ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS TECHOS VERDES EN LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO (PM_{10}) EN CONDICIONES DIURNAS EN BOGOTÁ.

María Fernanda Benavides Nieves y
Viviana Mojica Godoy

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, 15 de octubre del 2019

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS TECHOS VERDES EN LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO (PM_{10}) EN CONDICIONES DIURNAS EN BOGOTÁ.

María Fernanda Benavides Nieves y
Viviana Mojica Godoy

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Ambiental

Director (a):

David Felipe Beltrán Gómez

Línea de Investigación:

Agua Salud y Ambiente- Salud y Ambiente

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2019

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Dedicatoria

Este proyecto se lo dedico a mi familia, principalmente a mis padres, los cuales me dieron todo lo necesario para convertirme en lo que soy hoy, para mejorar y crecer como persona, para afrontar las situaciones de la vida, también porque son un ejemplo para mí, un modelo a seguir, me guían hacia el mejor camino y me orientan cuando necesito cambiar de dirección, siempre con todo el amor y cariño que ellos tienen. Se merecen todo el esfuerzo que puse en esta investigación y muchas cosas más.

María Fernanda Benavides Nieves

Este trabajo está dedicado a las personas que, sin importar las circunstancias, han creído en mí y han acompañado mi proceso académico y personal, principalmente mis papás y hermano, que han sido mi soporte en cada aspecto y momento de mi vida y una luz que ilumina mi camino constantemente

A mi mamá, mi papá y mi hermano, que este trabajo es solo una de las mil cosas que se merecen.

Viviana Mojica Godoy

Agradecimientos

Ante todo, le agradezco a la Universidad El Bosque la cual me brindo los conocimientos para realizar este estudio, me formo con valores lo que me ha permitido llegar hasta acá. A mis profesores que hicieron parte del proceso y a todos los que tuvieron algún contacto directo o indirecto para poder desarrollar las actividades dentro de la universidad. Principalmente a mi director de tesis David Beltrán que ha realizado un acompañamiento desde el periodo 2018-2 cuando esta aventura empezó.

A mi compañera de tesis Viviana Mojica, la cual estuvo siempre muy presente dentro del proyecto, además de ser mi amiga y siempre formar un equipo para buscarle soluciones a cualquier situación que se presentará.

A mi familia la cual es mi apoyo principal y siempre me brindo las herramientas para alcanzar mi meta, siempre dándome los mejores consejos, estando pendiente y enseñándome las mejores cosas para sacar la mejor versión de mí.

María Fernanda Benavides Nieves.

El último escalón de esta etapa, se ha hecho realidad y no sería posible sin mi familia; gracias a mis papás y hermano es que he llegado hasta acá, y como ellos me han enseñado, este no será el final, porque este sueño de ser Ingeniera Ambiental, hasta ahora empieza.

También agradezco a la Universidad El Bosque, por brindarme la oportunidad y los medios, de adentrarme en el mundo de esta carrera, por todos los docentes que hicieron parte de mi desarrollo académico y ayudaron a mi formación.

Por último, estoy muy agradecida con Mafe y su familia que, con mucha paciencia, entrega y colaboración, materializaron este proyecto.

Viviana Mojica Godoy

TABLA DE CONTENIDO

Pg

INTRODUCCIÓN……. 9

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA…… 10
2. JUSTIFICACIÓN……. 11
3. OBJETIVOS……. 12
3.1 Objetivo General……..... 12
3.2 Objetivos Específicos…….. 12
4. MARCOS DE REFERENCIA…….. 12
4.1 Estado del Arte…… 12
4.1.1 Contaminación del aire por PM_{10} en la ciudad de Bogotá…….. 13
4.1.2 Afectaciones en la salud por PM_{10}…….. 13
4.1.3 Beneficios de los techos verdes……. 14
4.1.4 Investigaciones internacionales del éxito de los techos verdes……. 14
4.2 Marco Conceptual y Marco Teórico…….. 15
4.3 Marco Normativo…….. 17
4.4 Marco Geográfico……. 18
4.4.1 Bogotá……. 18
4.4.2 Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB)……. 19
4.5 Marco Institucional…….. 20
5. METODOLOGÍA…… 22
5.1 Diseño Metodológico…….. 22
5.2 Fases del proyecto…….. 22
5.2.1 Fase 1…… 22
5.2.2 Fase 2…… 24
5.2.3 Fase 3…… 24
5.3 Cuadro Metodológico…….. 25
6. PLAN DE TRABAJO…… 28
6.1 Cronograma de Actividades……. 28
6.2 Presupuesto……. 29
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS……. 30
8. CONCLUSIONES…….. 41
9. RECOMENDACIONES…… 42
10. BIBLIOGRAFÍA…… 43

LISTADO DE TABLAS

Pg

Tabla 1. Normatividad nacional vigente aplicada al proyecto …… 17

Tabla 2. Características de medición de las estaciones de la RMCAB……. 19

Tabla 3. Aporte de la Secretaria Distrital de Ambiente dentro del proyecto…… 20

Tabla 4. Aporte del IDEAM dentro del proyecto…….. 22

Tabla 5. Cuadro metodológico de los objetivos del proyecto…….. 25

Tabla 6. Presupuesto del proyecto de investigación……..... 29

Tabla 7. Albedo correspondiente a las condiciones de Bogotá…… 30

Tabla 8. Albedo correspondiente a las condiciones de techos verdes…….. 36

Tabla 9. Variación de la altura de capa de mezcla sin y con techos verdes a cada hora del día en condiciones diurnas……...36

Tabla 10. Diferencia en la altura de capa de mezcla con y sin techos verdes, en condiciones diurnas…….39

LISTADO DE FIGURAS

Pg

Figura 1. Árbol de problemas sobre la alta concentración de PM_{10} en Bogotá…… 12

Figura 2. Concentración promedio anual de PM_{10} en las estaciones de monitoreo en el año 2012……..… 14

Figura 3. Mapa de las localidades de Bogotá y ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire…… 19

Figura 4. Organigrama de la Secretaría Distrital de Ambiente……... 22

Figura 5. Organigrama del IDEAM…….. 23

Figura 6. Esquematización de las fases del proyecto……... 26

Figura 7. Cronograma de actividades para el desarrollo del proyecto…….……..... 28

Figura 8. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en

la estación de Centro de Alto Rendimiento……..32

Figura 9. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Carvajal……32

Figura 10. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de las Ferias…….33

Figura 11. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Guaymaral…...33

Figura 12. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Kennedy……..33

Figura 13. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de MinAmbiente..33

Figura 14. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Móvil 7……...34

Figura 15. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Puente Aranda.34

Figura 16. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de San Cristóbal...34

Figura 17. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Suba……34

Figura 18. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Tunal……..35

Figura 19. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Usaquén…….35

Figura 20. Comportamiento de la altura de capa de mezcla en la ciudad de Bogotá por horas del día……..…35

Figura 21. Comportamiento del material particulado (PM_{10}) en la ciudad de Bogotá por horas del día…….. 36

Figura 22. Comportamiento del material particulado (PM_{10}) en la ciudad de Bogotá por horas del día representado en un gráfico de caja de bigotes…… 37

Figura 23. Comportamiento de la relación de material particulado (PM_{10}) con la altura de capa de mezcla en la ciudad de Bogotá. ……39

Figura 24. Gráfico de la relación de la altura de capa de mezcla con la concentración de PM_{10} de la estación de Centro de Alto Rendimiento……...39

Figura 25. Gráfico de la relación de la altura de capa de mezcla con la concentración de PM_{10} de la estación de Carvajal……..39

Figura 26. Gráfico de la relación de la altura de capa de mezcla con la concentración de PM_{10} de la estación de Ferias……..40

Figura 27. Gráfico de la relación de la altura de capa de mezcla con la concentración

de PM_{10} de la estación de Guaymaral……..40

Figura 28. Gráfico de la relación de la altura de capa de mezcla con la concentración de PM_{10} de la estación de Kennedy……40

Figura 29. Gráfico de la relación de la altura de capa de mezcla con la concentración de PM_{10} de la estación de MinAmbiente……40

Figura 30. Gráfico de la relación de la altura de capa de mezcla con la concentración de PM_{10} de la estación de Móvil 7……40

Figura 31. Gráfico de la relación de la altura de capa de mezcla con la concentración de PM_{10} de la estación de Puente Aranda……40

Figura 32. Gráfico de la relación de la altura de capa de mezcla con la concentración de PM_{10} de la estación de San Cristóbal……..41

Figura 33. Gráfico de la relación de la altura de capa de mezcla con la concentración de PM_{10} de la estación de Suba……...41

Figura 34. Gráfico de la relación de la altura de capa de mezcla con la concentración de PM_{10} de la estación de Tunal…….....41

Figura 35. Gráfico de la relación de la altura de capa de mezcla con la concentración de PM_{10} de la estación de Usaquén…….…41

Figura 36. Variación de la altura de capa de mezcla con y sin techos verdes……...44

Figura 37. Comparación de las condiciones de reflexión sin techos verdes y con techos verdes…… 45

LISTADO DE FÓRMULAS

Pg

Fórmula 1. Altura de capa de mezcla diurna en condiciones convectivas……... 23

Fórmula 2. Altura de capa de mezcla en condiciones mecánicas……. 23

Fórmula 3. Porcentaje de variación en la altura de los techos verdes……... 24

Resumen

Las enfermedades respiratorias causadas por la elevada concentración de PM_{10} afectan diariamente a los habitantes de Bogotá, por esta razón es importante encontrar alternativas que ayuden a disminuir el problema. Los techos verdes se estudiaron como una alternativa viable, en la cual se pretende analizar su eficiencia utilizándolos para disminuir la absorción del calor en los techos de asfalto de la ciudad y con ello aumentar la altura de capa de mezcla facilitando la dispersión del contaminante. Para esto fue necesario analizar cómo se relacionan la altura de capa de mezcla, concentración de material particulado (PM_{10}) y el fenómeno del albedo, teniendo en cuenta los datos de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, para posteriormente identificar la eficiencia del uso de techos verdes en la ciudad y los sitios adecuados. Como resultado se obtuvo que existe una relación inversamente proporcional entre la altura de capa de mezcla y concentración de PM_{10} y que a medida que transcurre el día aumenta la variación entre la capa de mezcla con y sin techos verdes. También se determinó que existen zonas de la ciudad que solo con la evaluación del albedo no resultan adecuados para la implementación como en la localidad de Kennedy. Según los resultados obtenidos se concluyó que el albedo resulta ser una variable significativa para aumentar la altura de capa de mezcla.

Palabras Clave: Calidad del aire, material particulado, albedo, altura de capa de mezcla, techos verdes.

Abstract

Respiratory diseases caused by the high concentration of PM_{10} daily affect the inhabitants of Bogotá, for this reason, is important to find alternatives that help to reduce the problem. The green roofs were studied as a viable alternative, in which it is intended to analyze their efficiency using them to decrease the absorption of heat on the asphalt roofs of the city and thereby increase the height of the mixing layer facilitating the dispersion of the contaminant. For this it was necessary to analyze how the mixing layer height, concentration of particulate material (PM_{10}) and the albedo phenomenon are related, taking into account the data of the stations of the Air Quality Monitoring Network of Bogotá, for later Identify the efficiency of the use of green roofs in the city and the appropriate sites. As a result, it was obtained that there is an inversely proportional relationship between the height of the mixing layer and the concentration of PM_{10} and that as the day passes, the variation between the mixing layer with and without green roofs increases. It was also determined that there are areas of the city that only with the evaluation of the albedo are not suitable for implementation as in the town of Kennedy. According to the results obtained, it was concluded that the albedo turns out to be a significant variable to increase the height of the mixing layer.

Keywords: Air quality, particulate material, albedo, mixing layer height, green roofs.

Introducción

Bogotá es catalogada como una de las ciudades con mayor contaminación atmosférica de América Latina. Desde el año 2001, la concentración de PM_{10} ha excedido la norma límite colombiana de 50 $\mu g/m^3$ al año, en un 40 % de los días. Esta situación se presenta principalmente debido a la rápida expansión urbana que ha tenido la ciudad, aumentando así la cantidad de fuente fijas y fuentes móviles que emiten partículas contaminantes al aire (Gaitán, Cancino, & Behrentz, 2007). Por este motivo el proyecto busca estudiar una alternativa que ayude a disminuir este problema de una manera adaptable a la ciudad.

Según estudios, los techos verdes ayudan a disminuir la temperatura de los tejados al reducir la transferencia de calor y mejorar la reflectividad solar (Vásquez, Jazcilevich, García, Caetano, & Gómez, 2016), lo cual ayuda a reducir el efecto de inversión térmica, generando un mayor espacio de volumen de aire para la dispersión de los contaminantes (Nuñez, 2004). Lo que conlleva a crear una mejor calidad de vida para los habitantes, disminuyendo las enfermedades cardiorrespiratorias que se presentan diariamente por respirar partículas contaminantes presentes en el aire de la ciudad (Franco, 2012)

Con este trabajo se busca, determinar si el fenómeno de inversión térmica se puede disminuir mediante el uso de techos verdes. En este caso, se realizará una comparación entre un techo

convencional fabricado con asfalto y un techo verde, teniendo en cuenta el cambio de albedo en cada una de las dos situaciones y se determinará en que localidades se presenta un mayor aumento de la altura de capa de mezcla, para conocer en donde las condiciones meteorológicas permiten un mejor desempeño de los mismos.

1. Planteamiento del problema

La contaminación del aire se presenta en todas las poblaciones sin discriminar condiciones sociales, sin embargo, algunas se ven más expuestas que otras, ya que no presentan medidas de protección, prevención y control, afectando así la salud humana; como se evidencia en el "Estudio de la Carga Global de Enfermedades , Lesiones y Factores de Riesgo 2015" de Global Burden of Disease (GBD, 2015) citado por (Cohen, 2017), que identificó la contaminación del aire como la principal causa en la carga mundial de enfermedades, especialmente en los países de ingresos bajos y medios.

El estudio de GBD (2015), demostró que la exposición a diferentes contaminantes ambientales a largo plazo, debido a la contaminación del aire ambiente, aumentan la mortalidad y la morbilidad por enfermedades cardiovasculares y respiratorias y el cáncer de pulmón y acorta la esperanza de vida. Por otra parte, otros estudios confirman que incluso a niveles por debajo de las normas internacionales, los contaminantes y sus derivados, están asociados con un incremento en la incidencia de asma, severidad en el deterioro de la función pulmonar, mayor gravedad en la presentación de las enfermedades respiratorias de niños y adolescentes y enfermedades cardiovasculares, todo lo anterior, consecuencia de que estos, pueden interactuar y alterar las moléculas indispensables para los procesos bioquímicos y fisiológicos del cuerpo humano (Romero, Olite & Álvarez, 2006).

Una de las principales causas del deterioro de la calidad del aire es el acelerado crecimiento urbano; ya que ha generado la creación de grandes extensiones de superficies duras e impermeables que alteran los patrones climáticos naturales, ciclo del agua, déficit de zonas verdes, entre otros (Ibáñez, 2008); también ha ayudado al aumento del número de vehículos e industrias que producen gases como: el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos no quemados, ozono y otros oxidantes fotoquímicos, plomo, partículas suspendidas totales de bióxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles, que puede repercutir en la salud de la población (Romero, Olite & Álvarez, 2006).

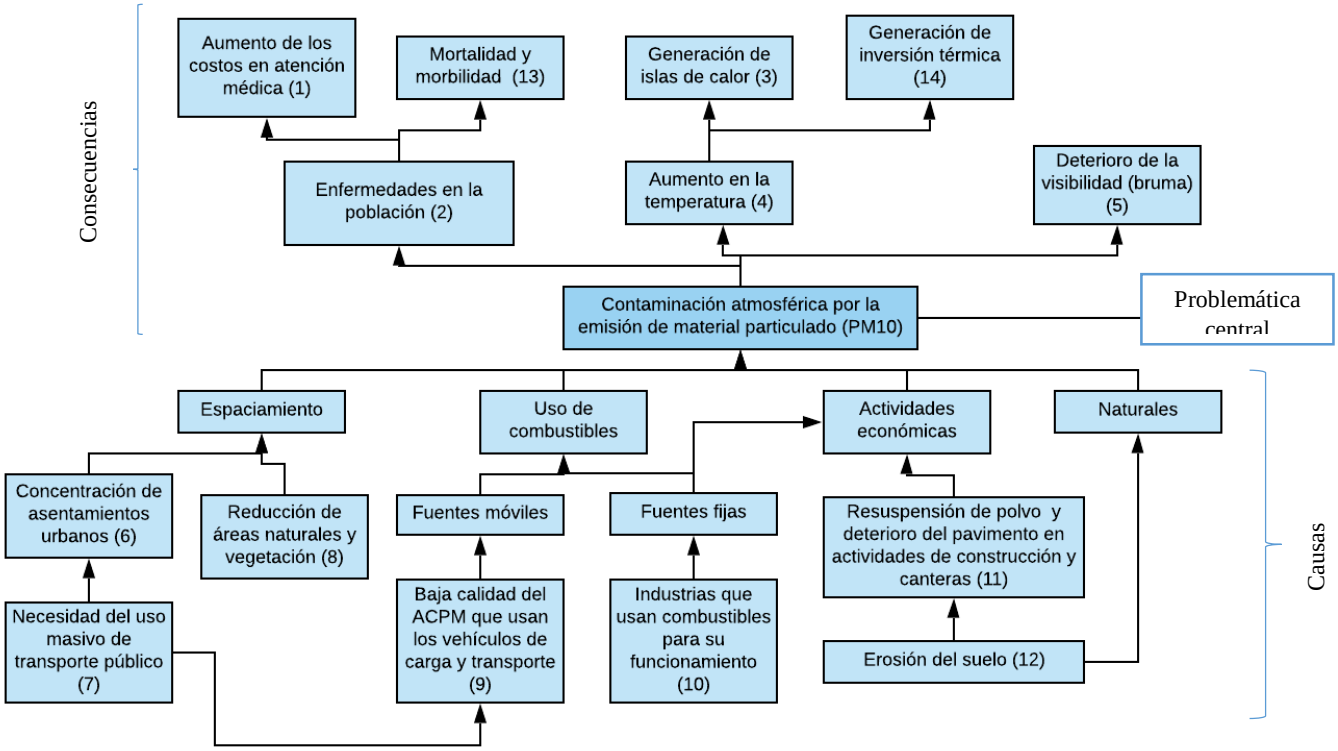
Dentro de los contaminantes emitidos a la atmósfera se encuentra el material particulado, el cual produce efectos en la salud humana, específicamente problemas respiratorios y cardiovasculares que pueden causar la muerte (Rosales, Torres, Olaiz, & VH, 2001). Un estudio realizado en Colombia muestra que existe una asociación significativa entre el aumento del PM_{10} y las consultas de enfermedades respiratorias en niños de 14 años, datos que fueron tomados de hospitales que se encuentran en la ciudad de Bogotá en los barrios de Bosa, Trinidad Galán y Venecia (Solarte, 2002), hecho que también se puede corroborar con registros de la Red de Monitoreo de la Calidad de Aire, en donde el PM_{10} en la ciudad presenta un mayor índice de excedencias en la norma desde hace varios años, gracias al aumento de vehículos que utilizan el diésel como combustible, especialmente los de servicio público (Rojas, 2007).

