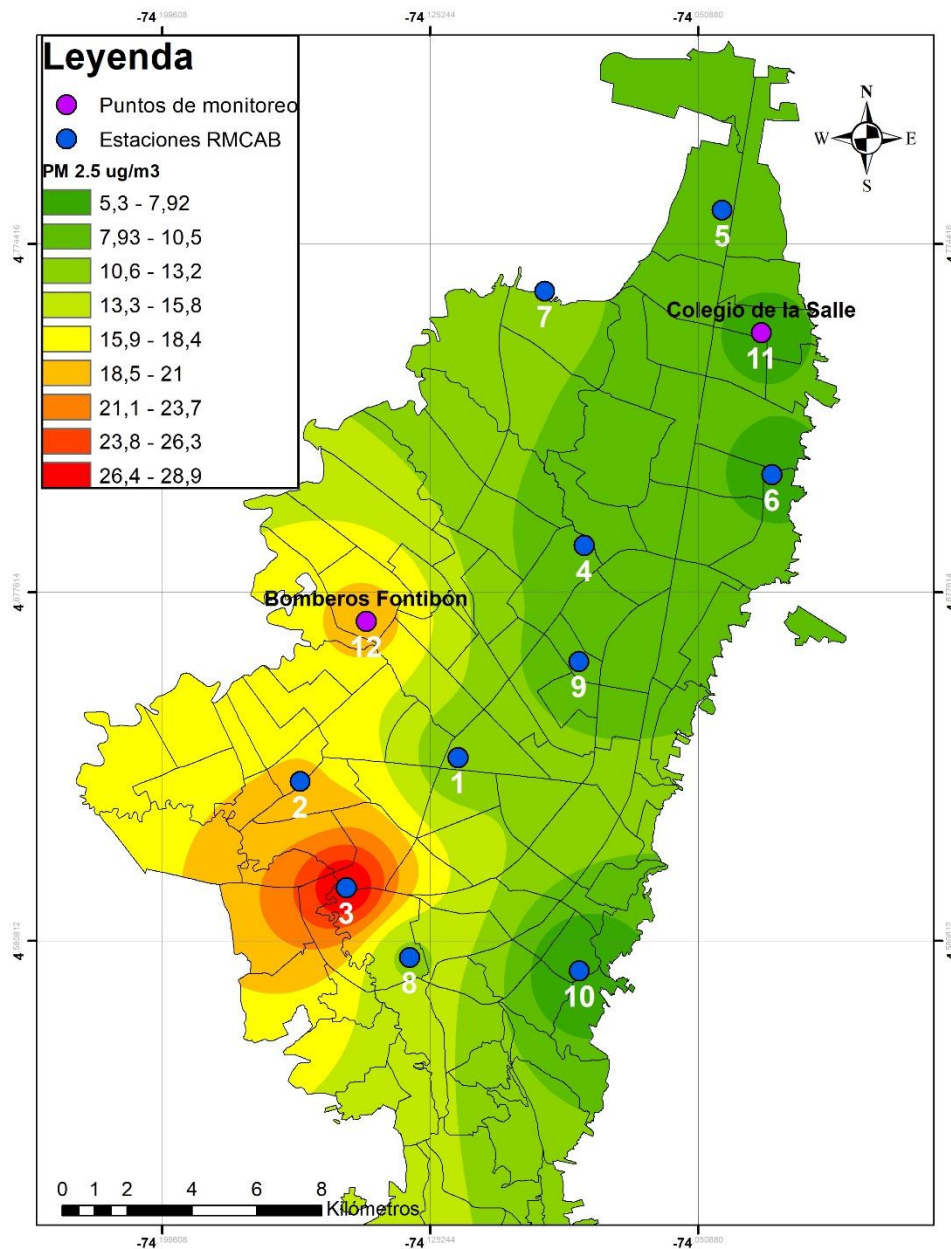


Figura 27. Análisis espacial mediante el método de IDW

Fuente: Autor

Cabe aclarar que para el punto de Bomberos Fontibón (punto 12), se observan concentraciones altas por las emisiones de fuentes móviles, como el flujo vehicular de flota pesada y alto tráfico en las vías como la calle 13, calle 17 y la Av. Ciudad de Cali (Figura 28) y la influencia de industrias generadoras de aluminio, pinturas, industria de detergentes, industria cervecera, fábrica de zapatos, entre otras (Universidad de los Andes, 2009).



Calle 13

Fuente: (El espectador, 2014)



Calle 17

Fuente: (Google Earth, 2017)



Av. Ciudad de Cali

Fuente: (Pulzo, 2017)

Figura 28. Vías importantes del punto de Bomberos Fontibón

Fuente: Autor

Por otra parte, el punto de Colegio de La Salle (punto 11), se determinó las menores concentraciones, sin embargo se le podría atribuir estas concentraciones a las fuentes móviles que se encuentran en la carrera 7, carrera 9 y calle 170 (Figura 29).



Carrera 7

Fuente: (El espectador, 2015)



Carrera 9

Fuente: (Google Earth, 2017)



Calle 170

Fuente: (Google Earth, 2017)

Figura 29. Vías importantes del punto de Colegio de La Salle

Fuente: Autor

7.3.4. Rosa de vientos

En la identificación de las fuentes de contaminación en los puntos estratégicos estudiados, por lo tanto para la realización de la rosa de vientos y rosa de contaminantes. Se tomaron datos de las estaciones meteorológicas más cercanas a los puntos de monitoreo, para ello se elaboró un conjunto de datos mediante la página de la RMCAB obteniendo información de dirección, velocidad del viento y concentración del contaminante, en este caso, $PM_{2.5}$ durante el periodo comprendido entre el 22 de mayo y 12 de septiembre de 2018, las cuales fueron tomadas con datos horarios.

En el colegio de La Salle, el conjunto de datos desarrollado fue con la estación de Usaquén debido a que en la estación de Guaymaral tenía carencia de datos de dirección aproximadamente de un mes; asimismo, en Bomberos Fontibón se tomó información de la estación de Kennedy, debido que en la estación de Puente Aranda no recolecto datos de velocidad durante el mismo periodo de la anterior estación.

