



# **ELABORACIÓN DE UN MODELO DE DISPERSIÓN DE $PM_{2.5}$ EN LA LOCALIDAD DE PUENTE ARANDA, BOGOTÁ D.C.**

Sara Quintero Riascos

Universidad El Bosque  
Facultad de Ingeniería  
Programa Ingeniería Ambiental  
Bogotá, 24 de Octubre de 2018

# **ELABORACIÓN DE UN MODELO DE DISPERSIÓN DE $PM_{2.5}$ EN LA LOCALIDAD DE PUENTE ARANDA, BOGOTÁ D.C.**

Sara Quintero Riascos

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

Director:

David F. Beltrán Gómez

Línea de Investigación:  
Salud ambiental

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

2018

## Tabla de contenido

|                                                                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1. Resumen .....</b>                                                                                      | <b>1</b>   |
| <b>1.1. Abstract.....</b>                                                                                    | <b>1</b>   |
| <b>2. Introducción .....</b>                                                                                 | <b>2</b>   |
| <b>3. Justificación.....</b>                                                                                 | <b>3</b>   |
| <b>4. Pregunta de investigación .....</b>                                                                    | <b>4</b>   |
| <b>5. Planteamiento del problema .....</b>                                                                   | <b>5</b>   |
| <b>6. Objetivos.....</b>                                                                                     | <b>6</b>   |
| <b>6.1. Objetivo general .....</b>                                                                           | <b>6</b>   |
| <b>6.2. Objetivos específicos.....</b>                                                                       | <b>6</b>   |
| <b>7. Marcos de referencia.....</b>                                                                          | <b>6</b>   |
| <b>7.1. Marco geográfico .....</b>                                                                           | <b>6</b>   |
| <b>7.2. Estado del arte .....</b>                                                                            | <b>9</b>   |
| <b>7.3. Marco teórico.....</b>                                                                               | <b>10</b>  |
| <b>7.4. Marco conceptual .....</b>                                                                           | <b>11</b>  |
| <b>7.5. Marco normativo .....</b>                                                                            | <b>15</b>  |
| <b>8. Metodología.....</b>                                                                                   | <b>17</b>  |
| <b>8.1. Diseño metodológico .....</b>                                                                        | <b>24</b>  |
| <b>9. Resultados y análisis de resultados.....</b>                                                           | <b>27</b>  |
| <b>10. Conclusiones.....</b>                                                                                 | <b>44</b>  |
| <b>11. Recomendaciones .....</b>                                                                             | <b>45</b>  |
| <b>12. Referencias .....</b>                                                                                 | <b>46</b>  |
| <b>13. Anexos. ....</b>                                                                                      | <b>48</b>  |
| <b>13.1. Anexo 1. Rosa de vientos sobre la Localidad de Puente Aranda .....</b>                              | <b>48</b>  |
| <b>13.2. Anexo 2. Gráfica de frecuencia de distribución del viento .....</b>                                 | <b>49</b>  |
| <b>13.3. Anexo 3. Imagen satelital Avenida Calle 68 y Avenida Las Américas .....</b>                         | <b>50</b>  |
| <b>13.4. Anexo 4. Imagen satelital Avenida Las Américas, Calle 6, Calle 13, Autopista Sur. ....</b>          | <b>51</b>  |
| <b>13.5. Anexo 5. Resumen de resultados del Modelo AERMOD.....</b>                                           | <b>51</b>  |
| <b>13.6. Anexo 6. Resultados del Modelo AERMOD de concentración máximo 24 horas de PM<sub>2.5</sub>.....</b> | <b>52</b>  |
| <b>13.7. Anexo 7. Resultados del Modelo AERMOD de concentración promedio anual de PM<sub>2.5</sub> .....</b> | <b>120</b> |

## Listado de tablas

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tabla 1. Normatividad colombiana para calidad del aire.....</b> | <b>15</b> |
| <b>Tabla 2 Factor de emisión por exhosto .....</b>                 | <b>20</b> |
| <b>Tabla 3. Diseño metodológico por objetivo específico .....</b>  | <b>25</b> |
| <b>Tabla 4. Aforo vehicular y el cálculo w .....</b>               | <b>27</b> |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 5.</b> Cálculo de concentración por vía .....                | 28 |
| <b>Tabla 6.</b> Comparación de valores de concentración de PM2.5..... | 44 |

## Listado de Figuras

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Mapa local de Puente Aranda .....                              | 7  |
| <b>Figura 2.</b> Metodología de la investigación .....                          | 18 |
| <b>Figura 3.</b> Mapa de receptores hipotéticos.....                            | 22 |
| <b>Figura 4.</b> Modelo AERMOD .....                                            | 23 |
| <b>Figura 5.</b> Promedio de precipitación (mm) .....                           | 29 |
| <b>Figura 6.</b> Concentración promedio de PM2.5 (g/m3) .....                   | 30 |
| <b>Figura 7.</b> Promedio para altura de capa de mezcla (m).....                | 31 |
| <b>Figura 8.</b> Humedad Relativa (%) .....                                     | 31 |
| <b>Figura 9.</b> Promedio de temperatura (°C) .....                             | 32 |
| <b>Figura 10.</b> Caja de bigotes de precipitación .....                        | 34 |
| <b>Figura 11.</b> Caja de bigotes de concentración de PM2.5 .....               | 34 |
| <b>Figura 12.</b> Caja de bigotes de temperatura .....                          | 35 |
| <b>Figura 13.</b> Caja de bigotes de altura de capa de mezcla.....              | 35 |
| <b>Figura 14.</b> Caja de bigotes de humedad relativa.....                      | 36 |
| <b>Figura 15.</b> Mapa de altura de obstáculos de Puente Aranda .....           | 37 |
| <b>Figura 16.</b> Mapa de dispersión de PM2.5 máximo de 24 horas .....          | 39 |
| <b>Figura 17.</b> Mapa de dispersión de PM2.5 anual promedio .....              | 40 |
| <b>Figura 18.</b> Histograma anual de concentración de PM2.5 .....              | 42 |
| <b>Figura 19.</b> Histograma máximo de 24 horas de concentración de PM2.5 ..... | 43 |