Se evidencia entonces que la intervención humana ha causado un déficit de zonas verdes debido al acelerado crecimiento en la ciudad de Bogotá desarrollando sitios urbanizados en donde se favorece que ocurra más fuerte y frecuentemente la acumulación de contaminantes, sin embargo, existen otras causantes como las condiciones meteorológicas que ligados a fenómenos como la inversión térmica asociada a la estabilidad atmosférica, favorecen el estancamiento tanto de la humedad presente en la atmósfera como del material particulado en suspensión y diferentes sustancias contaminantes,

causando afectaciones en la salud, aumentando costos en el sistema y disminuyendo su calidad de vida (Universidad Nacional de Colombia, 2010).

Debido a las consecuencias que trae consigo el problema de contaminación atmosférica, se deben plantear posibles soluciones que logren mitigarlos, por lo que surge como pregunta de investigación ¿Cuál es la influencia que tienen en los techos verdes en la variación de la concentración de material particulado (PM_{10}) en condiciones diurnas en la ciudad de Bogotá?

Figura 1. Árbol de problemas sobre la alta concentración de PM_{10} en Bogotá.



Nota 1: Las citas propuestas a continuación corresponden a cada número asignado en el árbol de problemas

Fuente: (1) (Rojas & Ortiz, 2012), (2) (Organización Mundial de la Salud, 2018), (3) (Voogt 2008), (4) Voogt James (2008), (5) Sierra, M. (2006), (6) (Jimenez, Correa, Romero, & Rodriguez, 2012), (7) (Bedoya y Martínez, 2009), (8) (Romero, Irarrázaval, Opazo, Salgado, & Smith, 2010), (9) (Arango, 2009), (10) (Cárdenas, 2009), (11) (Castañeda, D. 2018), (12) (Castañeda, D. 2018), (13) (Rosales, Torres, Olaiz, & VH, 2001), (14) (Voogt 2008)

2. Justificación

Bogotá actualmente cuenta con condiciones que favorecen al fenómeno de contaminación del aire, una de estas, es el constante tráfico (alto flujo de vehículos particulares, transporte masivo, SITP y transporte de carga), además de amplias zonas industriales, obras que utilizan materiales de construcción, vías destapadas y cambios en el uso del suelo. A lo anterior, se suman factores como la contaminación intradomicialiaria por tabaquismo, uso de biomasa para la cocción de los alimentos, entre otros, que generan niveles de contaminantes superiores a los permitidos actualmente por la autoridad ambiental y sanitaria (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018).

Este proyecto busca determinar alternativas que disminuyan la concentración de material particulado (PM_{10}) en la ciudad mediante mecanismos como los techos verdes. Su importancia se basa en tres aspectos importantes: el primero en el *ámbito social*, en el cual se han presentado evidencias teóricas y científicas sobre el impacto negativo que causa en la salud la contaminación atmosférica, provocando problemas respiratorios y cardiovasculares en las personas que ocasiona el deterioro de su calidad de vida. Un ejemplo de lo anterior, lo reportan las autoridades de salud pública en la ciudad de Bogotá respecto a los niños menores de cinco años, donde las enfermedades respiratorias son la principal causa de morbilidad y mortalidad, así como una de las cinco primeras causas para la totalidad de la población (Franco, 2012).

En segunda instancia, la importancia de este proyecto en el *ámbito económico* se refleja en la información suministrada por el Banco Mundial (2007), citada por Franco (2012), donde afirma que en Bogotá anualmente se originan costos de aproximadamente miles de millones de dólares, referentes a la mitigación de efectos negativos de la contaminación atmosférica, que a su vez afecta de manera significativa la competitividad de la ciudad. Por otra parte, estos costos de mitigación recaen sobre el Estado, no son sólo en el control, seguimiento y atención de enfermedades, sino también en la reducción del presupuesto que solventa otras necesidades relacionadas al saneamiento básico, seguridad, infraestructura vial y movilidad, entre otras

Finalmente, el *ámbito ecológico* se encuentra estrechamente relacionado con el social, ya que el cambio en el equilibrio ecológico del ambiente genera las problemáticas sociales relacionadas a la salud, anteriormente mencionadas. Adicionalmente, la importancia ecológica del proyecto contempla la utilización de métodos naturales (como lo son los techos verdes), en la solución de problemática, reduciendo impactos que pueden causar otro tipo de alternativas.

3. Objetivos

4.1 Objetivo General:
Analizar la influencia de los techos verdes en el comportamiento de la concentración de material particulado (PM10) a nivel espacial Bogotá.

4.2 Específicos:

- Determinar la relación de la altura de capa de mezcla y la concentración de PM10 en la ciudad de Bogotá.
- Comparar la variación de la altura de capa de mezcla en techos urbanos con y sin vegetación teniendo en cuenta el cambio en el albedo.
- Identificar las zonas de Bogotá donde el cambio en el albedo genera condiciones favorables para un uso viable de techos verdes en la ciudad.

4. Marco de Referencia

5.1 Estado del Arte

A continuación, se presentarán los estudios más relevantes sobre el tema de interés del proyecto. Se realizará para una mejor interpretación del contenido.

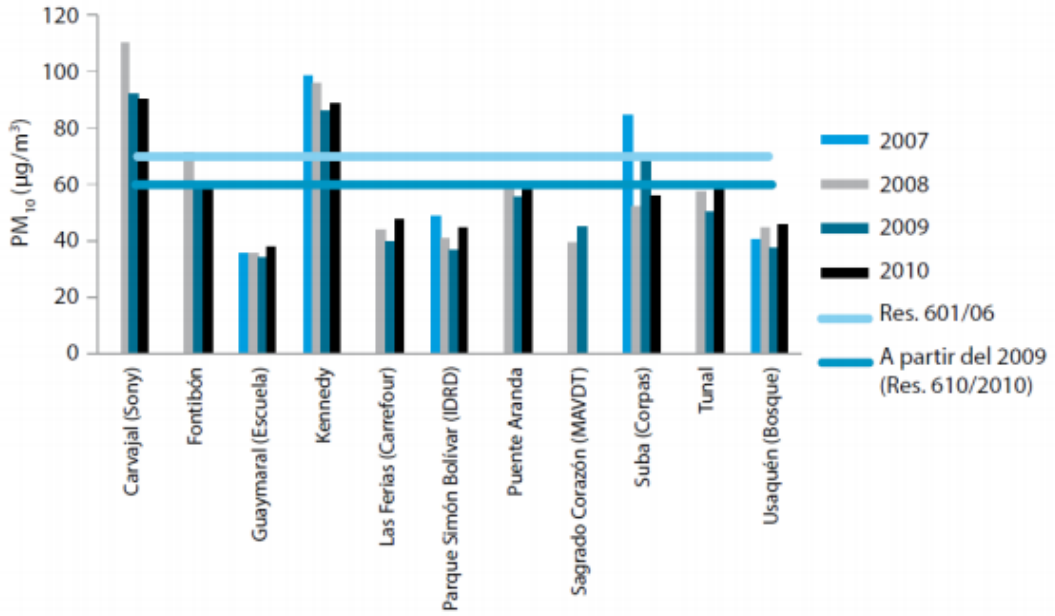
5.1.1 Contaminación del aire por PM_{10} en la ciudad de Bogotá.

La concentración de PM_{10} en la ciudad de Bogotá es un problema, ya que según el estudio realizado por Gaitán (2007), se exceden los niveles permisibles, principalmente en las zonas industriales como Puente Aranda, en donde en un 90% de los días se excede el límite establecido según la norma colombiana, la cual establece en la Resolución 2254 del 2017 que en 24 horas la exposición debe ser de 75 µg/m^3 y anualmente de 50 µg/m^3 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Otro estudio que confirma lo mencionado fue realizado en el 2008 en donde se determinó que el promedio anual fue de 55 µg/m^3, sin embargo, este menciona que hay que tener en cuenta que la concentración varía de acuerdo a la zona de la ciudad, en donde se determinó que en la región occidental se encuentran un rango de 60-90 µg/m^3, mientras que en zonas del este y noreste se encuentran entre 30-50 µg/m^3. (Vargas, Rojas, Pachón y Russell, 2012).

Es decir que la población se encuentra expuesta a diferentes concentraciones dentro de la ciudad. En el 2011 se realizó un estudio que muestra que en un tramo de la carrera séptima (una de las principales vías de la ciudad) se llegan a concentraciones de 210 µg/m^3 en horas de la mañana, mientras que en la misma vía en otro tramo se encuentran concentraciones de 25 µg/m^3, lo que quiere decir que la distribución del contaminante está dado por varias condiciones en este caso principalmente por la cantidad vehicular que pasa por la zona y especialmente los motores que manejan DIESEL que influye directamente en la emisión de material particulado PM_{10}. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012)

Figura 2. Concentración promedio anual de PM_{10} en las estaciones de monitoreo en el año 2012



Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012)

5.1.2 Afectaciones en la salud por PM_{10}

La exposición continua al material particulado ocasiona irritación y bloqueo de las vías bronquiales lo que ocasiona una serie de enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Duque, 2016), los más afectados son los niños menores de 5 años, adultos mayores (Sarmiento, Hernández, Medina, Rodríguez, & Reyes, 2015) y personas que viven cerca de vías con alto flujo vehicular (Franco, Rojas, Sarmiento, Hernández, Zapata, Maldonado & Beherent, 2009). Se estima que para el 2050 la principal causa de muerte infantil se presente por la inhalación de material particulado, este hecho es preocupante ya que todos los días por actividades cotidianas como actividades industriales, alto tráfico vehicular, quemas, entre otros, se está constantemente expuesto al PM_{10} y puede ocasionar problemas de salud pública. (Duque, 2016).

En Colombia, durante el año 2015, los efectos de la contaminación del aire estuvieron asociados a 10.527 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2015). Adicionalmente, los costos ambientales crecieron el 1,93% del PIB en el año 2015 ($15.4 billones de pesos), esto puede atribuírsele a la exposición de contaminantes como material particulado en las zonas urbanas que causan morbilidad y mortalidad en la población (DNP, 2018). Una reducción de 10 $\mu g/m^3$ de PM_{10}, reduciría el 17% de consultas por enfermedades respiratorias y cardiovasculares en la ciudad (Arciniégas, 2011), lo que generaría un beneficio económico de más de 21 billones de pesos en mortalidad (Rojas & Ortiz, 2012) y reduciría la morbilidad en la población (Villa, 2008). Con el fin de reducir las enfermedades y los costos adicionales, el Departamento Nacional de Planeación (DNP), formuló el CONPES 3943 del año 2018, sin embargo, esta medida también genera gastos adicionales, ya que la implementación de esta política tiene un costo total de 16.637 millones de pesos, según lo estimado por la entidad.

5.1.3 Beneficios de los techos verdes.

Los techos verdes son cubiertas vivas que tienen un bajo costo de implementación, su peso es reducido y requiere de poco mantenimiento (Ibáñez, 2008), aparte de ello, traen consigo muchos beneficios como: la reducción de la contaminación del aire en las ciudades gracias a que la vegetación es capaz de retener polvo y partículas contaminantes presentes en el aire por medio de la adhesión (Zielinski, Garda, & Vega, 2012), también disminuyen la absorción del calor en la edificaciones de la ciudad, ya que actúa como una barrera contra la radiación térmica (Moreno, Alpuche, Ochoa, & Irene, 2011).

Una de las características que presentan los techos verdes es que su albedo es más alto que el de las superficies asfálticas, un estudio realizado por Taha, H. (1997), da como resultado que los cambios en el albedo superficial y la cubierta vegetal pueden ser efectivos para modificar el clima en las superficies cercanas al suelo. Además, las simulaciones meteorológicas sugieren que las ciudades pueden revertir de manera factible el calor antropogénico en las ciudades y compensar sus impactos en uso de energía simplemente aumentando el albedo de los techos y pavimentos reforestando las zonas urbanas, ya que el aumento de la vegetación puede provocar una disminución de 2 ° C en el aire y en aumentos extremos del albedo, las disminuciones localizadas en la temperatura del aire pueden alcanzar hasta los 4 ° C.

5.1.4 Investigaciones internacionales del éxito de techos verdes

En Alemania se implementó un sustrato de 16 cm de espesor para una temperatura exterior de 30ºC; en esta investigación se obtuvo como resultado que la vegetación logro disminuir la temperatura a 23ºC, hecho que se le atribuye a la evaporación del agua, fotosíntesis, en donde por cada molécula de $C_6H_{12}O_6$ (glucosa) generada, se consumen 2,83 kJ de energía y la alta capacidad de almacenar calor en el agua de la planta. Para el desarrollo de todos estos procesos y el enfriamiento de esta se puede usar hasta un 90% de la energía solar consumida, además una parte de la radiación calórica de onda larga emitida por el edificio es reflejada por las hojas y otra es absorbida. Todos estos factores contribuyen a la dispersión de la contaminación (Minke, 2009).

Además, ayuda a controlar las islas de calor en la ciudad provenientes de múltiples factores como: la alta densidad poblacional, las estructuras pavimentadas y cementadas en la ciudad, que irradian calor a climas urbanos, redes eléctricas, equipos mecánicos, días soleados, entre otros, lo que puede aumentar hasta 7ºC la temperatura de la ciudad. Por otro lado, las áreas con más vegetación son más frescas ya que las plantas absorben la mayor parte de la energía recibida del sol en donde el 2% es usado para la fotosíntesis, el 48% pasa a través de las hojas y es almacenado en la planta, el 35% es transformado en calor usado para la transpiración y solo el 20% es reflejado. (Kristin, G., & Bradley, R. 2006).

En estudios realizados en México, concluyen que la vegetación actúa como una barrera, ya que capta la radiación solar, lo que evita la tendencia a sobrecalentarse, característica principal tanto de pavimentos asfálticos de concreto como materiales utilizados en las grandes ciudades. También de este estudio, se concluye que las azoteas, son la mayor forma de captación de radiación de solar, por lo tanto, la instalación de techos ajardinados resulta ser un medio eficaz para la reducción de la captación y posterior emisión de calor; de esta forma, además de mejorar la condiciones para la dispersión de los contaminantes del aire, se contrarresta el efecto de isla de calor (Alpuche, 2010).

Según investigaciones que ha hecho la National Aeronautics and Space Administration (NASA), ha encontrado que los techos verdes cubiertos de vegetación funcionan como un limpiador. El primer estudio que realizó la NASA fue en el 2003, en donde en su modelo, predijo que el uso extensivo de techos verdes podría reducir las temperaturas de la superficie del verano en 1,6 grados Farhenheit. (National Aeronautics and Space Administration, 2012). Otros estudios demuestran que el uso del potencial de la radiación solar y la fotosíntesis, a través de paredes y techos verdes urbanos, aumenta la calidad del aire a una tasa del 5%, con una reducción del 40% en los óxidos de nitrógeno y una disminución del 60% de las partículas contaminantes (Pugh, 2012), siendo un mecanismo apto para la reducción de la temperatura y la cantidad de contaminantes.

5.2 Marco conceptual y marco teórico

La *contaminación atmosférica* es un evento que se presenta a nivel mundial y como lo define el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2008), es el "fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes en el aire", dentro de estos contaminantes se encuentra el *material particulado* que se define como una "mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas, localizadas en el aire" entre estas se encuentran: el polvo, la suciedad, el hollín, o el humo; las partículas tienen diferentes tamaños, unas lo suficientemente grandes como para verlas a simple vista y otras tan pequeñas que se requiere el uso de un microscopio electrónico para identificarlas (Agencia

de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2013). Estos contaminantes pueden ser dispersados cuando las condiciones meteorológicas favorecen el aumento de la *altura de capa de mezcla*, debido a que esta es la distancia vertical de la atmósfera donde se produce el mezclado de contaminantes y dispersión de estos, esta puede ser estimada mediante mediciones meteorológicas rutinarias (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2001).

En el transcurso del día se presentan diferentes fenómenos, en las primeras horas de la mañana, cuando por el aumento gradual de la temperatura y de la turbulencia atmosférica, provocado por la irradiación solar, la altura de capa de mezcla comienza a aumentar, es decir, que mientras se va presentando la insolación que calienta el suelo y la convección, va aumentando el espesor de la capa de mezcla, en este sentido, entre mayor sea la altura de mezcla mayor será la dispersión de los contaminantes (Puigcerver, 2012). El otro fenómeno se presenta en las horas de la tarde, como por ejemplo después de la puesta de sol, cuando la superficie terrestre no recibe más irradiación, ni el suelo ni el aire cercano a la superficie se calienta, en consecuencia, las capas más bajas de la atmósfera se van enfriando más rápidamente que el aire en las capas más altas, así mismo, en las últimas horas de la tarde se alcanzan las mayores alturas de mezcla y en las horas de noche y madrugada las más bajas, en donde también se presenta la mayor estabilidad atmosférica, donde los valores de mezcla son bajos (Ingetec, 2017)

En estos procesos donde el aire cambia su temperatura, ocurre un fenómeno denominado *inversión térmica*, ya que por lo regular a nivel del piso, la temperatura es más caliente y en las capas superiores son más frías, sin embargo, debido a la diferencia de densidades del aire, causados por el calentamiento, se invierten las temperaturas, frío en la parte más baja (capa más densa y pesada) y posteriormente aire caliente (capa menos densa y más ligera), este fenómeno actúa como una tapa que impide el movimiento ascendente del aire contaminado; generando estabilidad atmosférica del aire impidiendo cualquier tipo de intercambio vertical, en donde los contaminantes quedan atrapados (Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial, 2010).

Las variables y fenómenos explicados anteriormente crean un entorno climático propio en función de los elementos urbanos que lo caracteriza, esto se conoce como *microclima urbano*, entre estos, se encuentran el albedo, conductividad, porosidad, rugosidad, orientación horizontal y vertical de los materiales cuando interceptan la radiación solar, las formas, proyecciones de sombras, pendiente, ventilación, entre otros (REDIAM, 2016). El parámetro micrometeorológico que se tiene en cuenta para el desarrollo del proyecto, es el *albedo.* Este hace referencia, al poder que tiene un cuerpo para reflejar la radiación que recibe, se tiene una escala de referencia, en donde el albedo alcanza 1 cuando toda la radiación se refleja y 0 cuando toda la radiación se absorbe (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Por otra parte, la *salud pública* a través de políticas busca, mediante acciones individuales y colectivas, garantizar la salud de la población de manera integrada, ya que estos resultados se convierten en indicadores de las condiciones de vida, bienestar y desarrollo del país (Departamento Nacional de Planeación, 2014), lo anterior, junto con las condiciones meteorológicas favorables del microclima urbano, logran obtener las concentraciones de los componentes presentes en el aire de tal forma que no afecten la salud, el bienestar de la población, el equilibrio ecológico, y los materiales con valor económico, a esto se le conoce como *calidad del aire*.

Sin embargo, las políticas públicas no son suficientes para el mejoramiento de la calidad del aire, por lo que surgen tecnologías capaces de apoyar a la finalidad de estas, como los *techos verdes*, los cuales son considerados un sistema constructivo de cobertura vegetal en la cubierta de un inmueble, que necesita una adecuada integración entre: el inmueble intervenido, la vegetación escogida, el medio de crecimiento diseñado, y los factores climáticos y ambientales (Secretaría distrital de Ambiente,

2012). La capa vegetativa, que crece de los techos verdes utiliza un albedo alto, que logra hacer más fresco el aire ambiente, mientras que las superficies de una azotea convencional pueden exceder las temperaturas del aire ambiente hasta en 90 ° F (50 ° C). Por otro lado, cuando las corrientes de viento transportan las partículas de material particulado y entran en contacto con las superficies de las plantas, estas pueden interceptar el contaminante, mientras que otras se adhieren a la superficie, donde pueden ser resuspendidas en la atmósfera por el viento o mediante lavados por la lluvia (U.S. Environmental Protection Agency, 2008).