Posteriormente, se usó el software Wrplot, creando las rosas de vientos de cada uno de los puntos y realizando la georreferenciación de las mismas con el programa Google Earth pro. En la Figura 30 y la Figura 32 se pueden observar las rosas de vientos que resumen el comportamiento promedio durante la ejecución del proyecto.

- La rosa de vientos del colegio de La Salle, como se muestra en la Figura 30 muestra que los vientos predominantes del sureste, las velocidades más comunes oscilan entre 1 – 1.5 y 2-3 m/s, con una frecuencia de 18% y 26.1% respectivamente (Figura 31) con un promedio de velocidades de 1.79 m/s y 6.7% de calmas; en donde las velocidades no superan los 5 m/s por lo cual sugiere una influencia significativas de fuentes locales (Garcia & Rojas, 2016). Las fuentes de contaminación podrían provenir de la carrera 7, carrera 9 y calle 170, donde transitan automóviles, motos y vehículos del Sistema Integrado de Transporte Publico (SITP) y de algunas zonas de explotación de canteras en el cerro oriental.

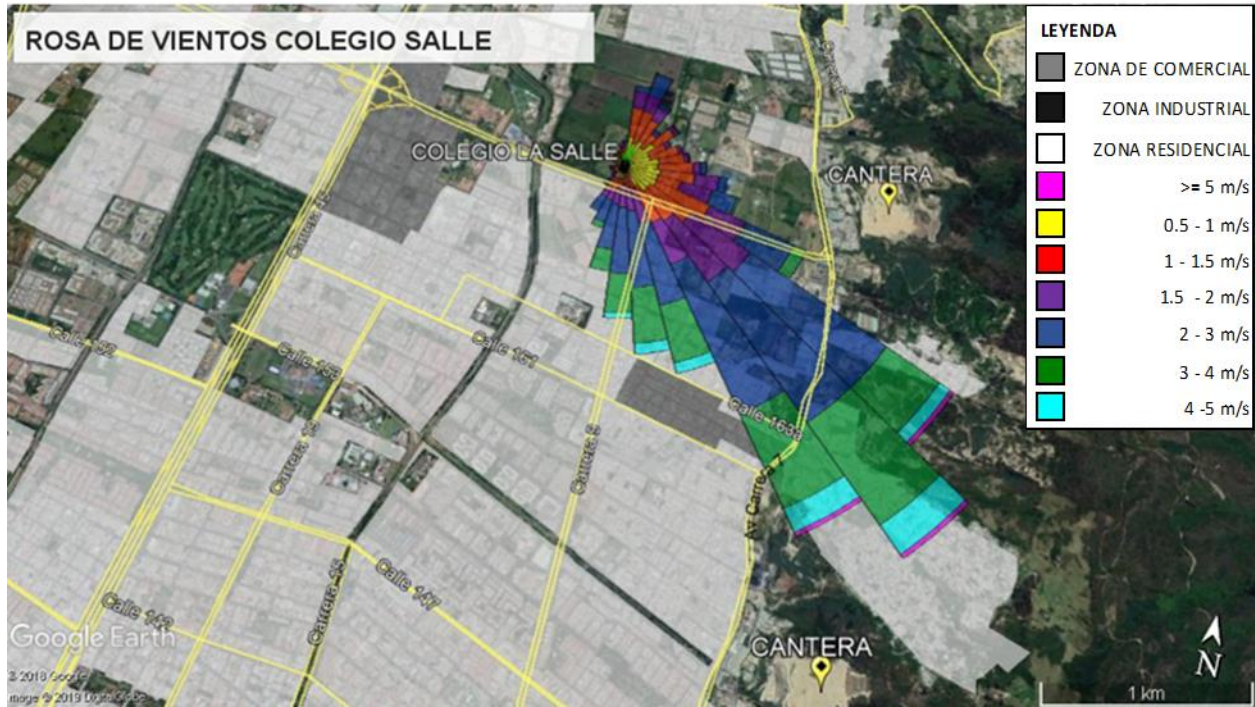


Figura 30. Rosa de vientos de Colegio de La Salle.

Fuente: Adaptado de Google Earth

Wind Class Frequency Distribution

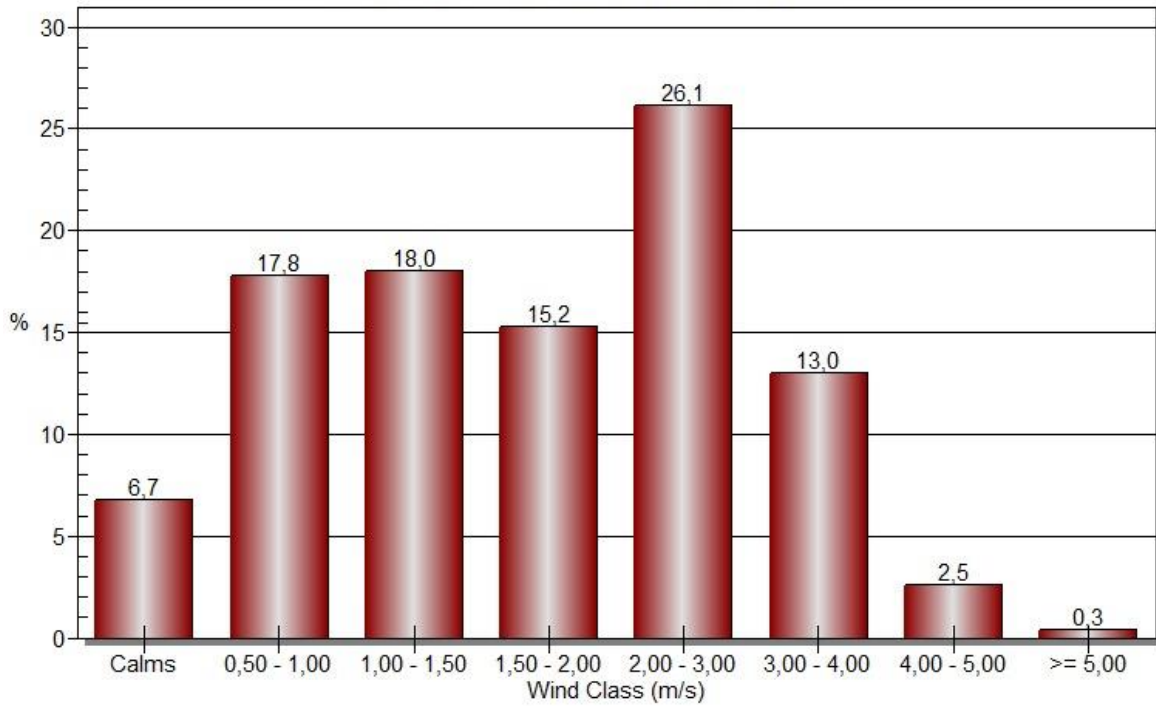


Figura 31. Histograma de velocidades en el colegio de La Salle

Fuente: (Wrplot, 2018)