## Listado de Ecuaciones

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Ecuación 1.</b> Factor de emisión por resuspensión en polvo ..... | 19 |
| <b>Ecuación 2.</b> Factor de emisión por exhosto .....               | 19 |
| <b>Ecuación 3.</b> Factor de emisión .....                           | 20 |
| <b>Ecuación 4.</b> Factor de emisión resuspensión en polvo .....     | 28 |
| <b>Ecuación 5.</b> Factor de emisión total .....                     | 28 |

## **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**

*A mi familia, por el apoyo incondicional, y el esfuerzo por darme la oportunidad de ejercer una carrera que me retó como profesional y como persona.*

## **Agradecimientos**

A mi director, quien siempre estuvo en todo el proceso brindando la orientación necesaria en el trabajo y apoyo en el proceso de desarrollo; a los profesores Hommy Copete y Carlos Quintero, que me guiaron en ordenar mis ideas y me brindaron conocimiento.

## **1. Resumen**

Bogotá representa la mayor concentración de población en Colombia, cuyo impacto se ve influenciado tanto en el ambiente como en la calidad de vida de los ciudadanos, convirtiéndose en afectaciones de alto impacto, como la contaminación del aire. Una de las localidades más afectadas por las actividades antropogénicas es Puente Aranda; en esta localidad se acumula las actividades industriales con alto movimiento comercial, lo cual la hace vulnerable a presentar problemas de salud pública. Es por esto, que la mayoría de políticas y regulaciones generalmente presentan estudios de ésta localidad para así generar alternativas, lineamientos o estrategias que puedan reducir, controlar o eliminar los contaminantes atmosféricos que hay en la zona.

El objetivo de este trabajo es presentar un modelo de dispersión del contaminante  $PM_{2.5}$  en la Localidad de Puente Aranda, con el fin de proyectar el comportamiento del contaminante en esta zona, según los factores ambientales que puedan influenciar en la concentración y dispersión de este mismo. Para esto, se utilizó el modelo AERMOD, recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), adoptada por la normatividad colombiana, cuyos resultados muestran de una manera más detallada sobre el estudio del contaminante a estudiar a través de un mapa de máxima concentración esperada.

Para finalizar y como parte fundamental de la elaboración del modelo, mediante análisis estadísticos que brindan los datos recopilados de las fuentes pertinentes, se pudo observar las mayores concentraciones de  $PM_{2.5}$  en la localidad, con el fin de determinar el estado actual y como la información de los resultados finales, pueden ser comparados con la información actual, ya sea por normativa, por las instituciones u organizaciones que sugieren que Puente Aranda muestra un estado de calidad del aire estable.

### **1.1. Abstract**

Bogotá represents the largest concentration of habitants in Colombia, which impact has influenced the environment and the quality of life of citizens, becoming high impacts, such as air pollution. Puente Aranda is one of the locations most related to anthropogenic activities; in this

locality there is an accumulation of industrial activities with high commercial movements, which is vulnerable to presenting public health problems. This is why most polictics and regulations generally present studies of this locality in order to generate alternatives, guidelines or strategies that can reduce, control or eliminate atmospheric pollutants that exist in the area.

The objective of this paper is to present a  $PM_{2.5}$  pollutant dispersion model in Puente Aranda locality, in order to project the dispersion behavior of the pollutant in this area, according to the factors that may influence the concentration and dispersion of this pollutant. For this, it is the AERMOD model recommended by the The Environmental Protection Agency of the United States (US EPA), adopted by the Colombian regulations, results in a more accurate way on the study of the pollutant through a map of maximum expected concentration.

Finally, as a fundamental part of the elaboration of the model, through statistical analyzes that provide the data collected from the relevant sources, it was possible to observe the highest concentrations of  $MP_{2.5}$  in the locality, in order to determine the current status and how the information of the final results can be compared with the current information, either by regulation, by institutions or organizations that indicate that Puente Aranda shows a stable air quality status.

## **2. Introducción**

Actualmente, se vive una era en donde la población se ha incrementado exponencialmente, evidenciando alteraciones en el ambiente, afectando de manera negativa la calidad de vida. Por consiguiente, la contaminación del aire ha sido uno de los temas que más preocupan a nivel gubernamental, ya que en la búsqueda de tener una mejor calidad de vida, se requieren condiciones óptimas para los servicios ecosistémicos (Organización Mundial de la Salud, 2005). No obstante, según el informe del Departamento Nacional de Planeación (DNP) (citado por CONPES 3943, 2018) en el 2015, se reportaron 8.000 muertes por cáncer de pulmón y enfermedades cardiovasculares relacionadas con la contaminación del aire, causando 12,3 billones de pesos al estado.

Por lo anterior, la importancia de esta investigación parte de un análisis de mayor detalle a nivel micro del comportamiento de dispersión del  $PM_{2.5}$  dentro de la calidad del aire en Puente Aranda, teniendo en cuenta que ya existe una Red de Monitoreo de Calidad del Aire en Bogotá (RMCAB); sin embargo, las estaciones tienen ciertas limitaciones con respecto a la dificultad de cada contaminante a estudiar, ya que en Colombia se debe seguir los métodos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), y no un método construido a nivel nacional según los criterios y características del territorio colombiano, generando así una incertidumbre en los modelos que se puedan plantear a futuro.

En la actualidad, en un modelo de dispersión se pueden estimar las fuentes provenientes del contaminante y la concentración de este mismo, teniendo en cuenta la topografía y meteorología del lugar en que se encuentra influenciado el contaminante, como son: el uso del suelo, el tipo de suelo, la altura de obstáculos, las vías principales y secundarias, precipitaciones, la dirección del viento, entre otras variables necesarias para determinar el comportamiento en el modelo de dispersión. De allí, se pueden generar soluciones, o alternativas que puedan disminuir su concentración, y así mejorar la calidad de vida principalmente de los ciudadanos que viven cerca de las zonas de alto impacto.

### **3. Justificación**

En el presente trabajo se realiza un modelo de dispersión del  $PM_{2.5}$  en la Localidad de Puente Aranda, ubicada en la ciudad de Bogotá D.C.