En cuanto a los beneficios de los techos verdes, además de los mecanismos por los cuales eliminan contaminantes, también proporcionan sombra a las superficies, eliminan y reducen el calor del aire y el transmitido a edificios o remitidos a la atmósfera a través de la evapotranspiración. Adicionalmente, pueden ser utilizados en áreas construidas que no disponen de espacio para plantar a nivel del suelo, igualmente poseen una amplia gama de lugares para su instalación como: edificios industriales, educativos, gubernamentales y oficinas de propiedad comercial y residencial (U.S. Environmental Protection Agency, 2008).

5.3 Marco normativo

Para el desarrollo del proyecto, se tuvo en cuenta normatividad nacional e internacional, sin embargo, la nacional se prioriza de manera significativa, debido a que el proyecto se ubica geográficamente en la capital del país. A continuación, se muestra en la tabla 1 la normatividad nacional y en la tabla 1 lo referente a lo internacional.

Tabla 1. Normatividad nacional vigente aplicada al proyecto

Norma legal	**Aporte al proyecto**
Constitución Política de Colombia de 1991	Es importante considerar la Constitución Política de Colombia, ya que es la "norma de normas" y de esta se rige el resto de normatividad del país, además en el artículo 79, la Constitución señala que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano y el proyecto busca mejorar la calidad del aire, por lo que la relación es directa

Ley 99 de 1993	Esta ley es la primordial para los asuntos ambientales, y para fines del desarrollo del proyecto, en la sección 3 del artículo 1, indica que las políticas tendrán en cuenta el derecho de los seres humanos a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza, es decir, que las políticas deben buscar el mejoramiento de la calidad de vida de los ciudadanos, incluyendo la calidad del aire.
CONPES 3550 de 2008	En los lineamientos de este documento, se destaca la salud ambiental con énfasis en los componentes de calidad del agua, seguridad química y calidad del aire, siendo este último de especial interés para el desarrollo el proyecto, ya que es importante desde la salud ambiental fortalecer la gestión integral para la prevención, manejo y control de diferentes factores ambientales que tienen el potencial de originar efectos adversos en la salud humana
Resolución 909 de 2008	"Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas", es importante considerar que las fuentes fijas, aportan al incremento del material particulado (PM_{10}), en la ciudad
Resolución 2254 de 2017	Esta resolución tiene una estrecha relación con el proyecto debido a que en el artículo 2, expone los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio, entre los que se encuentra el material particulado (PM10). Esta resolución a nivel nacional, indica si la información recopilada sobrepasa el límite, poniendo en riesgo la salud de las personas
CONPES 3943 de 2018	Basado en un diagnóstico a las problemáticas de la contaminación del aire en el país, se formula esta política, con el fin de mejorar la calidad del aire. En su último apartado, la política expresa que es necesario mejorar la implementación de estrategias de prevención, reducción y control de la contaminación. Los techos verdes podrían considerarse como una estrategia.

Fuente: Autoras

5.4 Marco geográfico

En esta sección se describirá el área de influencia que tiene el proyecto, mencionando las características principales que contiene y las partes involucradas con las cuales se desarrolló el estudio presente.

5.4.1 Bogotá

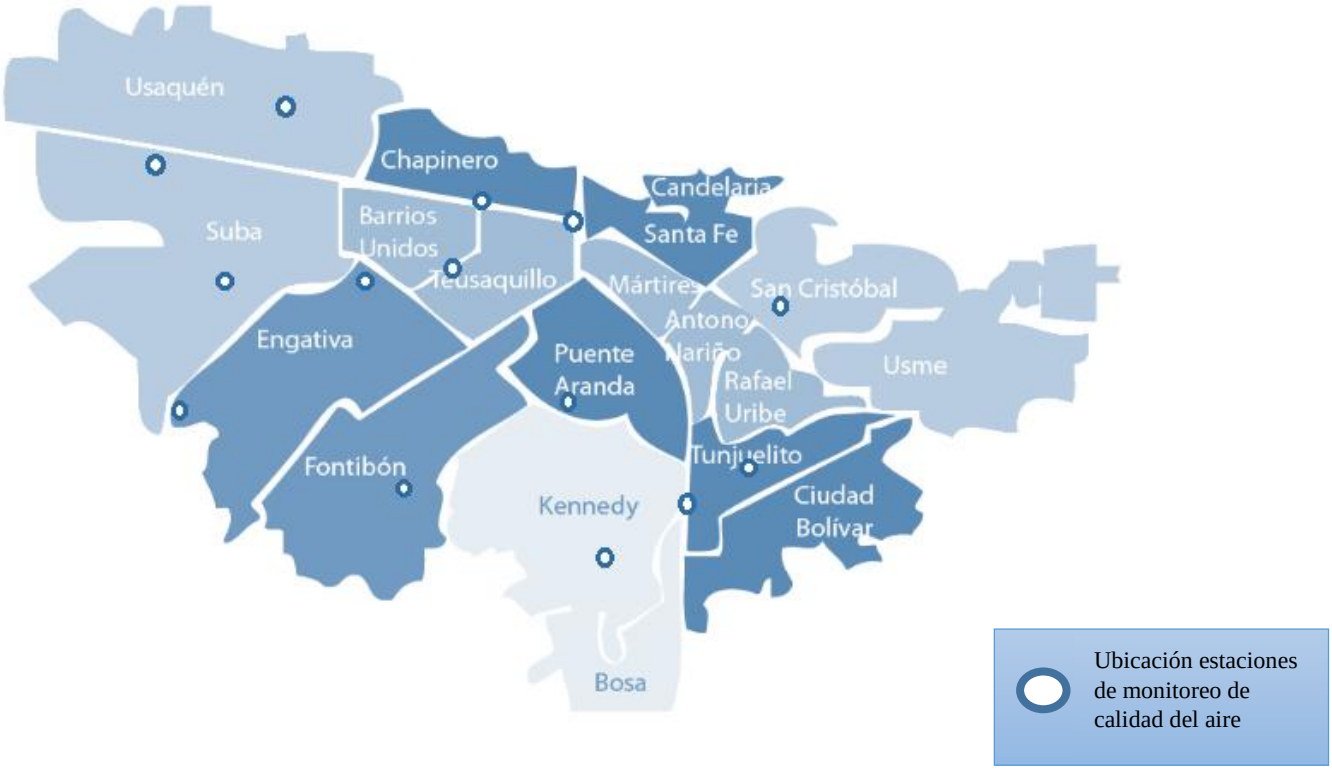
Se encuentra ubicada en el centro de Colombia, en la cordillera oriental en una latitud Norte: 4° 35'56" y longitud Oeste de Greenwich: 74°04'51, con 2625 m.s.n.m, una extensión alrededor de 33 kilómetros de sur a norte y 16 kilómetros de oriente a occidente, esta se encuentra dentro de la zona de confluencia intertropical, produciendo dos épocas de lluvia; en la primera mitad del año entre los meses de Marzo a Mayo y en la segunda entre los meses de Septiembre y Noviembre. (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2017).

Según el (DANE, 2019)la población de la capital oscilaba entre los 7.878.783 habitantes, esta población se encuentra distribuida en 20 localidades, las cuales son: Usaquén, Chapinero, Santafé, San Cristóbal, Usme, Tunjuelito, Bosa, Kennedy, Fontibón, Engativá, Suba, Barrios Unidos, Teusaquillo, Los Mártires, Antonio Nariño, Puente Aranda, La Candelaria, Rafael Uribe Uribe, Ciudad Bolívar y Sumapaz (Ver figura 3), que permiten ofrecer a los ciudadanos redes de servicios públicos como infraestructura vial, entretenimiento y abastecimiento de productos. (Secretaria de Recreación y Deporte, 2018)

5.4.2 Estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB)

La RMCAB está conformada por 13 estaciones fijas de monitoreo y una estación móvil; estas se encuentran ubicadas en diferentes sitios de la ciudad como se muestra en la figura 3 (Secretaría Distrital de Ambiente, 2013).

Figura 3. Mapa de las localidades de Bogotá y ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire



(Bogotá, A. M. 2019).

A su vez, la Red de Monitoreo cuenta con información precisa acerca de las estaciones: su ubicación exacta teniendo en cuenta latitud y longitud, localidad donde se encuentra, tipo de zona y tipo de estación. Cada punto cuenta con equipos que permiten realizar un monitoreo continuo de las concentraciones de material particulado (PM_{10}, PST, $PM_{2.5}$), gases contaminantes (SO_2, NO_2, CO, O_3) y de las variables meteorológicas de precipitación, velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación solar, humedad relativa y presión barométrica. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2013)

Tabla 2. Características de medición de las estaciones de la RMCAB

Estación	Localidad	Tipo de zona	Tipo de estación	Parámetros que mide.
Guaymaral	Suba	Suburbana	De fondo	PM_{10} ,O_3 ,NO_2 ,CO
Usaquén	Usaquén	Urbana	De fondo	PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3
Suba	Suba	Suburbana	De fondo	PM_{10} ,O_3 ,NO_2 CO, SO_2
Bolivia	Engativá	Suburbana	De fondo	
Las Ferias	Engativá	Urbana	De trafico	PM_{10} ,$PM_{2.5}$,O_3 ,NO_2 ,CO, SO_2
Centro de Alto Rendimiento	Barrios Unidos	Urbana	De fondo	PM_{10} ,$PM_{2.5}$, O_3 ,NO_2 ,CO ,SO_2
MinAmbiente	Santa Fe	Urbana	De trafico	PM_{10} ,O_3
Fontibón	Fontibón	Urbana	Industrial	PM_{10} ,O_3 ,CO ,SO_2
Puente Aranda	Puente Aranda	Urbana	Industrial	PM_{10} , O_3 ,NO_2 ,CO ,SO_2
Kennedy	Kennedy	Urbana	De fondo	PM_{10} ,$PM_{2.5}$,NO_2 ,CO, SO_2
Carvajal	Kennedy	Urbana	Trafico industrial	PM_{10}, ,PST ,$PM_{2.5}$, O_3 CO, SO_2
Tunal	Tunjuelito	Urbana	De fondo	PM_{10} ,$PM_{2.5}$, O_3 ,NO_2 ,CO, SO_2
San Cristóbal	San Cristóbal	Urbana	De fondo	PM_{10} , O_3 ,CO

Móvil	-	-	-	PM_{10}, O_3, NO_2, CO

Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2013)

5.5 Marco Institucional

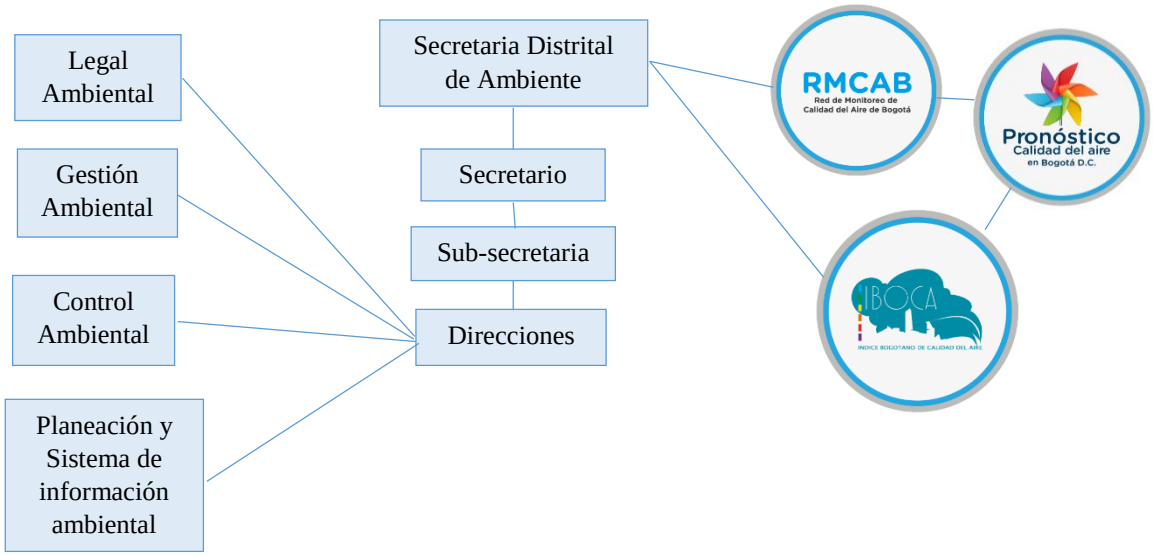
A continuación, se muestran los organismos que participan dentro del proyecto, los cuales crean un aporte importante, en donde se basó y saco diferente información relacionada con el tema.

Tabla 3. Aporte de la Secretaria Distrital de Ambiente dentro del proyecto

Entidad	¿Qué es?	Aporte
Secretaria Distrital de Ambiente.	Es una autoridad distrital que promueve, orienta y regula la sostenibilidad ambiental, con el fin de garantizar una buena calidad de vida de la población urbana y rural y de recuperar y conservar los recursos, servicios ecosistémicos y valores de biodiversidad. (Secretaria Distrital de Ambiente, 2018).	Dentro de ella se encuentra la información referente a Índice Bogotano de Calidad de Aire, modelación de calidad del aire y datos de inmisión (contaminantes criterio), la cual es usada dentro de la metodología a aplicar y sirve para conocer el estado actual de la calidad del aire de la ciudad de Bogotá

Fuente: Autoras

Figura 4. Organigrama de la Secretaría Distrital de Ambiente



Fuente: (Secretaria Distrital de Ambiente, 2018)

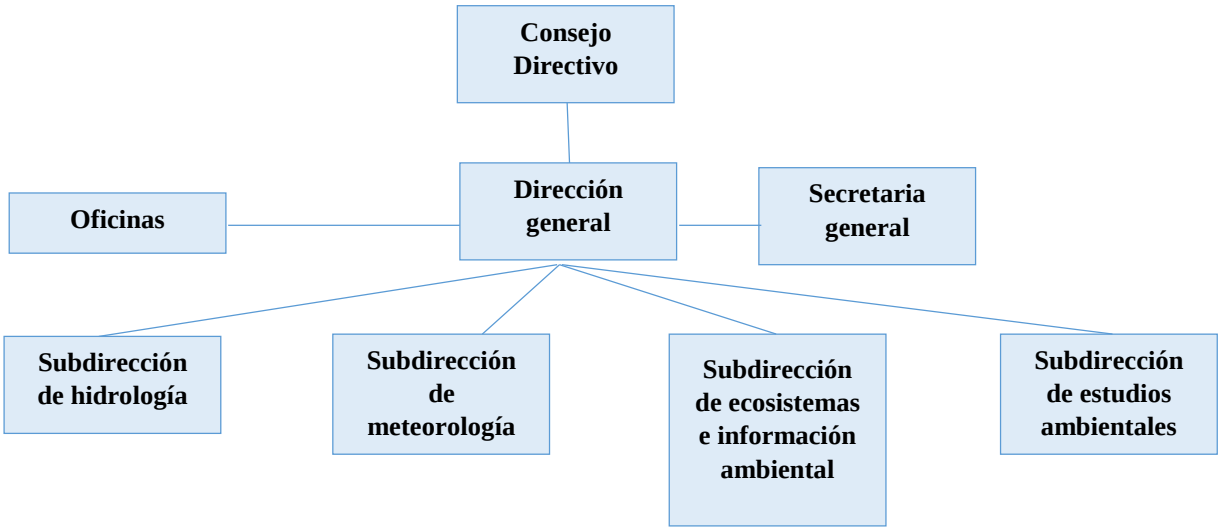
Se muestra otra de las entidades que participa en el proyecto, la cual fue necesaria desde el inicio y desarrollo del estudio.

Tabla 4. Aporte del IDEAM dentro del proyecto

Entidad	¿Qué es?	Aporte
IDEAM	"El IDEAM es una institución pública de apoyo técnico y científico al Sistema Nacional Ambiental, que genera conocimiento, produce información confiable, consistente y oportuna, sobre el estado y las dinámicas de los recursos naturales y del medio ambiente, que facilite la definición y ajustes de las políticas ambientales y la toma de decisiones por parte de los sectores público, privado y la ciudadanía en general" (IDEAM, 2018).	El IDEAM proporcionó la metodología usada en el proyecto para hallar la altura de capa de mezcla.

Fuente: Autoras

Figura 5. Organigrama del IDEAM



Fuente: (IDEAM, 2018)

5. Metodología

6.1 Diseño metodológico

El trabajo tiene un *enfoque de investigación* cuantitativo, ya que según Sampieri, Fernández y Baptista (2010), este enfoque se basa en la recolección de datos para probar hipótesis, lo que se ajusta al proyecto, debido a que por medio de la recopilación de información de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá y el uso de albedo de la ciudad, se buscó corroborar las teorías estudiadas para después realizar análisis estadístico, el comportamiento del contaminante y su relación con la variación de la altura de capa de mezcla, además del uso de techos verdes. Adicionalmente, la investigación tiene un "foco" como lo aseguran los autores, ya que buscó conocer con precisión las variables del estudio.

Por otra parte, el *alcance* de la investigación es de tipo correlacional, debido a que busca la relación existente entre dos o más variables, como es el caso de conocer la asociación entre la altura de capa de mezcla, la concentración de material particulado (PM10) y el albedo, todas en un contexto particular en el estudio, es decir, en relación con la *muestra* y *población*, que hace referencia a Bogotá, específicamente las estaciones que forman parte de la Red de Monitoreo de Calidad del aire de Bogotá, entre las que se encuentran: Usaquén, Puente Aranda, Carvajal, San Cristóbal, Centro de Alto Rendimiento, Móvil Séptima, Suba, Las Ferias, Tunal, Guaymaral, Kennedy, Ministerio de Ambiente y Fontibón.

6.2 Fases del proyecto

6.2.1 Fase 1:

De la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, se obtiene la siguiente información de las 13 estaciones meteorológicas: concentración de material particulado (PM10), velocidad del viento, temperatura, fecha y hora, presión barométrica y radiación solar, en el período comprendido entre los años 2013-2018, todos los días del año, cada hora; los cuales se organizan en Excel, para luego hallar la altura de capa de mezcla usando la metodología (determinística) del IDEAM: "Metodología para la evaluación de la capa límite planetaria y la elaboración del diagnóstico y pronóstico de la estabilidad atmosférica"(Sozzi & Ruiz, S.F) la cual consiste en una serie de cálculos que se realizan a través de datos micrometeorológicos, con el fin de determinar la altura de capa de mezcla aproximada que presenta la ciudad relacionándolo con los datos de las estaciones.

Para ello, es necesario realizar cálculos relacionados al balance energético superficial:

- Cálculo del ángulo de declinación solar
- Cálculo del ángulo de elevación solar
- Cálculo de la Radiación Solar Global
- Cálculo de la Radiación Neta

Se debe considerar que existen dos períodos para el cálculo de la altura de capa de mezcla, el diurno y el nocturno, donde para cada uno debe utilizarse una fórmula diferente, teniendo en cuenta que para el segundo la radiación solar no existe, es decir, debe ser cero.

Posteriormente, es necesario realizar una serie de cálculos para deducir parámetros turbulentos, como:

- Flujo de calor sensible
- Flujo de calor en el suelo
- Flujo de Calor latente
- Velocidad de fricción (Diurna y nocturna)

Además de las variables antes mencionadas, la nubosidad se obtiene por medio de la información suministrada por el Aeropuerto El Dorado y el albedo de las condiciones de la ciudad, por medio de revisión bibliográfica, y por medio de cálculos adicionales, se obtienen variables relacionadas al aire como su densidad y calor específico.