- La rosa de vientos en el punto de monitoreo de Bomberos Fontibón, como se muestra en la Figura 32, se evidencia que hay predominancia del sureste, las velocidades más comunes oscilan entre 2-3 y 3-4 m/s, con una frecuencia de 24.3% y 20.8% respectivamente (Figura 33), con un promedio de velocidades de 2.16 m/s y 2.4% de calmas. Las fuentes de contaminación podrían provenir de la localidad de Puente Aranda que es conocida como unas de las localidades con gran influencia industrial y de la vía principal (calle 17), calle 13 y carrera avenida ciudad de Cali, donde es muy frecuente ver buses del Sistema Integrado de Transporte Publico, vehículos particulares y de carga. Por otro lado, se encuentra área residencial en esta dirección, donde también hay presencia de parqueaderos para vehículos pesado y taller de fundición de metales.

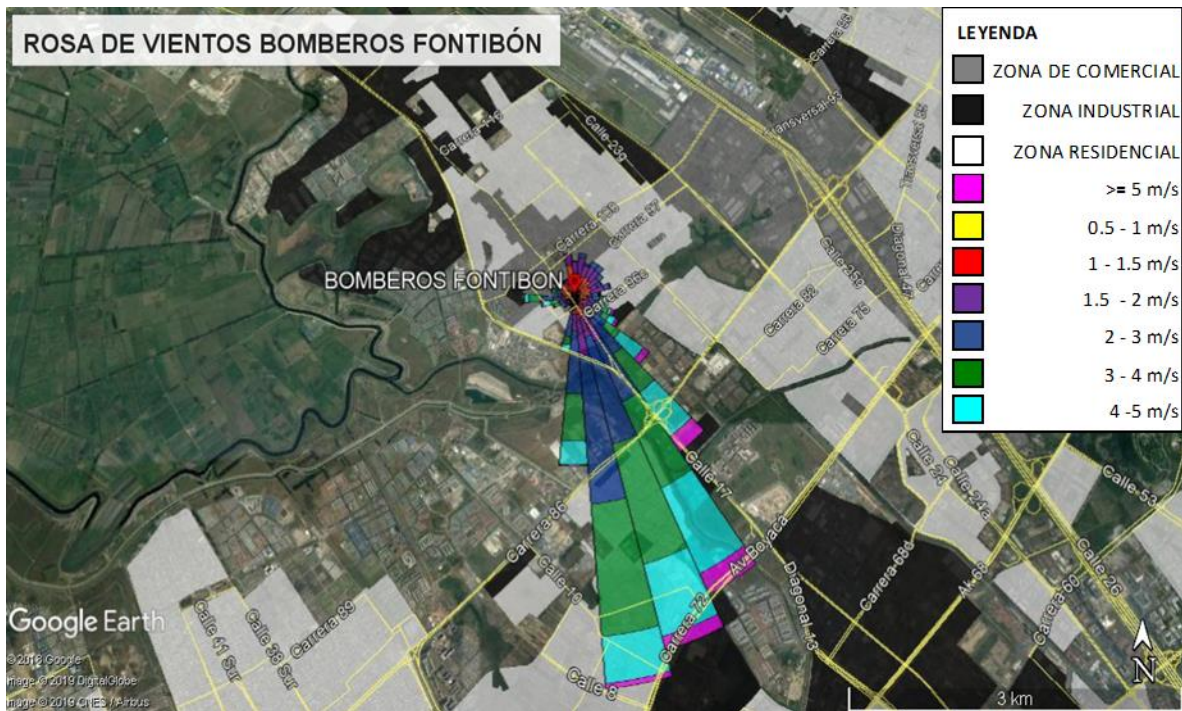


Figura 32. Rosa de vientos de Bomberos Fontibón
Fuente: Adaptado de Google Earth

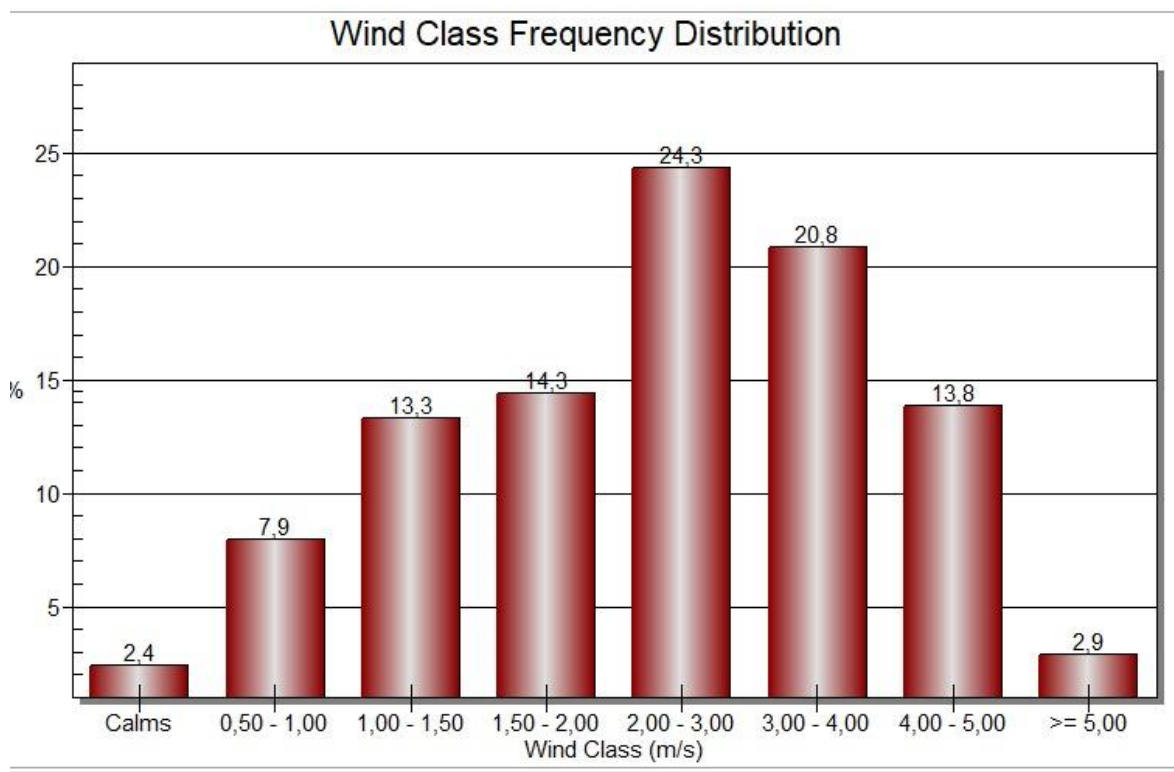


Figura 33. Histogramas de velocidades del punto de Bomberos Fontibón.

Fuente: (Wrplot, 2018)

7.3.5. Rosa de contaminantes

Para la rosa de contaminantes se empleó el software de R con la extensión estadística OpenAir, para determinar su origen, y saber que fuentes de emisión de $PM_{2.5}$ pueden estar allí presentes. Las rosas de cada uno de los puntos, fueron creadas con datos horarios de cada uno de los puntos con base a la estación de monitoreo más cercana, tomando la dirección, velocidad del viento y concentración de $PM_{2.5}$ en el período comprendido entre el 22 de mayo y 12 septiembre de 2018 para los puntos de Colegio de La Salle y de Bomberos de Fontibón.

