



**PROPUESTA DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO DE MATERIAL  
PARTICULADO PM2.5 Y PM10 EN TIEMPO REAL EN LA UNIVERSIDAD  
EL BOSQUE, BOGOTÁ**

**Andrés Camilo Maldonado Maya  
Nicolás Felipe Rojas Monroy**

Universidad El Bosque  
Facultad de Ingeniería  
Programa Ingeniería Ambiental  
Bogotá, 28 de noviembre de 2019.

**PROPUESTA DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO DE MATERIAL  
PARTICULADO PM2.5 Y PM10 EN TIEMPO REAL EN LA UNIVERSIDAD  
EL BOSQUE, BOGOTÁ**

**Andrés Camilo Maldonado Maya  
Nicolás Felipe Rojas Monroy**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Ambiental.**

Director:  
Gonzalo Alberto Forero Buitrago

Línea de investigación:  
Responsabilidad social

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 velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

***(Dedicatoria)***

*Dedicamos este trabajo a nuestras familias, quienes hicieron posible este sueño, nos apoyaron incondicionalmente en todo momento y siempre nos han motivado a salir adelante.*

### **Agradecimientos**

Inicialmente, queremos agradecer a nuestro director por el apoyo que nos brindó en las diferentes asesorías para poder finalizar con éxito esta investigación, su dirección en el proyecto fue clave para obtener resultados confiables con sustentos teórico – prácticos.

Igualmente, agradecemos a nuestras familias y amigos por acompañarnos a lo largo de esta etapa de la vida, por enseñarnos cosas valiosas que tendremos en cuenta a lo largo de nuestras vidas y por ser un soporte en todos los momentos difíciles.

## Tabla de contenido

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| Resumen .....  | 11                                   |
| Abstract .....   | 11                                   |
| 1 Introducción .....   | 12                                   |
| 2 Planteamiento del problema .....                                 | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| 3 Justificación .....  | 14                                   |
| 4 Objetivos.....   | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| 4.1 Objetivo general.....  | 15                                   |
| 4.2 Objetivos específicos .....                                    | 15                                   |
| 5 Marco de referencia .....  | 16                                   |
| 5.1 Estado del arte.....   | 16                                   |
| 5.1.1 Sistemas de vigilancia de calidad del aire.....              | 16                                   |
| 5.1.2 Sistemas de vigilancia de calidad del aire en Colombia ..... | 17                                   |
| 5.1.3 Sistemas de vigilancia de calidad del aire en Bogotá.....    | 17                                   |
| 5.2 Marco conceptual .....   | 18                                   |
| 5.2.1 Ciclo del agua .....   | 18                                   |
| 5.2.2 Contaminación atmosférica .....                              | 18                                   |
| 5.2.3 Dirección del viento .....                                   | 19                                   |
| 5.2.4 Dispersión de contaminantes.....                             | 19                                   |
| 5.2.5 Fuentes móviles.....   | 19                                   |
| 5.2.6 PM 10 .....  | 19                                   |
| 5.2.7 PM 2.5 .....   | 19                                   |
| 5.2.8 Precipitación .....  | 19                                   |
| 5.2.9 Rosa de vientos.....   | 19                                   |
| 5.2.10 Sistema de vigilancia de calidad del aire .....             | 19                                   |
| 5.2.11 Sensores low cost.....                                      | 20                                   |
| 5.3 Marco Teórico.....   | 20                                   |
| 5.3.1 Emisión de partículas por fuentes móviles.....               | 20                                   |
| 5.3.2 Comportamiento de las partículas.....                        | 20                                   |
| 5.3.3 Características de las partículas .....                      | 21                                   |
| 5.3.4 Precipitación de partículas.....                             | 21                                   |
| 5.3.5 Deposición húmeda .....                                      | 22                                   |
| 5.3.6 Métodos de muestreo de Material Particulado .....            | 23                                   |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.3.7 | Parámetros para la selección de un sensor de bajo costo de Material Particulado ..   | 23 |
| 5.3.8 | Requerimientos para la ubicación de un sistema de vigilancia de Material Particulado | 24 |
| 5.3.9 | Metodologías etnográficas de investigación.....                                      | 24 |
| 5.4   | Marco normativo .....  | 26 |
| 5.5   | Marco geográfico .....   | 28 |
| 5.5.1 | Localización geográfica .....  | 28 |
| 5.5.2 | Zona de estudio: Usaquén, Universidad El Bosque, Bogotá .....                        | 28 |
| 5.6   | Marco institucional .....  | 29 |
| 5.6.1 | IDEAM .....  | 29 |
| 5.6.2 | Ministerio de Medio Ambiente.....  | 29 |
| 6     | Metodología .....  | 29 |
| 6.1   | Metodología de investigación.....  | 29 |
| 6.2   | Descripción de la metodología del primer objetivo específico .....                   | 29 |
| 6.3   | Descripción de la metodología del segundo objetivo específico.....                   | 30 |
| 6.4   | Descripción de la metodología del tercer objetivo específico .....                   | 31 |
| 6.5   | Diagrama de flujo de la metodología.....   | 32 |
| 6.6   | Resumen metodología - Matriz metodológica .....                                      | 34 |
| 7     | Plan de trabajo.....   | 37 |
| 7.1   | Cronograma de actividades .....  | 37 |
| 8     | Resultados.....  | 38 |
| 9     | Análisis y discusión de resultados.....  | 51 |
| 9.1   | Primer objetivo específico .....   | 51 |
| 9.2   | Segundo objetivo específico .....  | 53 |
| 9.3   | Tercer objetivo específico .....   | 54 |
| 10    | Conclusiones.....  | 55 |
| 11    | Recomendaciones.....   | 57 |
| 12    | Referencias Bibliográficas .....   | 57 |
| 13    | Anexos .....   | 64 |

### Listado de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Características de las partículas de tamaño entre 2.5 y 10 micras .....                    | 21 |
| Tabla 2. Requerimientos para la selección de un sensor de bajo costo de Material Particulado.....   | 23 |
| Tabla 3. Requerimientos para la ubicación de un sistema de vigilancia de Material Particulado ..... | 24 |
| Tabla 4. Normativa legal nacional en cuanto a calidad del aire .....                                | 26 |
| Tabla 5. Normativa internacional en cuanto a calidad del aire .....                                 | 27 |
| Tabla 6. Matriz metodológica .....  | 34 |
| Tabla 7. Cronograma de actividades .....  | 37 |
| Tabla 8. Cuadro comparativo de sensores <i>low cost</i> en el mercado .....                         | 43 |
| Tabla 9. Número total de encuestas por grupos de interés.....                                       | 48 |

### Listado de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Sistema de transmisión de información por medio de etiquetas RFID .....                                     | 16 |
| Figura 2. Arquitectura de red de vehículos de transporte público basada en LTE .....                                  | 17 |
| Figura 3. Componentes de partículas emitidas por fuentes móviles .....  | 20 |
| Figura 4. Vida media y alcance espacial temporal del material particulado dependiendo de su composición química ..... | 21 |
| Figura 5. Influencia de la precipitación en la remoción de contaminantes atmosféricos .....                           | 22 |
| Figura 6. Formación de partículas atmosféricas secundarias a partir de núcleos de condensación en las nubes .....     | 23 |
| Figura 7. Mapa de la Localidad de Usaquén .....   | 28 |
| Figura 8. Identificación de la zona de estudio .....  | 29 |
| Figura 9. Diagrama de flujo metodología .....   | 32 |
| Figura 10. Rosa de viento de Usaquén .....  | 38 |
| Figura 11. Relación precipitación - PM2.5 y PM10 estación de monitoreo de Usaquén .....                               | 39 |
| Figura 12. Rosa de viento de las Ferias .....   | 40 |
| Figura 13. Relación precipitación - PM2.5 y PM10 estación de monitoreo de Las Ferias .....                            | 40 |
| Figura 14. Rosa de vientos de Guaymaral .....   | 41 |
| Figura 15. Relación precipitación - PM2.5 y PM10 estación de monitoreo de Guaymaral .....                             | 41 |
| Figura 16. Rosa de vientos de Suba .....  | 42 |
| Figura 17. Relación precipitación - PM2.5 y PM10 estación de monitoreo de Suba .....                                  | 42 |
| Figura 18. Ilustración sensor HPMA 115S0 .....  | 45 |
| Figura 19. Ilustración sensor PMS3003 .....   | 45 |
| Figura 20. Ilustración sensor ppd42ns .....   | 45 |
| Figura 21. Ilustración sensor SDS011 .....  | 45 |
| Figura 22. Ubicación del dispositivo de medición entrada carrera 7b .....   | 46 |
| Figura 23. Ubicación del dispositivo de medición entrada de la novena .....   | 47 |
| Figura 24. Resultados de la primera pregunta .....  | 48 |
| Figura 25. Resultados de la segunda pregunta .....  | 49 |
| Figura 26. Resultados de la tercera pregunta .....  | 49 |
| Figura 27. Resultados de la cuarta pregunta .....   | 49 |
| Figura 28. Resultados de la quinta pregunta. ....   | 50 |
| Figura 29. Resultados de la sexta pregunta .....  | 50 |
| Figura 30. Resultados de la séptima pregunta .....  | 51 |
| Figura 31. Partículas en una muestra de agua lluvia .....   | 53 |

## Resumen

En la actualidad, la contaminación del aire por material particulado se ha convertido en un problema de salud pública en la ciudad de Bogotá y otros centros poblados, dado que es causante de altas tasas de mortalidad y morbilidad en la población. Además, la información sobre el estado de la calidad del aire es difundida de forma técnica y por plataformas poco conocidas, lo que genera una limitante en la difusión de la información. Por esta razón, se propone un sistema de monitoreo de material particulado PM2.5 y PM10 en la Universidad del Bosque, que permita medir sus concentraciones, procesar los datos obtenidos y difundir la información de forma comprensible, la cual, sensibilizara a su población acerca de este tema, permitiéndoles identificar los momentos críticos de contaminación y la toma de medidas preventivas. Para esto fue necesario hacer un análisis del comportamiento del material particulado en la zona de la universidad y compararlo con otros puntos de la ciudad, lo que permite identificar las dinámicas de descontaminación por precipitación y arrastre del viento, y cómo esta descontaminación puede estar afectando a otros sistemas ambientales. Además, se establecieron los componentes electrónicos para su correcto funcionamiento, en donde se encontró que su precio de adquisición es bajo y la precisión en la toma de datos es alta. Finalmente, se aplicó una encuesta a la población universitaria, encontrando que un gran porcentaje de dicha población no conoce acerca del material particulado y que un 98%, considera necesario la implementación del proyecto.

Palabras clave: Sistema de vigilancia, material particulado, sensores low cost.

## Abstract

At present, air pollution from particulate matter has become a public health problem in Bogota and other human settlements, given the fact that it's accountable for high population's mortality and morbidity rates. Furthermore, information regarding air's quality is published in broadly unknown platforms using a technical language, causing a bias in the information dissemination. For this reason, a PM2.5 and PM10 particulate matter monitoring system installation is proposed for El Bosque University. This system will allow the measurement of the aforementioned particulate materials concentration, the analysis of the data obtained and its diffusion in a comprehensive manner. This information diffusion it's expected to raise awareness of the air quality in the population, allowing them to identify critical periods of pollution and take preventive measures. In order to do this, it was necessary to analyze the particulate matter behavior in the university and compare it with other sampling points across the city. This allowed the identification of decontamination dynamics carried out by rain and wind currents which could have been affecting simultaneously adjacent ecological systems. Moreover, electronic components for the proper functioning were established and it was found that acquisition price was low and the precision of the data acquisition high. Finally, a survey conducted among University members revealed that a high percentage doesn't know about the particulate matter and around 98% considers imperative the implementation of the project.

*Keywords:* Surveillance system, particulate matter, low cost sensors.

## 1 Introducción

El deterioro de la calidad del aire es una problemática que ha tenido diferentes implicaciones alrededor del mundo, lo cual ha sido causado por el desarrollo industrial y tecnológico poco sostenible, las altas tasas de emisiones de contaminantes a la atmósfera, leyes flexibles, la variación climática, entre otros (Jorquera, Gallardo y Molina, 2012). Como respuesta a esto, diferentes ciudades han optado por implementar sistemas de monitoreo de contaminantes atmosféricos, lo que ha sido indispensable para comprender los procesos fisicoquímicos que estos experimentan al ser liberados a la atmósfera y su relación con los efectos que producen en el ambiente (Cremades, 2013).

Países como Colombia han optado por implementar este tipo de sistemas debido a las altas tasas de mortalidad y morbilidad, según el Departamento Nacional de Planeación de Colombia (2017), en el año 2015, se asociaron a este fenómeno 10.527 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades, además, conforme con la Organización Mundial de la Salud (2016), una de cada nueve muertes que ocurren a nivel mundial es ocasionada por la contaminación del aire. A pesar de ser puestos en funcionamiento diferentes sistemas de monitoreo en todo el país, estos se han visto limitados por la escasa cobertura espacial que tienen (Elen, Molino y Theunis 2012), su alto costo (Urquijo, 2017), su constante mantenimiento y calibración (Cano, Luna y Talavera, 2017) y porque la información suministrada no puede ser interpretada por toda la población a razón del alto índice de desconocimiento que se tiene sobre temas relacionados con calidad del aire (IDEAM, s.f.).

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario priorizar el monitoreo y el estudio de la calidad del aire, para generar así estrategias y regulación de emisiones (Figuerola y Méndez, 2015). Por ello, se elaboró una propuesta de bajo costo para el monitoreo de material particulado PM2.5 y PM10 en tiempo real en la Universidad El Bosque, en la cual se realizó, un diagnóstico de la dirección de flujo del material particulado en inmediaciones de la universidad, en segundo lugar, una selección de los dispositivos necesarios para correcto funcionamiento del sistema de monitoreo, junto con los puntos de ubicación. Finalmente, se identificó la percepción de la comunidad universitaria en cuanto a la calidad del aire en la universidad y sus alrededores, también se evaluó el nivel de aceptación de la idea de implementar un sistema de monitoreo que informe sobre los niveles de concentración de material particulado en tiempo real.

## 2 Planteamiento del problema

La mala calidad del aire ha generado un deterioro de la salud pública en las grandes ciudades como Bogotá, diariamente se emiten elevadas concentraciones de contaminantes atmosféricos en el aire, tales como: material particulado, ozono, cadmio, plomo, entre otros. Uno de los más peligrosos, ya que aumenta considerablemente los índices de morbilidad y mortalidad, es el material particulado, el cual genera problemas respiratorios graves, reduce la función pulmonar y otra serie de enfermedades (EPA, 2019). Este contaminante es emitido en mayor porcentaje por los vehículos con motor diésel, a los que se le asocian aproximadamente el 90% de las emisiones (Rojas, 2012).

Como medida de control a esta problemática, el estado ha optado por monitorear la calidad del aire por medio de una red de monitoreo, *Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá - RMCAB*, desde el año 1997, la cual permite recolectar información sobre la concentración de diferentes contaminantes y el comportamiento de variables meteorológicas que se encuentran relacionadas con la dispersión de los mismos (Alcaldía de Bogotá, 2019). Esta red de monitoreo es indispensable para comprender los procesos fisicoquímicos que experimentan los contaminantes una vez son emitidos a la atmósfera, de manera que se puede establecer una relación entre estos y los efectos que produce en el ambiente (Cremades, 2013). De acuerdo con Núñez, 2015, el contaminante que presenta los niveles más preocupantes en la RMCAB es el material particulado.

Sin embargo, el alto costo que tiene la implementación de una sola estación de monitoreo es una enorme limitante ya que impide cubrir la totalidad de la superficie urbana (Urquijo, 2017), por lo que la red de monitoreo de Bogotá brinda solo una pequeña parte de la información de lo que es la verdadera problemática en toda la ciudad. Asimismo, según Cano, Luna y Talavera, 2017, los instrumentos utilizados en ese tipo de estaciones de monitoreo requieren de mantenimiento y calibración permanente, de modo que su costo supera las decenas de miles de dólares, además, se debe tener en cuenta el bajo presupuesto de inversión estatal que se brinda hoy en día para proyectos de esta índole, lo que complica la compra e implementación de tecnologías importada (Cremades, 2013).

Del mismo modo, es de vital importancia considerar el desconocimiento general que existe por parte de la población, puesto que en muchas ocasiones existe el medio, pero este no es divulgado por los medios de comunicación por el escaso interés que suscitan y, en muchos otros casos, se divulga la información, pero las comunidades no saben cómo interpretar esta (IDEAM, s.f.), fuera de que, en la mayoría de casos, hay ausencia de datos significativos. Es por esto que se ve necesario desarrollar acciones complementarias de monitoreo encaminadas a informar y a enriquecer a la comunidad en conocimientos acerca de la calidad del aire y sus diversas afectaciones.

### 3 Justificación

De acuerdo con Pineda (2019), para poder combatir y solucionar los diferentes problemas ambientales que ha causado el hombre, es fundamental y necesario despertar la conciencia en las diferentes comunidades ante la realidad ambiental que cada día se encuentra en peores condiciones. Para lograr esto, es indispensable llevar a cabo acciones educativas en cuestiones ambientales que estén dirigidas a todas las comunidades y que formen buenas bases para una opinión pública bien formada, lo que inspirará el sentido de responsabilidad en cuanto a la protección del medio en cada uno de los individuos (Temas Ambientales, s.f.).

Hoy en día, dentro de las instalaciones de la Universidad El Bosque se encuentra localizada la estación de monitoreo de calidad del aire de la localidad de Usaquén, la cual persigue el fin de realizar monitoreos continuos de parámetros meteorológicos y de calidad del aire, entre ellos la medición en tiempo real de la concentración de material particulado. A pesar de esto, la información suministrada no logra ser interpretada por toda la comunidad universitaria ya que solo un 21% está familiarizada con los términos PM2.5 y PM10, lo que quiere decir que únicamente este porcentaje puede interpretar los datos brindados por la red de monitoreo, debido a que estos se dan con estas abreviaturas.

De acuerdo con lo anterior, se ve la necesidad de desarrollar acciones preventivas y promover cambios en la conducta de la comunidad universitaria, a través de medios comunicativos que informen sobre este tipo de problemáticas. En base a lo anterior, se desarrolló una propuesta de bajo costo para el monitoreo de material particulado en la Universidad El Bosque, con la que se busca informar y educar a la comunidad sobre este contaminante y, además, generar un soporte adicional para la estación de monitoreo de Usaquén. Cabe destacar que se desarrolla en esta ubicación debido a que es un sector en el cual se encuentran diferentes fuentes de emisión, tales como: el tráfico, la construcción de infraestructuras, el humo de cigarrillo, el uso de diferentes materiales por estudiantes y/o profesores, entre otros (Gallego, 2011).

Esta propuesta se plantea teniendo en cuenta los tres componentes ambientales, económico, ecológico y social. En cuanto a lo económico, se propone el desarrollo de un sistema de monitoreo de material particulado de bajo costo, con una alta precisión y confiabilidad de medición, el cual, en comparación con las estaciones de monitoreo de calidad del aire, no necesitan una inversión tan alta para su instalación y constante mantenimiento.

Por otra parte, en el componente ecológico, se ha observado el constante deterioro de la calidad del aire a lo largo del perímetro urbano de Bogotá y más exactamente en la localidad de Usaquén, por esta razón surge la necesidad de comprender el comportamiento del material partícula a través de las corrientes de viento, lo que permitirá identificar cuál es el rango de transporte de este contaminantes y con influye la precipitación en sus concentraciones, además de observar como otras matrices ambientales está siendo afectadas y establecer las recomendaciones pertinentes que mitiguen esta problemática.

Finalmente, el componente social es uno de los más importantes, debido a que el trabajo con la comunidad permite conocer cuál es su perspectiva acerca del estado de la calidad del aire, si se encuentran interesados en proyectos que fomenten la educación ambiental y de qué manera asimilan de forma rápida y efectiva la información.

## **4 Objetivos**

### *4.1 Objetivo general*

Elaborar una propuesta de bajo costo que permita monitorear las concentraciones de material particulado PM2.5 y PM10 en tiempo real en la Universidad El Bosque.