Una vez obtenidas todas las variables relacionadas (Ver Anexo 1), se desarrolla la ecuación que determina la altura de capa de mezcla en un tiempo específico en condiciones convectivas diurnas, así:

Fórmula 1. Altura de capa de mezcla diurna en condiciones convectivas

$$(z_i)_{t_2} = h_{conv} = \sqrt{\left[(z_i)_{t_1}^2 + \frac{2.4}{\gamma.(z_i)_{t_1}} \frac{H_0}{\rho C p}(t_2 - t_1)\right]}$$

Ver anexo 1

Para las condiciones mecánicas, se utiliza la siguiente ecuación, ya sea para el período diurno o nocturno:

Fórmula 2. Altura de capa de mezcla en condiciones mecánicas

$$hmec = 1330U *$$

Por último, ya que para el período diurno, se tienen dos momentos (convectivo y mecánico), la altura final será el valor máximo entre estas dos.

Cuando se obtenga la altura de capa de mezcla, junto con la concentración de material particulado (PM_{10}) de todas las estaciones medidas de forma simultánea, se utiliza el lenguaje de programación R, a través del software RStudio, código abierto, gratuito y capaz de graficar información estadística, para obtener la relación entre las dos variables respecto al tiempo

6.2.2 Fase 2:

Para el desarrollo de esta fase es primordial realizar una revisión bibliográfica sobre el albedo y su valor respectivo para una superficie de techos verdes o una superficie con condiciones similares. Posteriormente, se deberá realizar el mismo proceso de la primera fase, teniendo en cuenta la modificación de la variable antes mencionada, además de la identificación de las horas que se desean estudiar para las condiciones diurnas, siendo las que tienen mayor probabilidad de aumento de inversión térmica por cambio rápido de la densidad del aire. Posteriormente, se realiza un tratamiento estadístico de la información, utilizando la mediana, ya que, al existir datos atípicos alejados de la tendencia central, herramientas como la media podrían sesgar drásticamente el resultado, como lo afirma (Ángel, 2012), identificando la mediana útil para casos cuando hay valores extremos que distorsionan la información.

Se toma la información referente a la altura de capa de mezcla con y sin techos verdes, para realizar el cálculo de la mediana por hora, posteriormente se realiza la variación en distancia (metros) y porcentual con la siguiente fórmula:

Fórmula 3. Porcentaje de variación en la altura de los techos verdes

$$\frac{Altura\ con\ techos\ verdes - Altura\ \text{sin}\ techos\ verdes}{Altura\ \text{sin}\ techos\ verdes} * 100 = \%\ de\ variación\ de\ la\ altura\ de\ capa\ de\ mezcla$$

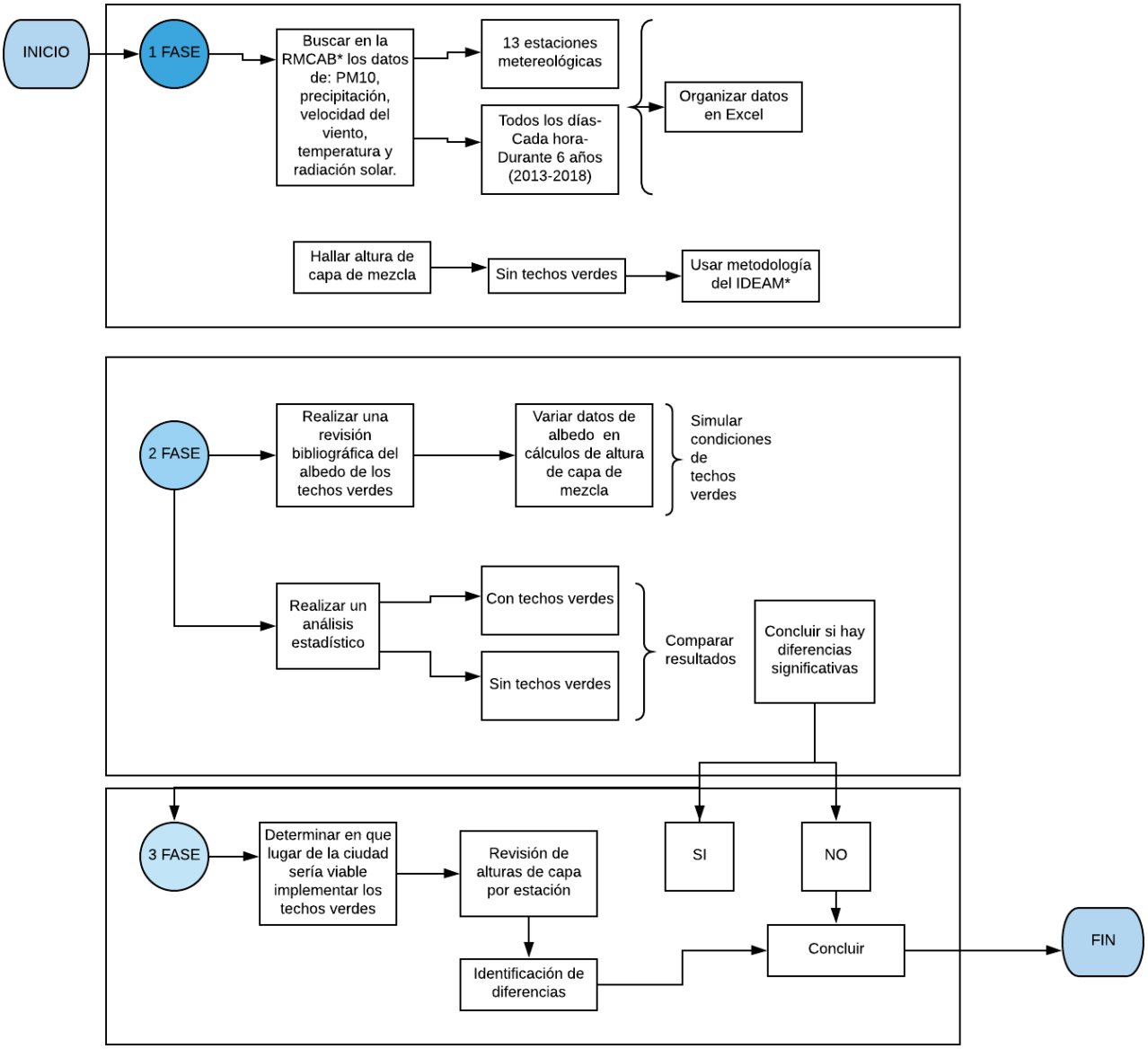
Finalmente, se compara la variación de las dos situaciones: con y sin techos verdes; para determinar si existe un cambio significativo que realmente pudiera mejorar la calidad del aire en la ciudad de Bogotá y así mismo, proceder a la siguiente fase

6.2.3 Fase 3:

Si el resultado de la fase anterior es positivo (se establece un cambio significativo en la altura de capa de mezcla), entonces se realiza la fase tres. Esta consiste, en identificar las zonas en Bogotá, referentes a la ubicación de las Estaciones de la RMCAB, que presentan variaciones altas con el cambio del albedo. Para esto, se debe hallar la mediana de la altura de capa de mezcla en condiciones diurnas para cada estación con y sin techos verdes, para que, con la diferencia de ese resultado, se identifiquen las zonas que presentan aumento rápido de la altura de capa de mezcla.

A continuación, se mostrará el diagrama metodológico propuesto para el desarrollo del proyecto:

Figura 6. Esquematización de las fases del proyecto.



Fuente: Autores

6.3 Cuadro metodológico: objetivos, actividades, metodología y resultados esperados

Tabla 5. Cuadro metodológico de los objetivos del proyecto

Objetivo general: Analizar la influencia de los techos verdes en el comportamiento de la concentración de material particulado (PM_{10}) a nivel espacial Bogotá.			
Objetivos específicos	**Actividades**	**Metodología**	**Resultados esperados**

Determinar la relación de la altura de capa de mezcla y la concentración de PM_{10} en la ciudad de Bogotá	-Revisión de la "Metodología para la evaluación de la capa límite planetaria y la elaboración del diagnóstico y pronóstico de la estabilidad atmosférica" -Búsqueda y recopilación de la información de la RMCAB. -Organización de la información en base de datos en Excel. -Cálculo y revisión de variables adicionales necesarias. -Cálculo de la altura de capa de mezcla.	Revisión de la metodología del IDEAM, donde se identifiquen las variables necesarias para hallar la altura de capa de mezcla. Algunas de las variables se podrán obtener por medio de datos de la RMCAB, y otros se deben buscar por medio de revisión bibliográfica. Se realiza el cálculo de la altura de capa de mezcla para posteriormente, establecer la relación entre esta y la concentración de material particulado (PM_{10}), por medio de gráficas realizadas en RStudio. Respecto a las técnicas e instrumentos relacionados a este objetivo: -Técnicas: Recopilación de información en base de datos, análisis de gráficas. -Instrumentos: Excel y RStudio	Las gráficas realizadas mostrarán una relación inversamente proporcional entre la altura de capa de mezcla y la concentración de material particulado (PM_{10}) en Bogotá.

Comparar la variación de la altura de capa de mezcla en techos urbanos con y sin vegetación teniendo en cuenta el cambio en el albedo.	-Realizar una revisión bibliográfica respecto al albedo correspondiente a las condiciones de techos verdes -Hallar la altura de capa de mezcla con la nueva condición de albedo. -Recopilar la información de las estaciones de las horas a estudiar (Diurnas) y hallar su mediana correspondiente. -Realizar comparación entre los resultados obtenidos de las condiciones con techos verdes y sin estos, teniendo en cuenta la variación porcentual y en términos de longitud (Metros). -Definir si existen cambios significativos en la altura de capa de mezcla.	Mediante una revisión bibliográfica se obtiene el albedo para condiciones de techos verdes, que será utilizado en el cálculo de la altura de capa de mezcla para estas condiciones. Se establece la variación de la altura teniendo en cuenta los momentos diurnos de todas las estaciones Respecto a las técnicas e instrumentos relacionados a este objetivo: -Técnicas: Recopilación de información en base de datos, análisis estadístico. -Instrumentos: Excel.	Tablas que recopilen la variación de la altura de capa de mezcla, donde muestre que el cambio del albedo, si genera cambios significativos en el incremento de la altura de capa de mezcla.
Identificar las zonas de Bogotá en donde el albedo genera condiciones para un uso viable de los techos verdes en la ciudad,	-Si existe un cambio en la altura de capa de mezcla significativo, que lograse disminuir la concentración de material particulado, se procede a identificar las zonas de las estaciones, donde se genera. -Realizar recopilación de la información referente a la mediana de la altura de capa de mezcla con y sin techos verdes de cada estación.	Partiendo que el objetivo puede ser desarrollado, se calcula la mediana de cada estación de la altura, para así poder obtener la zona que presentan mejores resultados Respecto a las técnicas e instrumentos relacionados a este objetivo: -Técnicas: Análisis estadístico -Instrumentos: Excel	Teniendo en cuenta que el resultado de la fase anterior es positivo, es decir, la variación de la altura de capa de mezcla es significativa, se identifican las zonas en Bogotá donde se pueden implementar los techos verdes, se esperaría que en toda la ciudad.

	-Identificar las zonas que presentan un incremento importante en la altura.

Fuente: Autoras

6. Plan de trabajo

7.1 Cronograma de actividades

A continuación, se presentará el cronograma de actividades realizado por parte de las tesistas para el cumplimiento del proyecto

Figura 7. Cronograma de actividades para el desarrollo del estudio

Fuente: Autores

7.2 Presupuesto del proyecto

Teniendo en cuenta la estructura del proyecto, se tuvieron en cuenta los honorarios del investigador, es decir, las horas invertidas en el desarrollo del mismo. Partiendo del salario mínimo legal vigente ($828.116), se estima que el valor por cada hora de trabajo es de $3450 y teniendo en cuenta que

para el trabajo se invirtió un total de aproximadamente 1500 horas, se obtiene el siguiente presupuesto como se indica en la tabla 6.

Tabla 6. Presupuesto del proyecto de investigación

Participantes	Gastos
	Honorario del investigador
María Fernanda Benavides Nieves (Investigadora 1)	$3450*1500 horas de trabajo =$5`175.000
Viviana Mojica Godoy (Investigadora 2)	$3450*1500 horas de trabajo =$5`175.000
Total de los honorarios: $10`350.000	

Fuente: Autoras

7. Resultados y Análisis.

Como se señala en la fase 1 de la metodología del proyecto, la primera actividad es la recopilación de la información necesaria de la RMCAB. Cabe aclarar, que el mapa de localización de las estaciones de monitoreo del año 2013, afirma que son 14 estaciones de monitoreo: Centro de Alto Rendimiento, Las Ferias, Guaymaral, Tunal, Kennedy, Carvajal, Móvil de la Séptima, Usaquén, Suba, San Cristóbal, Puente Aranda, Ministerio de Ambiente, Fontibón y Bolivia; sin embargo, esta última no aparece en la lista de estaciones que generan reportes en la Red. Por otra parte, la estación de Fontibón a pesar de estar inscrita, al generar la información del período de estudio, reporta valores de material particulado (PM_{10}) y temperatura desde el 6 de diciembre de 2018 y de velocidad del viento a partir del 17 de diciembre de 2017. En consecuencia, esta estación no aporta información significativa ni representativa al estudio, por lo que no se tiene en cuenta, es decir, el proyecto se basó en los datos obtenidos de 12 estaciones de la RMCAB.

A continuación, se mostrarán los resultados referentes al primer objetivo del proyecto el cual corresponde a: *Determinar la relación de la altura de capa de mezcla y la concentración de PM_{10} en la ciudad de Bogotá.*

Antes de realizar los cálculos de las variables necesarias para hallar la altura de capa de mezcla, se realizó una revisión bibliográfica para conocer el albedo correspondiente a las condiciones de la ciudad; de lo anterior se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 7. Albedo correspondiente a las condiciones de Bogotá

Condiciones	Valor de la bibliografía	Fuente
Asfalto	0,15	EPA, 2008
Área urbana	0,15	Ian L. Pepper, Charles P. Gerba, Mark L. Brusseau, 2006

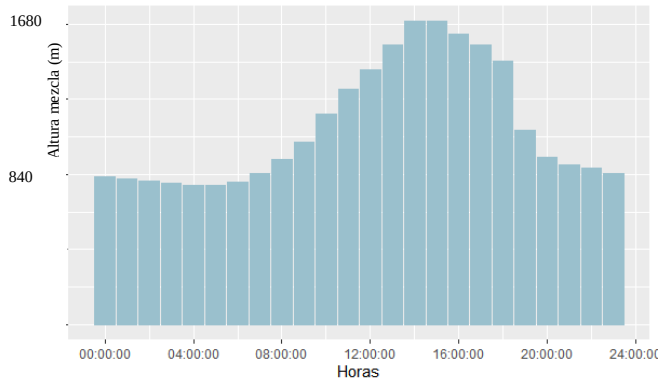
Fuente: Autoras

Teniendo en cuenta el concepto del albedo expuesto en el marco teórico-conceptual, un albedo de 0,15, como se muestra en la Tabla 7, hace referencia a un 15% en la capacidad de reflejar la radiación solar que recibe este cuerpo de asfalto.

Resultados altura de capa de mezcla

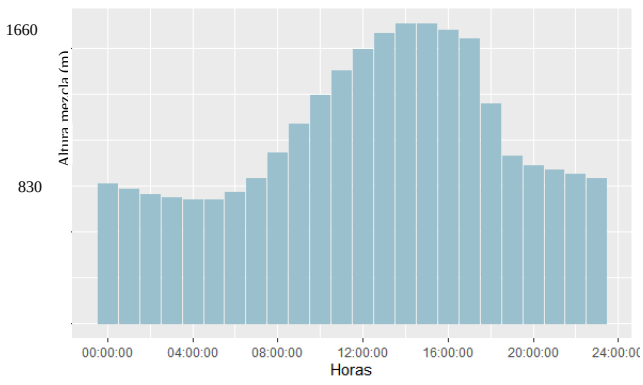
Se realizaron los cálculos de la altura de capa de mezcla en la ciudad de Bogotá basados en la metodología del IDEAM, en donde se obtuvieron una serie de variables que al final arrojaron como resultado el valor de la altura de capa de mezcla en cada hora del día durante los 6 años estudiados, en cada una de las estaciones de monitoreo de calidad del aire.

Figura 8. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Centro de Alto Rendimiento



Fuente: Autoras

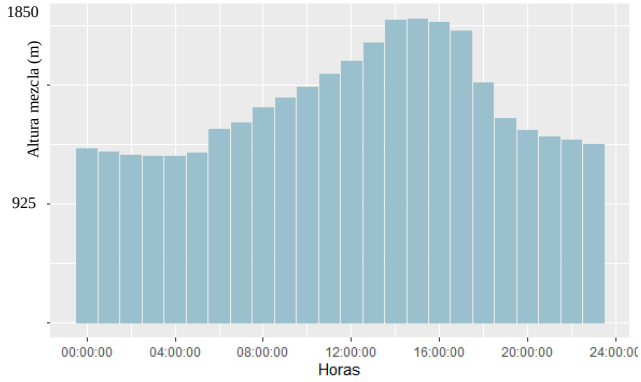
Figura 9. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Carvajal



Fuente: Autoras

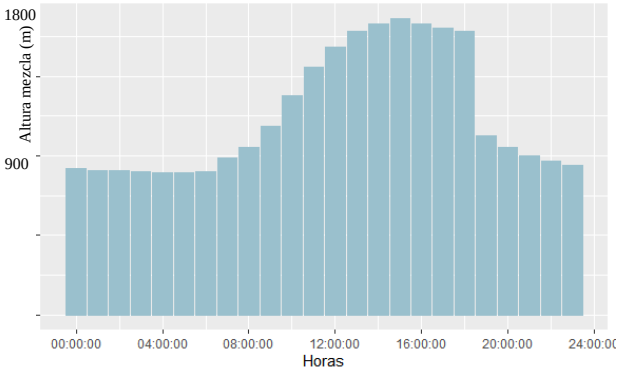
En la Figura 8, se observa el comportamiento de la altura de capa de mezcla de la estación de Centro de Alto Rendimiento, en donde en la mañana no presenta grandes variaciones, su pico más alto es entre las 13 pm y 14 pm, y posteriormente la altura empieza a disminuir, sin embargo, en las horas de la noche a pesar de disminuir, presenta una altura mayor que en horas de la mañana. Este comportamiento es similar al que se presenta en la estación de Carvajal, como se muestra en la Figura 9.