- Para el análisis del comportamiento del material particulado $PM_{2.5}$ en la zona del Colegio de La Salle como se ilustra en la Figura 34, se observa una concentración promedio de $7,39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con concentraciones comunes de 2-4 y 4-6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con una frecuencia de 18.38% y 22.62% (Figura 35), provenientes del sureste. Por lo tanto, una de las principales fuentes de material particulado podrían ser producidas por las canteras que se encuentran al sureste ya que de aquí provienen material particulado, donde según estudios de (Baca, 2014) determina que el 4.7% de $PM_{2.5}$ proviene de actividades de

extracción de minerales o canteras y que el tráfico vehicular podría atribuir como su fuente principal con un 56% , por vías principales como la calle 170, carrera 7 y la carrera 9 (Baca, 2014), ya que también se puede observar altas concentraciones provenientes del Norte, debido a que a pesar que no se maneja un flujo vehicular alto, podría atribuirse a estas vías principales, donde se establece que la emisión de $PM_{2.5}$ por el tipo de combustible es el diésel contribuyendo a un 80% (Universidad Pontificia Bolivariana, 2013).

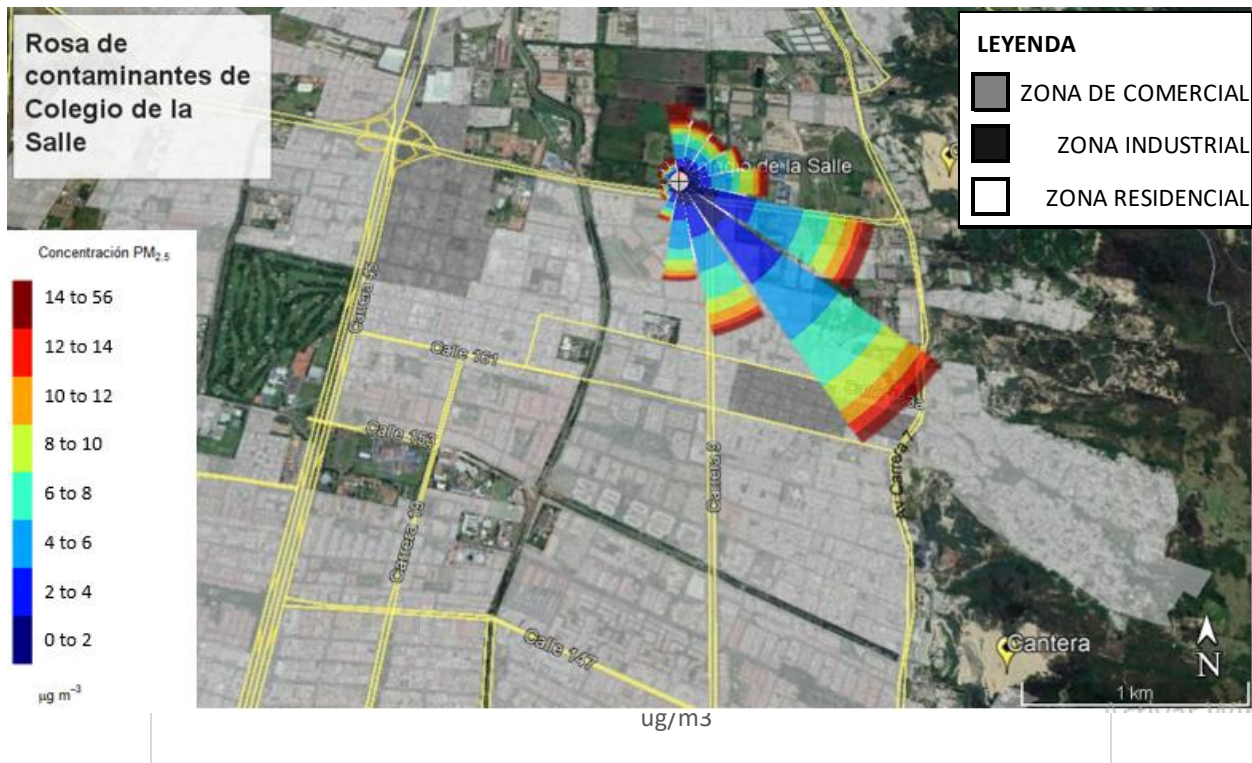


Figura 35. Histograma de concentraciones de la zona de Colegio de La Salle

Fuente: Autor

- En cuanto a la rosa de contaminantes de bomberos Fontibón como se muestra en la Figura 36 el comportamiento de $PM_{2.5}$ se puede observar que el mayor aporte son provenientes del sureste, con un promedio de $18.71\ \mu g/m^3$, con concentraciones comunes de 10-15 y 15-20 $\mu g/m^3$. Estos aportes podrían corresponder principalmente a las fuentes móviles y fijas de la localidad debido a vías como son la avenida Ciudad de Cali, calle 13 y la calle 17 tienen un alto tráfico vehicular pesado, presentando alta congestión vehicular y aumento en la emisión de gases por la dinámica “pare-arranque” (Alcaldía local de Fontibón, 2017), además, de la concentración de industrias que se encuentran en la