### *4.2 Objetivos específicos*

- Realizar un diagnóstico del comportamiento del material en inmediaciones de la Universidad El Bosque y en otras zonas de Bogotá.
- Seleccionar los dispositivos necesarios para el sistema de monitoreo de material particulado y establecer los puntos estratégicos para su ubicación
- Identificar la percepción por parte de la comunidad universitaria acerca de la calidad del aire en la Universidad El Bosque y de implementar un sistema de monitoreo de material particulado.

## 5 Marco de referencia

### 5.1 Estado del arte

#### 5.1.1 Sistemas de vigilancia de calidad del aire

En los últimos años se ha notado el preocupante deterioro de la calidad del aire a nivel mundial, lo que ha despertado el interés de científicos e investigadores por desarrollar innovadores sistemas de vigilancia de calidad del aire, los cuales han buscado mejorar la precisión y efectividad en las mediciones de contaminantes atmosféricos, sensibilizar a la población de los posibles daños que puede causar a su prolongada exposición, identificar y analizar parámetros ambientales de la calidad del aire o datos meteorológicos, entre otros (Querol, 2018). Esto surge dado que la contaminación del aire es un factor de riesgo ambiental que causa fuertes repercusiones en la salud pública, principalmente en los países con alta industrialización o con normativas ambientales flexibles, por lo que se estima que cerca del 92% de la población mundial habita en lugares donde la calidad del aire excede los límites establecidos por la normatividad internacional y produce cerca de 3 millones de muertes al año (OMS, 2016).

En cuanto al contexto internacional, un grupo de investigadores de la Universidad de Luxemburgo, diseñó una estructura arquitectónica basada en redes de malla de sensores inalámbricos, que permiten medir la contaminación del aire de ciertas ciudades africanas, con el propósito de disminuir las concentraciones de diferentes contaminantes por medio de la aplicación de normativas dirigidas a los datos obtenidos en el monitoreo. Este sistema está dirigido al uso del internet para distribuir las mediciones realizadas y consta de tres etapas:

- **Percepción:** Comprende aquella parte física como los sensores, que se despliegan para la captación de la información del ambiente. Esta capa tiene la capacidad de tomar información de diferentes sustancias contaminantes.
- **Red:** Es el punto intermedio entre la capa de percepción y de aplicación. Se encarga de la transmisión de la información proveniente de los sensores físicos a servidores de almacenamiento de datos.
- **Aplicación:** Es la capa en la que se realiza un análisis de la información captada, detectando los niveles de contaminación en tiempo real. Con base en esta información, se generan los diagnósticos y pronósticos de comportamiento de los niveles de polución (Fotue, Tononkoe y Engel, 2016).

Por otro lado, existe un modelo de monitoreo de la calidad del aire, creado en India, que se aplica en carreteras y vehículos debido a la constante emisión de contaminantes de combustión. Para esto, se utilizan sensores inalámbricos y de gases tóxicos electroquímicos conectados vía internet a los vehículos, los que cuentan con etiquetas RFID (identificación por radiofrecuencia) que envían la información de los contaminantes que genera cada vehículo (Manna, Bhunia y Mukherjee, 2014)

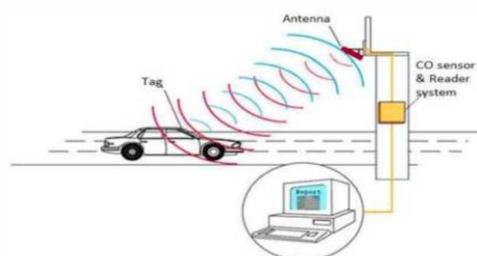


Figura 1. Sistema de transmisión de información por medio de etiquetas RFID. Fuente: Manna, Bhunia y Mukherjee, 2014.

Por último, la Universidad del Norte de Florida junto con Huawei Technologies y la Universidad de Ingeniería y Tecnología de Pakistán, han buscado diferentes alternativas al problema de contaminación del aire, utilizando el Internet como herramienta facilitadora. Sumado a lo anterior, diseñaron una red de sensores inalámbricos ubicados en diferentes puntos fijos de una ciudad, como en automóviles y en buses del transporte público, lo que permite monitorear las condiciones actuales del ambiente. Esta red brinda la oportunidad de identificar los factores críticos, para poder implementar acciones que reduzcan y mitiguen los daños asociados a la calidad del aire (Jamil et al., 2015).

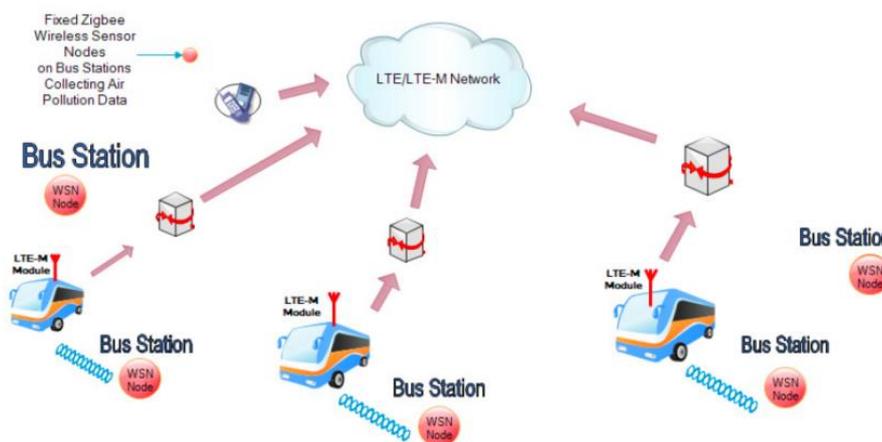


Figura 2. Arquitectura de red de vehículos de transporte público basada en LTE. Fuente: Jamil et al., 2015.

### 5.1.2 Sistemas de vigilancia de calidad del aire en Colombia

En Colombia se estructuró un proyecto científico, tecnológico y educativo llamado “*Ciudadanos Científicos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá*” el cual está siendo desarrollado por SIATA y busca, mediante el apoyo de la ciudadanía, instalar en sus respectivos hogares o lugares de trabajo una “nube”, la cual es un sensor de bajo costo para la medición de calidad del aire, lo que permitirá obtener datos en tiempo real de PM 2.5, temperatura y humedad, de los cuales ya se han instalado 250 puntos de monitoreo. De manera que, se promueva la investigación por parte de la ciudadanía, en cuanto a la calidad del aire y temas ambientales. También busca aumentar su participación en la mejora del estado de la calidad del aire de la ciudad (SIATA, 2018).

La implementación de este tipo de sistemas de monitoreo se debe a que la calidad del aire en el país se ha visto deteriorada a razón del crecimiento demográfico de las diferentes ciudades, la alta explotación agrícola, minera e industrial, los combustibles que se utilizan en el país, entre otras; convirtiéndose así en un gran problema de salud pública por las altas tasas de mortalidad y morbilidad asociadas a esta problemática. Con esto, se estima que la mala calidad del aire ocasiona 10.628 muertes al año, con un costo cercano a los 12,2 billones de pesos para el país (IDEAM, 2017).

### 5.1.3 Sistemas de vigilancia de calidad del aire en Bogotá

Bogotá ha optado por implementar una red de monitoreo, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), que tiene el objetivo de recolectar información sobre la concentración de contaminantes de origen antropogénico y natural y, además, el comportamiento de las variables meteorológicas que influyen en la distribución de estos en la atmósfera. Su funcionamiento se basa en recolectar datos tomados en diferentes sitios que son recibidos en una estación central donde se validan y se analizan para evaluar el cumplimiento con la Resolución 610 de 2010. Esta red se conforma por 13 estaciones fijas de monitoreo y una estación móvil y muestran mediciones de los contaminantes: PST, PM2.5, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>3</sub> y PM10 (Alcaldía de Bogotá, 2019).

Del mismo modo, se llevó a cabo un estudio realizado por un estudiante de la Universidad Sergio Arboleda que consiste en realizar una serie de mediciones de contaminantes criterio (NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM2.5 y CO) el día sin carro a los alrededores de dicha universidad y en la estación de Transmilenio de la calle 76, con el objeto de realizar una comparación entre la información obtenida en la mediciones y las realizadas por la estación de monitoreo de calidad del aire ubicada en el Centro de Alto Rendimiento. Para la medición de los contaminantes criterios se usaron sensores de bajo costo en conjunto con la aplicación CanAir, la cual proyecta mediante gráficas el comportamiento de los contaminantes medidos. (Castañeda, 2018).

Finalmente, estudiantes de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional diseñaron una aplicación denominada CanAir la cual consiste en una red ciudadana para el monitoreo de calidad del aire usando un sensor de bajo costo marca Honeywell y un celular, de forma que las mediciones realizadas por el sensor se pueden visualizar en el celular por medio de gráficas en un lapso de tiempo determinado. Su objetivo principal es brindar la oportunidad a la población de saber qué está respirando y qué medidas pueden tomar para mejorar su calidad de vida, por lo que cualquier persona puede acceder a la información que brinda la aplicación o bien, hacer sus propias mediciones (CanAir, 2019).

El desarrollo de proyectos relacionados con el monitoreo de la calidad del aire se debe a que el notable desgaste en cuanto a parámetros ambientales atmosféricos en Bogotá ha generado una alta preocupación por parte de los ciudadanos y las autoridades ambientales competentes, quienes han realizado diferentes acciones para mitigar este impacto, pero han sido poco significativas por el incremento en las emisiones (Gaitán, 2009). Este desgaste se debe a que Bogotá es el centro industrial más importante del país, por lo que presenta diferentes actividades económicas que emiten contaminantes atmosféricos (Figuroa, 2015).

## 5.2 *Marco conceptual*

Los siguientes términos corresponden a aquellos que son relevantes para el desarrollo del presente proyecto.

### 5.2.1 *Ciclo del agua*

Es el proceso en el cual se conecta el océano, la tierra y la atmósfera, el agua que se evapora de la superficie, sube a la atmósfera, se enfría y se condensa en forma de gotas de lluvia o de nubes y cae nuevamente a la superficie como precipitación. El agua que cae, se deposita en ríos, lagos, tierra, rocas, infraestructuras, animales, plantas, etc. (NASA, 2019).

### 5.2.2 *Contaminación atmosférica*

Es la liberación de sustancias químicas o materiales peligrosos en la atmósfera, lo que puede causar devastadoras consecuencias tanto para el ambiente como para la salud pública. Esta problemática ha llegado a causar cientos de millones de muertes al año ya que su incidencia en la salud es bastante

preocupante y puede llegar a causar enfermedades como cáncer, problemas respiratorios y cardiovasculares, disfunciones pulmonares, entre otros (CEH, s.f.).

### 5.2.3 *Dirección del viento*

Es la dirección en la cual sopla el viento, la cual se expresa en grados teniendo como referencia el norte geográfico (DISL, 2019).

### 5.2.4 *Dispersión de contaminantes*

Es el transporte de contaminantes aéreos en la atmósfera después de ser emitidos desde específicas fuentes de emisión, este fenómeno es causado por el viento, la precipitación y por los diferentes parámetros meteorológicos (Ni, 2015).

### 5.2.5 *Fuentes móviles*

Son los vehículos, motores y equipos que pueden ser clasificados como fuentes de carreteras, como lo son camiones, autobuses, carros y demás, o como fuentes no viales, por ejemplo, locomotoras, embarcaciones marinas, equipos de construcción, etc., ya que emiten una serie de contaminantes a la atmósfera dependiendo de su fuente de energía. Entre los cuales se encuentran los gases de efecto invernadero, material particulado, compuestos orgánicos volátiles, entre otros (DEC, s.f.).

### 5.2.6 *PM 10*

Serie de partículas gruesas o las llamadas partículas inhalables, las cuales tienen un diámetro de 10 micrómetros, están constituidas por materiales líquidos y sólido con una diversa composición y tamaño, son generadas de fuentes fijas y móviles de manera natural o antropogénica. Por otra parte, estas partículas se encuentran asociadas a procesos de combustión por uso de diésel, industrias de fundición, pinturas, cerámica y generación de energía (Canales, Quintero, Castro, y García, 2014).

### 5.2.7 *PM 2.5*

Son partículas con un diámetro de 2.5 micrómetros, tienen un tamaño menor al grosor de un cabello humano, lo que las caracteriza como una de las partículas más pequeñas en el aire y una de las más peligrosas para la salud pública. Son generadas por vehículos, fábricas, quema de madera, entre otras actividades y pueden causar la reducción de la capacidad pulmonar, agravar los ataques de asma, muerte prematura de personas con problemas pulmonares e irritación de las vías respiratorias (EPA, 2017).

### 5.2.8 *Precipitación*

Cualquier forma líquida o sólida de agua que cae desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. Este término incluye la llovizna, lluvia, granizo, nieve y, en contados casos, aguanieve. Dependiendo la ubicación geográfica del sitio a analizar se pueden observar variaciones en la precipitación en cuanto a la cantidad e intensidad de caída (DISL, 2019).

### 5.2.9 *Rosa de vientos*

Este diagrama brinda una visión de cómo la velocidad y dirección del viento son distribuidas típicamente en una locación específica. Se presenta en un diagrama circular y muestra la frecuencia en la que sopla el viento desde particulares direcciones (National Water and Climate Center, 2019).

### 5.2.10 *Sistema de vigilancia de calidad del aire*

Conjunto de equipos de monitoreo de contaminantes atmosféricos, que se encuentran instalados en un lugar específico para cumplir con un propósito determinado encaminado a monitorear constantemente la concentración de ciertos contaminantes atmosféricos de interés (SIAC, 2019).

### 5.2.11 Sensores low cost

Debido a la necesidad que ha surgido actualmente de realizar un constante control y seguimiento del medio ambiente, aparece la idea de los sensores Low cost (sensores de bajo costo) los cuales permiten monitorear gran cantidad de variables ambientales como la calidad del aire, junto con los intersticial IoT (Internet de las cosas) que nos brinda un control remoto de estos equipos (Lewis, Schneidmesser, y Peltier, 2018).

## 5.3 Marco Teórico

### 5.3.1 Emisión de partículas por fuentes móviles

Los vehículos automotores son responsables de la emisión de un 25% - 75% de material particulado por fuentes antropogénicas, lo que los define como la principal fuente de emisión de dicho contaminante (Rojas, 2004). La composición de estas partículas es bastante variable dependiendo de la fuente de emisión y del mecanismo de formación, pero se puede decir que se componen, en mayor proporción, de sulfatos, nitratos y amonios y en menor proporción, por elementos de traza como cadmio, mercurio y zinc (Mejía y Páramo, 2011).

| Compuestos mayoritarios  | Compuestos minoritarios  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sulfatos (SO<sub>4</sub>)</li> <li>• Nitratos (NO<sub>3</sub>)</li> <li>• Amonio (NH<sub>4</sub>)</li> <li>• Sodio y cloro (Na y Cl)</li> <li>• Carbón elemental</li> <li>• Carbón orgánico o Aerosol orgánico secundario (SOA, secondary organic aerosol)</li> <li>• Componentes minerales o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ca, Si y Al</li> <li>• Agua</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elementos traza: por ejemplo, metales, como plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), níquel (Ni), cromo (Cr), zinc (Zn) y magnesio (Mg), etc.</li> <li>• Compuestos orgánicos: por ejemplo, hidrocarburos aromáticos, HAP, alifáticos, aldehidos, ácidos carboxílicos y cetonas, entre otros.</li> </ul> |

Figura 3. Componentes de partículas emitidas por fuentes móviles. Fuente: Mejía y Páramo, 2011.

### 5.3.2 Comportamiento de las partículas

Es importante tener en cuenta que la formación y el desarrollo de eventos climáticos tiene un gran impacto en la difusión, acumulación y transporte de los contaminantes atmosféricos, lo que causa cambios en su concentración (Pineda y Álvarez, 2017). Al evaluarse el comportamiento de estas partículas, hay que tener como base que su dispersión es un proceso que se ve afectado por las condiciones y características meteorológicas del lugar, ya que esto incide en el transporte y arrastre de los mismos (Arrieta, 2016). Al igual que su composición química, la cual incide en su comportamiento espacio temporal. En el caso del material particulado emitido por el parque automotor, según su composición química, presenta un menor tiempo de residencia atmosférica, lo que le impide recorrer largas distancias (Viana, 2003).

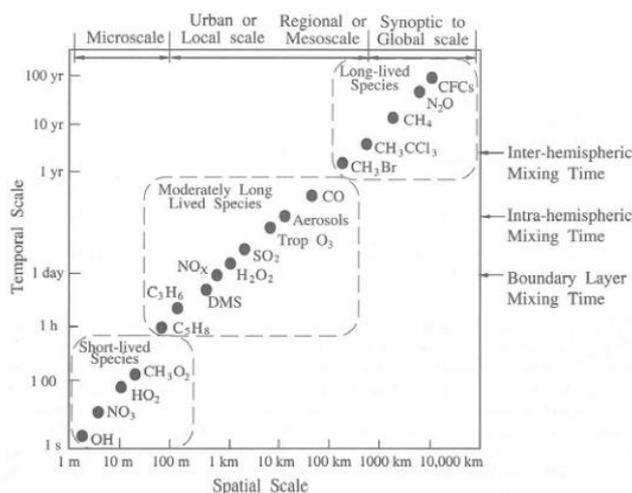


Figura 4. Vida media y alcance espacial temporal del material particulado dependiendo de su composición química. Fuente: Viana, 2003.

### 5.3.3 Características de las partículas

Estas partículas pueden ser removidas de la atmósfera por procesos como la sedimentación y la precipitación, dependiendo del tamaño de estas y de ciertos factores termodinámicos, además, es importante tener en cuenta las siguientes características propias de las partículas que abarcan un tamaño entre 2.5 y 10 micras (Mejía y Páramo, 2011).

Tabla 1

Características de partículas de tamaño entre 2.5 y 10 micras

| Característica.                 | Descripción.  |
|---------------------------------|---|
| <b>Solubilidad.</b>             | Muy insolubles y no higroscópicas.                      |
| <b>Vida media atmosférica.</b>  | Minutos a horas.  |
| <b>Proceso de remoción.</b>     | Precipitación seca.<br>Eliminación por gotas de lluvia. |
| <b>Distancia de transporte.</b> | De menos de un kilómetro a decenas de kilómetros.       |

Fuente: Mejía y Páramo, 2011.

### 5.3.4 Precipitación de partículas

Las precipitaciones son un mecanismo importante y eficiente para la remoción de contaminantes atmosféricos (Rubio, Lissi, Riveros y Páez, 2001), ya que la lluvia generada en la atmósfera arrastra las partículas presentes en el aire, dependiendo de su duración, velocidad, intensidad, solubilidad, tamaño y velocidad de caída, lo que genera un lavado de la atmósfera que aparentemente elimina las partículas, sin embargo, lo que sucede realmente es que estas son transformadas y trasladadas a otros lugares. De acuerdo con Xu et al., 2015, este arrastre ha generado cambios significativos en la composición química de la lluvia, por lo que hoy en día predominan los iones de SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> y NH<sub>4</sub>

en esta, los que corresponden a los componentes mayoritarios de las partículas de PM2.5 y PM10 (figura 3). Es importante tener en cuenta que la concentración de contaminantes en la atmósfera disminuye conforme incrementa la precipitación, lo que quiere decir que en períodos de lluvia existe una mejor calidad del aire y en períodos secos las condiciones atmosféricas no son igual de favorables (Tang y Hu, 2018).

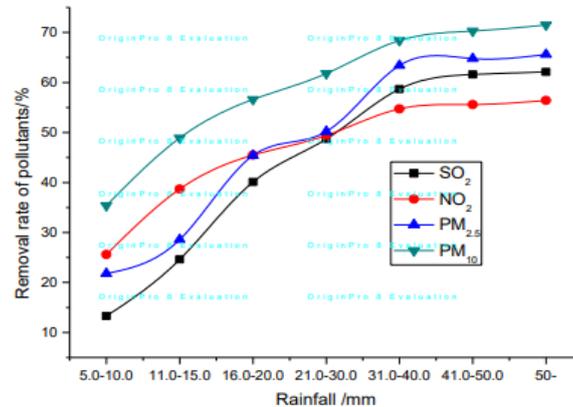


Figura 5. Influencia de la precipitación en la remoción de contaminantes atmosféricos. Fuente: Tang y Hu, 2018.