No obstante, la contaminación afecta a la salud humana como lo señala la Organización Panamericana de la Salud (citado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012) más de 100 millones de personas viven expuestas a concentraciones de contaminantes en el aire. Adicionalmente en América Latina existen aproximadamente 35.000 personas afectadas por la contaminación del aire (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012).

Según un estudio del DNP del 2015, (citado por CONPES 3943, 2018) en Colombia la contaminación del aire se concentra en lugares con alta actividad industrial al igual que su

densidad poblacional; éstas están ubicadas en ciudades principales como Bogotá y Medellín, las cuales aportan al país un 78% y un 81% respectivamente por fuentes móviles, costando el 1,5% del Producto Interno Bruto (PIB) al país (CONPES 3943, 2018).

Dicho lo anterior, según De Nevers, 1998, asegura que la mayoría de países utilizan modelos de dispersión para planear y ejecutar programas de control sobre la contaminación de aire, ya que estos modelos generan un resultado de predicción de las concentraciones de los contaminantes en el ambiente. Igualmente, un modelo de dispersión permite realizar un balance de materiales, es decir, una ecuación general del balance de alguna especie, en este caso la especie es el  $PM_{2.5}$  en el aire, dando como resultado una predicción de las emisiones de concentración del contaminante (De Nevers, 1998). Así mismo, aporta la implementación del desarrollo sostenible y al manejo adecuado de los recursos naturales.

De igual modo, este estudio tiene como objetivo mostrar el comportamiento del  $PM_{2.5}$  en la Localidad de Puente Aranda mediante un modelo de dispersión generando la relación de afectación a la salud pública con los altos niveles de concentración de los contaminantes criterio causante al deterioro de la salud humana (University College London-Reino Unido & Universidad de los Andes, 2013).

Para finalizar, este trabajo tiene un aporte desde la ingeniería ambiental por la naturaleza del documento, abarcando la parte económica relacionada con gastos por la alta morbilidad e incluso mortalidad en las ciudades principales del país; social pudiendo redactar mediante lineamientos y estrategias el mejoramiento de la calidad del aire y la calidad de vida de la población vulnerable; ecológica por parte de los ecosistemas afectados, ya sea por la disminución por la capa vegetal, o la saturación de contaminantes atmosféricos a largo plazo en el ambiente. Por lo tanto, en este trabajo indica una predicción del comportamiento de dispersión del material particulado de 2,5 micrómetros en la Localidad de Puente Aranda, generando un análisis cuantitativo concreto, teniendo en cuenta la incertidumbre del modelo y su desarrollo como tal.

#### **4. Pregunta de investigación**

¿Cómo es el comportamiento de dispersión a nivel micro del contaminante  $PM_{2.5}$  en la Localidad de Puente Aranda?

## **5. Planteamiento del problema**

Según el Diagnóstico de Salud Ambiental en el 2012, indica que con la Revolución Industrial, se incrementaron las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos. A su vez, Colombia considerado como un país en vía de desarrollo ha vivido un incremento acelerado en sus principales ciudades

Según De Nevers, 1998, a partir de 1945 se fue aumentando gradualmente la preocupación sobre la contaminación del aire, dando a lugar propuestas y estrategias para reducir la contaminación por parte de las industrias. De esta manera, en los años 80`s la mayor parte de los problemas eran considerados locales, ya que se emitía a baja concentración y no permanecían durante periodos largos en la atmósfera. Sin embargo, ocurrieron tres problemas relacionados a la contaminación y fueron las lluvias ácidas, la destrucción de la capa de ozono por los clorofluorocarbonos (CFC), y la acumulación del dióxido de carbono (De Nevers, 1998).

En este sentido, uno de los contaminantes que afectan a la salud es el material particulado, el cual es un indicador representativo común de la contaminación del aire y consiste en una compleja mezcla de partículas sólidas y líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire (Organización Mundial de la Salud, 2018).

A nivel local, la Secretaría Distrital de Ambiente es la entidad encargada de la Red de Calidad del Aire en Bogotá D.C. Ahora, para la Localidad de Puente Aranda los reportes de  $PM_{2.5}$  son pocos a comparación de otros contaminantes estudiados; sin embargo, hay informes de estaciones móviles mediante entidades o universidades que generan reportes de altas concentraciones del  $PM_{2.5}$ , resaltando la Localidad de Puente Aranda como una de las zonas que presentan niveles significativos de concentración, generando un problema de salud pública ya que el material particulado tiene acceso fácil a las vías respiratorias superiores

acumulándose en los pulmones generando síntomas y posteriormente enfermedades respiratorias que pueden causar la muerte (Palacio-Soto, Zafra-Mejía, & Rodriguez, 2014).

Según Gutiérrez, Romieu, Corey, & Fortoul (1997), afirma que la exposición por periodos de aumento relativo a la contaminación del aire por monóxido involucra efectos adversos en enfermedades coronarias también llamadas enfermedades cardiacas, llegando a causar la muerte (Gutiérrez et al., 1997).

## **6. Objetivos**

### **6.1. Objetivo general**

Diseñar y ejecutar un modelo de dispersión del contaminante  $PM_{2.5}$  en la Localidad de Puente Aranda, Bogotá D.C.

### **6.2. Objetivos específicos**

- Realizar una caracterización de fuentes de emisión, topografía y meteorología de la localidad.
- Elaborar el modelo de dispersión AERMOD del contaminante  $PM_{2.5}$  para el área de estudio.
- Validar la información actual con respecto a los resultados del modelo.

## **7. Marcos de referencia**

### **7.1. Marco geográfico**

El presente trabajo se realizó en la ciudad de Bogotá en la Localidad de Puente Aranda, debido al carecimiento de información del contaminante  $PM_{2.5}$  para esta zona que se caracteriza por ser industrial.