localidad de Puente Aranda del sector alimentario, manufacturero, metalúrgico entre otras. Sin embargo, presenta altas concentraciones del Norte posiblemente por la zona franca y en las zonas aledañas, cuenta con una gran cantidad de industrias del sector alimentario, parques industriales, metalúrgico e incineración de residuos, entre otros. Es importante mencionar que los habitantes que viven alrededor de esta zona presentan incomodidades por la mala calidad del aire y problemas de salud (Alcaldía local de Fontibón, 2017)

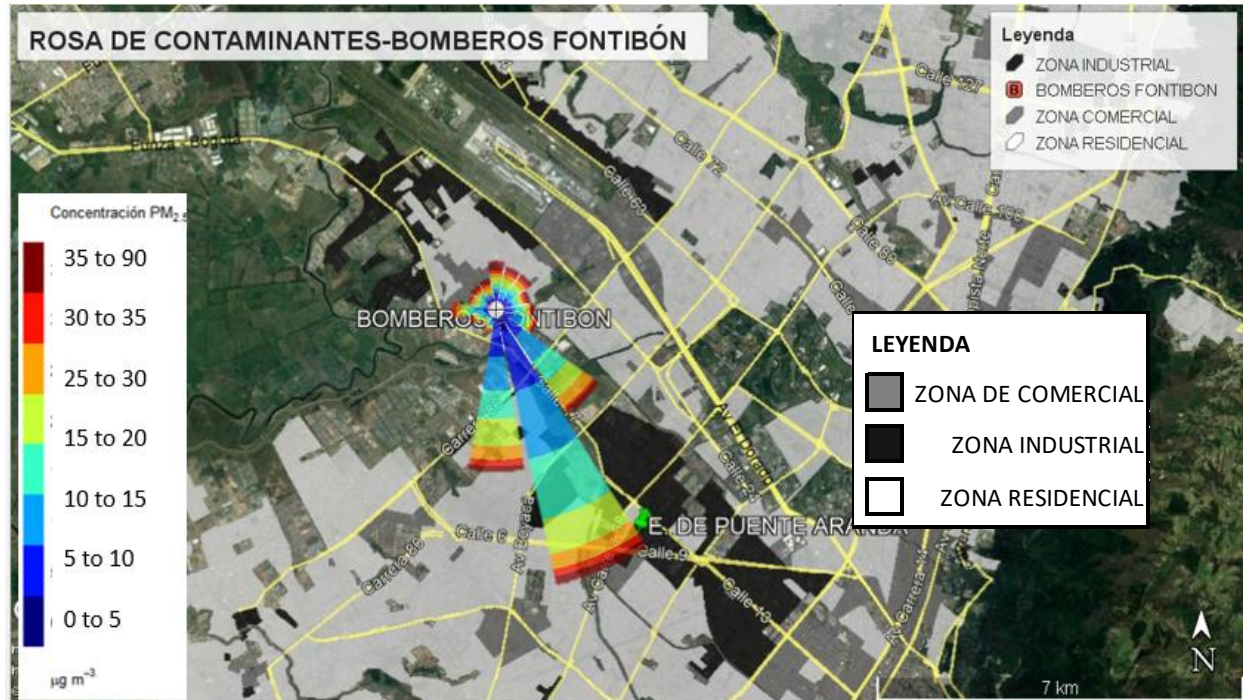


Figura 36. Rosa de contaminantes de la zona de Bomberos Fontibón
Fuente: Adaptado de Google Earth

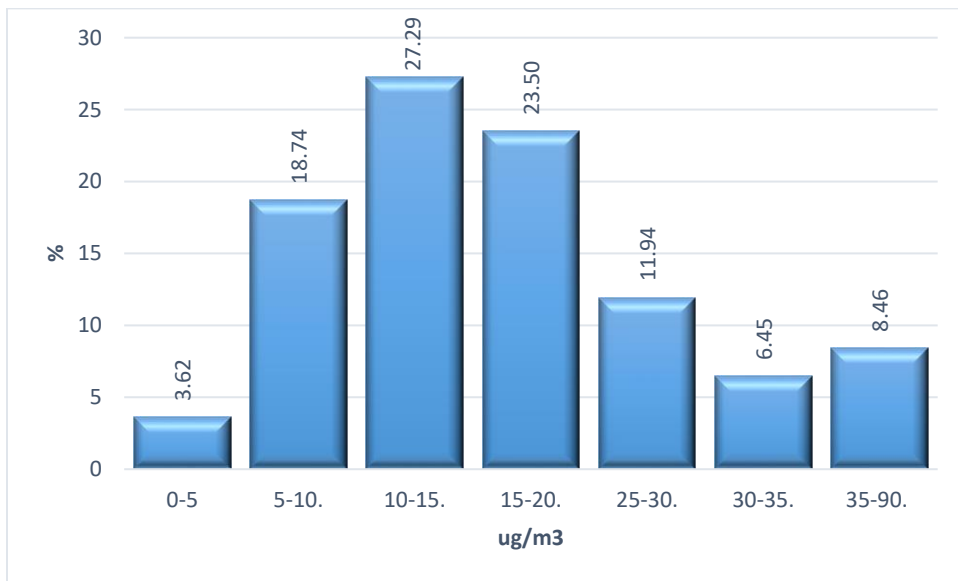


Figura 37. Histogramas de concentraciones de la zona de Bomberos Fontibón

Fuente: Autor

7.4. Cuarta fase: Análisis de excedencias

Para el año 2017, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió bajo la resolución 2254 la entrada en vigor, donde se contempla como niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire como:

PM_{2.5} → 50 µg/m³ para un tiempo de exposición de 24 horas desde enero 1 de 2018 hasta junio 30 del mismo año.