### 5.3.5 Deposición húmeda

Los contaminantes atmosféricos como el material particulado, son removidos del aire mediante la humedad en sus diferentes formas, como las precipitaciones en forma de rocío, llovizna, lluvia, aguanieve, nieve y granizo. Esto se debe a la interacción generada entre gotas de agua y dichos contaminantes, puesto que en dichas gotas se producen transformaciones químicas, que capturan permanentemente los contaminantes en el aire. No obstante, se ha encontrado que el agua lluvia contiene iones de SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> y NH<sub>4</sub> los cuales han sido recolectados de la contaminación local y por los contaminantes suspendidos en el trayecto de la nube, a consecuencia de que las nubes son uno de los medios ideales para el transporte de material particulado (Rubio *et al.*, 2001). Suponiendo que dicha nube se evapore, las partículas permanecen suspendidas y en el caso de que se produzca precipitación, las partículas serán lavadas por el proceso “In-cloud scavenging”, complementando con el “below-cloud scavenging”, proceso en donde las partículas atmosféricas que se encuentran en suspensión son retiradas de la atmósfera por la vía húmeda (Viana, 2003).

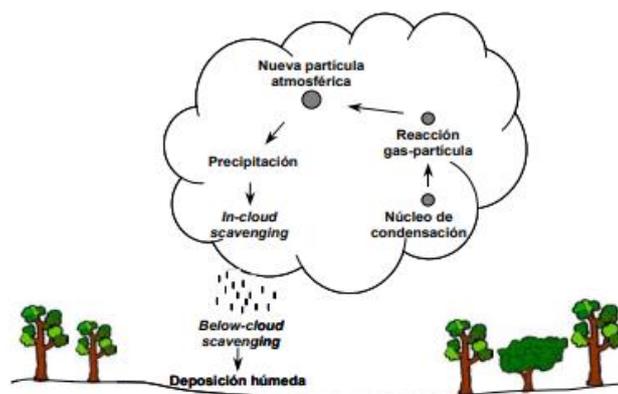


Figura 6. Formación de partículas atmosféricas secundarias a partir de núcleos de condensación en las nubes. Fuente: Viana, 2003.

### 5.3.6 Métodos de muestreo de Material Particulado

Según el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire de México (2015), existen 5 métodos para el muestreo de este contaminante que se agrupan de acuerdo a sus principios de medición, estos son:

1. **Muestreo pasivo:** Este método consiste en la absorción del contaminante por medio de un sustrato químico seleccionado por un período de muestreo específico, desde una hora hasta un año, el cual es analizado cuantitativamente en el laboratorio donde se lleva a cabo un proceso de desorción. En este método se utilizan muestreadores pasivos, son fáciles de manejar y tienen bajo costo, sin embargo, solo proporcionan valores promedios semanales o mensuales y no tienen una gran exactitud.
2. **Muestreo con bioindicadores:** este método implica el uso de especies vegetales para aprovechar su superficie funge como receptora de contaminantes, es de bajo costo y bastante útil para identificar la presencia y efectos de algún contaminante, a pesar de esto, posee problemas en cuanto a la estandarización de las metodologías y, en algunos casos, requiere análisis de laboratorio.
3. **Muestreo activo:** tiene como principio de medición un medio de colección físico o químico que funciona con energía eléctrica y puede ser en forma de burbujeadores (gases) o impactadores (partículas). Es fácil de operar, es confiable y tiene costos relativamente bajos, aunque no aprecia los valores máximos y mínimos durante el día, solo promedia por 24 horas y requiere de análisis de laboratorio.
4. **Método automático:** es el mejor en términos de resolución de las mediciones, su principio de medición (atenuación  $\beta$ , microbalanza oscilante o dispersión láser) establece que los equipos deben ser intercomparados con un captador de referencia que tiene la ventaja de dar la lectura de las concentraciones de manera automática y en tiempo real, también es bastante útil para tomar mediciones de forma continua aunque tenga un costo elevado de adquisición - operación y requiera personal capacitado para su manejo.
5. **Método óptico de percepción remota:** se basa en técnicas espectroscópicas por medio de las que se transmite un haz de luz de determinada longitud de onda a la atmósfera y se mide la energía absorbida. Los equipos utilizados son llamados sensores remotos, los cuales pueden ser de bajo (*low-cost*) o alto costo (de referencia) dependiendo de sus características y prestaciones brindadas. Su principal ventaja es que muestra valores en tiempo real con una alta resolución, lo que lo hace útil para mediciones de emisiones de fuentes específicas.

### 5.3.7 Parámetros para la selección de un sensor de bajo costo de Material Particulado

En la siguiente tabla pueden ser visualizados los parámetros establecidos para seleccionar el sensor adecuado para el sistema de monitoreo.

**Tabla 2**

*Requerimientos para la selección de un sensor de bajo costo de Material Particulado.*

| Parámetro             | Condición |
|-----------------------|-----------|
| Alimentación (máximo) | 5V        |
| Corriente (máxima)    | 150 mA    |

|   |                      |
|---|----------------------|
| Error relativo (máximo)                   | 5%                   |
| Hora y fecha de inicio monitoreo          | Debe ser programable |
| Tamaño de partículas detectables (mínimo) | 1 ug/m <sup>3</sup>  |
| Tasa de muestreo programable              | De 1s a 1h           |
| Temperatura de trabajo                    | 0°C - 50°C           |
| Tiempo de respuesta (máximo)              | 30 s                 |
| Vida útil (mínimo)                        | 1 año                |

Adecuado de: *Angulo, 2018*.

### 5.3.8 Requerimientos para la ubicación de un sistema de vigilancia de Material Particulado

Para ubicar adecuadamente el sistema de vigilancia y obtener mediciones confiables se tomaron como referencia los siguientes requerimientos:

**Tabla 3**

*Requerimientos para la ubicación de un sistema de vigilancia de Material Particulado.*

| Contaminante         | Requerimientos                         | Valor    |
|----------------------|--|----------|
| Material Particulado | Distancia desde estructuras de soporte | >2 m     |
|                      | Número de estaciones                   | 2        |
|                      | Altura sobre el suelo                  | 2 - 15 m |
|                      | Distancia árboles                      | > 10m    |
|                      | Distancia a la vía principal           | 5 - 15 m |

Adaptado de: *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 2010*.

### 5.3.9 Metodologías etnográficas de investigación

Tomando como base lo que menciona Martínez, 2011, este tipo de metodologías tienen la finalidad de describir e interpretar las realidades investigadas y observadas desde el punto de vista conceptual de sus protagonistas, comprendiendo la situación desde los significados que los actores le dan a ella y la correspondiente investigación. De acuerdo con esto, las metodologías etnográficas son las siguientes:

- **Encuestas:** Behar, 2008, comenta que este método permite recoger información de una determinada parte de la población de interés, se usan procedimientos estandarizados para que cada uno de los individuos sea evaluado con las mismas preguntas con el fin de obtener un perfil compuesto de la población. Unas de sus principales ventajas es que permite un acceso más generalizado a los miembros de una población, evita en lo posible el “cara a cara”, lo que da mayor libertad a las personas a la hora de responder y asegura objetividad en los datos

recogidos, a pesar de ello, presenta un alto nivel de complejidad por la exigencia técnica de las preguntas y por la dificultad de su aplicación. Esta puede ser de dos tipos: abierta o cerrada. Las encuestas abiertas proporcionan una mayor libertad para el entrevistado, pero complica la interpretación por parte del encuestado y las encuestas cerradas son aquellas que tienen preguntas y respuestas específicas, son fáciles de responder y de tabular, pero requieren una mayor preparación técnica en cuanto al cuestionario (Niño, 2011). Las encuestas pueden ser diseñadas de 4 formas diferentes

- **Autoadministrado:** se proporciona la encuesta directamente a los respondientes, no hay intermediarios y las respuestas las hacen ellos mismos.
  - **Encuesta personal:** se aplica la encuesta a los respondientes haciendo preguntas en una conversación “cara a cara”.
  - **Encuesta telefónica:** Es similar a la anterior, pero con la diferencia de que es a través del teléfono.
  - **Autoadministrado y enviado por correo postal o electrónico:** Los encuestados contestan directamente el cuestionario, el cual es entregado directamente en las manos del mismo o enviadas por correo u otro medio (Behar, 2008)
- **Entrevista:** definida como la comunicación interpersonal entre el investigador y el sujeto de estudio con un propósito previamente especificado donde se obtienen respuestas verbales a interrogantes planteados de acuerdo a un problema propuesto. Permite recolectar información acerca de percepciones, actitudes, opiniones, experiencias y conocimientos que tiene el entrevistado. Es considerado como un medio de hacer investigación a profundidad, consta únicamente de preguntas abiertas y tiene una gran exactitud. Existen 4 diferentes tipos de entrevistas:
- **Informal o conversacional:** donde el investigador interactúa con el informante y es el encargado de formular las preguntas de acuerdo al desarrollo de la conversación, en esta no se cumple con lo establecido en la guía general de preguntas, sino que la flexibilidad y creatividad del investigador ayudan a formular las preguntas, concorde se desarrolla la entrevista.
  - **Semiestructurada y esquemática:** parte de una guía o banco de preguntas que se quieren investigar de acuerdo al tema seleccionado, pueden ser preguntadas aleatoriamente o planteadas de diferente manera.
  - **Abierta estandarizada:** se parte de un cuestionario que contiene preguntas iguales para todos los entrevistados.
  - **Etnográfica en profundidad:** se pueden emplear diversos recursos o métodos para obtener la información con el propósito de que se profundice la conversación al máximo, se realiza a personas específicas en forma individual (Martínez, 2011).
- **Grupo de discusión:** Canales, 2006, lo define como una herramienta de reproducción del discurso por medio de la que se sostiene una conversación en donde el investigador calla para posibilitar la constitución de un grupo a partir de un tema previamente especificado para lograr mantener un debate y obtener como resultado un discurso grupal. Su característica principal es que el investigador no interviene sino únicamente para determinar el contenido del debate a realizar y se compone de cuatro fases diferentes: planificación, selección, moderación y análisis e informe final (Universidad de Alicante, 2019).
- **Grupo focal:** de acuerdo con Hamui y Varela, 2012, es un espacio de opinión donde se busca captar el sentir, pensar y vivir de los individuos para obtener datos cualitativos de interés del investigador. Este tipo de entrevista grupal es particularmente sensible para el estudio de actitudes y experiencias, para examinar cómo se desarrollan y operan las ideas en un determinado contexto y para explorar cómo se construyen diferentes opiniones. Esta metodología se centra en el análisis de la interacción de los participantes y de sus reacciones al tema que es propuesto por el investigador de manera que el moderador está atento a las

diferencias en las opiniones, debates y dinámicas para formar consenso, desarrollar una explicación, interpretar mensajes promocionales o sopesar prioridades (López, 2018). Según Ruiz (2019), el grupo de discusión y el grupo focal se diferencian en que cada metodología persigue un objetivo diferente, el primero persigue captar las opiniones individuales de cada participante y el segundo pretende la producción de un discurso colectivo mediante la conversación que se realice en el grupo. En otras palabras, mientras uno utiliza una dinámica de entrevista grupal, el otro utiliza una dinámica conversacional entre los participantes.

#### 5.4 Marco normativo

A continuación, se detallan y describen las diferentes normas legales nacionales e internacionales que son relevantes para el desarrollo del proyecto. En primer lugar, se pueden observar las normas nacionales en cuanto a la calidad del aire.

**Tabla 4**

*Normativa legal nacional en cuanto a calidad del aire*

| <b>Normas legales nacionales.</b>                 | <b>Propósito</b>   | <b>Contribución al trabajo. Artículo.</b>   |
|---|--|---|
|   |  | <b>Cap. 2. Parte II.</b>  |
| <b>Decreto 2811 de 1974.</b>                      | Dicta el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y Protección del Medio Ambiente.   | <b>Art. 75</b> - Se dictan las disposiciones para prevenir la contaminación atmosférica en cuanto a la calidad del aire (Secretaría General del Senado, 1974).  |
|   |  | <b>Título I.</b>  |
|   |  | <b>De las emisiones atmosféricas.</b>   |
| <b>Ley 9 de 1979.</b>                             | Dicta las medidas sanitarias que son indispensables en el marco de la salud pública del país.  | <b>Art. 41</b> - El Ministerio de Salud fijará las normas sobre calidad del aire.<br><b>Art. 42</b> - El Ministerio de Salud fijará las normas de emisión de sustancias contaminantes (Ley 9, 1979, arts. 41 y 42). |
| <b>Constitución Política de Colombia de 1991.</b> | Marco legal más importante a nivel nacional que tiene como propósito desarrollar los deberes y derechos del estado y de la ciudadanía. | <b>Art. 79</b> - Todas las personas tienen derecho a gozar de un medio ambiente sano (Const., 1991, art. 17).   |

|                                 |   |  |
|---------------------------------|---|--|
| <b>Ley 99 de 1993.</b>          | Se crea el Ministerio de Medio Ambiente y el Sistema Nacional Ambiental (SINA).   | <b>Art. 5</b> - Establece las funciones y responsabilidades del Ministerio del Medio Ambiente entre ellas formular la política nacional en relación con el medio ambiente.<br><b>Art. 31</b> - Delega las funciones de las Corporaciones Autónomas Regionales como ejercer las funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental del aire y demás recursos<br>(Ley 99, 1993, arts. 5 y 31). |
| <b>Resolución 610 de 2010.</b>  | Se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia. | <b>Art. 10</b> - Se declaran los niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación del aire para PM10, en un tiempo de exposición de 24 horas (Res. MinAmbiente610, 2010, art. 10).   |
| <b>Resolución 2154 de 2010.</b> | Se ajusta el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.  | Reglamenta y establece todo lo necesario para implementar un sistema de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (Res. MinAmbiente2154, 2010).   |
| <b>Resolución 2254 de 2017.</b> | Se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.  | <b>Art. 2</b> - Se establecen los niveles máximos permisibles de material particulado en un período anual y de 24 horas, además brinda los valores ICA (Res. MinAmbiente2254, 2017, art. 2).   |
| <b>CONPES 3943</b>              | Política para el mejoramiento de la calidad del aire  | Propone acciones para reducir la contaminación en el aire producida por el parque automotor (CONPES 3943, 2018), considerado como la fuente de emisión mayoritaria en la zona de estudio.  |

Fuente: *elaboración propia.*

Por otro lado, se pueden observar las normas internacionales en cuanto a la calidad del aire.

**Tabla 5**

*Normativa internacional en cuanto a calidad del aire.*

| <b>Norma internacional.</b>                           | <b>Propósito.</b>  | <b>Contribución al trabajo.</b>   |
|---|--|---|
| <b>Norma Ambiental de Calidad del Aire de la FAO.</b> | Establece los valores máximos permisibles de concentración de contaminantes a nivel mundial. | Estándares de la calidad del aire para material particulado PM10 y PM2.5 (FAO, 2019). |

**Guías de Calidad del Aire de la OMS Relativas al Material Particulado, el Ozono, el dióxido de Nitrógeno y el Dióxido de Azufre.**

Respaldar medidas orientadas a conseguir una calidad del aire que proteja la salud pública en distintas situaciones.

**Pp. 9.** Establece los niveles máximos permisibles a la exposición de PM2.5 y PM10 (Who, 2017).

Fuente: *elaboración propia.*

## 5.5 Marco geográfico

### 5.5.1 Localización geográfica

La ciudad de Bogotá se encuentra ubicada en la cordillera oriental, consta de una extensión de 33 kilómetros de norte a sur y de 16 kilómetros de oriente a occidente, está localizada en la zona de confluencia intertropical, lo que causa que existan dos épocas de lluvia: en el primer semestre del año, entre marzo - mayo, y en el segundo semestre del año, entre septiembre - noviembre, presenta temperaturas variables, las cuales cambian dependiendo del mes, entre diciembre - marzo son altas y entre abril - octubre son bajas (General, 2018). Cuenta con una división administrativa de 20 localidades en donde se ofrecen redes de servicios públicos como infraestructura vial, entretenimiento, abastecimiento de productos, entre otros. Las localidades 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 (Alcaldía de Bogotá, 2019).

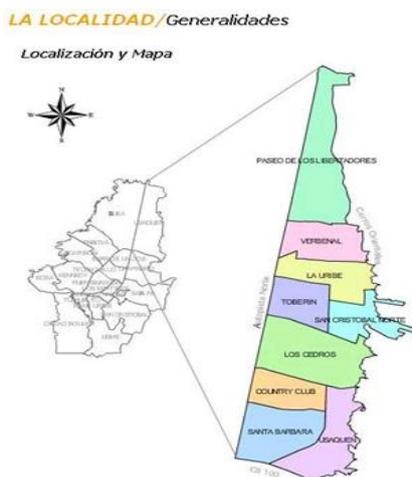


Figura 7. Mapa de la Localidad de Usaquén. Fuente: Alcaldía Local de Usaquén, 2010.

### 5.5.2 Zona de estudio: Usaquén, Universidad El Bosque, Bogotá

Usaquén cuenta con una extensión de 6.531,32 hectáreas y limita al occidente con la Autopista Norte, al sur con la Calle 100, al norte con los municipios de Chía y Sopó y al oriente con La Calera, tiene una población cercana a los 449.621 habitantes (Consejo Local de Gestión del Riesgo y Cambio Climático, 2017). El presente proyecto se realizó específicamente en la Universidad El Bosque



Figura 8. Identificación de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

## 5.6 Marco institucional

### 5.6.1 IDEAM

Entidad que brinda la información correspondiente a los datos promedios mensuales de PM y precipitación en la estación de monitoreo de calidad del aire de Usaquén

### 5.6.2 Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

Entidad que publicó el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire necesario para el desarrollo del proyecto.

## 6 Metodología

### 6.1 Metodología de investigación

El presente trabajo tiene un **enfoque mixto** a razón de que se lleva a cabo un proceso donde se recolectan y analizan datos cuantitativos y cualitativos que van encaminados a responder la pregunta de investigación previamente estructurada. De este modo, este enfoque permite utilizar evidencias de datos numéricos, verbales, textuales, visuales y simbólicos para entender el problema establecido. Asimismo, permite utilizar las fortalezas de ambos tipos de investigación de forma que puedan ser combinados con el fin de minimizar sus debilidades potenciales. El **alcance** del trabajo es **descriptivo** debido a que detalla el contexto que envuelve a la contaminación por material particulado teniendo como base las propiedades y características que lo componen para su respectivo análisis dentro de la problemática establecida, a su vez, es **explicativo** ya que identifica las causas de la problemática, sus afectaciones a la salud pública y frente a esto busca sugerir medidas de prevención (Hernández, Fernández y Baptista, 2010).

### 6.2 Descripción de la metodología del primer objetivo específico

Para dar inicio al primer objetivo propuesto, se realizó una búsqueda espacial de las tres estaciones de monitoreo de calidad del aire de Bogotá más cercanas a la zona de estudio, es decir de la estación de la localidad de Usaquén, las cuales se encargan de identificar las concentraciones de una amplia variedad de contaminantes atmosféricos como PM2.5, PM10, SO<sub>2</sub>, NO, y además mide parámetros climatológicos. Una vez que se identificadas estas, se procedió a descargar los datos por hora, en formato Excel, de la velocidad y dirección del viento en un periodo de 5 años directamente desde la página web.

Tan pronto se obtuvo esta información, se realizó una respectiva configuración a los documentos descargados, con el fin de que los datos se encuentren en formato csv delimitado por comas y puedan ser procesados por el programa WRPLOT View, el cual es una herramienta que proporciona análisis de frecuencia y gráficos para el diseño de rosas de vientos. Para ello, fue necesario agregar los datos de la estación como, departamento, ciudad, zona horaria y coordenadas, en busca de que el programa pueda ubicar geoespacialmente los datos.