La Localidad de Puente Aranda está ubicada en el centro occidente de la ciudad, pasando los Ríos Fucha canalizado y los canales Río Seco, La Albina y Comuneros. El área total es de 1.724,28 hectáreas y el área urbana es de 1.723,13 hectáreas, con una población de 28.418

habitantes en el 2016. En la localidad de Puente Aranda, están establecidas 5 Unidades de Planeamiento Zonal (UPZ), que hacen referencia al uso del suelo; una de ellas es la UPZ 108 Zona Industrial como se observa en la Figura 1, de color rojo; la zona de color gris representa la UPZ 40, barrio Ciudad Montes ; la zona de color naranja corresponde a la UPZ 111, el sector de color verde representa a la UPZ 43, barrio San Rafael; por último está la zona azul correspondiente a la UPZ 41, barrio Mazú.

Sus límites son:

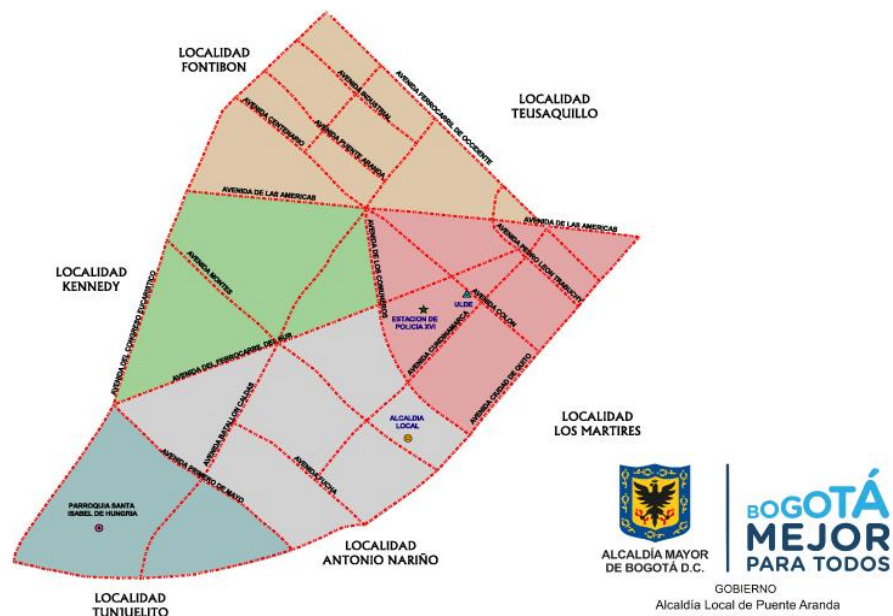
Al Norte: En la diagonal 22, con la localidad de Teusaquillo

Al Sur: En la Autopista Sur, con las localidades de Tunjuelito y Antonio Nariño

Al Este: En la Norte-Quito-Sur con la localidad de Los Mártires

Al Oeste: En la Avenida Carrera 68, con las localidades de Kennedy y Fontibón  
(Alcaldía local de Puente Aranda, 2012).

*Figura 1. Mapa local de Puente Aranda*



Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018.

La temperatura promedio en Bogotá es de 13,9°C, con una temperatura mínima media que puede llegar a los 8,5°C y una máxima de 20°C. Sin embargo, la temperatura puede variar de acuerdo a la zona de la ciudad relacionada con las actividades de las fábricas, el comercio y la alta densidad poblacional. Teniendo en cuenta lo anterior, Puente Aranda muestra así una temperatura alrededor de 15°C en promedio, ya que es una zona de alta densidad poblacional, comercial e industrial (Secretaría Distrital de Ambiente, 2010).

Adicionalmente, se pueden experimentar bajas temperaturas en las noches y heladas en las madrugadas. Las temporadas de baja temperatura están entre abril y octubre (Alcaldía Local Puente Aranda, 2012).

Por otro lado, los contaminantes que se emiten van ascendiendo hacia la atmósfera, lo cual les hace perder una temperatura a las partículas de 1°C por cada 100 metros de ascenso teóricamente. Por lo anterior, cuando la superficie se calienta, los contaminantes tienen una mejor dispersión debido a que el aire está seco. Ahora, cuando la atmósfera se enfría al mismo tiempo que el aire seco, ésta se neutraliza, por lo tanto, los contaminantes no tienen la capacidad de ascender ni dispersarse (Secretaría Distrital de Ambiente, 2010).

Existen dos tipos de vientos en la ciudad, los generales y los locales, en donde los primeros toman direcciones nororiente y suroriente; los vientos locales los hace característicos por sus lloviznas que reemplazan las lluvias fuertes, arrastrando la contaminación emitidas por las zonas industriales (Secretaría Distrital de Ambiente, 2010).

Como se menciona anteriormente, en la localidad de Puente Aranda están establecidas 5 UPZ, una de ellas es la UPZ 108 Zona Industrial, la cual cuenta con 5.585 habitantes, presentando en su mayoría problemáticas por una calidad del aire deteriorada asociada con las altas concentraciones de material particulado, menor a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ), como producto de actividades antrópicas industriales (Alcaldía local de Puente Aranda, 2012).

## 7.2. Estado del arte

Para poder abarcar de manera más amplia sobre la contaminación del aire en los diferentes territorios con la misma problemática, se debe comenzar por contextualizar a nivel global.

El primer escenario donde se revisará la contribución al trabajo de investigación es la India. El documento “*Influencia de la fuente en las vías de emisión y la contaminación en el ambiente de PM<sub>2.5</sub> en la India (2015-2050)*” resaltan que el país experimenta una degradación de la calidad del aire, encontrando que el PM<sub>2.5</sub> es un problema regional, excediendo el estándar anual nacional (40 µg/m<sup>3</sup>), ocasionando un 60% de las concentraciones relacionadas con las actividades antropogénicas. Así mismo, los autores realizaron las evaluaciones mediante modelos de manera en que las concentraciones del material particulado muestran los niveles nacionales y estatales relacionado con el tipo de fuente proveniente del contaminante (Venkataraman et al., 2018).

En el segundo escenario, los autores Di Sabatino, Buccolieri, Pulvirenti & Britter (2007) proponen que, recientemente los modelos de dispersión para la calidad del aire son operacionales y de naturaleza integral, de modo que tienen en cuenta las características meteorológicas y topográficas de la zona, puesto que estos factores se ven influenciados con el comportamiento del contaminante a estudiar (Di Sabatino, Buccolieri, Pulvirenti, & Britter, 2007).