PM_{2.5} → 37 µg/m³ para un tiempo de exposición de 24 horas desde el julio 1 de 2018

Por lo tanto, es de relevancia cuantificar el número de excedencias registradas con base en los límites máximos permisibles estipulados en la norma nacional. En complemento, se evalúan los límites permisibles según la Organización Mundial de Salud (OMS), ya que se apoyan en investigaciones científicas sobre la afectación de este contaminante sobre la salud humana.

PM_{2.5} → 25 µg/m³ para un tiempo de exposición de 24 horas.

- Colegio Salle. Este punto de monitoreo no registra excedencias relacionadas con material particulado PM_{2.5} según la norma nacional de calidad del aire; sin embargo, si se tiene en

cuenta valores límite presentados por la OMS, empezamos a observar el reporte de excedencias transformadas, para este caso, se registró un día que exceden este límite permisible, para el 12 de septiembre donde también concuerda para el día que tiene la mayor concentración medida ($29.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$) como se observa en la Figura 38 .

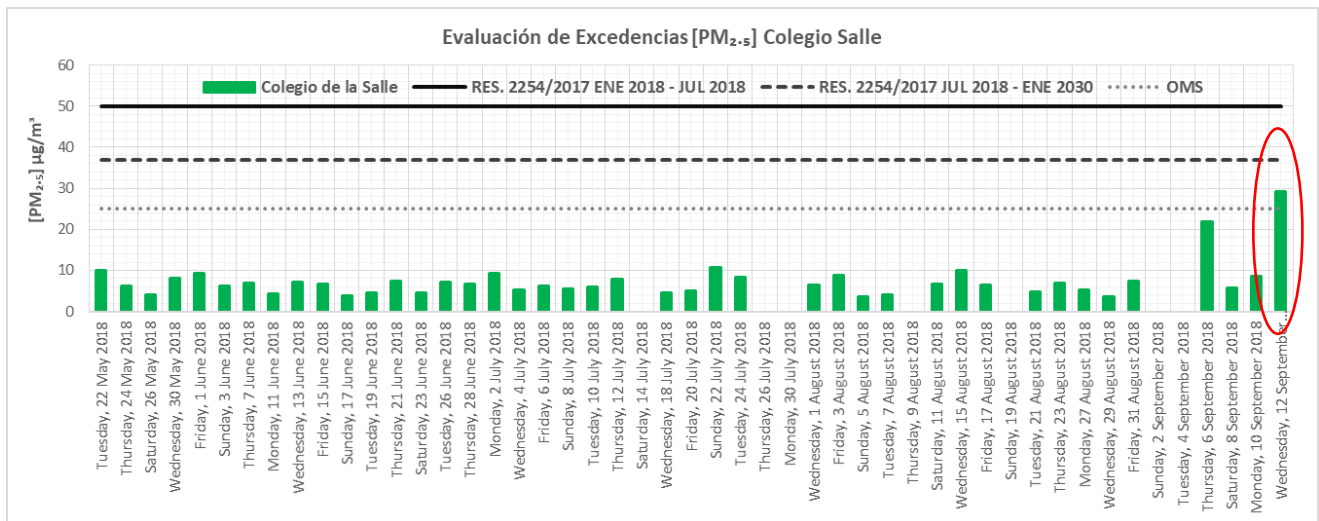


Figura 38. Evaluación de excedencias para colegio de La Salle
Fuente: Autor

- Bomberos Fontibón. Este punto de monitoreo presenta una excedencia para PM_{2.5}; que coincide el día 12 de septiembre. No obstante, si el punto de comparación son valores guía presentados por la OMS, se registran 9 días que exceden los límites de la OMS en PM_{2.5} de 36 monitoreados (Figura 39) cifras que empiezan a ser alarmantes en las distintas poblaciones vulnerables y residentes en el lugar, sobretodo por la presencia de concentraciones medias en la fracción fina, lo que implica un incremento de enfermedades cardiacas, respiratorias y de mortalidad alrededor del 2.5% (OMS, 2006)