Una vez obtenidas las rosas de viento, se llevó al mapa de Google Earth ingresando las coordenadas geográficas del lugar, las que debieron transformarse a coordenadas digitales previamente ya que se encontraban como coordenadas planas. Finalmente, se agregó al mapa de Google Earth, la capa de drenajes dobles y sencillos corregidos del departamento de Cundinamarca, obtenidos del Instituto Agustín Codazzi, además se obtuvieron los datos de material particulado PM2.5, PM10 y precipitación de las estaciones seleccionadas en un periodo de 3 años, con el fin de comparar cuál es la relación existente entre el movimiento de partículas por el arrastre del viento, la relación hidrología-viento, la relación entre la precipitación y las concentraciones de material particulado, para analizar la dirección de flujo del material particulado.

### 6.3 Descripción de la metodología del segundo objetivo específico

Con respecto al desarrollo del segundo objetivo, se partió de la búsqueda bibliográfica de los diferentes métodos de muestreo de material particulado que son utilizados en la actualidad y se seleccionó con sustentos teóricos un único método que tenga la mayor afinidad con el proyecto, siendo el *método óptico de percepción remota*. Teniendo en cuenta esto se procedió a identificar los sensores de bajo costo con mayor precisión, vida útil, precio asequible, voltaje, porcentaje de error, rango, entre otras características. Luego, se identificaron los dispositivos necesarios para realizar la lectura e interpretación de los datos tomados por el sensor, lo que facilita su visualización y posterior interpretación ya que estos tienen la función de almacenar dichos datos y mostrar los valores promedio en un intervalo de tiempo previamente configurado. Por último, se establecieron los dispositivos adicionales que son claves para el funcionamiento del sensor, los cuales son componentes necesarios para realizar conexiones entre los diferentes dispositivos y la fuente de energía. Vale la pena mencionar que se indago sobre la compatibilidad de los dispositivos que lo componen el sistema de monitoreo

Para darle continuidad al segundo objetivo, se procedió a realizar un análisis del *Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire* el cual dicta unas directrices necesarias para la ubicación de una estación de monitoreo de material particulado, en donde se tendrán en cuenta los parámetros exigidos en los estudios micro meteorológicos del lugar. Para este caso en particular, se realizó una minuciosa segregación de características o estudios exigidos, puesto que la norma no define las características pertinentes para un sistema de monitoreo elaborado con componentes low cost, buscando así mediante la segregación y recolección de esta información, conocer la predominancia en la velocidad y dirección del viento, de forma que se pueda determinar los puntos favorables para las instalación de los sensores, teniendo en cuenta que dicho manual exige como

requisito mínimo para el SVCA básico, un sensor en dirección al viento y otro sensor a contra viento. Basado en esto, los aspectos evaluados fueron:

- Tendencias de vientos anuales durante los últimos 5 años.
- Rosa de vientos diurna y nocturna en el último año.
- Variaciones mensuales de la rosa de vientos durante el último año.
- Tendencias de precipitación durante los últimos 5 años.

Para el desarrollo de estos aspectos fue necesario acceder a la plataforma virtual de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire, ingresar a los datos históricos de las cuatro estaciones a valorar los reportes de cada una ya que brinda la opción de descargar en una tabla de Excel los valores diarios de la Dirección del viento y su velocidad en un lapso de tiempo específico. Una vez obtenidos estos resultados, se procedió a seleccionar los puntos de instalación adecuados de acuerdo a los parámetros mencionados (tabla 3).

#### 6.4 Descripción de la metodología del tercer objetivo específico

Por último, se empleó la búsqueda bibliográfica de las metodologías etnográficas de investigación en diferentes plataformas virtuales de información, teniendo en cuenta enfoque del proyecto se seleccionó el que tuviera una mayor y se procedió a realizar el formato correspondiente para su aplicación (cuestionario). Posteriormente, se investigó el tamaño de la población estudio (estudiantes, docentes, administrativos y servicios generales) por medio de las bases de datos administrativas de la facultad de talento humano y comunicación. Seguido a esto, se calculó la muestra con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{z^2(P*(1-P))}{\varphi^2} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

n: muestra.

Z: nivel de confianza.

P: probabilidad de éxito.

$\varphi$ : probabilidad de fracaso.

Una vez obtenida la muestra, se calculó el número total de encuestas con la siguiente fórmula:

$$Ne = \frac{n}{1 + (\frac{n}{N})} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

Ne: número total de encuestas.

n: muestra.

N: población de estudio.

Obtenido este resultado, se realizó una proporcionalidad (Fórmula 3) con el fin de hallar el número total de encuestas discriminadas por los grupos de interés. Vale la pena mencionar que esto se desarrolló de forma general para los grupos de docentes, administrativos y servicios generales puesto que estos son, en número, mucho más pequeños que el de estudiantes, por lo que la cantidad de respuestas necesarias de estos grupos es muy pequeña para discriminarlo por facultad y programa.

$$N_{est} = N_e * \frac{ne}{N} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

Nest: número total de encuestas discriminada por grupos de interés.

Ne: número total de encuestas.

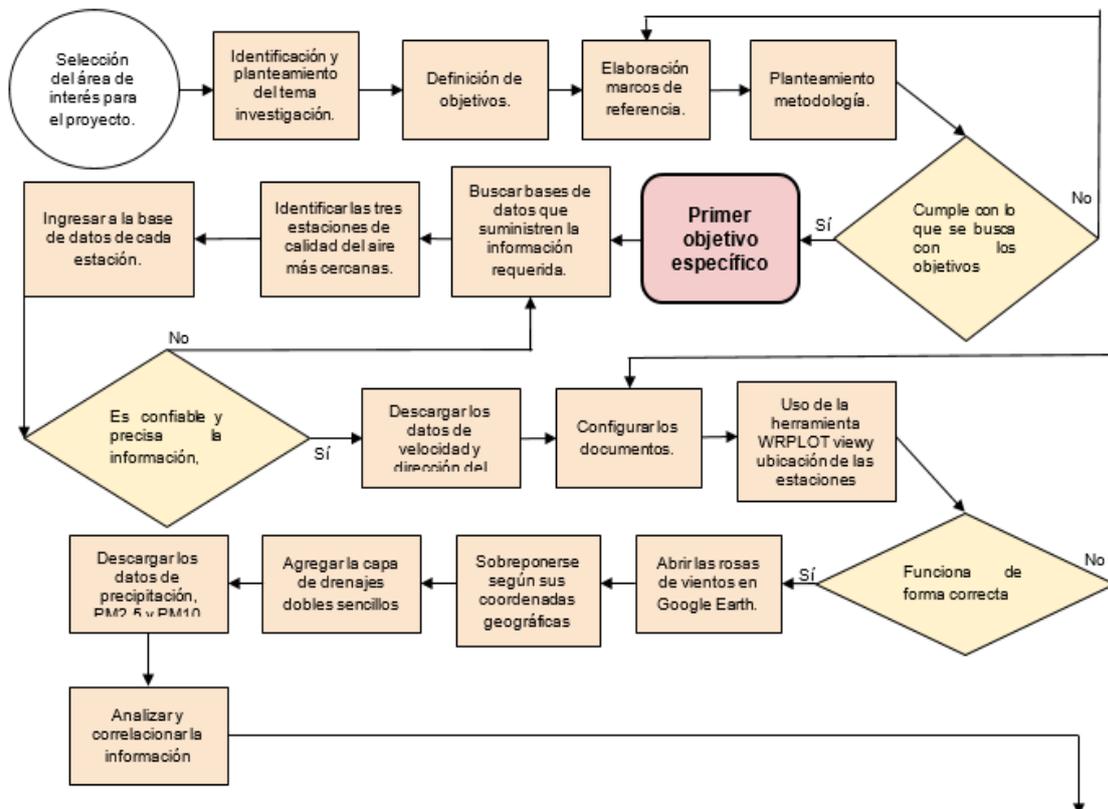
ne: población total por grupo discriminado.

N: población de estudio (Díaz et al., 2016).

Después, se divulgó la encuesta por medio de los correos electrónicos de los estudiantes y docentes con la colaboración del área de comunicaciones de la universidad. Por otro lado, en cuanto a los administrativos y trabajadores de servicios generales, la encuesta fue realizada de manera personal puesto que eran la minoría de las respuestas y, por esto, se facilitó su aplicación personal, de igual manera, se trató de seleccionar representantes de diferentes programas y facultades para obtener una muestra significativa. Finalmente, obtenidas la cantidad de encuestas respondidas según el cálculo, se analizaron los resultados para obtener las conclusiones pertinentes.

### 6.5 Diagrama de flujo de la metodología

El siguiente diagrama (Figura 6) muestra el paso a paso llevado a cabo en la investigación para poder cumplir cada uno de los objetivos específicos planteados y, principalmente, el objetivo general establecido.



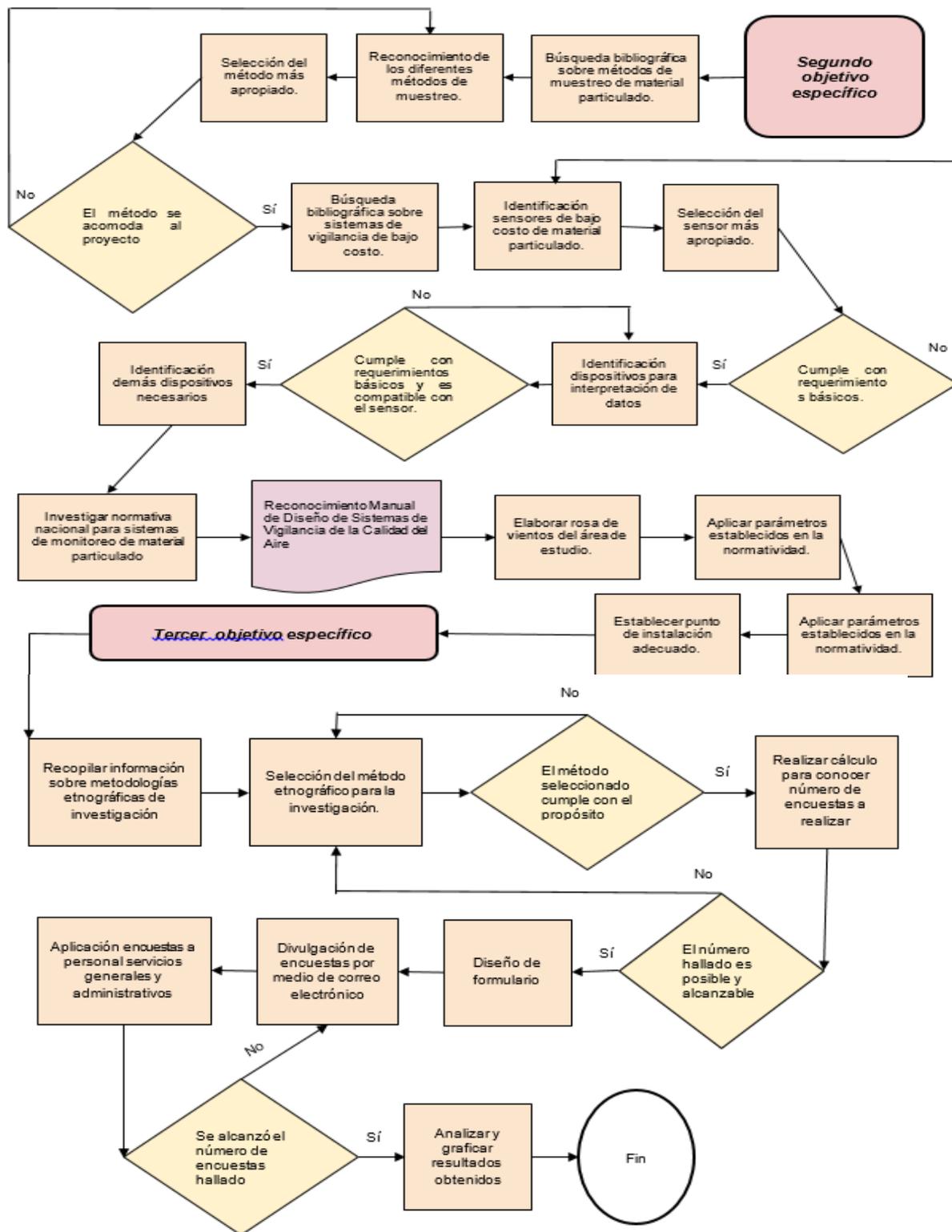


Figura 9. Diagrama de flujo metodología. Fuente: elaboración propia.

6.6 Resumen metodología - Matriz metodológica

El resumen de la metodología llevada a cabo para el desarrollo del presente trabajo se puede observar en la Tabla 3, la cual se divide en 3 fases, que corresponden a cada uno de los objetivos específicos planteados, donde se especifica la actividad, la técnica, el instrumento y el resultado esperado, para así poder lograr el objetivo general planteado y cumplir con éxito la investigación.

**Tabla 6**  
Matriz metodológica.

| Matriz metodológica  |   |  |                                   |                      |  |
|--|---|--|-----------------------------------|----------------------|--|
| Objetivo general   | Objetivo específico   | Actividad  | Técnica                           | Instrumento          | Resultados esperados   |
| Elaborar una propuesta de bajo costo que permita monitorear las concentraciones de material particulado PM2.5 y PM10 en tiempo real en la Universidad El Bosque. | Realizar un diagnóstico de la dirección de flujo del material particulado en inmediaciones de la Universidad El Bosque. | Hacer rosas de viento de los lugares más cercanos que cuenten con estaciones de monitoreo.                     | Diseño e interpretación de datos. | WRPLOT View y ArcGis | El comportamiento del material particulado se ve modificado por la precipitación y la velocidad – dirección del viento, lo cual genera que los problemas asociados a la exposición constante a este contaminante, se trasladen a poblaciones que habitan cerca de los puntos de emisión, como lo son Usaqué, |
|  |   | Conocer la dirección de flujo de los drenajes en la zona de estudio y su relación con la dirección del viento. | Diseño e interpretación de datos  | ArcGis               |  |

|  |   |  |  |
|--|---|--|--|
| <p>Identificar los promedios de precipitación y de material particulado PM2.5 y PM10 en las mismas zonas.</p>  | <p>Interpretación de datos.</p>   | <p>Datos abiertos históricos RM CAB.</p>             | <p>Suba, Guaymaral y Ferias.</p>   |
| <p>Graficar los valores identificados en la actividad anterior.</p>  | <p>Diseño y estructuración</p>  | <p>Excel.</p>  |  |
| <p>Investigar y recopilar información sobre los métodos de muestreo de material particulado.</p>   | <p>Lectura analítica de síntesis de información.</p>  |  | <p>Los dispositivos seleccionados son económicos, duraderos y seguros en cuanto a calidad de mediciones, además los puntos de instalación establecidos cumplen con los parámetros de la normatividad de forma que puede tomar mediciones correctas y confiables de</p> |
| <p>Seleccionar el método en base a sustentos teóricos.</p>   | <p>Análisis de información</p>  |  |  |
| <p>Seleccionar los dispositivos necesarios para el sistema de monitoreo de material particulado y establecer los puntos estratégicos para su ubicación</p> | <p>Investigar y recopilar información de los diferentes sensores de material particulado de bajo costo.</p> | <p>Lectura analítica de síntesis de información.</p> |  |
|  | <p>Seleccionar el sensor de bajo costo de material particulado.</p>   | <p>Análisis de información</p>                       | <p>Recursos literarios.</p>  |

---

|   |  |                              |
|---|--|------------------------------|
| <p>Investigar y recopilar información del microprocesador requerido para el sensor.</p> | <p>Lectura analítica de síntesis de información.</p> | <p>material particulado.</p> |
|---|--|------------------------------|

---

Investigar y recopilar información de los dispositivos adicionales necesarios para el sistema de vigilancia.

---

|  |  |                            |
|--|--|----------------------------|
| <p>Investigar los requerimientos para un sistema de vigilancia de material particulado según la normatividad nacional.</p> | <p>Lectura analítica de síntesis de información.</p> | <p>Recursos normativos</p> |
|--|--|----------------------------|

---

|  |                                |                      |
|--|--------------------------------|----------------------|
| <p>Aplicar parámetros establecidos en normativa para la ubicación del sistema de vigilancia.</p> | <p>Análisis de información</p> | <p>Google Earth.</p> |
|--|--------------------------------|----------------------|

---

|   |                                |                          |
|---|--------------------------------|--------------------------|
| <p>Realizar la rosa de vientos del área de estudio.</p> | <p>Diseño y estructuración</p> | <p>RStudio y ArcGis.</p> |
|---|--------------------------------|--------------------------|

---

|  |                   |
|--|-------------------|
| <p>Seleccionar el punto de instalación adecuado.</p> | <p>Selección.</p> |
|--|-------------------|

---

|   |  |  |
|---|--|--|
| <p>Recopilar información acerca de metodologías</p> | <p>Lectura analítica de síntesis de información.</p> | <p>El método seleccionado cumple con las expectativas de los autores</p> |
|---|--|--|

---

|   |  |                          |                         |   |
|---|--|--------------------------|-------------------------|---|
| Identificar la percepción por parte de la comunidad universitaria acerca de la calidad del aire y el sistema de vigilancia. | etnográficas de investigación.                             |                          | Recursos literarios.    | para su formulación, su impacto social es positivo ya que llama la atención de la comunidad educativa y permite saber que están interesados en el proyecto y que, en forma global, no se tiene un amplio conocimiento sobre problemáticas públicas relacionadas con material particulado. |
|   | Seleccionar método etnográfico.                            | Análisis de información. |                         |   |
|   | Calcular la muestra.                                       | Cálculos                 | Ecuaciones estadísticas |   |
|   | Diseñar el formato correspondiente para la identificación. | Diseño y estructuración  | Google docs             |   |
|   | Aplicar formato elaborado                                  |                          |                         |   |

Fuente: *elaboración propia.*

## 7 Plan de trabajo

### 7.1 Cronograma de actividades

#### Tabla 7



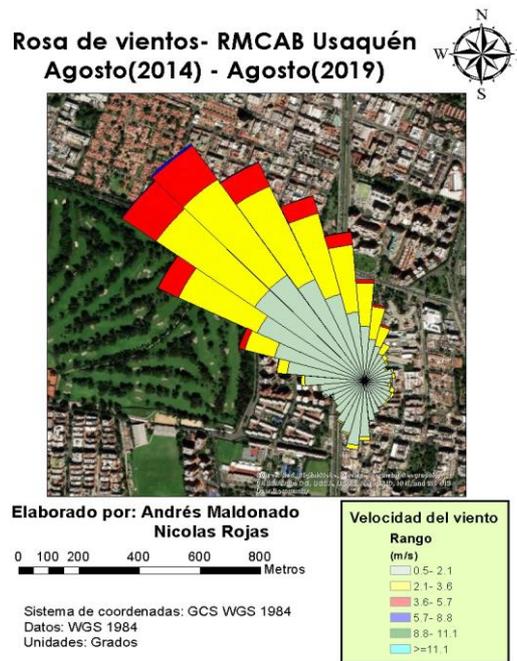


Figura 10. Rosa de viento de Usaquéen. Fuente: elaboración propia.

Del mismo modo, la precipitación es un factor clave, ya que influye en las concentraciones de material particulado en el aire puesto que genera la condensación de las partículas y las depositada en cuerpos de agua, vegetación, etc. A continuación, se puede observar su influencia en las concentraciones de este contaminante en la zona de estudio.