El Diagnóstico de Salud Ambiental (2012), señala que Colombia está en la posición 27 de 132 países a nivel mundial en el indicador de Desempeño Ambiental (EPI, por sus siglas en inglés); permitiendo evaluar su mejoramiento a nivel ambiental. No obstante, en el 2007 se desarrolló un diagnóstico de ocho redes de calidad del aire en Bogotá, Cali y Medellín, mostrando falencias en la información recolectada con respecto a los inventarios de fuentes de emisión de modo que, este informe se desarrolla con el fin de elaborar un diagnóstico en salud ambiental para formular la Política Nacional de Salud Ambiental (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012)

Un estudio de la Universidad de Antioquia (2014), reporta que la Localidad de Puente Aranda es una de la más contaminadas por PM<sub>10</sub> considerando los límites por la normatividad en el país;

por esta razón se realiza una evaluación temporal y espacial de la calidad del aire en la zona industrial de Puente Aranda mediante un laboratorio móvil de monitoreo, en donde se muestra que las concentraciones analizadas ( $PM_{10}$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NO$  y  $CO$ ), superan entre  $2,03\mu g/m^3$  y  $2,01\mu g/m^3$  los niveles de concentración admitidos (Palacio-Soto et al., 2014).

Según el reporte del día sin carro de la Alcaldía Mayor de Bogotá en el 2018, muestra una condición moderada según los datos obtenidos de la RMCAB; sin embargo, para la zona suroccidental de la ciudad la condición es regular, por las fuentes móviles y fijas característica de la zona. Igualmente, para el  $PM_{2.5}$  se considera que las mayores concentraciones están ubicadas en las localidades de San Cristóbal y Antonio Nariño (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018).

Por otra parte, se realizó un estudio en Bogotá en el 2016 a partir de la identificación y evaluación del inventario de fuentes móviles de Bogotá utilizando las metodologías de *top-down* y *bottom-up* junto con la herramienta en código JAVA, para la extracción y procesamiento de la información de flujos vehiculares. A continuación, se comparan los datos donde se infiere que la flota vehicular en las categorías de motocicletas y automóviles se ha incrementado en un 69% , de allí se concluye que la metodología utilizada puede establecer estrategias para reducción y mejoramiento de la calidad del aire de los ciudadanos. Sin embargo, en este estudio se cuenta con una incertidumbre por falta de información de calidad (Carmona Aparicio et al., 2016).

### **7.3. Marco teórico**

En el presente trabajo de investigación, es importante hacer énfasis en las teorías más importantes que han apoyado a la elaboración de estudios sobre la contaminación del aire y los impactos que conlleva, ya sea por región o a nivel global.

La teoría principal la cual aporta a este trabajo de investigación es un reporte de The Lancet Commission (2017), llamado “*Implicaciones para la ciencia de la contaminación del aire y la salud*”, resaltando la importancia de sensibilizar a la población sobre la problemática que hay actualmente por la contaminación del aire, vinculada con las enfermedades respiratorias; dando

así, una oportunidad a nuevas políticas que puedan enfrentar de manera efectiva la contaminación. Adicionalmente, los contaminantes atmosféricos, hacen referencia a la cuantificación de la carga de los contaminantes en la salud por medio de estimaciones cuantitativas del riesgo según los resultados, asociados a los diferentes tipos de contaminantes en el aire (Maddocks & Higginson, 2017)

Una metodología para analizar el origen de los contaminantes son los modelos de dispersión de los contaminantes atmosféricos; éstos son de gran importancia a la hora de realizar una predicción del comportamiento de sustancias contaminantes, considerando que tienen un impacto en el ambiente y en la salud humana, principalmente en las comunidades vulnerables como son los niños menores a cinco años (OMS,2018). Igualmente, los modelos de dispersión apoyan al desarrollo de estrategias para los gobiernos que buscan tener una mejor calidad de vida e innovaciones en sus políticas para el progreso en temas de calidad del aire (Leelőssy, et al., 2014).

Por último, teniendo en cuenta que una de las fuentes mas importantes para el estudio son los vehículos (fuentes móviles) las cuales generan emisiones de partículas en forma gaseosa, ya sea por el tubo de escape, por desgaste de frenos o neumáticos. Ahora, el material particulado que se encuentran en las vías, se les llama resuspensión de material provenientes del agotamiento del material suelto presente en la superficie (Environmental Protection Agency, 1980).

#### **7.4. Marco conceptual**

Para entender la salud ambiental, principalmente se debe comprender éstos dos términos por separado.

El primero, según la Constitución de la Organización Mundial de la Salud (1948) (citado por Yassi, Kjellström, Kok & Guidotti, 2002) se define como “un estado de completo bienestar físico, mental y social y no meramente la ausencia de enfermedad o incapacidad”. Así mismo, la OMS define ambiente en 1995 como “Todo lo que es externo al individuo humano. Puede clasificarse en físico, químico, biológico, social, cultural, ect., cualquier cosa o todo lo que puede influir en la condición de salud de la población”. Por lo tanto, al conocer que la salud y el

ambiente están relacionadas con el desarrollo y las actividades gestioadas según los recursos natruales, se concluye por salud ambiental como cualquier alteración que se pueda tener en el ambiente que pueda afectar a la salud humana (Yassi, Kjellström, Kok, & Guidotti, 2002).

No obstante, según The Lancet Commission (2017), señala que la polución es uno de los factores ambientales que causan mas enfermedades y muertes prematuras en el mundo, con un estimado de 9 millones de muertes en el 2017 (Landrigan et al., 2017). Por lo tanto, de manera general, se puede determinar la definición de contaminante, como cualquier materia o sustancia ya sea mezclada o derivada de diferentes procesos biológicos y químicos, que al introducirse en el ambiente generan alteraciones en ella; adicionalmente se considera contaminante toda forma de energía, como calor, radiactividad y ruido que pueda alterar el estado natural del ambiente (Gutiérrez et al., 1997).