Figura 10. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de las Ferias



Fuente: Autoras

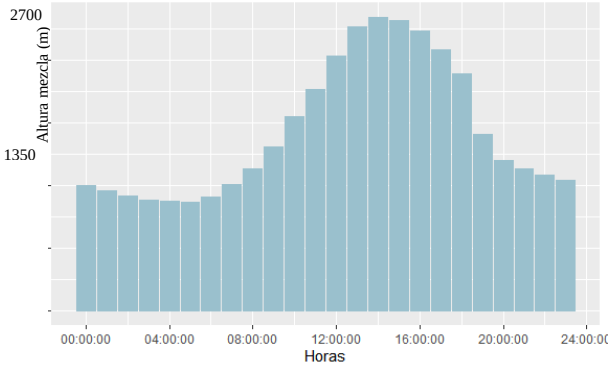
Figura 11. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Guaymaral



Fuente: Autoras

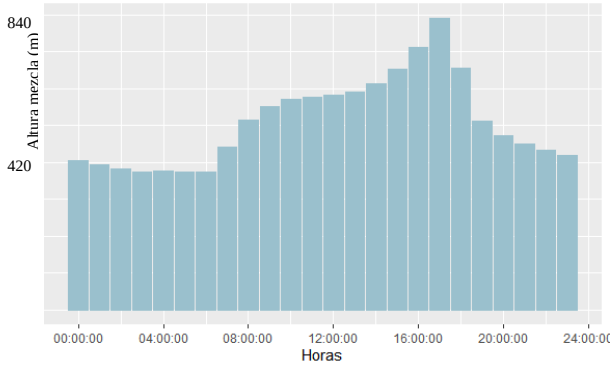
En la Figura 10, la altura de capa de mezcla tanto en horas de la mañana como en la tarde no presenta grandes diferencias, pero va aumentando a lo largo del día, con alturas máximas entre las 14 pm y 15 pm. La altura de capa de mezcla de Guaymaral en la Figura 11, presenta un comportamiento constante en la altura, en las condiciones de la mañana, sin embargo, existe un cambio abrupto en la diminución de la altura entre las 18 pm y 19 pm.

Figura 12. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Kennedy



Fuente: Autoras

Figura 13. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de MinAmbiente

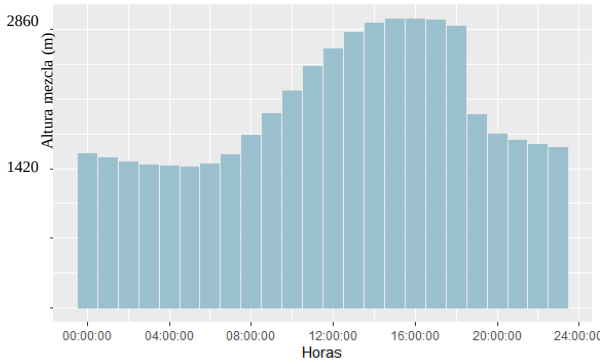


Fuente: Autoras

En relación a la Figura 12, la altura de capa de mezcla en la madrugada presenta un comportamiento decreciente hasta las 4 am, posteriormente aumenta significativamente hasta la 1 pm, donde se presenta su valor máximo y desciende entre 18 pm y 19 pm.

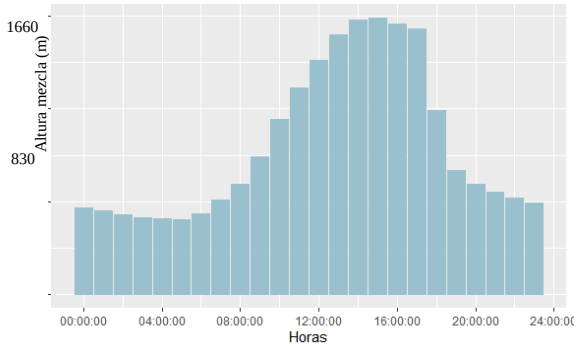
Para la Figura 13, relacionada a la estación de MinAmbiente, el comportamiento es atípico en comparación con las demás estaciones, ya que no se muestra un aumento marcado en la altura en el transcurso del día, sin embargo, si resalta su punto más alto a las 17 pm.

Figura 14. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Móvil 7



Fuente: Autoras

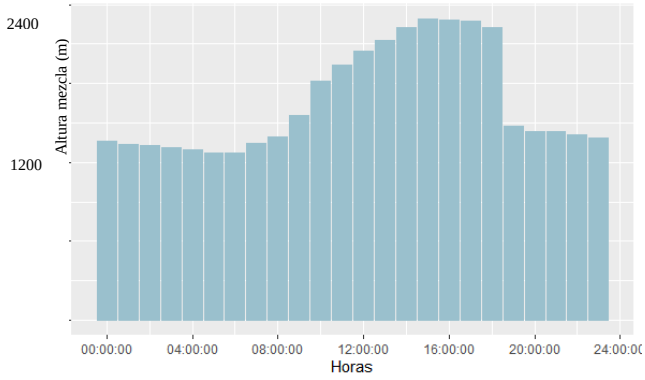
Figura 15. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Puente Aranda



Fuente: Autoras

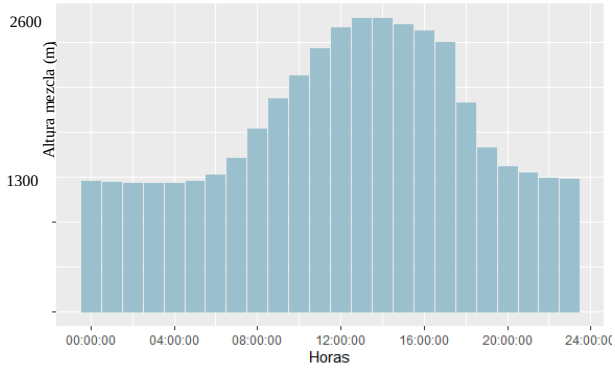
En la estación de Móvil 7 representada en la Figura 14, el valor de la altura de capa de mezcla máximo, se encuentra en el rango entre las 15pm, 16 pm y 17pm, no mostrando una tendencia tan marcada como en la Figura 13. Por otro lado, a pesar que la estación de Puente Aranda en la Figura 15, presenta un comportamiento similar a las demás estaciones, donde en la madruga aumenta hasta aproximadamente las 12 pm y posteriormente empieza a descender, después de las 16 pm, la altura en la mañana alcanza valores muy bajos, diferentes a las demás estaciones.

Figura 16. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de San Cristóbal



Fuente: Autoras

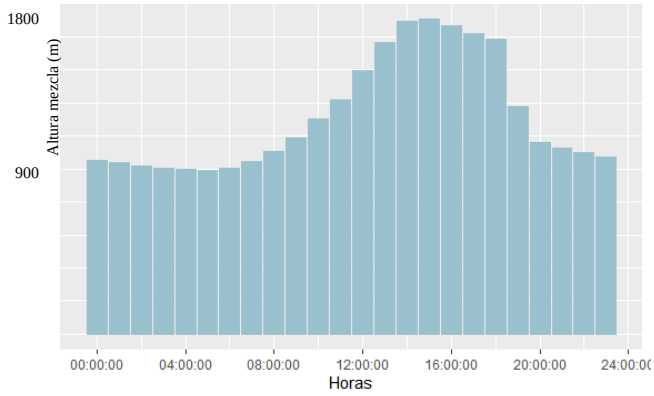
Figura 17. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Suba



Fuente: Autoras

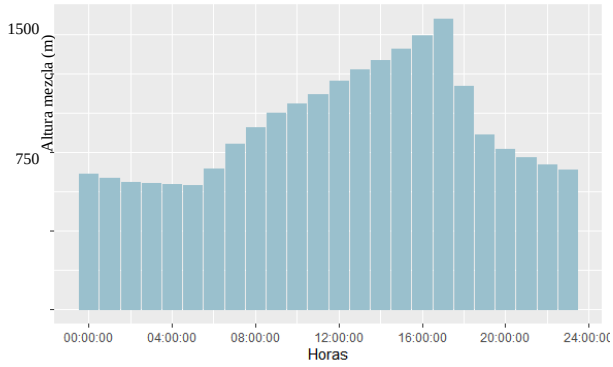
En lo relacionado a las Figuras anteriores (Figura 8-Figura 17), se observa un comportamiento de la altura de capa de mezcla similar en todas las estaciones, ya que la va aumentando en las horas de la mañana alcanzando su punto máximo entre las 12 pm-16 pm, exceptuando la estación del Ministerio de Ambiente donde el pico relacionado a la altura se observa a las 17 pm. Por otra parte, la estación de Centro de Alto Rendimiento (Figura 8), Kennedy (Figura 9) y Puente Aranda (Figura 15), presentan las alturas de capa de mezcla más bajas en las horas de la mañana a comparación de las otras estaciones

Figura 18. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación del Tunal



Fuente: Autoras

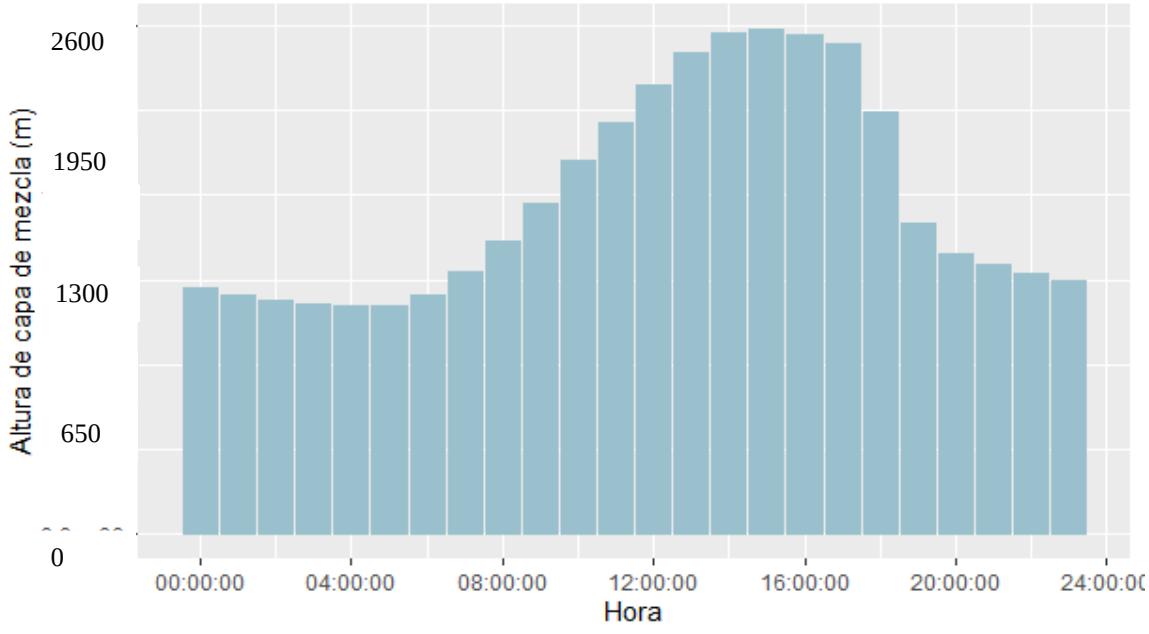
Figura 19. Gráfica altura de capa de mezcla por horas del día en la estación de Usaquén



Fuente: Autoras

A continuación, se muestra el comportamiento general de la altura de capa de mezcla de la ciudad de Bogotá, en donde se encuentran integrados todos los datos de las 13 estaciones de monitoreo de calidad del aire.

Figura 20. Comportamiento de la altura de capa de mezcla en la ciudad de Bogotá por horas del día



Fuente: autoras

Se observa en la Figura 20, que en las horas de la madrugada entre la 1:00 am y las 5:00 am la altura de capa de mezcla es baja y a medida que el día transcurre esta va teniendo un aumento. Llega a su pico máximo aproximadamente a las 3:00 pm y luego disminuye con rapidez hacia las 7:00 pm; luego desciende en poca proporción en las horas de la noche y madrugada para luego comenzar de nuevo el ciclo del día.

Análisis y Discusión: altura de capa de mezcla.

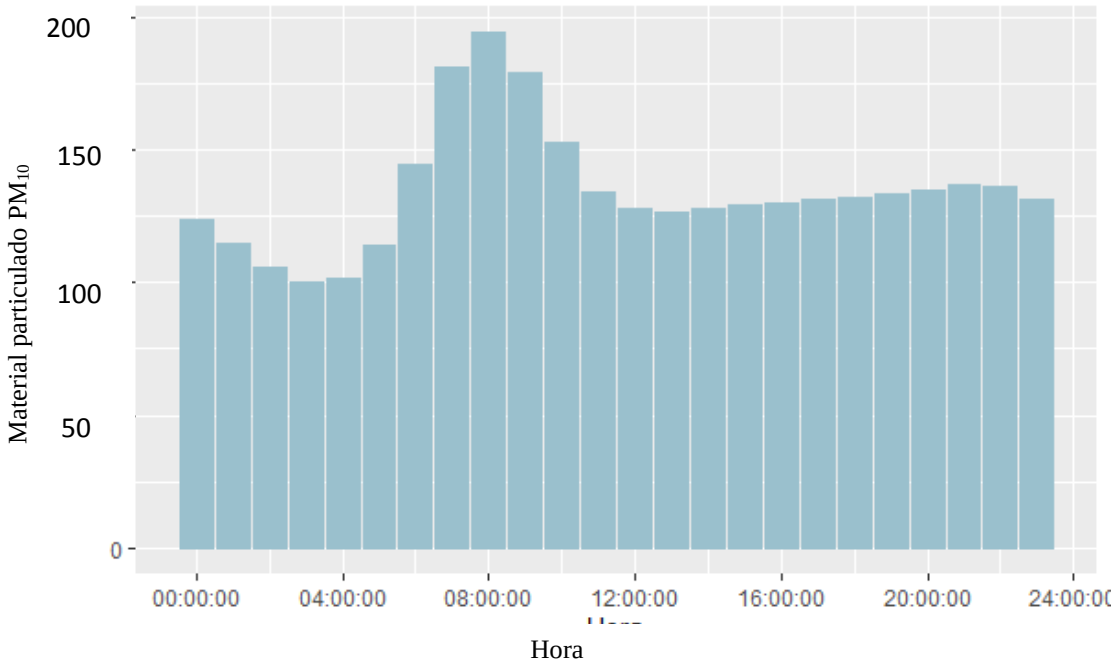
Según los resultados durante el día la variación de la altura de capa de mezcla es mayor y en las horas de la noche y madrugada se mantiene mucho más constante. Este fenómeno se le puede atribuir a varios factores pero principalmente se debe a la radiación solar, la cual calienta el ambiente y crea episodios de inestabilidad atmosférica y mayor turbulencia, aumentando la altura de capa y generando un escenario favorable para una mayor dispersión de los contaminantes. (Rodriguez, Quintero, Gonzalez, Cuesta, & Sanchez, 2015). Acorde con lo mencionado se presenta una mayor inestabilidad desde las 6:00 am hora en la que sale el sol y empieza a calentar el ambiente, hasta las 5:00 pm hora en la que ya no hay emisión de rayos pero se mantiene el calor en la atmosfera y a medida que la temperatura baja (hacia las 7:00 pm) se ve una tendencia más constante de la altura de capa de mezcla.

Esta estabilidad en las horas nocturnas se debe al fenómeno de inversión térmica por radiación en donde no existe un aporte energético por parte del sol, manteniéndose así y sin poder incrementar su altura de capa de mezcla. La disminución tan rápida que se presenta al final del atardecer según la figura 20, se debe precisamente a la pérdida de temperatura y la preparación que esta deja para que se desarrolle el proceso de inversión térmica en horas de la noche, lo que concuerda con (Nuñez, 2004) en su estudio del comportamiento de la altura de capa de mezcla.

Resultados del material particulado (PM_{10})

Según la recopilación de los datos arrojados por las estaciones de monitoreo de calidad del aire, se realizó la gráfica que muestra cómo se comporta la concentración a lo largo del día.

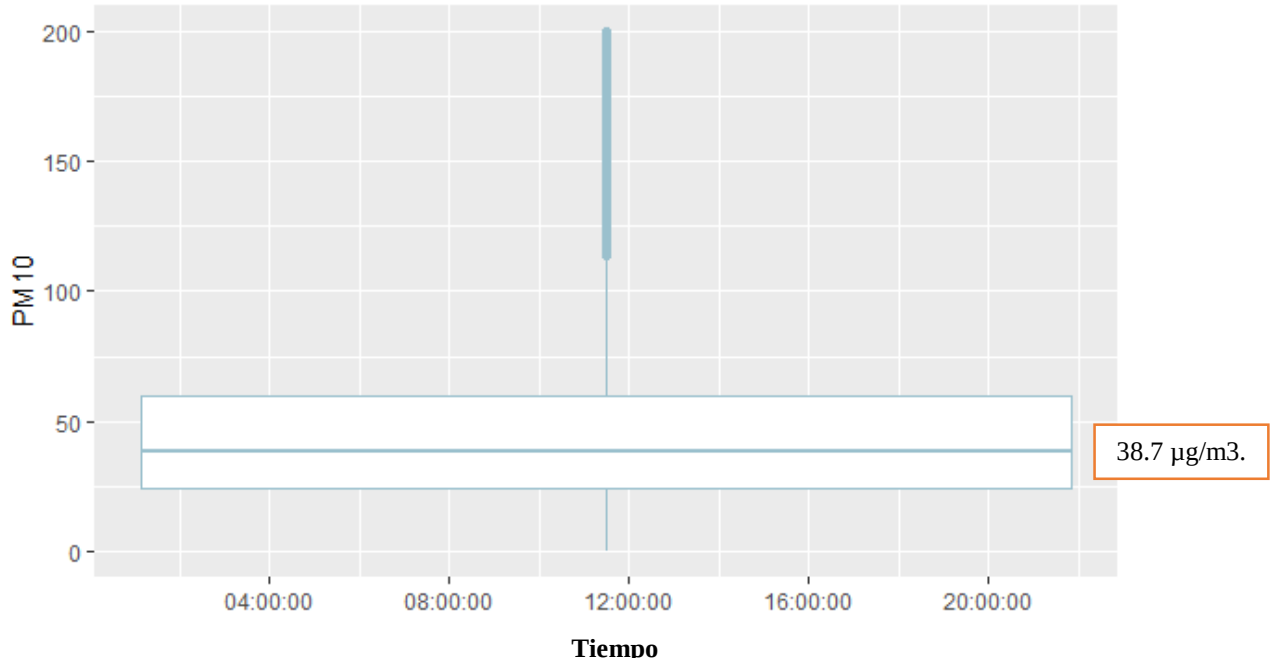
Figura 21. Comportamiento del material particulado (PM_{10}) en la ciudad de Bogotá por horas del día



Fuente: Autoras

Los resultados de la Figura 21, muestran que a partir de las 4:00 am la concentración del contaminante criterio (PM_{10}) empieza a aumentar considerablemente llegando a su máximo nivel a las 8:00 am; luego disminuye gradualmente hasta el mediodía, y después de la 1:00 pm se observa un incremento muy leve pero constante hasta las 10:00 pm, donde empieza a disminuir hasta las 4:00 am.

Figura 22. Comportamiento del material particulado (PM_{10}) en la ciudad de Bogotá por horas del día representado en un gráfico de caja de bigotes.



Fuente: Autoras

Los gráficos de cajas de bigotes permiten analizar en qué valores se concentra más la información, cuales son los valores atípicos y cuál es la mediana. En este caso se observa que los valores de concentración de material particulado PM_{10} se encuentran en un rango de 25 µg/m^3 hasta 60 µg/m^3, la mediana es de 38.7 µg/m3 y se reportan datos a típicos desde las 120 µg/m^3 hasta los 200 µg/m^3.

Análisis y Discusión: Concentración de material particulado (PM_{10})

La Resolución 2254 del 2017 indica que la exposición diaria de una persona al material particulado (PM_{10}) no debe superar los 75 µg/m^3 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), Sin embargo, se muestra en el presente estudio que la mayoría de concentraciones o datos típicos que ocurren en un día en los 6 años de seguimiento (2013-2018) no superan la norma, si se relaciona con la Figura 22. Sin embargo, se evidencia en la Figura 22, la cual muestra todos los valores que arrojó la red de monitoreo de calidad del aire, que existen datos críticos que se presentaron a lo largo de los diferentes días y estaciones, como concentraciones que superan los 100 µg/m^3 especialmente en horas de la mañana y como hora critica a las 8:00 am.