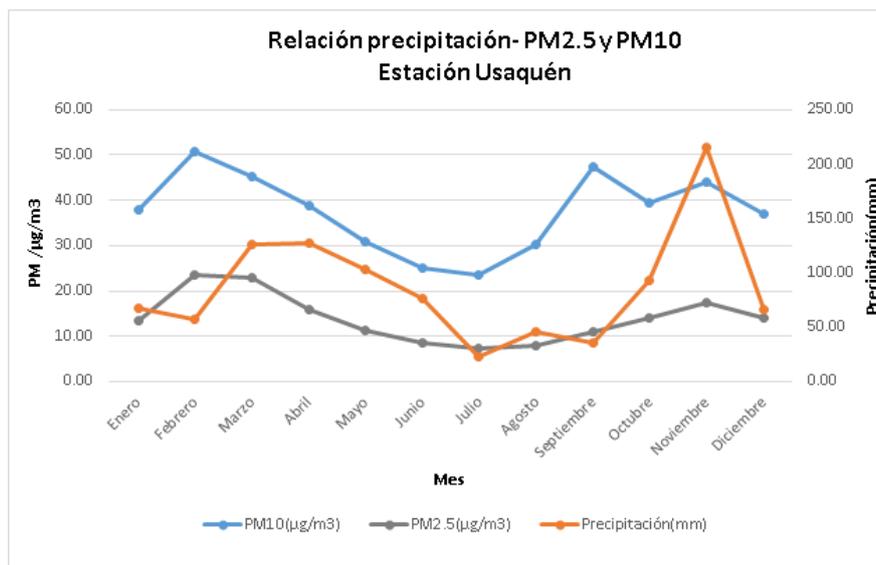


Figura 11. Relación precipitación - PM2.5 y PM10 estación de monitoreo de Usaquéen. Fuente: elaboración propia.

Con el fin de comprender detalladamente la dirección de flujo del material particulado y determinar si existe un comportamiento similar en otras partes de Bogotá, fue necesario escalar la investigación a los puntos más cercanos, que cuentan con estaciones de monitoreo, es decir, Ferias, Guaymaral y Suba, encontrando que:

**Ferías**

Se puede observar en la figura 12 que el viento en esta zona arrastra el material particulado con mayor intensidad hacia el occidente de la ciudad, no obstante, se presenta un arrastre en dirección noroccidental y suroccidental.

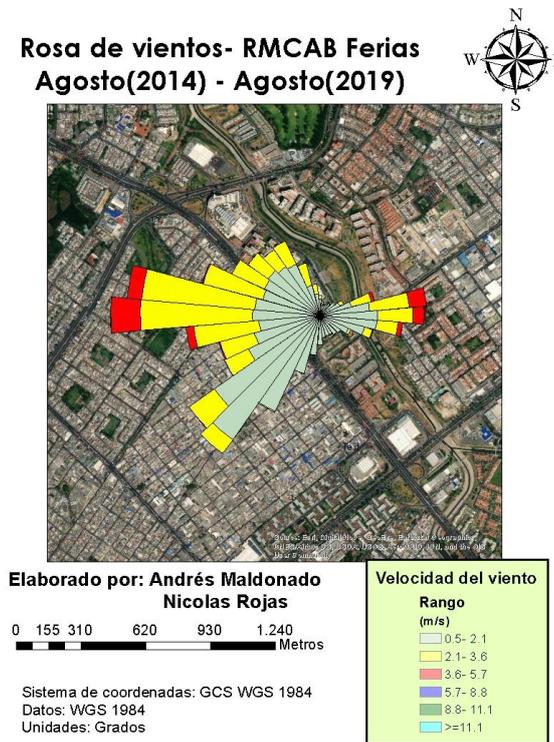


Figura 12. Rosa de viento de las Ferías. Fuente: elaboración propia.

Además, la relación entre la precipitación y las concentraciones de material particulado PM2.5 y PM10 es la siguiente:

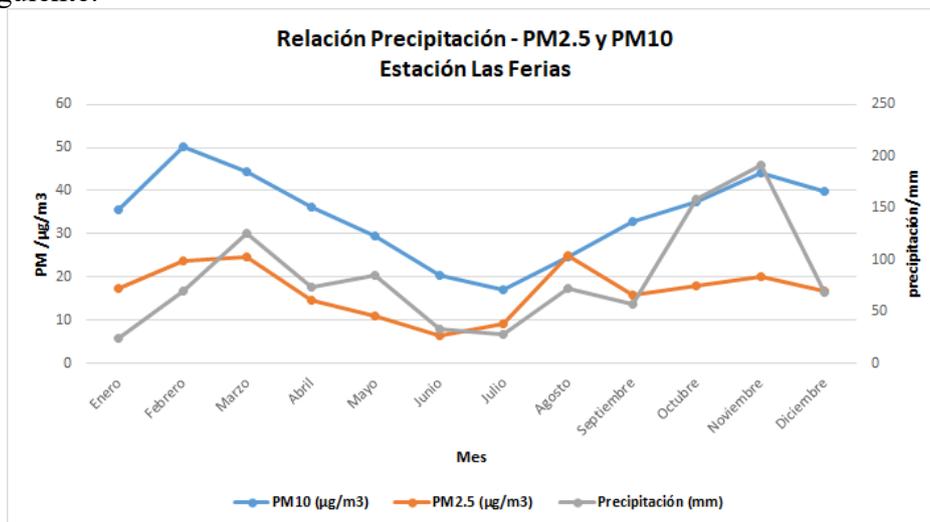


Figura 13. Relación precipitación - PM2.5 y PM10 estación de monitoreo de Las Ferías. Fuente: elaboración propia.

**Guaymaral**

En cuanto a Guaymaral, la dirección del viento va en sentido occidental, como se puede ver en la Figura 14.

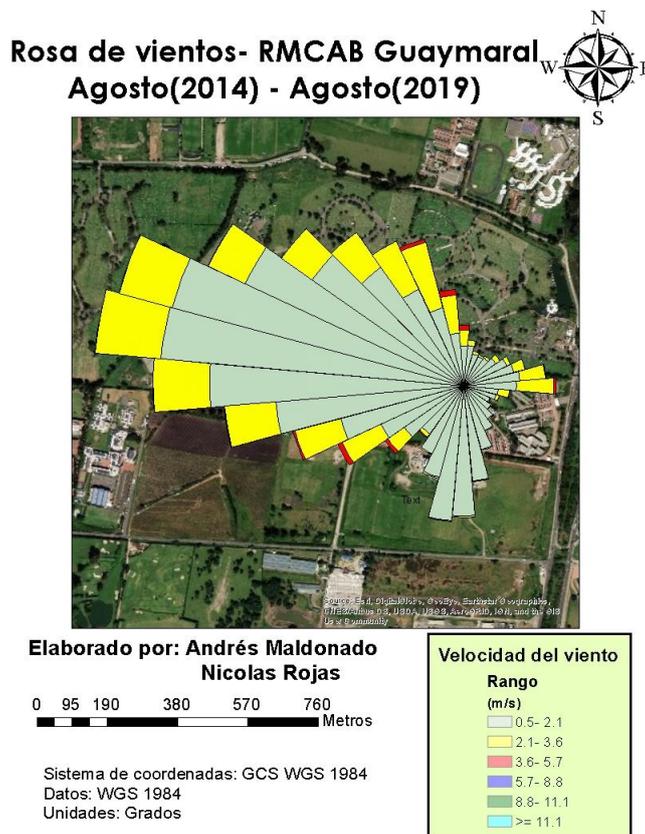


Figura 14. Rosa de vientos de Guaymaral. Fuente: elaboración propia.

De igual forma, se obtuvo que la precipitación en Guaymaral tiene una incidencia directa en las concentraciones de material particulado, como se puede observar en la Figura 15.

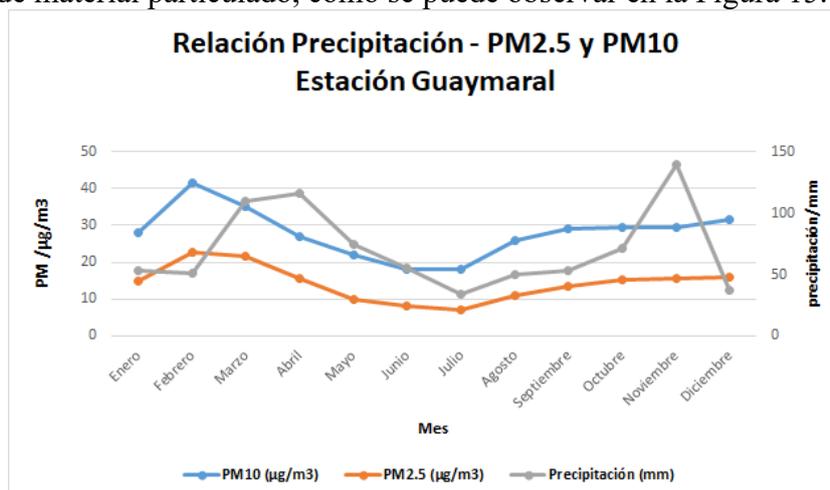


Figura 15. Relación precipitación - PM2.5 y PM10 estación de monitoreo de Guaymaral. Fuente: elaboración propia.

### Suba

Finalmente, en Suba las partículas se transportan con mayor velocidad en dirección occidental y a su vez presenta mayor intensidad hacia el suroccidente.

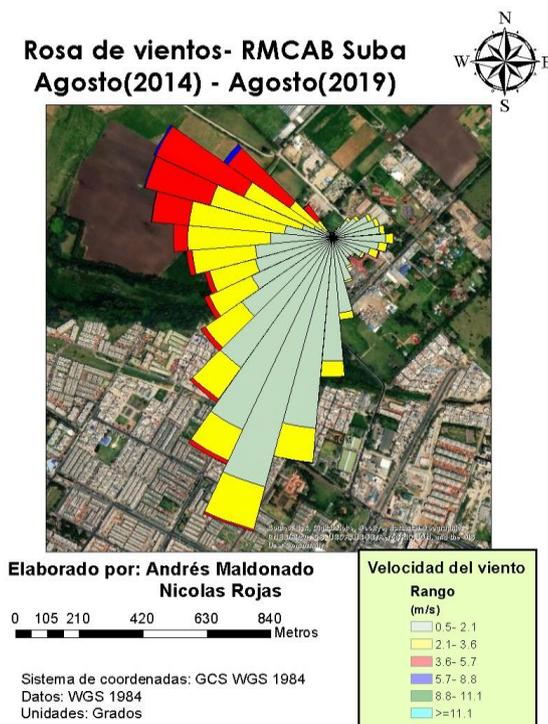


Figura 16. Rosa de vientos de Suba. Fuente: elaboración propia.

Asimismo, en la relación de la precipitación con la concentración de material particulado PM2.5 y PM10, se puede detallar que en meses que presentan altos niveles de precipitación como mayo y marzo, la concentración de este contaminante disminuye significativamente.

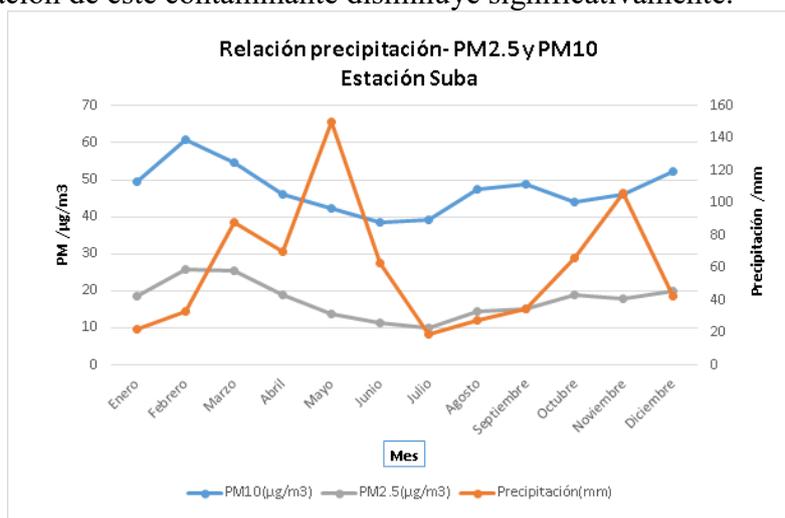


Figura 17. Relación precipitación - PM2.5 y PM10 estación de monitoreo de Suba. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, para darle cumplimiento al segundo objetivo específico, en cuanto al método de muestreo seleccionado para el desarrollo del proyecto, se seleccionó el **método óptico de percepción remota**, dado que tiene un diferenciador en cuanto a su uso por el tipo de equipos utilizados para su funcionamiento. Dicho de otro modo, los sensores de referencia mantienen una humedad relativa constante dentro de la entrada de muestreo del sistema y se componen de ópticas de precisión (para enfocar la luz láser y recolectar luz dispersa), un control de flujo de partículas y detectores ópticos altamente sensibles, por lo que poseen una detección mucho más precisa, en cambio, los sensores *low*

*cost*, según Lewis et al., (2018), toman mediciones de tamaños de partículas comprendidas entre 400 - 10,000 nm, operan a humedad relativa del ambiente y cuando se supera el 80-85% del valor normal, se afecta significativamente el rendimiento del sensor y además, actualmente hay muy pocas herramientas que permitan corregir o ajustar los datos obtenidos.

Sin embargo, los mismos autores aclaran que no significa que tengan un rendimiento menor, sino que aún no alcanzan la exactitud de los de referencia, lo que los constituye como una fuente complementaria de información sobre la calidad del aire, siempre y cuando se utilice el sensor adecuado para lo que se desea realizar. Sumado a lo anterior, según Jhonston et. al. (2017), existen una gran cantidad de proyectos innovadores para medir la calidad del aire utilizando sensores de bajo costo en Europa y en Estados Unidos que pueden proporcionar la resolución espacio - temporal requerida para mejorar la comprensión de la contaminación del aire y sus implicaciones en la salud.

Para profundizar este método de muestreo, fue necesario identificar los sensores de bajo costo que se encuentran en el mercado y los diferentes dispositivos que son indispensables para su funcionamiento (Anexo 1.1). Para ello, se identificaron las características de los sensores *low cost* más eficientes del mercado, de acuerdo a los parámetros establecidos en la tabla 2, que se pueden observar en la siguiente tabla:

**Tabla 8**

Cuadro comparativo de sensores low cost en el mercado.

|  | <b>HPMA 115s0</b>                   | <b>PMS3003</b>                       | <b>PPD2NS</b>       | <b>SDS011</b>                        |
|--|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| <b>Parámetros</b>                              | (Honeywell, s.f.).                  | (Aqicn, 2019).                       | (Shinyei, 2010).    | (Nova Fitness Co, 2015).             |
| <b>Corriente (máxima)</b>                      | 80 mA                               | 120 mA                               | 90 mA               | 100mA                                |
| <b>Error relativo</b>                          | 5%                                  | 5%                                   | 5%                  | 5%                                   |
| <b>Precios</b>                                 | 30.71 Dólares USD                   | 13.80Dólares USD                     | 7.07 Dólares USD    | 16.40 Dólares USD                    |
| <b>Rango de medición</b>                       | 0.0 - 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 0.0 - 999.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 0 - 28000 pcs/L     | 0.0 - 999.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| <b>Tamaño mínimo de partículas detectables</b> | 0.1 $\mu\text{g}$                   | 0.3 $\mu\text{m}$                    | 1.0 $\mu\text{m}$ . | 0.3 $\mu\text{m}$                    |

|                                |  |  |  |   |
|--------------------------------|--|--|--|---|
| <b>Temperatura de medición</b> | -30°C - +65°C  | -10°C - +60°C.   | 0°C - +45°C.   | -10°C - +50°C   |
| <b>Tiempo de respuesta</b>     | <6s  | <10s   | No información.  | 1s  |
| <b>Ventajas</b>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Monitoreo preciso de partículas.</li> <li>- Alto grado de confiabilidad.</li> <li>- Potencial para aplicabilidad industrial.</li> <li>- Tiene una precisión de +- 15%.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Brinda datos confiables y estables.</li> <li>- Trae un ventilador incorporado.</li> <li>- Alta resolución.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se le pueden realizar varias modificaciones sin que se afecte su rendimiento.</li> <li>- Estudios indican que sus mediciones son fiables.</li> <li>- Se le realiza mantenimiento cada 3 años.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Maneja un contado de partículas.</li> <li>- Tiene un ventilador estable y confiable.</li> <li>- Toma valores precisos y confiables.</li> <li>- Cuenta con un dispositivo de sombra en su interior.</li> <li>- Buena consistencia.</li> </ul> |
| <b>Desventajas</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo más elevado en comparación los demás.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Las mediciones varían dependiendo de la temperatura. (Ángulo, 2018).</li> </ul>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- La medición de los datos presenta comportamientos no lineales cuando la concentración es elevada.</li> <li>- La orientación del sensor influye en el flujo de aire que toma como muestra.</li> <li>- Empieza a tomar datos después de 25-33 minutos por la alta intensidad del flujo de aire</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se le tiene que realizar mantenimiento mínimo cada 6 meses y máximo un año para obtener una mayor fiabilidad en sus mediciones.</li> </ul>   |

(Canu, *et, al.* 2018).

|                                |                           |                          |                          |                         |
|--------------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Vida útil</b>               | 2.28 años (20,000 horas). | 0.91 años (8,000 horas). | 1.14 años (10,000 horas) | 0.91 años (8,000 horas) |
| <b>Voltaje de alimentación</b> | 5V                        | 5V                       | 5V                       | 5V                      |

**Imagen**



Figura 18. Ilustración gráfica sensor HPMA 115S0. Fuente: Honeywell, s.f.



Figura 19. Ilustración gráfica sensor PMS3003. Fuente: Aqion, 2019.



Figura 20. Ilustración gráfica sensor ppd42ns. Fuente: Shinyei, 2010.



Figura 21. Ilustración gráfica sensor SDS011. Fuente: Nova Fitness Co, 2015.

Fuente: *elaboración propia.*

Asimismo, se requiere un dispositivo que permita llevar a cabo la **lectura e interpretación de datos**, que sea compatible con el sensor HPMA 115S0 y que recoja, analice e interprete los valores medidos dependiendo del sistema de automatización de datos que se desarrolle. Conforme a esto, se propone utilizar un ordenador Raspberry Pi 3 B, el cual debe ser programado para que interprete los datos obtenidos en las mediciones y dependiendo las concentraciones obtenidas, arroje los datos de acuerdo al lenguaje de programación desarrollado, tiene un precio de **\$184,450COP** (Sigma Electrónica, cotización del 14 de abril de 2019). Es importante resaltar que para que el ordenador realice correctamente la interpretación de los datos, es necesario instalar un sistema operativo que sea compatible con la Raspberry, de acuerdo con esto, se propone utilizar el sistema *Raspbian*, ya que es desarrollado por la misma compañía, además, según Johnston *et al.*, 2017, es fácil de programar, trae consigo diferentes paquetes que dan un valor agregado al sistema y es utilizado frecuentemente para monitorear la calidad del aire con diferentes tipos de sensores.

Para continuar con la estructuración del sistema de monitoreo, se necesita de una **fuentes de alimentación** que suministre energía al sensor y al procesador el tiempo que estos se encuentren en funcionamiento, es decir, 14 horas por día (entre 6:00 AM y 8:00 PM). Para definir esta fuente, se debe considerar que el sensor requiere de 5V/80mA (Honeywell, 2019) y el procesador de 5V/2.5A para funcionar (RaspberryPi, 2019). Por esta razón, se propone adquirir una batería recargable de litio que es ideal para la Raspberry Pi, la cual alimentará a su vez al sensor y tiene un precio de aproximadamente **\$125,000 COP** (Batería de litio recargable, cotización 14 de abril de 2019).

Para finalizar esta parte, se requieren los siguientes **dispositivos adicionales** que son claves para estructurar el sistema de monitoreo y para obtener mejores resultados.

- Como bien se sabe, el sensor no puede estar expuesto a la lluvia y a los rayos del sol por largos períodos de tiempo, por lo que se propone instalar una caja eléctrica fabricada por NEMA, de medidas de 20cm de largo x 9,95cm de ancho x 6,70cm de alto, es ideal para cubrir el sensor de la variabilidad climática y tiene un precio que ronda los **\$70.000COP** (Zheng et. al, 2018).
- **Micro SD Samsung Evo 32Gb:** contiene el sistema operativo correspondiente para la interpretación de los datos, el cual es descargado previamente según lo que se desee realizar con la Raspberry, cuesta cerca de **\$20.000 COP** (Ebay, 14 de abril de 2019)
- **Disipador y ventilador:** son los dispositivos utilizados para disminuir la temperatura del procesador y no dejar que se sobrecaliente, actualmente se encuentra a la venta un kit profesional que contiene estos dos y tiene un precio de **\$22.854 COP** (Baratukin, 14 de abril de 2019).