De Nevers menciona que las partículas que están en el aire no son químicamente uniforme, como lo es la molécula de monóxido de carbono (CO), sino, que éstas mantienen una amplia gama de características, diferenciadas ya sea por su tamaño, forma o composición química, siendo las de menor diámetro las más peligrosas como es el PM<sub>2.5</sub> (partículas menores a 2,5 micrómetros), basada en varios compuestos comúnmente asociados con partículas ácidas, por la combustión de combustibles fósiles, producción manufacturera y quema agrícola. La OMS determinó sus concentraciones como riesgo para la salud humana, son de la siguiente manera: 10 µg/m<sup>3</sup> (media anual) y 25 µg/m<sup>3</sup> (media diaria) (Organización Mundial de la Salud, 2005).

Del mismo modo, hay diferentes tipos de contaminantes, como son los primarios y secundarios, diferenciados por su composición, la forma en la que se emitieron, su estado físico, y su tamaño. Para esta investigación, se tienen en cuenta los contaminantes secundarios que se forman en la atmósfera como producto de una reacción. Además, el contaminante de interés se encuentra de forma sólida, y su tamaño hace que tenga facilidad de alejarse de su fuente de emisión, dependiendo de los factores meteorológicos del área de influencia (Gutiérrez et al., 1997).

Las fuentes de emisión se derivan entre fuentes móviles y fuentes fijas. Las móviles para este estudio son las que se tendrán en cuenta; éste tipo de fuente incluyen vehículos de cualquier

peso, aviones, barcos y trenes. Sin embargo, la Localidad de Puente Aranda, es una zona industrial y de alto flujo vehicular, por lo tanto solo se tendrán en cuenta los diferentes tipos de vehículos, incluyendo las motocicletas (Gutiérrez et al., 1997).

De allí, la determinación del factor de emisión según US EPA (citado por el CONPES 3943,2017), es “el valor representativo que intenta relacionar la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión del contaminante” (Departamento Nacional de Planeación et al., 2018). Con este cálculo se puede determinar las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en la Localidad de Puente Aranda, según la vía principal.

Para mejor entendimiento de la información de las emisiones y sus concentraciones en el aire, es importante tener en cuenta los inventarios de emisiones, que caracteriza el tipo de fuente y la cantidad de contaminantes emitidos en una determinada área geográfica y un intervalo de tiempo que se crea pertinente (Departamento Nacional de Planeación et al., 2018).

Para la investigación es importante tener en cuenta la diferencia entre los conceptos de contaminación del aire y contaminación atmosférica debido a que tienden a confundirse por su similitud; sin embargo, éstos dos conceptos son diferentes ya que la contaminación del aire según De Nevers en 1997, es la presencia de material indeseable en ese aire, en mayor cantidad que pueden producir efectos nocivos, incluyendo la afectación que tiene en el ambiente, siendo éstos los bienes humanos. Sin embargo, cabe señalar que muchos de los materiales nocivos mencionados anteriormente, entran en la atmósfera provenientes de fuentes que van más allá del control humano, afectando principalmente la capa de ozono, siendo este la contaminación atmosférica, que abarca la problemática más allá de la tropósfera (De Nevers, 1997).

De esta manera, la concentración de la contaminación puede verse afectada por cambios en el clima (humedad, precipitaciones, vientos, etc.); además, es difícil controlar simultáneamente los múltiples contaminantes y separar e identificar los efectos de cada uno de ellos, debido a que muchos contaminantes se generan a través de la misma fuente (tipo industrial), por lo tanto, están correlacionados (Gaviria, Benavides, & Tangarife, 2011).

Teniendo en cuenta los factores que influyen sobre el contaminante, para esta investigación se utilizó el modelo meteorológico de reanálisis MM5, el cual fue adquirido comercialmente, que se define como “una cuadrícula con diferencias finitas centradas en el espacio y tiempo. El modelo puede tener información hidrostática o no hidrostática”. El objetivo es brindar una información detallada sobre las variables que se quieran modificar a través del modelo, en este caso son las variables meteorológicas, como es la precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación, altura de capa de mezcla, dirección y velocidad del viento, entre otras. Esta herramienta de investigación está en constante mejora y modificación, facilitando la interpretación y análisis que se requiera para el modelo a desarrollar (Haagenson, Grell, & Stauffer, 1994).

Con el objetivo de predicción de comportamiento de dispersión del contaminante se utilizará el modelo AERMOD, definido como un modelo de pluma de estado estable, asumiendo la distribución de la concentración será gaussiana tanto en vertical como en horizontal (Cimorelli et al., 2004).

Adicionalmente, los resultados, análisis e interpolación de datos se harán a través del software QGIS, que compete a un Sistema de Información Geográfica (SIG), aplicado a la creación, edición, visualización, análisis y publicación de información geoespacial, permitiendo la creación de mapas a partir de diferentes capas añadidas según el interés (QGIS, 2016).

Teniendo en cuenta que en el mundo el 92% de las personas respiran aire contaminado (OMS, 2018), se encuentran casos por infección respiratoria aguda (IRA) las cuales afectan al sistema respiratorio, ya sean causadas por microorganismos virales, o material particulado inhalado. Por esa razón, la importancia y la prevalencia de estas enfermedades, van relacionadas con las condiciones ambientales, relacionadas con los contaminantes criterio que se encuentra el ser humano determinantes para la evolución de enfermedades. Así, existen diferentes factores de riesgo para un incremento en la mortalidad por neumonía, como lo menciona la OMS. También se genera una deficiencia en el sistema inmune, teniendo en cuenta que la comunidad más vulnerable son los niños, ya que presentan dificultades para superar los problemas por neumonía (Secretaría de Salud, 2016).

### 7.5. Marco normativo

Para este trabajo se tuvo en cuenta la normatividad vigente tanto nacional como internacional para la calidad del aire.