El alto incremento de la concentración en las mañanas se debe a actividades antropogénicas: la cantidad de vehículos circulando por la ciudad, tanto particulares, como buses del SITP, articulados, transporte de carga, rutas escolares, entre otros; también la puesta en funcionamiento de la mayoría de las fábricas e industrias las cuales emiten partículas contaminantes a la atmosfera. La consecuencia de que estas actividades inicien su funcionamiento casi al mismo tiempo genera un alza significativa en la concentración y el punto más crítico del día.

Por otro lado, según estudios realizados en el 2008 el promedio de concentración de PM_{10} en la ciudad era de 55 µg/m^3 (Vargas, Rojas, Pachón y Russell, 2012) y actualmente los resultados arrojan que el promedio es de 46 µg/m^3, lo que demuestra que los niveles de concentración en la ciudad han bajado a lo largo de los años a pesar del aumento poblacional que presenta la ciudad. Posiblemente se debe

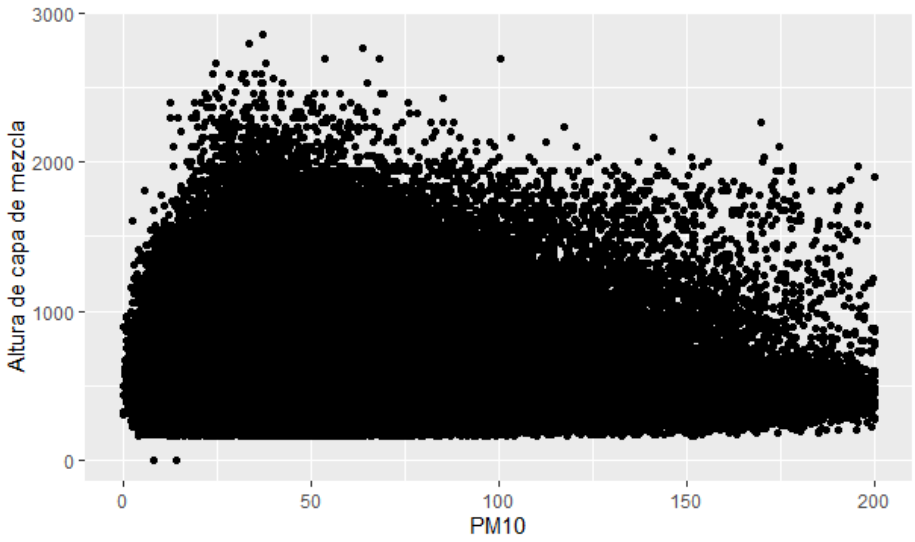
a que la calidad de los combustibles ha mejorado gracias a las nuevas tecnologías y al uso de sustancias que inhiben la emisión de diferentes contaminantes al ambiente; además existe un mayor control y uso de alternativas en las industrias como lo demuestra el informe de calidad del aire realizado por el IDEAM en el 2010. En este mismo documento se muestra que entre los años 2007 y 2010 se llegó a una mediana de 56 µg/m^3 y en el presente estudio se encuentra una mediana de 38.7 µg/m^3, lo que corrobora la información mencionada.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que a pesar de que no se están rompiendo los estándares propuestos en la reglamentación colombiana, si se sobrepasan los estándares propuestos por la OMS los cuales sugieren una exposición máxima de 20 µg/m^3 a 24 horas y 50 µg/m^3 anualmente OMS (2005). Se ve en este estudio el promedio diario sobrepasa por casi 19 µg/m^3 la sugerencia internacional, lo que puede ocasionar mayores problemas respiratorios en la salud de la población capitalina. (Cárdenas, 2009).

Resultados relación altura de capa de mezcla – material particulado (PM_{10}).

Se realizó una relación de los parámetros de altura de capa de mezcla y material particulado (PM_{10}), la cual arrojó como resultado que a mayor altura de capa de mezcla existe una menor concentración de material particulado, lo quiere decir que son inversamente proporcionales. También se observa que existen datos atípicos en ambos en el eje x como concentraciones muy altas que llegan hasta 200 µg/m^3 como se observa en la Figura 22.

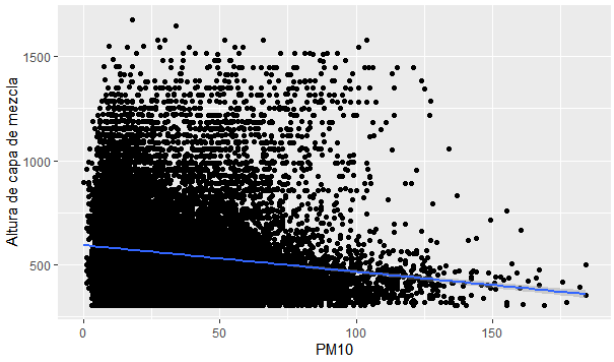
Figura 23. Comportamiento de la relación de material particulado (PM_{10}) con la altura de capa de mezcla en la ciudad de Bogotá.



Fuente: Autoras

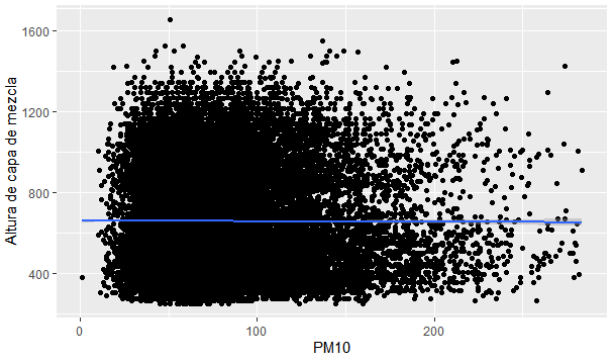
Además, se obtuvieron gráficas por cada una de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, en ellas se observa que presentan un comportamiento similar en cuanto a la relación de las variables de altura de capa de mezcla y material particulado. Sin embargo, muestran algunas variaciones de máximas alturas de mezcla y máximas concentraciones, lo que quiere decir que cada zona de la ciudad se ve influenciado por diferentes factores, lo que limita el crecimiento de la altura de mezcla y la dispersión de los contaminantes.

Figura 23. Relación altura de mezcla y PM_{10} en la estación de Centro de Alto Rendimiento



Fuente: Autoras

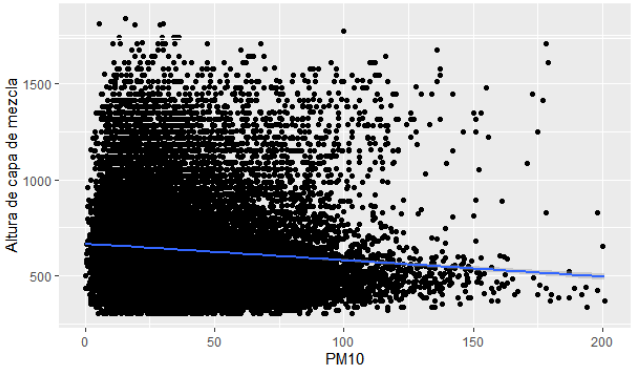
Figura 24. Relación altura de mezcla y PM_{10} en la estación de Carvajal



Fuente: Autoras

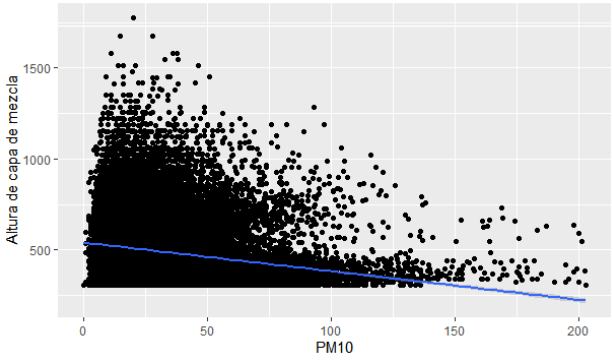
La mayoría de las gráficas en su línea de tendencia muestran que existe una relación inversamente proporcional entre la altura de capa de mezcla y el material particulado, en algunas de ellas la tendencia es mucho más marcada y se evidencia con mayor facilidad, como en: Centro de Alto Rendimiento (Ver Figura 23), Ferias (Ver Figura 25), Kennedy (Ver Figura 27) y Usaquén (Ver Figura 35), en otras se ve muy leve como en Carvajal (Ver Figura 24), Móvil 7 (Ver Figura 29), Puente Aranda (Ver Figura 30) y Tunal (Ver Figura 34). Sin embargo, todas muestran el mismo comportamiento. Por otro lado, las estaciones de MinAmbiente (Ver Figura 28), San Cristóbal (Ver Figura 31) y Suba (Ver Figura 32) presentan una línea de tendencia diferente.

Figura 25. Relación altura de mezcla y PM_{10} en la estación de las Ferias



Fuente: Autoras

Figura 26. Relación altura de mezcla y PM_{10} en la estación de Guaymaral



Fuente: Autoras

Figura 27. Relación altura de mezcla y PM_{10} en la estación de Kennedy

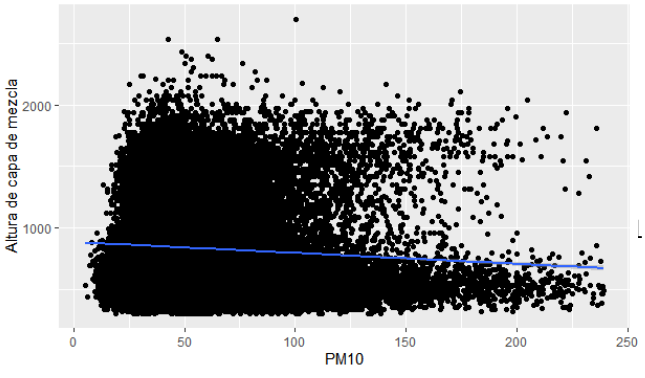
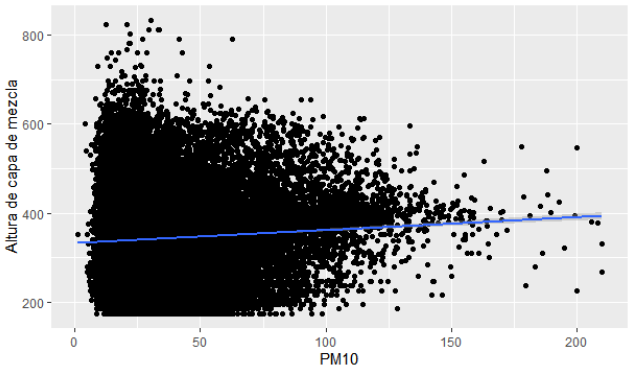
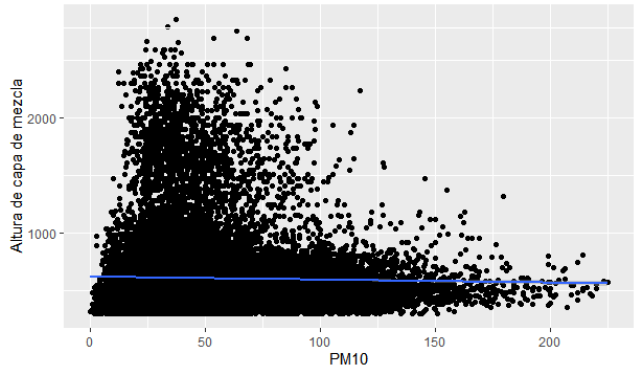


Figura 28. Relación altura de mezcla y PM_{10} en la estación de MinAmbiente



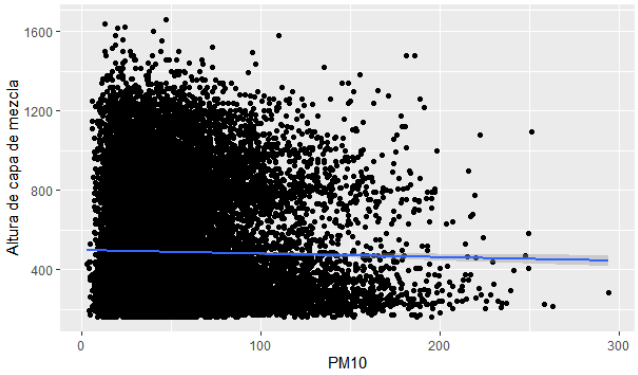
En las estaciones de Suba (Ver Figura 32) y San Cristóbal (Ver Figura 31), se determinó mediante la revisión de los datos en Excel, que el comportamiento se presenta por la presencia de diferentes datos atípicos de concentración de material particulado, pero teniendo en cuenta la dispersión de los puntos en general se ve que existen mayores concentraciones a menores alturas lo que corrobora lo mostrado en las demás gráficas. En Min Ambiente se observa un comportamiento totalmente diferente, en donde la línea de tendencia y dispersión de los datos presenta una gran diferencia, lo que puede generarse por las condiciones meteorológicas de la zona.

Figura 29. Relación altura de mezcla y PM_{10} en la estación de Móvil 7



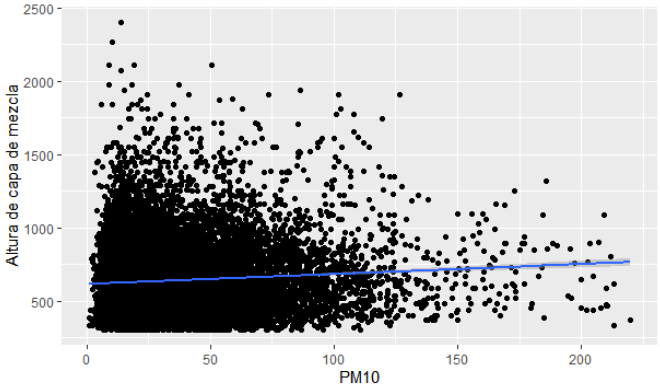
Fuente: Autoras

Figura 30. Relación altura de mezcla y PM_{10} en la estación de Puente Aranda



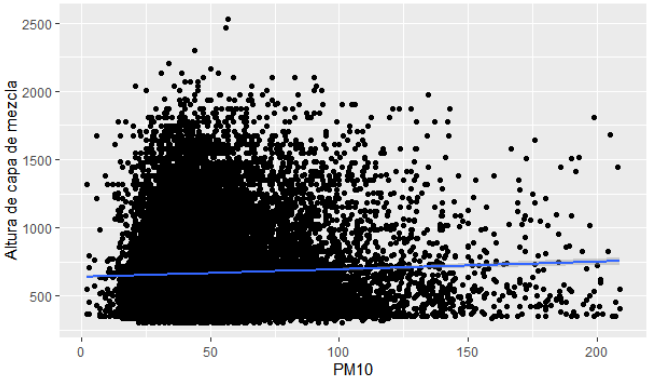
Fuente: Autoras

Figura 31. Relación altura de mezcla y PM_{10} en la estación de San Cristóbal



Fuente: Autoras

Figura 32. Relación altura de mezcla y PM_{10} en la estación de Suba

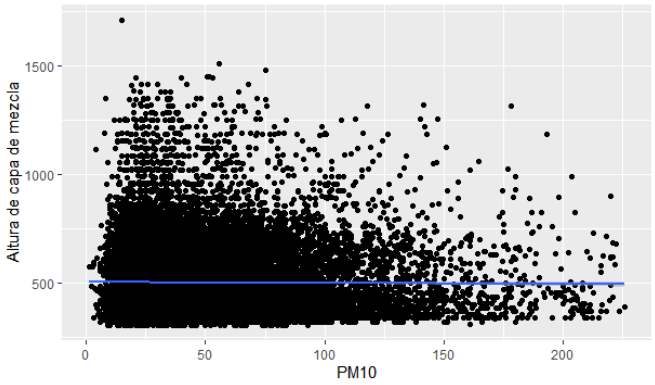


Fuente: Autoras

Las estaciones que presentan menores concentraciones de material particulado son Centro de Alto Rendimiento (Ver Figura 23), Ferias (Ver Figura 25), Guaymaral (Ver Figura 26), San Cristóbal (Ver Figura 31) y Usaquén (Ver Figura 35), los cuales muestran la relación inversa más marcada exceptuando la estación de San Cristóbal. Las que muestran mayor concentración de PM_{10} son Kennedy (Ver Figura 27), Puente Aranda (Ver Figura 30), Tunal (Ver Figura 34) y Carvajal (Ver Figura 24). Sin embargo, la mayoría de datos de esta variable en todas las estaciones se encuentran en un límite de 200 $\mu g/m^3$ y varios presentan una dispersión de datos no uniformes, lo que posiblemente se presente por el rápido aumento de concentración generado en las mañanas o por

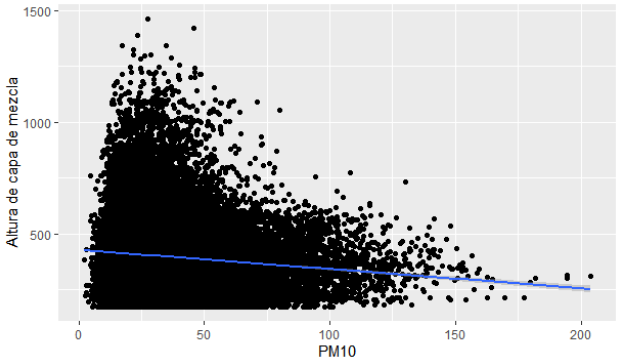
condiciones meteorológicas que se presenten atípicamente o que varíen con un comportamiento no uniforme.

Figura 34. Relación altura de mezcla y PM_{10} en la estación el Tunal



Fuente: Autoras

Figura 35. Relación altura de mezcla y PM_{10} en la estación de Usaquén



Fuente: Autoras

Análisis y Discusión: relación de la concentración de material particulado (PM_{10}) con la altura de capa de mezcla.

La altura de capa de mezcla es un factor que influye directamente en la dispersión de contaminantes atmosféricos, en este caso de material particulado PM_{10}, ya que representa el volumen de aire que tienen para dispersarse (Nuñez, 2004), es decir a mayor volumen de aire menor concentración de PM_{10}; esta situación se observa en la Figura 23, la cual muestra que a concentraciones muy elevadas hay una altura de capa de mezcla baja y a concentraciones bajas o medias la altura aumenta. Cabe resaltar que existen varios factores que afectan esta lógica, por ejemplo: hora del día, condiciones meteorológicas como: velocidad y dirección del viento, temperatura, nubosidad, entre otros. Sin embargo el comportamiento general o significativo es una relación inversamente proporcional.

Una situación que se presenta en la ciudad de Bogotá es que en horas de la mañana se emiten altas concentraciones de contaminantes y como se ha mencionado anteriormente la altura de capa de mezcla apenas empieza a aumentar a las 6:00 am por la emisión de los rayos del sol, lo que hace que estas horas sean más peligrosas en cuanto a la salud de los habitantes ya que hay una menor dispersión de ellos y es cuando más están expuestos.

Desde las 9:00 am la concentración de material particulado empieza a disminuir cuando la altura de capa aumenta progresivamente y a partir del mediodía la concentración mantiene un promedio con pequeñas variaciones mientras que la altura de capa de mezcla continúa aumentado. En el momento en que esta empieza a disminuir por la falta de radiación solar la concentración empieza a aumentar un poco debido a la disminución de la altura de capa de mezcla, pero tampoco se evidencia un aumento excesivo ya que también en las horas nocturnas se disminuyen las emisiones.