Por otro lado, se establecieron los puntos estratégicos para la instalación de los dispositivos de medición, teniendo en cuenta los requerimientos para la ubicación establecidos en la tabla 3. Primero se propuso la siguiente ubicación para el dispositivo en dirección del viento.



Figura 22. Ubicación del dispositivo de medición entrada de la séptima. Adaptado de: Google Earth.

Después, se estableció el lugar indicado para que se realice la medición de material particulado a contraviento, Figura 29.



Figura 23. Ubicación del dispositivo de medición entrada de la novena. Adaptado de: Google Earth.

Finalmente, para el desarrollo del tercer objetivo, se determinó que el método más preciso es la encuesta ya que, según Hamui y Varela (2012), es el más apropiado para obtener información cuantitativa y estudiar la opinión que asume un grupo de personas sobre determinado tema, a diferencia de las entrevistas que son más adecuadas para analizar ideas en las biografías personales o los grupos focales que exploran el porqué de las diferentes opiniones que expresan los entrevistados. Asimismo, existen las siguientes razones:

- **Encuestas - entrevistas:** una ventaja que tienen las encuestas frente a las entrevistas es el tiempo, ya que esta última requiere una gran cantidad de tiempo para el desarrollo e interpretación de los resultados, además depende de las características de la entrevista y de la actitud del entrevistador y el entrevistado, lo que dificulta su planificación y aplicación y puede llegar a producir errores de reactividad, fiabilidad o validez (Valles, 1999).
- **Encuestas - grupos focales:** comparada esta metodología con la de grupos focales, esta presenta una gran limitación ya que su planificación es complicada en lo que respecta al tiempo y el logro de acuerdos o conclusiones colectivas. De igual manera, en este tipo de discusiones el grupo es influenciado por una o dos personas más dominantes que los demás, lo que polariza la información de manera negativa dentro del grupo (Bibliotecas UDLAP, s.f.).
- De forma general, no existe un parámetro clave que determine el tipo de investigación etnográfica que se deba utilizar para la investigación, estos van siendo creados por el investigador a medida que se adentra en el tema e identifica qué herramientas le pueden funcionar conociendo un momento y espacio determinado (Martínez, 2011).

En cuanto a la modalidad para la divulgación de las encuestas, se realizó por correo electrónico, puesto que actualmente este medio de comunicación es utilizado por gran parte de la población objetivo, representa un ahorro de recursos como tiempo y papel, y, además, no es necesario hacer una retroalimentación inmediata, la cual es la principal desventaja de este tipo de diseños (Behar, 2008). Adicionalmente, tiene una ventaja sobresaliente en cuanto al tiempo y en cuanto a que el encuestado no se ve presionado por el encuestador, lo que aumenta la confiabilidad, honestidad y franqueza por anonimato (Sánchez, 2011). El formato correspondiente al cuestionario se puede visualizar en el Anexo 1.2.

Se debe agregar que, para realizar las encuestas, hay que tener en cuenta que la población estudio es de 12147 personas. Dicho valor permitió obtener la muestra (Ecuación 4) y el número total de encuestas (Ecuación 5).

$$n = \frac{1,96^2(0,5*(1-0,5))}{0,05} 384,16 = 385 \quad \text{(Ecuación 4)}$$

$$Ne = \frac{385}{1+(\frac{385}{12147})} = 373,17 = 374 \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Asimismo, se obtuvieron los siguientes resultados para el número de encuestas necesarias por cada uno de los grupos de interés:

**Tabla 9**

*Número total de encuestas por grupo de interés.*

| Grupo de interés    | Tamaño población | Cantidad de encuestas |
|---------------------|------------------|-----------------------|
| Estudiantes         | 9772             | 301                   |
| Docentes            | 1791             | 55                    |
| Administrativos     | 493              | 15                    |
| Servicios generales | 91               | 3                     |

Fuente: *elaboración propia.*

Una vez realizados los cálculos correspondientes para las encuestas y su posterior aplicación, se obtuvieron los siguientes resultados de acuerdo a las preguntas realizadas.

**Primera pregunta:** se obtuvo que la percepción que tiene la comunidad universitaria en cuanto a la calidad del aire que respira dentro y a los alrededores de la Universidad es considerada buena por un 37% de la población, regular por un 54% y mala por un 9%.

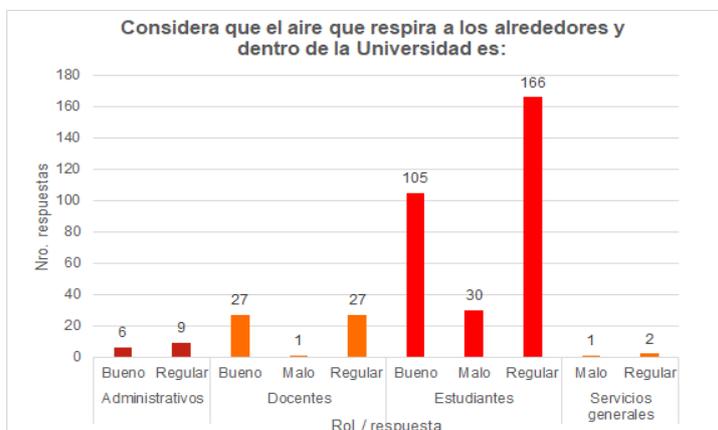


Figura 28. *Resultados de la primera pregunta.* Fuente: *elaboración propia.*

**Segunda pregunta:** se pudo observar que solamente el 21% de la población se encuentra familiarizada con los términos PM2.5 y PM10, lo que permitió identificar que la información a suministrar debe ser clara y comprensible para todos los miembros de la institución.

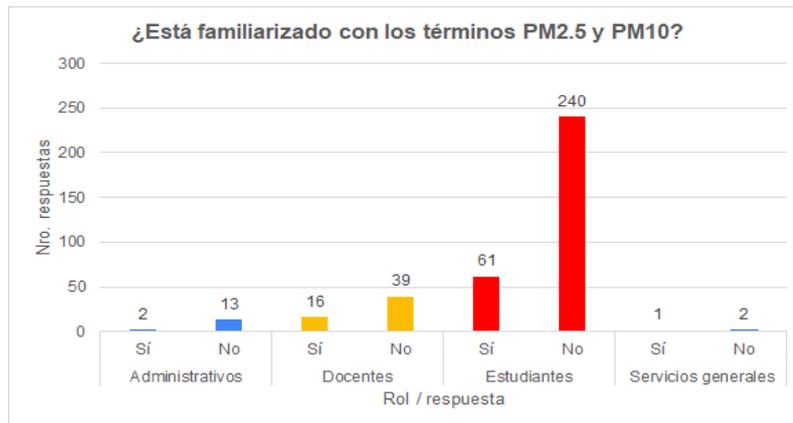


Figura 29. Resultados de la segunda pregunta. Fuente: elaboración propia.

**Tercera pregunta:** se encontró que el 62% de la población cree que el aire que respira en la universidad puede llegar a afectar su salud mientras que el 38% restante cree lo contrario.

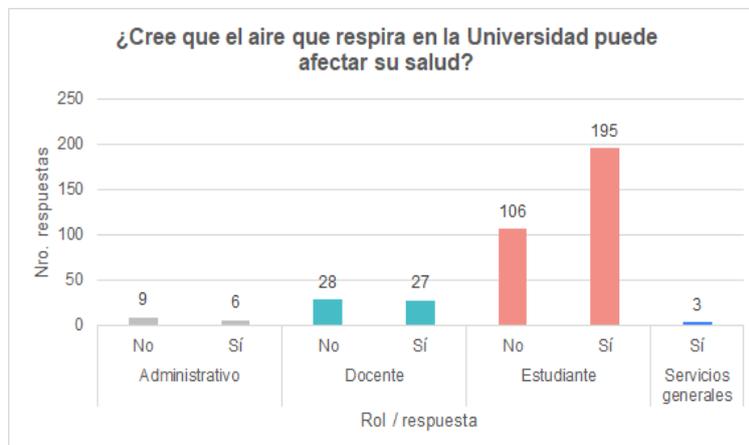


Figura 30. Resultados de la tercera pregunta. Fuente: elaboración propia.

**Cuarta pregunta:** se evidenció que a un alto porcentaje (98%) le gustaría que se implementara un medio que informe periódicamente sobre el nivel de contaminación de material particulado en la universidad.

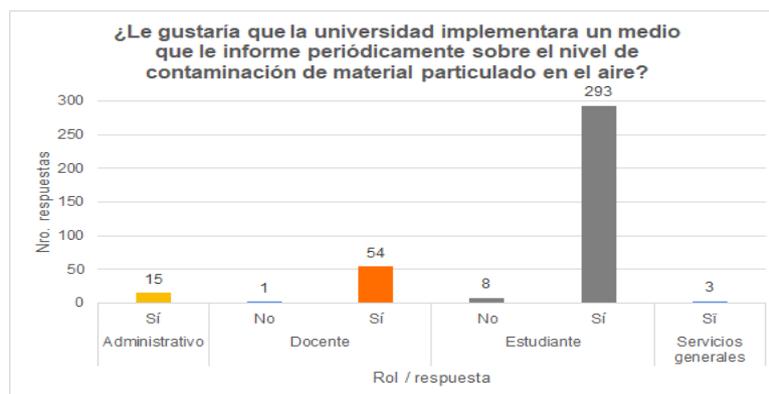


Figura 33. Resultados de la cuarta pregunta. Fuente: elaboración propia.

**Quinta pregunta:** con respecto a las preferencias de la población para recibir la información, se identificó que el mayor porcentaje prefiere una pantalla ubicada dentro de la universidad, mientras que el menor prefiere una página web.

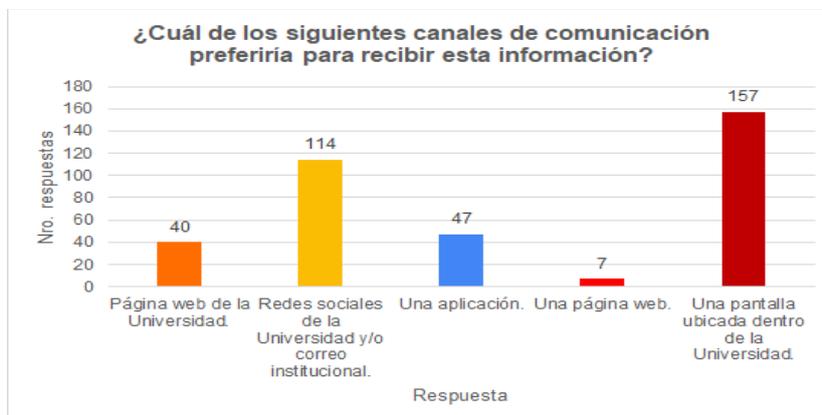


Figura 34. Resultados de la quinta pregunta. Fuente: elaboración propia.

**Sexta pregunta:** se detalló que más de la mitad (53%) de la población universitaria no ha sufrido ninguna enfermedad respiratoria en los últimos doce meses, mientras que el 23% ha sufrido alguna incidencia en los últimos 3 meses, 14% en los últimos 6 meses y 10% en los últimos 12 meses.

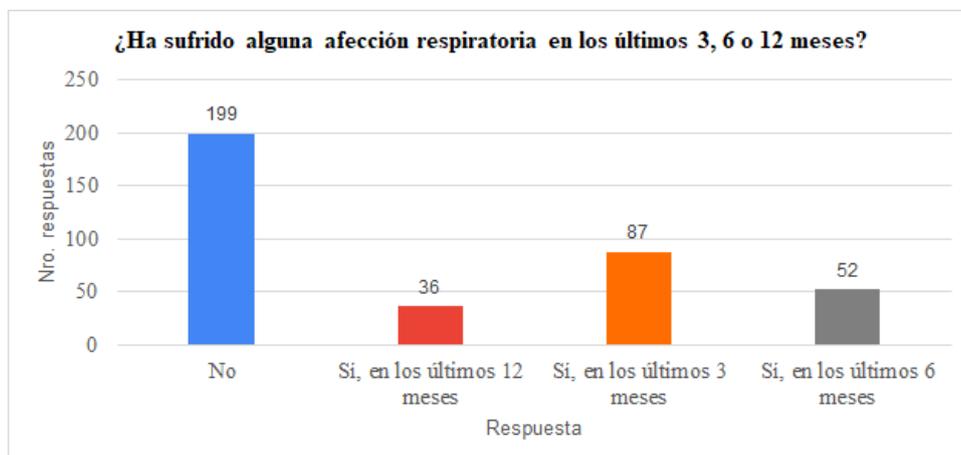


Figura 35. Resultados de la sexta pregunta. Fuente: elaboración propia.

**Sexta pregunta:** de acuerdo a la pregunta anterior, la mayor parte de la población (78%) cree que la enfermedad respiratoria que sufrieron está relacionada con una mala calidad del aire, caso contrario del 22% que cree que se debe a otros factores.



Figura 36. Resultados de la séptima pregunta. Fuente: elaboración propia.

## 9 Análisis y discusión de resultados

### 9.1 Primer objetivo específico

Con base en los resultados obtenidos del primer objetivo específico, al diseñar las rosas de vientos de las diferentes áreas de interés, es posible comprender a profundidad el rumbo que está tomando el material particulado, cuál es su posible rango de dispersión y a su vez, determinar cómo este transporte, posiblemente, afecte a las poblaciones cercanas. Además, permite identificar los posibles puntos de ubicación para los dispositivos de medición, teniendo en cuenta que un punto debe estar ubicado en dirección del viento y otro en dirección opuesta.

Por consiguiente, se encontró que en la Universidad El Bosque las corrientes de vientos viajan en dirección noroccidental con una velocidad promedio entre 0.5 y 5.7 m/s, en donde predominan los vientos con velocidades de 2.1-3.6 m/s como se puede observar en la Figura 10. Conforme a lo anterior y teniendo en cuenta que los compuestos del material particulado, por su peso y densidad pueden ser arrastrados hasta 1 km de distancia (Viena, 2003), se puede decir que, las emisiones generadas en la carrera séptima son transportadas hacia la universidad y las zonas residenciales aledañas, posiblemente en las horas de mayor flujo vehicular, la calidad del aire de la zona de estudio se ve fuertemente afectada, convirtiéndose en un factor de riesgo para la población universitaria. Es posible que, este fenómeno también se presente en la carrera novena, lo que puede generar el deterioro de la salud en gran parte de la población del barrio Nuevo Country, ya que probablemente al ser una zona residencial, sus habitantes no toman medidas preventivas ante la exposición de dicho contaminante.

De igual modo, puede verse afectado un 25% de la vegetación del Parque el Country, pues el material particulado altera el proceso de la fotosíntesis, genera cambios en la composición química del suelo, altera el crecimiento normal y la reproducción de las plantas (Moscoso *et al.*, 2019). Esto se debe a que la vegetación en las ciudades, funciona como un filtro natural que atrapa las partículas transportadas en el aire, por medio de las ramas, semillas o mediante las estomas de las hojas; es necesario recalcar que su capacidad de retención, está directamente relacionada con las características de sus hojas, como sus tricomas, la rugosidad en su superficie y su capa de cera epiculitar (Egas *et al.*, 2018). Ahora bien, no todas las partículas son interceptadas por la vegetación, generalmente una pequeña fracción de las partículas de mayor tamaño son absorbidas, por lo que la fracción sobrante es arrastrada por la precipitación o depositada en el suelo. Es importante resaltar que la lluvia también arrastra gran parte de estas partículas que se encuentran en las hojas, en contraste con las partículas más pequeñas que se adhieren con mayor fuerza al follaje (Przybysz *et al.*, 2014). Teniendo en cuenta lo anterior, se puede inferir, que la vegetación circundante de las zonas con alto flujo vehicular de la

ciudad de Bogotá, se está viendo afectada por altas tasas de emisión de material particulado y posiblemente se está generando una afectación en la cadena trófica.

Por otra parte, existe una relación entre la dirección predominante del viento y el flujo de agua de una de las vertientes más cercanas a la zona de estudio, como se puede observar en el Anexo 1.3, esto se debe a que el agua y el viento por su densidad, fluyen a través de las partes más bajas de la topografía y confluyen en un mismo punto. Por consiguiente, se deduce teniendo en cuenta lo observado en el mismo anexo, que un porcentaje del material particulado que es arrastrado por el viento desde la carrera novena, se está depositando en dicho cuerpo de agua, mediante el proceso de deposición seca, proceso en el cual las partículas y gases atmosféricos son depositados en el suelo en ausencia de precipitaciones, viéndose removidas con mayor facilidad las partículas de mayor tamaño (Ávila, 2017). De modo que, dicho contaminante atmosférico, pueden durar suspendido en el aire, en lapsos minutos o un día (Viana, 2003).

Así mismo, se comparó en las estaciones de Guaymaral, Suba y Ferias, la relación existente entre el flujo de las vertientes, dirección y velocidad de las corrientes de viento, con el fin de identificar, si este fenómeno se replica en gran parte de la ciudad y si posiblemente se está generando un impacto aún mayor. Encontrando que, en Guaymaral, se presenta la misma relación entre el flujo del agua y la dirección del viento, lo cual, posiblemente está generando que en dicho lugar se estén depositando las partículas suspendidas en la vertiente más cercana. Aunque, a diferencia de Usaquén, el arrastre de las partículas por el viento, no impactan a un gran número de personas, ya que es una zona semi-rural, como se puede observar en el Anexo 1.4. Por otro lado, como se detalla en el Anexo 1.5, en la zona de Ferias, se presenta un flujo multidireccional del viento, lo que posiblemente está causando la colisión de las masas de aire, ya que es un lugar en donde confluyen diferentes vertientes a un cauce más grande. Todo esto, parece confirmar que las partículas quedan suspendidas en el lugar y se depositan en el río Arzobispo, el cual, desemboca en el río Bogotá.

Por último, se evaluó la zona de Suba, en donde las corrientes de viento viajan con mayor frecuencia en dirección suroccidental y a su vez, se presentan corrientes de vientos en dirección noroccidental con altas velocidades. De modo que existe una relación entre la dirección del viento del lugar y el flujo de agua como se puede contemplar en el Anexo 1.6, en donde se evidencia que el río Bogotá fluye en la misma dirección que la corriente de viento con mayor frecuencia, además, es posible que, al presentarse un flujo de aire con alta velocidad en dirección al río, el material particulado emitido en la zona se está depositando en él.

Ahora bien, con la finalidad de conocer el impacto que tiene la precipitación en las concentraciones de material particulado PM2.5 y PM10 de los cuatro puntos estudiados, se graficaron sus concentraciones promedio de forma mensual entre el 10 de agosto del 2016 hasta el 10 de agosto del 2019. En donde se pudo observar que en los meses con mayor precipitación como marzo, abril y mayo, existe un decrecimiento considerable de las concentraciones de material particulado, no obstante en los meses con menor precipitación como diciembre, enero y julio, aumentan dichas concentraciones, como se puede observar en las Figuras 11, 13, 15 y 17. Esto se debe al fenómeno de la deposición húmeda, en donde son removidos los contaminantes suspendidos en el aire como el material particulado (Rubio *et al.*, 2001). De manera que, al producirse la precipitación se lava el contaminante que se encuentra en la nube y a su paso, lava el suspendido en la atmósfera (Viana, 2003). Así mismo, se identificó que la precipitación causa una mayor oscilación en las concentraciones de PM10 que en las concentraciones de PM2.5, esto se debe a que las partículas de PM10 tienen un peso mucho mayor en comparación con el PM2.5, estas partículas al ser más pequeña tienen una alta probabilidad de ser depositadas en el suelo por deposición seca. En contraste con lo anterior, se observó que en el mes de noviembre las concentraciones de estos contaminantes no

decrecen, a pesar de ser el mes con mayor precipitación promedio del año. Posiblemente se deba a que en este mes la frecuencia y la velocidad del viento, disminuyen considerablemente a comparación de los otros meses del año, permitiendo inferir que el material particulado arrastrado por el viento, tiene un alto porcentaje de remoción (Anexo 1.7).