*Tabla 1. Normatividad colombiana para calidad del aire*

| <b>Año</b> | <b>Norma</b>                                                                                          | <b>Entidad que expide</b>                      | <b>Contribución</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1993       | LEY 99 DE 1993                                                                                        | Congreso de Colombia                           | Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.                                                                                                                                                            |
| 1995       | DECRETO 948                                                                                           | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible | Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos <u>33</u> , <u>73</u> , <u>74</u> , <u>75</u> y <u>76</u> del Decreto - Ley 2811 de 1974; los artículos <u>41</u> , <u>42</u> , <u>43</u> , <u>44</u> , <u>45</u> , <u>48</u> y <u>49</u> de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire. |
| 2005       | GUÍAS DE CALIDAD DEL AIRE DE LA OMS RELATIVAS AL PM, O <sub>3</sub> NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> | Organización Mundial de Salud                  | Actualización mundial 2005, resumen de evaluación de los riesgos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 2006       | RESOLUCIÓN 601                                                                                        | Ministerio de                                  | “Por la cual se establece la Norma de Calidad                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

| <b>Año</b> | <b>Norma</b>                                                     | <b>Entidad que expide</b>                                 | <b>Contribución</b>                                                                                                                                         |
|------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            |                                                                  | Ambiente y Desarrollo Sostenible                          | del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia”                                                                |
| 2008       | RESOLUCIÓN 909                                                   | Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial | “Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones” |
| 2010       | PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE | Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial | Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire.                                                                                          |
| 2010       | RESOLUCIÓN 610                                                   | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible            | “Por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006”                                                                                          |
| 2010       | RESOLUCIÓN 650                                                   | Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial | “Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire”                                                                 |
| 2010       | RESOLUCIÓN 651                                                   | Ministerio de Ambiente, Vivienda y                        | “Por la cual se crea el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire - SISAIRES”                                                                        |

| <b>Año</b> | <b>Norma</b>    | <b>Entidad que expide</b>                      | <b>Contribución</b>                                                                                                                                                         |
|------------|-----------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            |                 | Desarrollo Territorial                         |                                                                                                                                                                             |
| 2010       | RESOLUCIÓN 2154 | Ministerio de Salud y Protección Social        | “Por la cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010 y se adoptan otras disposiciones” |
| 2015       | DECRETO 1076    | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible | “Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”                                                                   |
| 2017       | DECRETO 2254    | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible | “Por la cual se adopta la norma de calidad del aire y se dictan otras disposiciones”                                                                                        |
| 2018       | CONPES 3943     | Departamento Nacional de Planeación            | Política para el mejoramiento de la calidad del aire.                                                                                                                       |

## 8. Metodología

Para el trabajo de investigación, se determinaron los pasos que se ven en la Figura 2, partiendo desde las fuentes de emisiones móviles que tiene la localidad con un aforo vehicular hecho por la empresa CONDENTER S.A.S, tomado el 21 de marzo de 2018, en la Avenida las Américas (Av. Calle 20), mostrando las características generales de la fuente, ya sea liviano, ciclos con motor (carros pesados), ciclos sin motor (motocicletas) ó camiones, contando la cantidad promedio por hora que transitan por ésta vía de la localidad; a partir de esta información se realiza, el cálculo

w. Este dato es calculado a partir del peso de cada tipo de vehículo, multiplicado por la fracción, y así se obtiene el total en gramos por vehículos, luego se realiza la conversión de gramos a toneladas, ya que la ecuación 1 y 3 de la US (EPA) lo exige. De esta manera, las ecuaciones 1 y 3, se refieren al peso promedio (en toneladas) de los vehículos que recorren la carretera monitoreada, es decir, la Avenida las Américas.

Después se tienen en cuenta los reportes de concentración de  $PM_{2.5}$  para la Localidad de Puente Aranda desde el año 2016 hasta el 2018, pertinentes a la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), para así, realizar los cálculos correspondientes, junto con las estadísticas de los datos reportados.

*Figura 2. Metodología de la investigación*



Fuente: Autor, 2018.

Luego con el software QGIS, se identifican las vías principales; de allí, se determina la longitud en kilómetros de cada vía. A continuación se sacan las coordenadas por cada tramo de vía y se procede a reemplazar éstos valores a la ecuación 1 y 3 que muestra la US EPA y la Agencia Ambiental Europea (EEA por sus siglas en inglés), exponiendo una metodología para realizar los cálculos de factor de emisión a partir de las bases de datos AP-42 y EMEP. Cabe resaltar, que la metodología puede ser usada como un valor aproximado, teniendo en cuenta la normatividad de cada país y la tecnología usada para la aplicación de éstos cálculos (European Environment Agency, 2016).

Por otro lado, se encuentra la ecuación (2) que calcula el factor de emisión por exhosto de material particulado, para ese caso el  $PM_{2.5}$ ; correspondiente a un valor estándar determinado por la EEA. Éstos valores son determinadas por el tráfico vehicular, es decir por fuentes móviles. Por lo tanto, a partir de la ecuación (2), la EEA presenta una tabla (ver Tabla 2) donde menciona que el factor de combustión, dependiendo del tipo de combustible clasificado por categorías genera una concentración en gramos de  $PM_{2.5}$  por cada kilogramo de combustible consumido. Por ésta razón, no se hace énfasis en estos valores ya que se realiza mediante una metodología ya estandarizada.

*Ecuación 1. Factor de emisión por resuspensión en polvo*

$$E = k (sL)^{0.91} (W)^{1.2} \quad (1)$$

En donde:

E: Factor de emisión de partículas (unidades que coinciden con las unidades de k)

k: Multiplicador de tamaño de partícula para el rango de tamaño de partícula y unidades de interés.

sL: Carga de limo en la superficie de la carretera (gramos por metro cuadrado) ( $g/m^2$ ).

W: Peso promedio (toneladas) de los vehículos que recorren la carretera.

*Ecuación 2. Factor de emisión por exhosto*

La ecuación para las emisiones por exhosto es de la siguiente manera

$$E_i = \sum_j \left( \sum_m (FC_{j,m} \times EF_{I,J,M}) \right) \quad (2)$$

Donde:

$E_i$  = Emisión del contaminante  $i$  [g].

$FC_{j,m}$  = Consumo de combustible de categoría de vehículo  $j$  utilizando combustible  $m$  [kg].