Por otra parte, se encontraron huecos de información dentro de la base de datos que proporciona la Red de Monitoreo de Calidad del Aire (RMCAB), algunos de los más importantes son: temperatura, presión atmosférica, concentración de material particulado PM_{10} y velocidad del viento. Para tener una consistencia en los resultados se eliminaron los días que contenían algún faltante de información. En total se eliminaron 8.720 días de 25.632 lo cual arroja un porcentaje de 34.01% de días eliminados

del total de días obtenidos en las 12 estaciones de monitoreo; esta situación puede afectar un poco los resultados obtenidos, ya que la información podría variar si se tuviera el 100% de los datos.

Unas de las posibles causas sobre los vacíos de la información, puede atribuirse a fallas técnicas de los aparatos, que hayan impedido la lectura de las variables o por un error humano, lo que quiere decir que no se están haciendo lecturas el 100% de los días del año; esto puede ser crítico en momentos en donde la concentración represente un riesgo considerable para la salud humana y no se genere un reporte de la ella, ocasionando que no se tomen medidas con respecto a esto.

A continuación, se mostrarán los resultados referentes al segundo objetivo del proyecto el cual corresponde a: *Comparar la variación de la altura de capa de mezcla en techos urbanos con y sin vegetación, teniendo en cuenta el cambio en el albedo.*

Ya que el parámetro a estudiar en este proyecto es el albedo, se realizó la revisión bibliográfica para identificar el valor correspondiente a las condiciones de techos verdes, como se expresa en la fase 2, en donde se obtuvieron los resultados, como se muestra en la Tabla 8:

Tabla 8. Albedo correspondiente a las condiciones de techos verdes

Condiciones	Valor de la bibliografía	Fuente
Techos verdes	0,7-0,85	Garrison, 2012
Techos verdes	0,7-0,85	Acks, 2006

Fuente: Autoras

Debido a que la revisión bibliográfica no arrojó un valor específico sino en los dos casos, el mismo rango, se decide tomar como referencia el valor más bajo, ya que indicaría las condiciones menos óptimas de los techos verdes y sin embargo, podría presentar un mejor resultado con un albedo más alto.

Los resultados obtenidos al realizar los cálculos de la altura de capa de mezcla con y sin techos verdes en horas diurnas teniendo en cuenta el parámetro a estudiar se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Variación de la altura de capa de mezcla sin y con techos verdes a cada hora del día en condiciones diurnas.

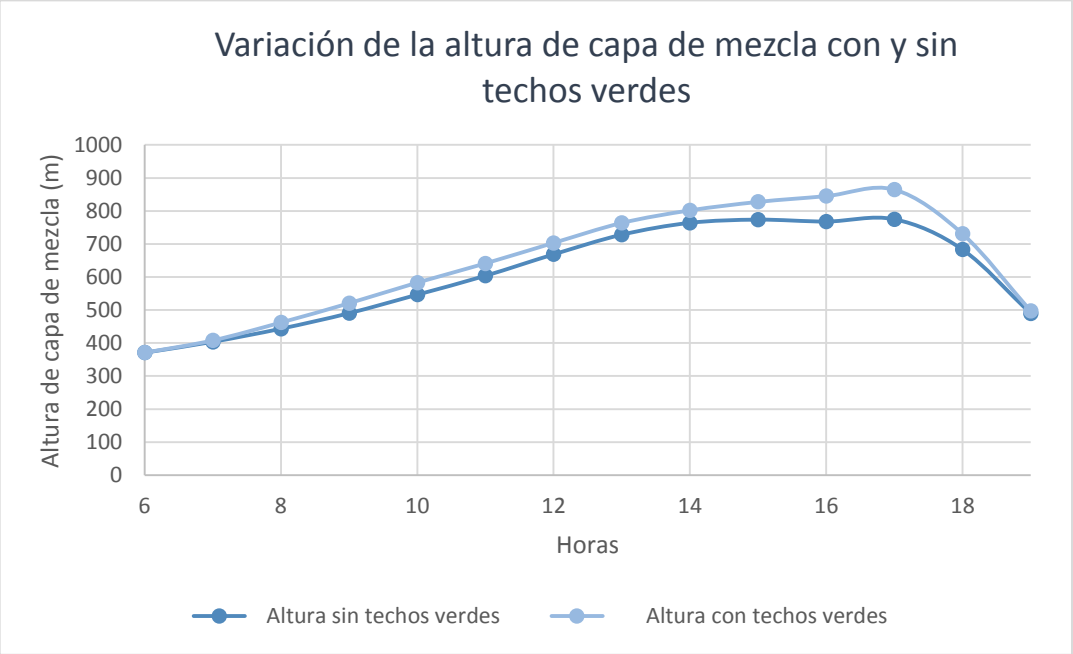
Hora	Altura sin techos verdes	Altura con techos verdes	% de variación	Diferencia en metros(m)
6	370.8	370.8	0.00%	0
7	403.7	408.02	1.06%	4.3
8	443.4	462.1	4.04%	18.7

9	490.4	520.5	5.79%	30.1
10	546.5	582.9	6.25%	36.4
11	603.7	641.1	5.83%	37.4
12	668.5	703.2	4.94%	34.7
13	728.05	763.6	4.65%	35.5
14	763.9	801.7	4.71%	37.7
15	773.7	827.4	6.49%	53.7
16	768.0	844.9	9.10%	76.8
17	774.9	864.6	10.37%	89.7
18	683.1	730.7	6.51%	47.5
19	489.5	497.3	1.56%	7.8

Fuente: Autoras

Las horas que presentan un mayor porcentaje de variación son a las 16:00 y a las 17:00 con unos porcentajes de 9,10% y 10,37% respectivamente, las que menor variación presentan son a las 7:00 y a las 19:00 con un 1,06% y 1,56% respectivamente y el momento más crítico o que no presenta ningún cambio es a las 6:00.

Figura 36. Variación de la altura de capa de mezcla con y sin techos verdes



Fuente: Autoras

Para tener una mejor visualización de los resultados se realizó la Figura 36, que permite determinar que sí existe un aumento de la altura de capa de mezcla cuando existen techos verdes; es decir que se puede afirmar que existe una variación entre las dos situaciones estudiadas y, entonces, es favorable el uso de techos verdes en la ciudad para disminuir la concentración de PM_{10}, hecho que describen los resultados del primer objetivo de este estudio, al mostrar la relación inversa de la altura de capa de mezcla con la concentración de material particulado.

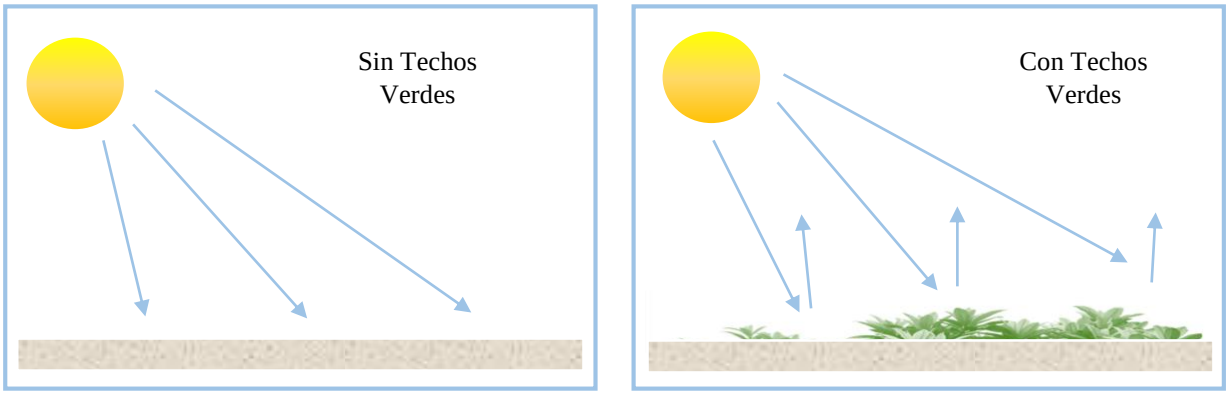
Análisis y discusión.

En condiciones diurnas las emisiones de PM_{10} son continuas debido a las actividades cotidianas que realiza la población de la ciudad de Bogotá y, por este motivo, se encuentra más expuesta a la inhalación de estas partículas y sus consecuencias, como las describe (WHO, 2013), dentro de las que encuentran la morbilidad respiratoria y cardiovascular, agravamiento del asma, aumento en los ingresos hospitalarios y mortalidad por enfermedades cardiovasculares y respiratorias y por cáncer de pulmón.

Debido a que en condiciones nocturnas se encuentra una estabilidad atmosférica, una menor emisión de PM_{10} y que en la zona en donde se encuentra ubicada la ciudad no existen estaciones, se decidió tomar como referencia las horas diurnas para el estudio, ya que representaban los momentos más significativas de exposición como se mencionó anteriormente y tomando como referencia el parámetro a estudiar (albedo) que está relacionado con los rayos emitidos por el sol, se estudiaron las horas de 6:00 am a 19:00 pm.

Se evaluó el cambio existente a las 19:00 pm (periodo nocturno) debido a que se encontró una variación significativa en comparación a los demás momentos nocturnos; esto puede atribuírsele a que aún se encuentran episodios de turbulencia en el ambiente gracias a la proporción el aire caliente que continúa en la atmosfera. Sin embargo, a medida que la temperatura disminuye la estabilidad atmosférica se hace mayor y la altura de capa de mezcla baja.

Figura 37. Comparación de las condiciones de reflexión sin techos verdes y con techos verdes



Fuente: Autoras

La Figura 37 explica como los techos verdes sirven para generar una reflexión de los rayos emitidos por el sol y aunque una proporción es absorbida por la planta, este calor no se queda sobrecalentando el asfalto de la mayoría de las superficies existentes en la ciudad (Minke, 2009). Este fenómeno ayuda

ya que disminuye la temperatura de la porción de aire más cercana al suelo (gradiente adiabático) evitando que ésta se sobrecaliente y evitando que supere el calor del gradiente ambiental (lo que generaría una disminución en la altura de capa de mezcla y conllevaría a que se desarrollaran fenómenos de inversión térmica).

En los resultados se observa que, así como la altura de capa de mezcla va aumentando gradualmente en las horas diurnas, también aumenta el nivel de la misma manera cuando hay techos verdes; este hecho se puede atribuir ya que al salir el sol aumenta la temperatura y presión del fluido (aire) aumentando así su flotabilidad, lo que hace que se aumente la altura de capa de mezcla naturalmente. Por otro lado hay que tener en cuenta que el aumento natural de la temperatura ayuda a subir la altura de mezcla, pero el calentamiento de una porción de aire, que no genera intercambio de calor con la atmosfera puede ser negativo ya que invierte el comportamiento normal del gradiente ambiental generando inversión térmica.

Se ve entonces en la Tabla 9, que en horas de la mañana existe una diferencia de aproximadamente 4 metros de altura y en las horas de la tarde está llega a 89 metros, esto sucede ya que a medida que pasa el día existe una mayor reflexión de los rayos y una menor temperatura en las capas bajas de aire (las más cercanas a la ciudad) haciendo que no se generen porciones de aire con mayor temperatura que el gradiente que presenta la atmosfera en su comportamiento natural y por ende que la tendencia al aumento de la altura de mezcla con techos verdes sea cada vez mayor y en consecuencia la dispersión de contaminantes, disminuyendo la concentración del material particulado. Hay que tener en cuenta que es necesario que exista un aumento de temperatura considerable en la atmosfera para que empiece a aumentar la altura de mezcla por ello se muestra que a las 6: 00 am no hay un incremento considerable de la temperatura.

Hay que tener en cuenta que la altura de capa de mezcla se ve influenciada también por diferentes factores meteorológicos y su comportamiento varía según estos mismos, en el estudio solo se varió uno de ellos (albedo) y se vio que efectivamente los techos verdes si funcionan para aumentar la altura de capa de mezcla; muy posiblemente los factores que no se están teniendo en cuenta y que también se ven afectados por la presencia de techos verdes podrían aumentar aún más esta altura o podrían influir en el comportamiento de la misma.

Uno de estos factores es la velocidad del viento, la cual se usa para el cálculo de la altura de capa de mezcla. Dentro de la Tabla 9 se observa que en horas del medio día hay una pequeña disminución del porcentaje de diferencia de sin techos verdes y con techos verdes, según los estudios meteorológicos realizados por el IDEAM en la mayoría de los meses la velocidad del viento disminuye entre el periodo de 11:00 am a las 13:00 pm (IDEAM, 2009) lo que concuerda con la disminución vista en el estudio, lo que podría ser la explicación del patrón de disminución en esas horas del día.

Teniendo en cuenta los resultados que arroja el segundo objetivo se logra identificar que a pesar de que los porcentajes de variación de la altura de capa de mezcla con y sin techos verdes en condiciones diurnas, no son muy altos, ya que el más elevado es de 10, 37%, al realizar esa diferencia en metros, ese porcentaje representa 89,70 metros, lo que demuestra un aumento significativo en la altura, por lo tanto, se realiza la fase 3 del proyecto, descrita en la metodología.

Finalmente, para cumplir con el cumplimiento de los objetivos, se desarrolló el tercer objetivo, que plantea: *Identificar las zonas de Bogotá en donde el albedo genera condiciones para un uso viable de los techos verdes en la ciudad*

Como resultado de lo anterior, se obtiene la Tabla 10, la cual muestra la diferencia de la altura de capa de mezcla en condiciones diurnas con y sin el uso de techos verdes, para cada una de las estaciones estudiadas.

Tabla 10. Diferencia en la altura de capa de mezcla con y sin techos verdes, en condiciones diurnas

Estaciones	Altura de capa de mezcla (m)		PM_{10} ($\mu g/m^3$)	Diferencia de la altura de capa de mezcla (m)
	Sin techos verdes	Con techos verdes		
Min Ambiente	391,5	586,3	31,1	194,7
Centro alto rendimiento	604,3	640,6	28	36,3
Guaymaral	559,6	588,6	27	28,9
Kennedy	986,6	988,1	58	1,5
Las Ferias	674,2	797,9	30,55	123,7
Móvil 7	621,4	625,2	48,1	3,7
Usaquén	441,1	618,9	32,3	177,75
Tunal	556,5	577,4	40	20,9
San Cristóbal	695,7	690,9	26,8	-4,8
Suba	673,9	806,8	46	132,8
Carvajal	786,9	687,1	78	-99,8
Puente Aranda	602,8	485,3	45	-117,5

Fuentes: Autoras

Resultados sobre la concentración de material particulado (PM_{10})

Después de realizar la mediana por estación de la concentración de material particulado (PM_{10}) en condiciones diurnas, se obtuvo que 10 de las 12 estaciones presentan valores entre 26 $\mu g/m^3$ y 48 $\mu g/m^3$, Por otro lado, se evidencia que las estaciones de Carvajal y Kennedy, presentan concentraciones fuera del rango mencionado, siendo más elevadas con una concentración de 78 $\mu g/m^3$ y 58 $\mu g/m^3$ respectivamente.

Estas elevadas concentraciones de los resultados que representan valores alejados de los obtenidos en las demás estaciones, coinciden con lo citado por (García, 2018) del informe anual de calidad el aire

2017 de la Secretaría Distrital de Ambiente, donde afirman que, las concentraciones elevadas de material particulado del año 2017 estuvieron en las estaciones del suroccidente de la ciudad, es decir, las ubicadas en la localidad de Kennedy (Kennedy y Carvajal). Aseguran también, que en estas zonas se presentan concentraciones altas de material particulado, asociadas a las emisiones de las industrias, al polvo que se re-suspende por el mal estado de las vías y a la quema de basura.

Resultados diferencia de altura de capa de mezcla

Para la identificación de zonas donde el cambio en el albedo genera un cambio relevante en la altura de capa de mezcla, se tuvo en cuenta la diferencia de las alturas, como se muestra en la Tabla 10, dando como resultado que existen estaciones entre las se encuentran la del Ministerio de Ambiente y Usaquén, con un incremento de 194,7 metros y 177, 7 metros, respectivamente, que un albedo mayor, produce un aumento significativo en la altura, es decir, que el material particulado podría dispersarse con mayor facilidad. De igual forma, las estaciones de Suba (132,8 metros) y Las Ferias (123,7 metros) presentan variaciones representativas, que también podrían considerarse como zonas donde el uso techos verdes pueden generar una mejor calidad del aire.

Las estaciones de Móvil 7 y Kennedy, a pesar de presentar incrementos en su altura, no señalan una diferencia representativa, ya que para la primera es de 3,7 metros y para la segunda de 1,5 metros. Por otra parte, tres estaciones muestran un efecto negativo del incremento de la altura de capa de mezcla, las cuales son: Puente Aranda ubicada en la localidad de Puente Aranda con -117,6 metros, Carvajal ubicada en la localidad de Kennedy con -99,8 m y la estación de San Cristóbal en la localidad con este mismo nombre, con -4, 8 m.

Análisis y discusión

Para el caso de las zonas con diferencia significativa de la altura, se observa una respuesta positiva e importante en el cambio de la variable relacionada al albedo. Por otra parte, las zonas con baja o diferencia negativa en la altura, presentan efectos insignificantes o adversos a la modificación de este parámetro. Sin embargo, como se señala en la Fórmula 1 y en el Anexo 1, donde se relacionan diferentes variables que intervienen en el cálculo de la altura de capa de mezcla, es decir, en su comportamiento, el albedo es solamente uno de los parámetros que influyen. Dicho de otra manera, no significa que el cambio del albedo por el uso de techos verdes sea la única variable que puede afectar en el aumento o disminución de la altura de capa de mezcla. Entre estas variables que afectan directamente en el cálculo, se encuentran: la temperatura, la velocidad del viento, la radiación solar, la presión atmosférica y la nubosidad, adicionalmente, existen otras variables que, aunque no están directamente relacionadas con las fórmulas, si influyen en su comportamiento y en la dispersión de los contaminantes, como la dirección del viento, la humedad relativa y la precipitación. Un ejemplo de las interacciones de otras variables meteorológicas, lo concluye (Meneses, Iral, 2017) en su estudio situado en Kennedy, donde exponen que la localidad es una zona vulnerable, debido a la expansión urbana, la confluencia de los vientos hacia este lugar, generan un aumento en las concentraciones de los contaminantes atmosféricos y cambios que influyen en el comportamiento de la altura de capa de mezcla a lo largo del día.

Sin embargo, a pesar de que existan estas interacciones y unas variables dependan y estén estrechamente relacionadas entre sí, el alcance de esta investigación no genera este tipo de análisis,

ya que está enfocado netamente a la respuesta de la altura de capa de mezcla con el cambio del albedo, que es lo que se observa en la Tabla 10.

Dicho lo anterior y con los resultados obtenidos se evidencia que en la ciudad es factible implementar los techos verdes, sin embargo, la gran extensión de la ciudad y la distribución de la población hace que se creen microclimas y diferentes condiciones en varios puntos de la ciudad que pueden afectar el uso de tecnologías verdes en las áreas específicas.

8. Conclusiones

Posterior al desarrollo del proyecto, se concluye que existe una relación inversamente proporcional entre la altura de capa de mezcla y la concentración de material particulado PM_{10} como lo afirman la teoría, ya que amplía el volumen de la dispersión del contaminante. Sin embargo, al estudiar el periodo diurno, se evidenció que la variabilidad de la altura de mezcla es mucho mayor que en la noche debido a la turbulencia que causa la radiación solar, mientras que en el periodo nocturno existe mayor estabilidad atmosférica por lo que no se presentan cambios significativos en la altura de capa. Hay que tener en cuenta que los estudios de años anteriores se evidencia una disminución en el promedio de la concentración de material particulado (PM_{10}) en la ciudad, la cual en términos generales ha causado que no se sobre pase el limite permisible de 50 $\mu g/m^3$ establecido en la norma colombiana (Resolución 2254 del 2017), a pesar de ello la información presentada en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire, demostró concentraciones atípicas en llegando hasta valores de 200 $\mu g/m^3$, teniendo en cuenta que este fenómeno no se presentó con alta regularidad, sino en pocos de los días estudiados.