Conforme a lo anterior, se observó al microscopio, con un aumento de 400X una muestra de agua lluvia recolectada en la Universidad El Bosque (Forero, 2019), con el fin de comprobar si es verídico que el agua lluvia arrastra consigo material particulado, visualizando partículas de color oscuro, posiblemente provenientes de combustibles fósiles debido a su color (Ver Figura 31).

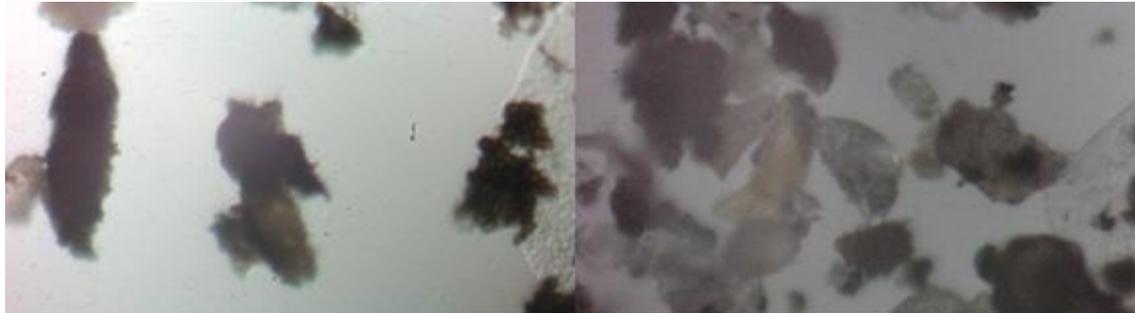


Figura 31. *Partículas en la muestra de agua lluvia.* Fuente: Forero, 2019.

Además, se observó que cuando el promedio mensual de precipitación es mayor a 60 mm, las concentraciones de PM10 y PM2.5 disminuyen, no obstante, a medida que la precipitación disminuye con respecto a este valor, las concentraciones aumentan exponencialmente. Para concluir, es posible que el material particulado depositado en los cuerpos de agua por deposición húmeda y deposición seca a lo largo de la ciudad, termine en la cuenca del río Bogotá.

Por último, se realizó una comparación de las concentraciones promedio de material particulado y la precipitación de los cuatro puntos estudiados, de modo que se encontró, que los puntos con los datos más altos en ambas variables son Usaquén y Suba. Además, al comparar la variables de cada uno de estos puntos, se puede decir que en comparación a Usaquén, Suba presenta concentraciones superiores de PM10 y PM2.5, en un 21% y 20.3%, respectivamente, sin embargo, Usaquén presenta un 30% más de precipitación y una mayor velocidad e intensidad del viento, lo que permite inferir que en los alrededores de la Universidad El Bosque se genera una mayor tasa de emisión de material particulado, sin embargo, el arrastre por el viento y la constante deposición húmeda del lugar, ocasiona que los valores registrados por la estación de monitoreo sean mucho menores.

## 9.2 Segundo objetivo específico

Por lo que se refiere al segundo objetivo, se seleccionaron los dispositivos necesarios que conforman el sistema de monitoreo, de tal forma que esté compuesto por un dispositivo que se encargue de realizar las mediciones de las concentraciones de material particulado, otro de la lectura e interpretación de datos y una serie de instrumentos que son imprescindibles para que no haya ningún problema técnico, una vez se ponga en funcionamiento. Es necesario recalcar que todos los dispositivos deben ser compatibles con el modelo del sensor seleccionado, ya que de estos depende la eficiencia en la interpretación y visualización de los datos.

Inicialmente, se puede observar en la tabla 4 que existen diferentes sensores para la *adquisición de datos*, los cuales tienen características similares, sin embargo, se encontraron diferenciadores en cuanto al modelo Honeywell HPMA 115s0, a pesar de ser el más costoso, ya que brinda resultados

más confiables, necesita menos corriente eléctrica, posee un tiempo de respuesta rápido con respecto al sensor PMS3003, su principio de funcionamiento es más completo que los demás, posee una alta resistencia a la variabilidad climática por su larga vida útil, lo que disminuye a su vez la frecuencia de pago por mantenimiento (reparaciones, calibraciones, mano de obra, etc.). Así mismo, posee un alto grado de confiabilidad para la toma de muestras y no presenta desventajas que puedan afectar su funcionamiento, a diferencia de los demás sensores. Cabe señalar que dicho sensor ha sido utilizado en diferentes proyectos, como CanAir, lo que brinda confiabilidad en cuanto a la precisión de sus mediciones.

Otro rasgo importante es el dispositivo encargado de la *lectura e interpretación de datos*, para ello se propone el uso del ordenador Raspberry Pi 3B, debido a que puede ser programable desde diferentes sistemas operativos, como OpenElec, RaspBMC, entre otros, en una única aplicación llamada Noobs, la cual permite instalar y probar diferentes sistemas operativos dependiendo de lo que se desee realizar. Al contrario de los microprocesadores arduinos, que solamente se programa por medio de un sistema determinado. Adicionalmente, tiene un procesador potente y cuenta con memoria propia, lo que incrementa su rendimiento. Es necesario agregar que se requieren accesorios extra como la fuente de alimentación y las memorias micro SD para funcionamiento, lo que incrementa su costo (RaspberryPi, 2019). En conclusión, sus costos son más elevados en comparación con otros procesadores que se encuentran en el mercado, dado que sus resultados son más confiables.

Como se mencionó anteriormente, los costos incrementan por el uso de la Raspberry Pi pero se obtienen mejores resultados, por lo que el costo total de ensamblaje ronda los **\$530,000** COP, valor significativamente pequeño comparado con lo que cuesta la implementación de una estación de monitoreo (Anexo 2.1).

Por lo que concierne a la ubicación del sistema de monitoreo, se puede observar que los puntos seleccionados cumplen con los parámetros establecidos en la tabla 3. Conforme a lo anterior, se ubicó un primer punto a favor del viento en el techo de la entrada de la carrera 7b, Figura 22, donde se puede proveer de electricidad para su alimentación, además, soporta el peso del equipo, tiene un flujo de aire constante que transporta el material particulado emitido por las fuentes móviles, se encuentra a una distancia considerable de la vía principal donde se genera la mayor tasa de emisión de material particulado, es decir la carrera séptima y como valor agregado, se pueden comparar los datos obtenidos por la medición con los valores arrojados por la estación de monitoreo de Usaquén. De igual forma, para la ubicación del sensor en contraviento (Figura 23), se cumplió con dichos requerimientos, sumado a esto, ofrece la posibilidad de identificar qué porcentaje de material particulado arrastrado por el viento desde carrera 7 y 7b, se deposita en las instalaciones de la universidad. Si bien es posible teniendo en cuenta las mediciones realizadas por cada uno de los sensores y comparándolas con la intensidad, dirección del viento y la precipitación.

### 9.3 Tercer objetivo específico

Con respecto al tercer objetivo, se puede decir que, de las 374 encuestas realizadas, con un nivel de confianza del 95% y un error máximo permisible del 5%, más del 60% de la población, considera el aire que respira en inmediaciones de la universidad como regular o malo. Esto permite detallar que la población está familiarizada con la contaminación atmosférica pero no conoce este problema a fondo ya que, de este porcentaje mencionado, solamente el 25% conoce los términos PM2.5 y PM10. Dicho porcentaje de desconocimiento por parte de la población, justifica lo mencionado por el IDEAM (s.f.), puesto que, de forma general, el 79% de los miembros de la institución educativa desconocen los términos PM2.5 y PM10. Conforme a esto, se puede deducir que este alto porcentaje de desconocimiento se debe a la falta de asignaturas que aborden temas relacionados con educación

ambiental, al igual que por la poca claridad en la difusión de este tipo información, debido a que no se estructura de forma comprensible para toda la población.

Cabe agregar que, de las personas encuestadas, el grupo que presenta mayor conocimiento respecto al material particulado, es la población de la segunda edad (40 - 59 años), con un porcentaje del 31%, lo que posiblemente está relacionado con que el 41% de la muestra que se encuentran en este rango de edad, han sufrido alguna complicación respiratoria en los últimos 12 meses. En consecuencia, se puede decir que este grupo poblacional tienden a preocuparse mucho más por su salud y, por ende, se encuentran más informados en temas que puedan representar un riesgo para su salud.

En cuanto a la propuesta de implementar un medio comunicativo que informe en tiempo real sobre el nivel de contaminación de material particulado en el aire, se obtuvo que al 98% de la comunidad le gustaría que se implementara, mientras que al 2% no le gustaría. De acuerdo con esto, se evidenció que 8 de los 9 encuestados que respondieron que no les gustaría que se implementara, no han sufrido ninguna afección respiratoria en los últimos 12 meses, por consiguiente, es una probable explicación al porqué de su respuesta.

Habría que decir también que del 98% que está de acuerdo con la instalación de dicho medio, 48% ha sufrido alguna afección respiratoria en los últimos 12 meses, donde aproximadamente el 72% considera que pudo ser causada por los altos niveles de contaminación a los que se encuentran expuestos constantemente. Otra posible razón de esta respuesta es que el 62% de los encuestados que perciben positivamente el medio comunicativo, consideran que el aire que respiran en la universidad puede llegar a afectar su salud. De modo que, se puede observar que el apoyo a que se implemente un sistema de monitoreo, se debe a la incidencia de enfermedades respiratorias que son relacionadas con altos niveles de material particulado y porque la calidad del aire es percibida por un alto porcentaje como regular o mala, razón por la que se ve la necesidad de monitorear aún más los niveles de concentración de material particulado en el área de estudio.

Finalmente, se identificó que la mayor parte de la población (43%) prefiere una pantalla en la universidad que brinde la información. Considerando que, no es necesario descargar alguna aplicación o ingresar a internet para poder acceder a la información, al encontrarse en un punto central será fácil de observar, como, por ejemplo, en el edificio F y que no requiere de una programación compleja para el diseño del contenido. Además, es importante mencionar que las prestaciones deben ser explicadas detalladamente para que no haya sesgos en la recepción de la información, teniendo como referencia el alto índice de desconocimiento que se tiene sobre los términos PM2.5 y PM10.

\*Todos los cálculos y respuestas de las encuestas correspondientes al tercer objetivo específico, se encuentran disponible en el documentos anexos.

## 10 Conclusiones

### *Primer objetivo específico*

- Debido a que Usaquén es la zona con mayor precipitación y con las velocidades más fuertes de viento, sus valores de material particulado son muy similares a las registradas en Suba, lo que permite concluir que en Usaquén posiblemente se genere una mayor tasa de emisión.
- El viento tiene una elevada capacidad de remoción de partículas, dado que en los meses en donde desciende representativamente la velocidad del viento, las concentraciones de material particulado aumentan, sin importar lo fuerte que sean las precipitaciones.
- Las lluvias reducen considerablemente las concentraciones de material particulado cuando se presentan precipitaciones promedio mensuales de 60 mm en adelante.

- Al encontrar que la dirección del flujo del agua presenta gran similitud con la del viento, se puede decir que gran parte del material particulado arrastrado por el viento, está siendo depositado por deposición seca sobre los cuerpos de agua.
- El material particulado presenta el mismo comportamiento en los cuatro puntos en presencia de variables como precipitación y viento.
- De acuerdo con las diferentes gráficas realizadas en las que se detallan los valores promedio de material particulado en los diferentes meses, se puede decir que la política pública colombiana que define los valores máximos permisibles de material particulado por hora, es ineficiente ya que en muchas ocasiones se supera el nivel máximo permisible y, además, el rango establecido es bastante alto en comparación a los niveles establecidos por la OMS.

#### *Segundo objetivo específico*

- Los diferentes puntos propuestos para la ubicación del sistema de vigilancia, brindan la oportunidad de saber qué pasa con el material particulado una vez ingresa a las instalaciones de la universidad.
- El costo total para el ensamblaje del sistema de monitoreo es de \$530,000COP, el cual es un valor accesible para un sistema que brinda mediciones confiables, es seguro y resiste la variabilidad climática, además, esto permite que se pueda expandir el proyecto a diferentes instituciones tales como clínicas, colegios, entre otros.

#### *Tercer objetivo específico*

- La población universitaria sí se encuentra interesada en que se implemente un sistema de vigilancia de material particulado, lo cual puede ser explicado desde la perspectiva que se tiene del aire que se respira en la universidad.
- Teniendo en cuenta que más de la mitad de la comunidad considera el aire que respira en la universidad es regular o malo y que el 72% de la población asocia los problemas respiratorios que han tenido en los últimos 12 meses con una mala calidad del aire, es necesario implementar un sistema de vigilancia que busque educar a la población sobre esta problemática.
- Implementar una pantalla que informe periódicamente sobre el nivel de contaminación de material particulado dentro de la universidad, facilita la divulgación e interpretación de la información ya que puede ser visualizada por los diferentes miembros de la institución educativa.
- Dado el alto índice de desconocimiento que se tiene sobre los términos PM2.5 y PM10, es necesario que el sistema de vigilancia utilice un lenguaje comprensible para todos, sin importar el nivel de educación que posean.
- La propuesta de bajo costo consiste en un sensor Honeywell HPMA 115S0 que se encargará de realizar las mediciones pertinentes de material particulado PM2.5 y PM10, una Raspberry pi 3b que tiene la función de interpretar los datos, una memoria micro SD que almacenará los datos tomados, una batería recargable para que los dispositivos estén en funcionamiento entre 6:00 AM y 8:00 PM, una caja eléctrica que contendrá el sistema de vigilancia seguro y resistente a la intemperie y una pantalla que mostrará la información recolectada por el dispositivo, como se puede observar en los anexos 1.7 y 1.8.

## 11 Recomendaciones

- En dado caso de quererse implementar el proyecto, es necesario realizar pruebas piloto para comprobar que el sistema opere correctamente y no tiene sesgos en cuanto a su funcionamiento.
- Se recomienda incentivar el aprendizaje de los diferentes miembros de la institución educativa en temas relacionados a calidad del aire.
- Si se quiere tener una mejor idea en cuanto al comportamiento del material particulado a los alrededores de la Universidad, es necesario realizar un modelo de dispersión de contaminantes de esta área para poder visualizar cómo se comportan estas partículas espacialmente.
- Es necesario profundizar en el estudio de cómo el material particulado afecta a la vegetación urbana y si se está presentando una afectación de esta en el Parque el Country.
- Ya que gran parte de la población universitaria prefiere obtener la información por medio de una pantalla, se recomienda construir esta como se puede ver en los anexos 1.8 y 1.9.
- Igualmente, se recomienda mostrar las prestaciones establecidas en los anexos 1.10, 1.11 y 1.12.
- Para corroborar si el material particulado se está depositando en los cuerpos de agua de la ciudad de Bogotá, es necesario realizar estudios del agua, en busca de identificar si existe una alta presencia de los principales compuestos químicos que componen el material particulado.
- Se recomienda establecer más puntos estratégicos para el monitoreo de Material Particulado en la Universidad El Bosque.

## 12 Referencias Bibliográficas

- Alcaldía de Bogotá. (2019). Red de Monitoreo de Calidad del Aire. Recuperado de: <http://ambientebogota.gov.co/red-de-calidad-del-aire>
- Alcaldía de Bogotá. (2019). Localidades de Bogotá. Recuperado de: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/localidades>
- Alcaldía Local de Usaquén. (2010). Localidad de Usaquén. Recuperado de: <https://sites.google.com/site/sitiosparaintervenir/localidad-de-usaquen>
- Ángulo, B. (2018). Prototipo de una Red de Estaciones Móviles de Medición de la Calidad del Aire en Bogotá (tesis de pregrado). (pp. 47). Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia.
- Aqicn. (2019). The Plantowe PMS3003 Air Quality Sensor Experiment. Recuperado de: <https://aqicn.org/sensor/pms3003/es/>
- Arrieta, A. (2016). Dispersión de Material Particulado (PM10), con Interrelación de Factores Meteorológicos y Topográficos (tesis de posgrado). *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, Tunja, Colombia. (pp. 2).
- Ávila, A., y Aguillaume, L. (2017). Monitorización y tendencias de la deposición de N en España, incluyendo polvo sahariano. *Ecosistemas*. 26. 16-24.
- Baratukin. (14 de abril de 2019). Disipador y ventilador para Raspberry Pi 3B. Recuperado de: <https://baratukin.es/producto/B01L8FXNF4>

- Batería de litio recargable. (2019). Cotización baterio de litio recargable. Recuperado de: <https://www.bateriadelitiorecargable.com/es/baterias-de-litio-recargables-5v/bateria-litio-recargable-5v-3a-15wh-87html>
- Behar, D. (2008). Metodología de la Investigación. (pp. 62-66). Recuperado de: <http://www.rdigital.unicv.edu.cv/bitstream/123456789/106/3/Libro%20metodologia%20investigacion%20este.pdf>
- Bibliotecas UDLAP. (s.f.). ¿Qué son los Grupos Focales? (pp. 18-21). Recuperado de: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lco/magadan\\_p\\_ge/capitulo5.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lco/magadan_p_ge/capitulo5.pdf)
- Bogotá Cómo Vamos. (2019). Preocupa Crecimiento de Parque Automotor en Bogotá. Recuperado de: <http://www.bogotacomovamos.org/blog/preocupa-crecimiento-de-parque-automotor/>
- CanAirio (2019). Proyecto CanAirIo. Recuperado de: <https://canair.io/>
- Canales, M. (2006). Metodologías de Investigación Social Santiago de Chile, Chile: Lom Ediciones. (pp. 23, 268).
- Canales, M., Quintero, M., Castro, T., y García, R. (2014). Las Partículas Respirables PM10 y su Composición Química en la Zona Urbana y Rural de Mexicali, Baja California en México. *Scielo*. 6(25).
- Cano, L., Luna, A., Talavera, A. (2017). Uso de Sensores Electroquímicos de Bajo Costo para el Monitoreo de la Calidad del Aire en el Distrito de San Isidro - Lima - Perú. *Universidad Del Pacífico*. Recuperado de: <http://repositorio.up.edu.pe/bitstream/handle/11354/1845/DD1705.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castañeda, J. (2018). Estudio de la Calidad del Aire en la Universidad Sergio Arboleda en Jornada del Día Sin Moto y Sin Carro, Analiza la Concentración de PM 2.5. *Universidad Sergio Arboleda, Bogotá, Colombia*.
- CEH. (s.f.). Atmospheric Pollution. Recuperado de: <https://www.ceh.ac.uk/our-science/science-issues/atmospheric-pollution>
- Congreso de Colombia. (22 de diciembre de 1993). Artículos 5 y 31. *Ley por la cual se crea el ministerio del medio ambiente. [Ley 99 de 1993]*. Do: 41.146.
- Congreso de Colombia. (24 de enero de 1979). Artículos 41 y 42. *Ley por la cual se dictan medidas sanitarias. [Ley 9 de 1979]*. DO: 42.748.
- Consejo Local de Gestión del Riesgo y Cambio Climático. (2017). Caracterización General de Escenarios de Riesgo Localidad de Usaqué. (Pp. 6).
- Consejo Nacional de Planeación. (31 de julio de 2018). *Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire. [Documento CONPES 3943]*.
- Constitución Política de Colombia. [Const.]. (1991). Artículo 79. 2da Ed. Legis.