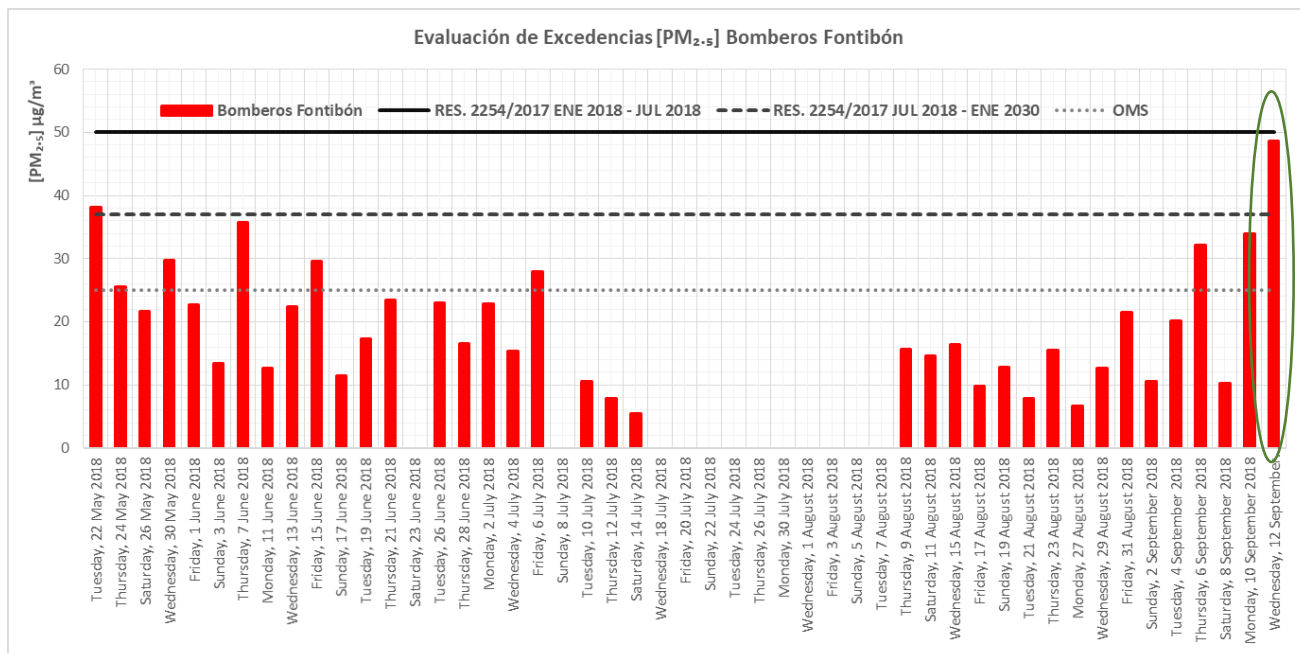


Figura 39. Evaluación de excedencias para Bomberos Fontibón
Fuente: Autor

Para el día 12 de septiembre se ve una una anomalia por el crecimiento de concentraciones que en Bomberos Fontibon (ovalo verde) excede a una concentración de $48.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para el punto del colegio de La Salle (ovalo rojo) no excede con la norma nacional, sin embargo si observamos el limite de la OMS si excede, este comportamiento se debio por el cambio del regimen de los vientos y la influencia de los huracanes que se registraron en estas fechas en el oceano Atlántico, con lo que cual hubo un posible arrastre del material particulado generado por las quemas realizadas en el sur del pais, en Ecuador y Perú, con una predominancia de los vientos provenientes del sur (Secretaria Distrital de Ambiente, 2018).

8. Resumen de los resultados de conocimiento y la descripción del impacto actual o potencial

De acuerdo con el desarrollo del proyecto los logros alcanzados en términos de habilidades y/o competencias adquiridas con la organización, la utilización efectiva del tiempo, la comunicación, la paciencia, la adaptabilidad, la decisión y escucha fue encontrar resultados concisos y claros. Dado que al realizar el trabajo tiene diferentes actividades en donde se buscó las mejores estrategias claras, estimulando a una buena comunicación con los demás auxiliares de trabajo apoyando a un componente crítico hasta obtener el mejor desempeño. Así, como en todo proyecto se presentaron problemas y cambios continuos al desarrollar actividades tanto en campo como en el laboratorio, dominando el hábito a acoplarme, aceptar retos y así estar preparada para el cambio, explorando nuestro potencial de desarrollar soluciones.

9. Descripción del impacto actual o potencial

Por otra parte, estos resultados nos apoyan en nuestro ejercicio profesional dado que vivimos en un mundo competitivo en donde las oportunidades laborales son cada vez más escasas y la cantidad de postulantes a un empleo es cada vez mayor. Es por ello que los aportes intelectuales y de aptitudes fue alcanzar a un fortalecimiento de conocimientos técnicos que podrían llegar a ser una ventaja con respecto a nuestra competencia como la claridad y veracidad de la lectura de las rosas de viento y la rosa de contaminante, manejo de software especializados en la calidad del aire como WRPLOT y RSTUDIO con su paquete estadístico de OPENAIR (rosa de vientos y rosa de contaminantes), fortalecimiento y practica en softwares de Sistemas de Información Geográfica como ArcGis (interpolación espacial), asimismo en el manejo, calibración y toma de datos de los muestreadores de $PM_{2.5}$. Además, que es importante mencionar que acerca del tema relacionado a la calidad del aire es relativamente poca la competencia en comparación a otros campos de trabajo.

10. Conclusiones

- Al Caracterizar las zonas de ubicación, en el Colegio de La Salle se registra como es la zona de fondo ya que registra históricamente las más bajas concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ teniendo en cuenta su uso de suelo que es netamente residencial. Por parte de Bomberos Fontibón, es el punto de monitoreo que registra las más altas concentraciones ya que se encuentra ubicado bajo usos de suelo totalmente distintos (Residencial, Comercial e Industrial, respectivamente) con concentraciones promedio $19.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- En el análisis espaciotemporal, se determina que la zona que presenta las más altas concentraciones es la suroccidental ya que se le atribuye a importantes vías vehiculares con un flujo vehicular alto, el tipo de vehículos que transitan en ellas (vehículos pesados y transporte público), el combustible principalmente utilizado como es el Diésel y la gasolina y su uso de suelo.
- Según las rosas de vientos y la rosa de contaminantes, donde principalmente provienen del sureste, en el punto Colegio de La Salle se le podría atribuir las concentraciones de material $PM_{2.5}$ a la combustión, como a las fuentes móviles de vías que rodean este punto como la carrera 7, carrera 9 y calle 170, con un flujo vehicular bajo, donde transitan principalmente vehículos liviano y motos, que trabajan principalmente con gasolina, que es uno de los combustibles con mayor contribución de este contaminante.
- Por otra parte, Bomberos Fontibón es el punto de monitoreo que registra las más altas concentraciones provenientes del sureste, este se encuentra ubicado bajo dos usos de suelo totalmente distintos. Este punto se encuentra rodeado de vías importantes con un alto flujo vehicular como lo son la calle 17, calle 13 y la carrera Ciudad de Cali, además que transitan vehículos pesados que en su mayoría trabajan principalmente con Diésel, donde es el combustible que más contribuye con el $PM_{2.5}$. Además, de las industrias manufactureras, metalúrgicas, alimenticias entre otras que se encuentran en la localidad de Fontibón y Puente Aranda.
- Para las dos estaciones de muestreo se observó que para el análisis temporal coincide una disminución significativa de concentraciones de material particulado de $PM_{2.5}$ para los días del fin de semana, esto puede deberse al cese de actividades laborales, industriales y vehiculares, mientras que en los días entresemana se encuentra un

ascenso ya que son días en los cuales son más activos por la gran cantidad de flota vehicular que se maneja y de actividad.

- Específicamente, si observamos en detalle para los dos puntos de monitoreo, el miércoles 12 de septiembre 2018, día en el cual corresponde a un evento con una anomalía, registraron las más altas concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ para ambos puntos, niveles que terminó siendo para Bomberos Fontibón, una excedencia sobre límites máximos permisibles establecidos por la norma nacional de calidad del aire que pudo ser por la influencia del huracán Isaac, con lo que hubo arrastre por las quemaduras realizadas en el sur del país y predominancia en esta dirección.