Por otra parte, el albedo es un factor importante que influye en el comportamiento de la altura de capa de mezcla, en el caso de los techos verdes al tener un mayor albedo reducen la absorción del calor en las superficies próximas al suelo, disminuyendo la temperatura del ambiente y por ende también la del gradiente adiabático, generando la disminución de episodios de inversión térmica. Lo que quiere decir, que los techos verdes son una opción viable para la dispersión de contaminantes en la mayoría de las localidades de la ciudad de Bogotá y gracias a los demás beneficios que este presenta, representaría la solución a un problema de salud pública como lo es la contaminación del aire que genera enfermedades respiratorias y costos económicos. Sin embargo, el estudio de un solo factor (albedo) no generar un panorama global de la eficiencia de los techos verdes los cuales son influenciados por otras condiciones meteorológicas que varían según las zonas de la ciudad.

9. Recomendaciones

★ El alcance del proyecto de investigación solo estudia una variable, se recomienda dar continuidad al presente estudio, evaluando las variables meteorológicas que influyen directa e indirectamente en la variación de la altura de capa de mezcla, para conocer a mayor profundidad la eficiencia de los techos verdes y así poder mejorar la calidad de vida de la población capitalina

- ★ Debido a que el estudio solamente se basa en el parámetro del albedo para determinar la variación de la altura de capa de mezcla, se hace necesario evaluar la influencia de variables como: la temperatura, la velocidad del viento, radiación, nubosidad entre otras, para obtener un resultado más completo y certero sobre la eficiencia de los techos verdes en el aumento de la altura de capa de mezcla en la ciudad de Bogotá. Lo anterior, priorizando la localidad de Kennedy, ya que las estaciones de Carvajal y Kennedy, presentan los niveles más altos de contaminación por material particulado (PM_{10}), por lo que necesitan una intervención de las autoridades. Una de las posibles soluciones, es la implementación de los techos verdes en la localidad, sin embargo, se debe tener como referencia un estudio detallado de las condiciones meteorológicas de la zona y su influencia con el cambio del albedo.

- ★ Se evidencia que la Red de Monitoreo de Calidad del aire de Bogotá (RMCAB), no presenta información uniforme, ni completa de todas las variables, además no hay zonas que no cuentan con estaciones cercanas que permitan monitorear la calidad del aire en la zona. Por lo que es recomendable, tener un margen de error al realizar estudios basados en la RMCAB, además se sugiere a la Secretaría Distrital de Ambiente, tener mayor control y mantenimiento de los equipos de las estaciones.

- ★ Después de realizar estudios específicos de las demás variables que pueden influir en la eficiencia de los techos verdes, es recomendable realizar de forma experimental un diseño de los techos verdes, teniendo en cuenta los sustratos adecuados, la vegetación óptima y demás.

- ★ Debido a la correlación que tiene el proyecto con la Salud Ambiental y su enfoque social hacia la reducción de enfermedades respiratorias y mejoramiento de la calidad de vida, se recomienda realizar estudios epidemiológicos, cuyo fin sea analizar la relación entre el aumento de la altura de capa de mezcla y uso de techos verdes, con problemas de salud, la incidencia y prevalencia de enfermedades como Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica-EPOC e Infección Respiratoria Aguda-IRA, entre otras.

10. Referencias Bibliográficas.

Acks, K. (2006*). Green Roofs in the New York Metropolitan Region: Research Report*. Columbia University Center for Climate Systems Research NASA Goddard Institute for Space Studies.

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. *(2013). Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés).* EPA en español. Estados Unidos.

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2017). *Ubicación de la ciudad.* Tomado de: http://www.bogota.gov.co/ciudad/ubicacion

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2018). *Calidad del aire y salud urbana.* Salud Capital. Secretaría Distrital de Salud. Tomado de: http://www.saludcapital.gov.co/DSP/Boletines%20temticos/ASIS/2018/Calidad_del_Aire_y_Salud_Urbana.pdf

Alpuche, M. (2010). *Análisis térmico de viviendas económicas en México utilizando techos verdes*. Estudios sobre Arquitectura y Urbanismo del Desierto. Pg 57-69

Ángel Gutiérrez, J. (2012). *La correcta utilización de los promedios*. Revista Universidad EAFIT, 31(98), 77-86.

Arango, J. (2009). *Calidad de los Combustibles en Colombia*. Revista de Ingenieria- Universidad de los Andes, 100-108.

Arciniégas, G. (2011). *Diagnóstico y control del material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10*. Revista Luna Azul No. 34, Pg 195-213

Banco Mundial (BM) (2007*). Prioridades Ambientales para la Reducción de la Pobreza en Colombia: un análisis ambiental del país para Colombia*. Versión en español: Editorial Mayol.

Bedoya, J., & Martínez, E. (2009). *Calidad del aire en el Valle de Aburrá*. Universidad Nacional de Colombia, 7-15.

Bogotá, A. M. (2019). *Alcaldía Local de Usaquén*. Obtenido de http://www.usaquen.gov.co/mi-localidad/mapas

Cárdenas, H. (2009). *Consideraciones del Material Particulado en Bogotá. Alternativas tecnológicas de medición de la calidad del aire*. Con-ciencias, 108-118.

Castañeda, D. (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.

Cohen, A. (2017). *Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015.* The Lancet. Vol 389. Pg 1907-1918.

DANE. (2019). *Población por edad y sexo*. Obtenido de https://geoportal.dane.gov.co/midaneapp/pob.html

Departamento Nacional de Planeación. (2014). *Salud Pública.* Tomado de: https://www.dnp.gov.co/programas/desarrollo-social/subdireccion-de-salud/Paginas/salud-publica.aspx

Departamento Nacional de Planeación. (2018). Valoración económica de la degradación ambiental en Colombia. Obtenido de Departamento Nacional de Planeación: https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/Valoraci%C3%B3n%20Econ%C3%B3mica%20Degradacion%20ambiental_SD.pdf

Duque, J. F. (2016). *Sobre los efectos de la Contaminación Atmosférica en la Salud.* Bogotá: Universidad EAFIT.

Gaitán, M., Cancino, J., & Behrentz, E. (2007*). Análisis del estado de la calidad del aire*. Universidad de los Andes, 82-92.

García, D. (2018). *Calidad del aire y políticas públicas en Bogotá: Una historia de injusticia ambiental*. Fundación Heinrich Boll Stiftung Colombia. Índices verdes No. 14

Garrison, N. (2012*). Looking Up: How Green Roofs and Cool Roofs Can Reduce Energy Use*, Address Climate Change, and Protect Water Resources in Southern California. NRDC Report. Emmett Center On Climate Change and the Environment

GBD. (2015). *Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015*. The Lancet. Vol 388. Pg 1659-1754.

Franco, J., Rojas, N., Sarmiento, O., Hernández, J., Zapata, E., Maldonado, A. Behrent, E. (2009*). Niveles de material particulado en colegios distritales ubicados en vías con alto tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá: estudio piloto*. Bogotá: Universidad de Antioquia.

Franco, J. (2012). *Contaminación atmosférica en centros urbanos. Desafío para lograr su sostenibilidad: caso de estudio Bogotá*. Revista EAN. Bogotá.

Ian L. Pepper, Charles P. Gerba, Mark L. Brusseau. (2006). *Environmental and Pollution Science*. Second Edition. Elsiever. Pg 353.

Ibañez, R. (2008). *Techos vivos extensivos: Una práctica sostenible por descubrir e investigar en Colombia.* Alarife: Revista de arquitectura. No 16. Pg 21. Colombia.

IDEAM. (2009). *Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelito.* Bogotá.

IDEAM. (2010). *Calidad del Aire en Colombia.* Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2001). *Estabilidad atmosférica y altura de capa de mezcla. Convenio DAMA – IDEAM No. 183/2001*. Tomado de: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:b7qIMuItss4J:documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005604/Auditoria/Anexo_16_Capacitacion/IDEAM/Meteorologia/Micrometeorologia(mayo24)/Presentacion/Estabilidaad.ppt+&cd=3&hl=es&ct=clnk&gl=co

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). *Radiación solar. Tiempo y clima*. Tomado de: http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). Índice de la Calidad del Aire (ICA). Tomado de: http://sgi.ideam.gov.co/documents/24155/125494/35-HM+%C3%8Dndice+calidad+aire+3+FI.pdf/6c0c641a-0c9a-430d-9c37-93d3069c595b

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). Organigrama. Tomado de: http://www.ideam.gov.co/web/entidad/organigrama

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). *Glosario: Albedo*. Tomado de: http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario

Ingetec. (2017*). Modelo de dispersión de contaminantes "Estructuración técnica de la primera línea del metro de Bogotá (PLMB)", ubicado en el área urbana de Bogotá, departamento de Cundinamarca, para la empresa Ingetec S.A.* Consultor: K2 Ingeniería S.A.S.

Instituto Nacional de Salud, Observatorio Nacional de Salud. (2018). *Carga de Enfermedad Ambiental; Décimo Informe Técnico Especial.* Pg 66-100. Bogotá, D.C.

Jiménez, V., Correa, S., Romero, N., & Rodríguez, A. (2012). *Terrazas verdes, tendencia en Bogotá.* Repositorio Politécnico Grancolombiano

Kristin, G., & Bradley, R. (2006*). The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development.* HortScience, 41, 1276-1285.

Meneses, T. Iral, P. (2017). *Análisis espacio-temporal de variables que inciden en la generación de isla de calor urbana en la localidad de Kennedy*. Universidad Santo Tomás. Bogotá

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). *Resolución 909 del 2008.* República de Colombia

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental.* Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución 2254 del 01 de Noviembre de 2017*. Art 2. Colombia.

Minke, G. (2009). *Techos Verdes.* Montevideo: Fin del Siglo.

Moreno, H., Alpuche, G., Ochoa, M., & Irene, M. (2011). *Análisis Térmico de viviendas económicas en México utilizando techos verdes*. Obtenido de https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/11006967/esaud3-cap3.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1541096322&Signature=1mn1%2FNLs3RIiKKYNcvne0r0%2F9ho%3D&response-content disposition=inline%3B%20filename%3DAnalisis_termico_de_viviendas_

National Aeronautics and Space Administration. (2012). *NASA & Green roof research*. Utilizing New Technologies to Update an Old Concept

Nuñez, S. (2004). *Altura de la capa de mezcla : caracterización experimental y aplicación de un modelo meteorológico para el estudio de su evolución diurna.* Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Obtenido de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=8651B21A162AA88A943A1AF3782ADF70?sequence=1

Organización Mundial de la Salud. (2018). *Calidad del aire y salud*. Tomado de: http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

Organización Panamericana de la Salud. (S.F.). *Circulación Vertical y Estabilidad Atmosferica*. Obtenido de http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/lecc4/lecc4_b.html

Pan American Health Organization. (2015). *Health Indicators: Conceptual and operational considerations*. World Health Organization regional Office for the Americas. Pg 26-31

Pug, T. (2012). *Effectiveness of Green Infrastructure for Improvement of Air Quality in Urban Street Canyons.* Environmental, Science & Technology. Lancaster University

Puigcerver, M. (2012). *El medio atmosférico: meteorología y contaminación.* Publicacions i Edicions. Universitat de Barcelona. Tomado de: http://www.publicacions.ub.edu/refs/indices/07022.pdf

REDIAM. (2016). *Servicios de regulación climática aportados por la vegetación urbana a la ciudad de Córdoba.* Primera parte: Fundamentos y metodología. Estrategias de adaptación al cambio climático. Unión Europea. Andalucía: España.

Rodriguez, D., Quintero, A., Gonzalez, Y., Cuesta, O., & Sanchez, A. (2015). *Variación de la estabilidad y altura de la capa de mezcla en la ciudad de Pinar del Río: Su relación con condiciones sinópticas*. Revista Brasileira de Meteorologia vol 30, 1-15.

Rojas, N. (2007). *Aire y problemas ambientales de Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia.

Rojas, N. Ortiz, E. (2012). *Estimación de los beneficios económicos en salud asociados a la reducción de PM10 en Bogotá.* Revista de Salud Pública No. 15. Pg 90-102. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Romero, H., Irarrázaval, F., Opazo, D., Salgado, M., & Smith, P. (2010). *Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile.* SciELO, 35-62.

Romero, M., Olite, D., & Álvarez, M. (2006). *La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud*. Rev Cubana Hig Epidemiol, 44.

Rosales, C. J., Torres, M. V., Olaiz, F. G., & VH, B.-A. (2001). *Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos*. Salud Publica Mex, 544-555.

Sampieri, R. Fernández, C. Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación*. Mc Graw Hill. Quinta edición. México

Sarmiento, R., Hernández, L., Medina, K., Rodríguez, N., & Reyes, J. (2015). *Síntomas respiratorios asociados con la exposición a la contaminación del aire en cinco localidades de Bogotá, 2008-2011, estudio en una cohorte dinámica.* Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal, 167-175.

Secretaria Distrital de Ambiente. (2018). *Misión.* Obtenido de http://ambientebogota.gov.co/web/sda/funciones

Secretaría distrital de Ambiente. (2012). *Guía de Techos verdes en Bogotá.* Colombia

Secretaría Distrital de Ambiente. (2013). *Características generales de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá y parámetros medidos en cada una de ellas a 2013*. Tomado de: http://ambientebogota.gov.co/estaciones-rmcab

Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial. (2010). *Inversión térmica*. Gobierno del Estado de Jalisco. México. Tomado de: https://semadet.jalisco.gob.mx/sites/semadet.jalisco.gob.mx/files/inversion_termica.pdf

Secretaria de Recreación y Deporte. (2018). *Bogotá y sus localidades*. Obtenido de https://www.culturarecreacionydeporte.gov.co/es/bogotanitos/bogodatos/bogota-y-sus-localidades

Sierra, M. (2006). *Establecer la asociación existente entre las variables meteorológicas temperatura, velocidad del viento y precipitación y las concentraciones de pm10 registradas en la red de calidad del aire de Bogotá D.C.* Bogotá: Universidad de la Salle.

Solarte, P. (2002). *Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Bogotá.* Revista Médica Sanitas. Vol 5, No. 2. Pg 2-21.Bogotá.

Sozzi & Ruiz, s,f. *Metodología para la evaluación de la capa límite planetaria y la elaboración del diagnóstico y pronóstico de la estabilidad atmosférica*. Auditoría a la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá. IDEAM.

Taha, H. (1997). *Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat.* Energy and Buildings. Vol 25. No.2. Pg 99-103

Universidad Nacional de Colombia. (2010). *Inversión térmica favorece contaminación aérea*. Agencia de Noticias UN. Medioambiente. Tomado de: http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/inversion-termica-favorece-contaminacion-aerea.html

U.S. Environmental Protection Agency. (2008). *"Green Roofs."* In: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Draft. https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium.

Vargas, F. Rojas, N. Pachón, J & Russell, A. (2012). PM10 characterization and source apportionment at two residential areas in Bogota. Atmospheric Pollution Research 3. Pg 72-80

Vasquez, W. Jazcilevich, A. García, A. Caetano, E. Gómez, G. (2016). *Influence of Green Roofs on Early Morning Mixing Layer Depths in Mexico City.* Revista Journal of Solar Energy Engineering. Vol 138

Villa, F. (2008). *Beneficios Económicos de Reducir la Contaminación por PM10 en el área Metropolitana de Monterrey*. Edición Única. Obtenido de https://repositorio.itesm.mx/bitstream/handle/11285/567743/DocsTec_5288.pdf;jsessionid=0B054D409CD4BF768F9B50EC026BFAE0?sequence=1

Yang et al. (2008). *Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago*. Atmospheric Environment. Volumen 42

Voogt, J. (2008). *Islas de Calor en Zonas Urbanas: Ciudades Más Calientes*. Obtenido de http://www.actionbioscience.org/esp/ambiente/voogt.html

Zielinski, S., Garda, M., & Vega, J. (2012). *Techos verdes: Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta?* Gestión Ambiental, 91-104.

Glosario

Costos en salud: Están asociados al impacto del cambio climático, la contaminación del aire urbano, contaminación de agua, sanidad e higiene, contaminación atmosférica interior, entre otros eventos que por daños ambientales, generan deterioros en la salud pública e incluyen los costos sociales (pérdida de productividad por muerte prematura o incapacidad), costos directos relacionados con la atención de la enfermedad, programas, diagnóstico, tratamiento entre otros, que son asumidos por la familia y/o el Estado y costos indirectos (incapacidades y transporte) (Instituto Nacional de Salud, 2018).

Estabilidad atmosférica: "Imposibilidad del aire de extenderse hacia arriba o hacia abajo" (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2001).

Morbilidad: "Ocurrencia de enfermedades, lesiones y discapacidades en las poblaciones" (Pan American Health Organization, 2015)

Mortalidad: "Fuente fundamental de información demográfica, geográfica y de causa de muerte que refleja la ocurrencia y la gravedad de una enfermedad" (Pan American Health Organization, 2015).

Radiación solar: Energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas y determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2014).

Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá: Permite recolectar información sobre la concentración de material particulado (PM10, PST, PM2.5), de gases contaminantes (SO2, NO2, CO, O3) y de las variables meteorológicas de precipitación, velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación solar, humedad relativa y presión barométrica, en forma continua y permanente. Está Red cuenta con 12 estaciones de medición fijas automáticas y una estación móvil.

Gradiente ambiental: es el resultado de complejas interacciones complejas producidas por factores meteorológicos y generalmente se considera que consiste en una disminución en la temperatura con la altura. (Organización Panamericana de la Salud, S.F.)

Gradiente Adiabático: Una porción de aire en su mayor parte no intercambia calor traspasando sus fronteras. Por consiguiente, una porción de aire más cálida que el aire circundante no transfiere calor a la atmósfera. (Organización Panamericana de la Salud, S.F.)

Anexo 1

Balance energético superficial	
Cálculo del ángulo de declinación solar δ	$\delta = \Phi_r \cos\left[\frac{2\pi(d - d_r)}{d_y}\right]$
Cálculo del ángulo de elevación solar Ψ	$\text{sen}\,\Psi = \text{sen}\,\Phi\,\text{sen}\,\delta - \cos\Phi\cos\delta\cos\left[\left(\frac{\pi t_{utc}}{12}\right) - \lambda_e\right]$

Cálculo de la *Radiación Solar Global* $R_g = \left(a_1 \operatorname{sen} \Psi + a_2\right)\left(1 + b_1 N^{b_2}\right)$

Cálculo de la *Radiación Neta*: $R_n = \dfrac{(1-\alpha)R_g + c_1 T^6 + c_2 N - \sigma T^4}{1 + c_3}$

Algoritmo para deducir los parámetros turbulentos en horas diurnas

Diurno

Flujo de calor sensible $H_0 = 0.3R_g + A$

Flujo de calor en el suelo $G = \alpha R_n$ (⟨ igual a 0.1)

Flujo de Calor latente: $H_E = \left(R_n - G\right) - H_0$

Velocidad de fricción: $u_* = u_0\left[1 + a \ln\left(1 + bQ_0 / Q_*\right)\right]$

Nocturno

Velocidad de fricción: $u_* = \dfrac{C_{DN} u}{2}\left(1 + C^{0.5}\right)$

.