- Cremades, P. (2013). Desarrollo de un Monitor Abierto de Calidad del Aire. *Universidad Nacional de Cuyo*. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/306442802\\_DESARROLLO\\_DE\\_UN\\_MONITOR\\_ABIERTO\\_DE\\_CALIDAD\\_DEL\\_AIRE\\_MACA](https://www.researchgate.net/publication/306442802_DESARROLLO_DE_UN_MONITOR_ABIERTO_DE_CALIDAD_DEL_AIRE_MACA)
- DEC. (s.f.). Mobile Sources. Recuperado de: <https://dec.vermont.gov/air-quality/mobile-sources>
- Departamento Nacional de Planeación de Colombia. (2017). Los Costos en la Salud Asociados a la Degradación Ambiental en Colombia. Recuperado de: [https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx)
- Díaz, J., Ojeda, M., y Valderrábano, D. (2016). Metodología de Muestreo de Poblaciones Finitas para Aplicaciones en Encuestas. Veracruz, México: Imaginaria Editores.
- DISL. (2019). What is Precipitation? Recuperado de: <https://arcos.disl.org/main/whatisprecip>
- DISL. (2019). What is Wind Direction? Recuperado de: <https://arcos.disl.org/main/whatiswinddir>
- Ebay. (14 de mayo de 2019). Micro SD Samsung Evo 32Gb. Recuperado de: [https://www.ebay.com/sch/i.html?\\_nkw=samsung+evo+micro+sd+32gb+card&ul\\_noapp=true](https://www.ebay.com/sch/i.html?_nkw=samsung+evo+micro+sd+32gb+card&ul_noapp=true)
- Egas, C., Naulin, P., y Préndez, M. (2018). Contaminación Urbana por Material Particulado y su Efecto sobre las Características Morfo-Anatómicas de Cuatro Especies Arbóreas de Santiago de Chile. *Información Tecnológica*, 29(4), 111–118.
- Elen, B., Molino, A., Theunis, J. (2012). The EveryAware SensorBox: a Tool for Community-Based Air Quality Monitoring. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/280064143\\_The\\_EveryAware\\_SensorBox\\_a\\_tool\\_for\\_community-based\\_air\\_quality\\_monitoring](https://www.researchgate.net/publication/280064143_The_EveryAware_SensorBox_a_tool_for_community-based_air_quality_monitoring)
- EPA. (2017). Conceptos básicos sobre el material particulado. Recuperado de: <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- EPA. (2019). Efectos del Material Particulado (PM) sobre la Salud y el Medio Ambiente. Recuperado de: <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- Figuroa, E., y Méndez, A. (2015). Evaluación de la Calidad del Aire en 8 Zonas de la Ciudad de Bogotá Utilizando los Líquenes como Bioindicadores. (pp. 7-9). *Universidad de la Salle*. Bogotá, Colombia.
- FAO. (2019). Norma Ambiental de Calidad del Aire de la FAO. Recuperado de: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/dom60781.pdf>
- Forero, G. (2019). Tutoría de Proyecto de Grado. *Universidad El Bosque*.
- Fotue, D., Tononkoe, G., y Engel, T. (2016). An ad-hoc Wireless Sensor Networks with Application to Air Pollution Detection. University of Luxembourg: Luxembourg

- Gaitán, M., y Behrentz, E. (2009). Evaluación del Estado de la Calidad del Aire en Bogotá. *Universidad de Los Andes*. Bogotá, Colombia.
- Gallego, L. (2011). Propuesta de Plan de Aire Limpio para la Universidad El Bosque (tesis de pregrado). (pp. 4). Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia.
- General, S. (2018). Alcaldía Mayor de Bogotá. Recuperado de <http://www.bogota.gov.co/ciudad/ubicacion>
- Hamui, A., y Varela, M. (2012). La Técnica de Grupos Focales. *Elsevier*, 2(1), 55-60.
- Honeywell. (s.f.). HPM Series Particle Sensor. Recuperado de: <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-hpm-series-particle-sensors-datasheet-32322550-e-en.pdf>
- IDEAM. (s.f.). Anexo 12: Evaluación de los Criterios que Actualmente Utiliza el DAMA para la Elaboración de Índice Bogotano de Calidad del Aire (IBOCA). *IDEAM*. , pp. 3.
- IDEAM. (2017). Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia. IDEAM, *Bogotá, Colombia*, pp. 4.
- Jamil, M. S., Jamil, M. A., Mazhar, A., Ikram, A., Ahmed, A., & Munawar, U. (2015). Smart Environment Monitoring System by Employing Wireless Sensor Networks on Vehicles for Pollution Free Smart Cities. *Procedia Engineering*, 107, 480–484. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.106>
- Johnston, S., Basford, P., Bulot, F., Cristea, M., Foster, G., Loxham, M. y Cox, S. (2017). IoT deployment for city scale air quality monitoring with Low-Power Wide Area Networks. (pp. 3). Recuperado de: [https://eprints.soton.ac.uk/420732/1/LoraForAQ\\_StevenJohnstonPDFexpressCompatible.pdf](https://eprints.soton.ac.uk/420732/1/LoraForAQ_StevenJohnstonPDFexpressCompatible.pdf)
- Jorquera, H., Gallardo, L., y Molina, L. (2012). Tackling Challenges in Assessing Air Quality Over South America. *Eos, Vol. 93* (No. 24). Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/258626453\\_Tackling\\_challenges\\_in\\_assessing\\_air\\_quality\\_over\\_South\\_America](https://www.researchgate.net/publication/258626453_Tackling_challenges_in_assessing_air_quality_over_South_America)
- Lewis, A., Schneidemesser, E., Peltier, R. (2018). Low-cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition: Overview of Topic and Future Applications. (pp. 24 - 25). Recuperado de: [http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/Draft\\_low\\_cost\\_sensors.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/Draft_low_cost_sensors.pdf)
- López, A. (2018). Los Grupos Focales. Recuperado de: [http://cea.uprrp.edu/wp-content/uploads/2013/05/grupo\\_focal.pdf](http://cea.uprrp.edu/wp-content/uploads/2013/05/grupo_focal.pdf)
- Moscoso, L., Vanegas, D., Monroy, L. M., Narváez, A., Vera, M., Espinoza, C., y Alemán, A. (2019). Phyto-toxic effect of particular material PM10 collected in the urban area of the city of Cuenca, Ecuador. *Revista ITECKNE*, 16, 12–21.
- Manna S., Bhunia, S., y N. Mukherjee. (2014). Vehicular pollution monitoring using IoT," *International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014)*, Jaipur, pp. 1-5.

- Martínez, J. (2011). Métodos de Investigación Cualitativa. Recuperado de: <http://www.cide.edu.co/doc/investigacion/3.%20metodos%20de%20investigacion.pdf>
- Mejía, G., y Páramo, V. (2011). Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones de PM2.5. (pp. 22-23). Recuperado de: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible. (2010). Manual de Diseño de Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire. Recuperado de: [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/aire/res\\_2154\\_021110\\_manual\\_diseno.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/aire/res_2154_021110_manual_diseno.pdf)
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible. (1 de noviembre de 2017). Resolución por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. [Resolución 2254 de 2017].
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible. (24 de marzo de 2010). Resolución por la cual se modifica la resolución 601 del 4 de abril de 2006. [Resolución 610 de 2010].
- Ministerio de Transporte. (2019). Boletín de Prensa 003 de 2019. Recuperado de: <https://www.runt.com.co/sites/default/files/Bolet%C3%ADn%20de%20Prensa%2003%20de%202019.pdf>
- NASA. (2019). The Water Cycle. Recuperado de: <https://pmm.nasa.gov/education/water-cycle>
- National Water and Climate Center. (2019). What is Wind Rose? Recuperado de: <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/climate/windrose.html>
- Ni, J. (2015). Research and Demonstration to Improve Air Quality for the U.S. Animal Feeding Operations in the 21st Century – A Critical Review. *Elsevier*, vol. 200, 105-109.
- Niño, V. (2011). Metodología de la Investigación. Bogotá, Colombia: Ediciones de la U. (pp. 63).
- Nova Fitness Co. (2015). Laser PM2.5 Sensor Specification, SDS011. Recuperado de: <https://ecksteinimg.de/Datasheet/SDS018%20Laser%20PM2.5%20Product%20Spec%20V1.5.pdf>
- Núñez, M. (2015). Análisis Exploratorio de la Relación entre Emisiones Atmosféricas, Calidad del Aire y Salud Pública en la Zona Suroccidental de Bogotá en el Año 2015 (tesis de pregrado). pp. 16. Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia.
- Organización Mundial de la Salud. (2016). Contaminación del Aire Ambiental. Recuperado de: [https://www.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&view=article&id=12918:ambient-air-pollution&Itemid=72243&lang=es](https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=12918:ambient-air-pollution&Itemid=72243&lang=es)
- Organización Mundial de la Salud. (2019). Efectos del Material Particulado sobre la Salud y el Medio Ambiente. *OMS*.
- OMS. (2016). La OMS publica estimaciones nacionales sobre la exposición a la contaminación del aire y sus repercusiones para la salud. *OMS*.

- Pineda, D., y Álvarez, S. (2017). Evaluación del Comportamiento de las Concentraciones de PM10 con Relación a Variables Meteorológicas en Tres Sedes de la Universidad Distrital (tesis de pregrado). Universidad Distrital de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Pineda, J. (2019). Despertar Conciencia Ambiental ante los Problemas Ambientales. *Temas Ambientales*. Recuperado de: <https://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/despertar-conciencia-ambiental-problemas-ambientales/>
- Przybysz, A., Sæbø, A., Hanslin H. ,Gawroński S..(2014). Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time, *Science of the Total Environment* , 481, 360-369
- Querol, X. (2018). La Calidad del Aire en las Ciudades, un Reto Mundial. Fundación Gas Natural Fenosa, Barcelona, España.
- RaspberryPi. (2019). Raspberry Pi 3 Model B. Recuperado de: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- Reina, J., Olaya, J. (2012). Ajuste de Curvas Mediante Métodos no Paramétricos para Estudiar el Comportamiento de Contaminación del Aire por Material Particulado PM10. *Revista EIA*, (18), 19-31.
- Rojas, N. (2004). Revisión de las Emisiones de Material Particulado por la Combustión de Diésel y BioDiésel. *SCielo*. Rev. Ing., no.20 Bogotá.
- Rojas, N. (2012). Aire y Problemas Ambientales en Bogotá. *Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Rubio, M., Lissi, A., Riveros, E., y Páez, M. (2001). Remoción de Contaminantes por Lluvias y Rocíos en la Región Metropolitana. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química*, 46(3), 353-361.
- Ruíz, J. (2019). Focus Group y Grupo de Discusión: Similitudes y Diferencias. (pp. 6). Recuperado de: <http://fes-sociologia.com/files/congress/12/papers/3036.pdf>
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2006). Metodología de la Investigación. McGraw – Hill. México. Cap.5.
- Sánchez, G. (2011). Encuestas y Entrevistas en Investigación Científica. *Revista de Actualización Clínica Investiga*, volumen 10.
- Secretaría General del Senado. (1974). Decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974. Recuperado de: [http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/decreto\\_2811\\_1974.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/decreto_2811_1974.html)
- SIAC. (2019). Monitoreo del Aire. Recuperado de: <http://www.siac.gov.co/monitoreoaire#targetText=Un%20Sistema%20de%20Vigilancia%20de,de%20los%20datos%2C%20entre%20otras.>
- SIATA. (2018). Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá. Recuperado de: [https://siata.gov.co/sitio\\_web/](https://siata.gov.co/sitio_web/)

- Sigma Electrónica. (14 de abril de 2019). Raspberry Pi 3B. Recuperado de: <https://www.sigmaelectronica.net/producto/raspberry-pi-3/>
- Shinyei. (2010). Specification Sheet of PPD42NS. New York, Estados Unidos.
- Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire de México. (2015). Manual 1: Principios de Medición de la Calidad del Aire. Recuperado de: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-%20Principios%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>
- Tang, W., y Hu, Y. (2019). Characteristics of Atmospheric Pollutants Distribution and Removal Effect of Rainfall on Atmospheric Pollutants in Mining Cities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 153, 062015.
- Temas Ambientales. (S.F.). ¿Quiénes Somos? Recuperado de: <https://www.temasambientales.com/p/quienes-somos-es-importante-frente-la.html>
- Universidad de Alicante. (2019). El Grupo de Discusión. Recuperado de: <https://sites.google.com/site/tecninvestigacionsocial/temas-y-contenidos/tema-4-las-tecnicas-estructurales-entrevista-grupo-de-discusion-observacion-y-biografia/el-grupo-de-discusion>
- Urquijo, J. (2017). Sensores Low-Cost vs Estaciones de Calidad del Aire Fijas: ¿Con Cuáles te Quedas? *GreenApp's&Web*. Recuperado de: <https://www.greenappsandweb.com/noticias/medicion-de-la-calidad-del-aire/>
- Valles, M. (1999). Técnicas Cualitativas de Investigación Social. (pp. 196-199). Recuperado de: [https://eva.udelar.edu.uy/pluginfile.php/1022379/mod\\_resource/content/1/Valles%2C%20Miguel%20%281999%29%20Tecnicas Cualitativas De Investigacion Social.pdf](https://eva.udelar.edu.uy/pluginfile.php/1022379/mod_resource/content/1/Valles%2C%20Miguel%20%281999%29%20Tecnicas Cualitativas De Investigacion Social.pdf)
- Viana, M. (2003). Niveles composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias. Recuperado de: [https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/1972/0Agradecimientos\\_Indice.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/1972/0Agradecimientos_Indice.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Who. (2017). Guías de Calidad del Aire de la OMS Relativas al Material Particulado, el Ozono, el dióxido de Nitrógeno y el Dióxido de Azufre. Pp. 9. Recuperado de: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf;sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;sequence=1)
- Zheng, T., *et al.*. (2018). Field Evaluation of Low Cost Particulate Matter Sensors in High and low Concentration Environments. (Pp. 3). Recuperado de: [http://home.iitk.ac.in/~snt/pdf/Zheng\\_T\\_AMT-2018.pdf](http://home.iitk.ac.in/~snt/pdf/Zheng_T_AMT-2018.pdf)
- Xu, Z., Wu, Y., Liu, W., Liang, C., Ji, J., Zhao, T., y Zhang, X. (2015). Chemical composition of rainwater and the acid neutralizing effect at Beijing and Chizhou city, China. *Elsevier*, 164-165, pp. 278-285.

## 13 Anexos

### Anexo 1 Figuras

#### ¿Cómo se siente con el aire que respira?

Buenas tardes,

Somos estudiantes de décimo semestre del programa de ingeniería ambiental y realizamos la siguiente ENCUESTA con el fin de identificar CÓMO SE SIENTE CON EL AIRE QUE RESPIRA EN LA UNIVERSIDAD y si considera relevante implementar un MEDIO que INFORME PERIÓDICAMENTE sobre el nivel de contaminación de una mezcla de partículas y sustancias que hay en el aire, denominada MATERIAL PARTICULADO, conocida por ser un contaminante del aire que genera afectaciones a la salud por su composición.

Vale la pena mencionar que esta encuesta y sus respuestas están protegidas de acuerdo al derecho de confidencialidad absoluta de los datos y que usted tiene la opción de abandonar el estudio si lo considera pertinente. Recuerde que esta encuesta se realiza únicamente con fines académicos por lo que NO TENDRÁ CALIFICACIÓN ALGUNA. No olvide responder la encuesta con toda sinceridad.

\*Obligatorio

Rol en la institución \*

- Estudiante
- Administrativo
- Docente
- Servicios generales (aseo o seguridad)

Programa - facultad. \*

Tu respuesta \_\_\_\_\_

Edad \*

Tu respuesta \_\_\_\_\_

Género \*

- Masculino
- Femenino

Considera que el aire que respira a los alrededores y dentro de la Universidad es: \*

- Bueno
- Regular
- Malo

¿Está familiarizado con los términos PM2.5 y PM10? \*

- Sí
- No

¿Cree que el aire que respira en la Universidad puede afectar su salud? \*

- Sí
- No

¿Le gustaría que la universidad implementara un medio que le informe periódicamente sobre el nivel de contaminación de material particulado en el aire? \*

- Sí
- No

¿Cuál de los siguientes canales de comunicación (medios) preferiría para recibir esta información? \*

- Una aplicación.
- Una página web.
- Una pantalla ubicada dentro de la Universidad.
- Redes sociales de la Universidad y/o correo institucional.
- Página web de la Universidad.

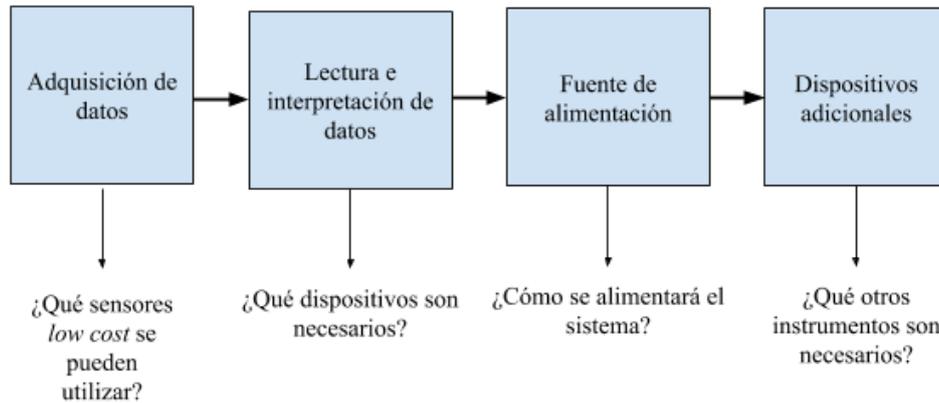
¿Ha sufrido alguna afección respiratoria en los últimos 3, 6 o 12 meses? \*

- Sí, en los últimos 3 meses
- Sí, en los últimos 6 meses
- Sí, en los últimos 12 meses
- No

Si su respuesta anterior fue Sí, ¿considera que la afección esta relacionada con una mala calidad del aire?

- Sí
- No

Anexo 1.1. *Cuestionario encuestas realizadas.* Fuente: elaboración propia.



Anexo 1.2. Diagrama de bloques para el desarrollo del segundo objetivo específico. Fuente: elaboración propia.



Anexo 1.3. Relación hidrología- dirección del viento Usaquén. Fuente: elaboración propia.



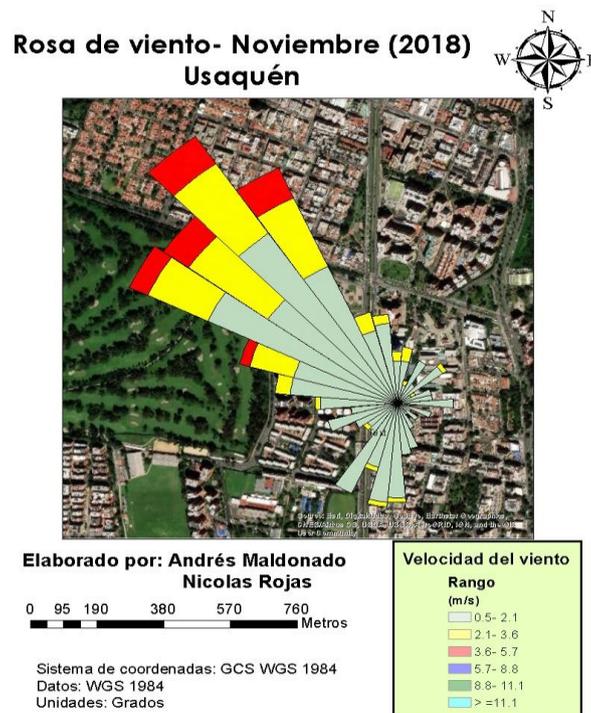
Anexo 1.4. *Relación hidrología- dirección del viento Guaymaral.* Fuente: *elaboración propia.*



Anexo 1.5. *Relación hidrología- dirección del viento Ferias.* Fuente: *elaboración propia.*



Anexo 1.6. Relación hidrología- dirección del viento Suba. Fuente: elaboración propia.



Anexo 1.7. Rosa de vientos noviembre 2018 Usaquén. Fuente: elaboración propia.



Anexo 1.8. Diseño estructural del monitor de material particulado (1). Fuente: elaboración propia.



Anexo 1.9. Diseño estructural del monitor de material particulado (2). Fuente: elaboración propia.



Anexo 1.10. Recomendación de las prestaciones a exponer en el monitor (1). Fuente: elaboración propia.



Anexo 1.11. Recomendación de las prestaciones a exponer en el monitor (2). Fuente: elaboración propia.



Anexo 1.12. Recomendación de las prestaciones a exponer en el monitor (2). Fuente: elaboración propia.

**Anexo 2 Tablas**

Anexo 2.1. Costo total de implementación de una estación de monitoreo de calidad del aire automática. Adaptado de: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 2010.

| Parámetro                             | Costo COP             |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Analizador automático                 | \$68'620.360          |
| Adecuación del monitor                | \$62'108.700          |
| <b>Costo total de implementación.</b> | <b>\$124'729,060.</b> |