11. Recomendaciones

- Se recomienda que cada punto muestreado tenga su propia estación meteorológica funcional (anemómetro, veleta y software para la base datos) para una mejor precisión de datos para la rosa de vientos y de contaminantes.
- Recolección de mayor número de muestras para obtener mayor representatividad de los datos obtenidos, puesto que para el punto de Bomberos Fontibón no hubo equipo durante un mes aproximadamente.
- Fortalecer la normatividad nacional, puesto que ya se redujeron los límites máximos permisibles, aún Colombia se encuentra fuera de rango de la OMS, para así disminuir la inmisión que se presenta en la ciudad.
- Establecer mayor cantidad de puntos representativos para la captura de datos en diferentes tipos de usos de suelo.
- Actualización del inventario de emisiones tanto para fuentes móviles y fijas para la ciudad de Bogotá donde se permita observar más a detalle todas las posibles fuentes de contaminación.
- Los resultados obtenidos en el presente proyecto sean tomados como insumo en la formulación de políticas públicas para el control y la mitigación de la contaminación atmosférica en la ciudad.

12. Anexos

- **Anexo 1. Protocolo operacional para el monitoreo de material particulado PM_{2.5} a nivel atmosférico en dos puntos estratégicos de Bogotá.**
PDF con protocolo de muestreo para PM_{2.5}.
- **Anexo 2. Cadenas de custodia**
Fotografías
- **Anexo 3. Reporte de concentraciones**
Excel con contenido de pesajes y concentraciones obtenidas
- **Anexo 4. Registro de calibraciones de los muestreadores**
Excel con contenido de las calibraciones en cada punto.
- **Anexo 5. Manuscrito del artículo científico**
PDF

13. Bibliografía

- Alcaldía local de Fontibón. (2017). *Plan Ambiental Local de Fontibón*. Bogotá.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2013). POT. Bogotá, Colombia.
- Baca, J. C. (2014). *Informe final del inventario de emisiones de contaminantes criterio*. Quito: Secretaria de Ambiente.
- Carranza, D., & García, S. (2018). ¿Qué respiran y de dónde proviene la contaminación en Bogotá? *Semana Sostenible*, 1-3.
- Castañeda Velandia, D., & Mendez Alcazar, J. (2018). *Estimación de la relación entre material particulado pm10 atmosférico y el susceptible de resuspensión en algunas vías de Bogotá*. Bogotá: Universidad de La Salle.
- Colomecol S.A.S. (2012). *colombguia*. Obtenido de <https://www.colomguia.com/seguridad-industrial/>
- Corporación DAMAR S.A.C. (2017). *Corporación DAMAR*. Obtenido de <http://www.corporaciondamar.com/ing-ambiental/39-muestreador-de-particulas>
- Ecopetrol, & Universidad de La Salle. (2017). *Protocolo operacional para el monitoreo de material particulado a nivel atmosferico en bogotá*. Bogotá: clima.
- enviroequip. (s.f.). Obtenido de <http://www.enviroequip.pe/cambio-climatico-detalle/equipo-muestreador-alto-volumen-de-material-particulado-pm-10-en-el-ambiente-hivol-pm-10/>
- Espitia Cano, S., & Porras Montaña, S. (2017). *Identificación preliminar del aporte de fuentes del material particulado susceptible de resuspension en vías de Bogotá*. Bogotá: Universidad de la Salle.
- Gaitan , M., Cancino, J., & Behrentz, E. (1 de Octubre de 2007). *Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá*. Obtenido de Scielo Colombia: <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n26/n26a11.pdf>
- García , P., & Rojas, N. (2016). Analisis del origen de PM10 y PM2.5 en Bogotá usando mapas polares. *MUTIS*, 47-58.
- García Ávila, P., & Rojas, N. (2016). Análisis del origen de PM10 y PM2.5 en Bogotá gráficos polares. *MUTIS*, 47-58.
- García Villegas , N., & Parra Garcés, M. D. (2017). *Analisis preliminar de la caracterizacion y contribucion de fuentes de material particulado PM10 en el aire ambiente de Bogotá*. Bogota D.C: Universidad de La Salle.

- Herrera Torres, A., Echeverri Londoño, C., Maya Vasco, G., & Ordoñez Molina, J. (2010). Patoloías respiratorias en niños preescolar y su relacion con la concentración de contaminantes en el aire en la ciudad de Medellín. *Ingenierias Universidad de Medellin*, 22-34.
- MAVDT. (2010). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*. Bogotá.
- OMS. (2006). *Guías de Calidad del Aire*. Suiza: Organización Mundial de la Salud.
- OMS. (mayo de 2018). *Calidad del aire y salud*. Obtenido de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Sanambiente. (Mayo de 2016). *Equipos para medicion de particulas*. Obtenido de <https://www.sanambiente.com.co/index.php/equipos-para-medicion-de-particulas>
- SDA , & Universidad de la Salle. (2014). *Capitulo 2. Actualización de inventarios de emisiones*. Bogotá: CLIMA.
- Secretaria de movilidad. (2015). *Cartilla de movilidad*. Bogotá: Alcaldia mayor de Bogotá.
- Secretaria de movilidad de Bogotá. (2015). *Movilidad en cifras*. Bogotá: Alcaldia mayor de Bogotá.
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2014). *Informe anual de calidad de aire*. Bogotá.
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2015). *Informe anual de calidad de aire en Bogotá*. Bogotá.
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2016). *Informe anual de calidad de aire*. Bogotá.
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2016). *Informe Anual de Calidad del Aire en Bogotá*. Bogotá: Alcaldia mayor de Bogotá.
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2017). *Indice Bogotano de Calidad del Aire*. Bogotá: Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales.
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2017). *Informe anual de Calidad de Aire*. Alcaldia Mayor de Bogotá D.C.
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2018). *Informe mensual de calidad del aire del mes de septiembre*. Bogotá: Red de Monitoreo de Calidad de Aire.
- Subdirección de Vigilancia en Salud Pública. (2018). *Salud capital*. Recuperado el 20 de Octubre de 2018, de http://www.saludcapital.gov.co/DSP/Boletines%20temticos/ASIS/2018/Calidad_del_Aire_y_Salud_Urbana.pdf
- Universidad de los Andes. (2009). *Elementos técnicos del Plan Decenal de Descontaminación de Bogotá*. Bogotá: Alcaldia Mayor de Bogotá.

Universidad de los Andes. (2009). *Elementos técnicos del plan decenal de descontaminación de Bogotá*. Bogotá.

Universidad Pontificia Bolivariana. (2013). *Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá*. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.