$EF_{i,j,m}$  = Factor de emisión específico del consumo de combustible del contaminante  $i$  para vehículos de categoría  $j$  y combustible  $m$  [g / kg].

Según la EMEP EEA, señala que “las categorías de vehículos que se consideraran carros pasajeros, vehículos comerciales ligeros, vehículos pesados y vehículos de categoría L. Los combustibles a considerar incluyen gasolina, diesel, gas licuado de petróleo (GLP) y gas natural”. De esta manera “los factores de emisión de Nivel 1 ( $EF_{i,j,m}$ ) con base en el método de Nivel 3, del modelo EC4MACS - [www.ec4macs.eu](http://www.ec4macs.eu), para ser aplicable a países con flotas de vehículos más antiguas” (European Environment Agency, 2016). Los factores de emisión por exhosto se dan en la Tabla 2 a continuación.

**Tabla 2** Factor de emisión por exhosto

| Categoría    | Tipo de combustible | PM <sub>2.5</sub> (g/kg*combustible) |       |      |
|--------------|---------------------|--------------------------------------|-------|------|
|              |                     | Total                                | Min   | Máx  |
| PC           | Petróleo            | 0,03                                 | 0,02  | 0,04 |
|              | Diesel              | 1,10                                 | 0,80  | 2,64 |
|              | GLP                 | 0,00                                 | 0,00  | 0,00 |
| LCV          | Petróleo            | 0,02                                 | 0,02  | 0,03 |
|              | Diesel              | 1,52                                 | 1,10  | 2,99 |
| HDV          | Diesel              | 0,94                                 | 0,061 | 1,57 |
|              | CNG (Buses)         | 0,02                                 | 0,01  | 0,04 |
| Categoría- L | Petróleo            | 2,20                                 | 0,55  | 6,02 |

Fuente: Adaptada de la guía de inventario de emisiones de contaminantes del aire de EMEP / EEA, 2016.

**Ecuación 3.** Factor de emisión

$$E = k (sL)^{0.91} (W)^{1.2} \left( 1 - 1.2 \frac{P}{N} \right) \quad (3)$$

En donde:

$E$ : Factor de emisión de partículas (unidades que coinciden con las unidades de  $k$ )

$k$ : Multiplicador de tamaño de partícula para el rango de tamaño de partícula y unidades de interés.

$sL$ : Carga de limo en la superficie de la carretera (gramos por metro cuadrado) (g/m<sup>2</sup>).

W: Peso promedio (toneladas) de los vehículos que recorren la carretera.

P: Número de día lluviosos con al menos 0,254 mm de precipitación durante el periodo medio.

N: Número de días en el período promedio (365 por año).

Nota: La EPA en la base de datos de la AP-42 menciona que “en el término de corrección de humedad por hora ( $1-1.2P / N$ ) para la ecuación 3, el multiplicador 1.2 se aplica para tener en cuenta el efecto mitigante residual de la humedad. Para la mayoría de las aplicaciones, esta ecuación producirá resultados satisfactorios” (Environmental Protection Agency, 1980).

Posteriormente, se realiza el modelo de elevación de terreno mostrada en 3D, con la plataforma de ALOS JAXA (Satélite de observación de tierra avanzado por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón, por sus siglas en inglés) permitiendo saber la altitud del terreno de estudio, relacionado el uso del suelo junto con el mapa precedente en el software QGIS. De igual forma, se identifican las vías principales de Puente Aranda, junto con los kilómetros determinados por la herramienta QGIS, para luego calcular la concentración por vía en horas.

Por otro lado, con la herramienta QGIS se introducen dentro del mapa ya delimitado, los receptores hipotéticos (ver Figura 3). En este caso, cuenta con mil receptores hipotéticos, el cual el modelo los tendrá en cuenta para poder hacer un promedio de la concentración de  $PM_{2.5}$  en la localidad.

**Figura 3. Mapa de receptores hipotéticos**



A continuación, se corre el modelo con el logaritmo AERMOD (ver Figura 4); el sistema de modelado AERMOD consta de dos preprocesadores y el modelo de dispersión; el preprocesador meteorológico (AERMET) proporciona a AERMOD la información meteorológica que necesita para caracterizar la capa límite planetaria; el preprocesador (AERMAP) caracteriza el terreno y genera cuadrículas de receptores para el modelo de dispersión.

Por último, con los análisis de resultados que arroja el modelo y la interpretación mediante la herramienta que aporta el software QGIS que son los mapas de concentración de máximo de 24 horas y un promedio anual y la herramienta de los histogramas muestra el máximo valor de concentración de  $PM_{2.5}$  ( $\mu/m^3$ ) y la mayor frecuencia con la que este valor se repite; permitiendo estimar y analizar el estado actual de la Localidad de Puente Aranda.

Por lo anterior, con éstos análisis se realiza una comparación de la concentración  $PM_{2.5}$  ( $\mu/m^3$ ) de la localidad con la normatividad en Colombia, y a nivel mundial. Así mismo, se pretende comparar con demás modelos que analicen el comportamiento del  $PM_{2.5}$  como lo hace la OMS.

*Figura 4. Modelo AERMOD*



Fuente: Adaptado de Cimorelli et al., 2004

### 8.1. Diseño metodológico

El enfoque de la presente investigación es de carácter cuantitativo ya que la manera en que se ejecuta el proyecto, es a partir de un levantamiento de información teniendo en cuenta los factores meteorológicos y topográficos del terreno de estudio, dando así un resultado de manera secuencial y estadístico según los datos adquiridos a partir de base de datos de organizaciones e instituciones responsables en el ámbito ambiental, específicamente la parte de la calidad del aire (Hernández, Collado, & Lucio, 2014).

Conforme a los análisis de datos obtenidos, el enfoque cuantitativo utiliza la lógica o el razonamiento deductivo aceptando la realidad que se enfrenta el estado actual de la Localidad de Puente Aranda, teniendo en cuenta que se parte de un problema en general que en este caso es la generación del contaminante  $PM_{2.5}$ , a lo específico correspondiente a la salud pública de la localidad (Hernández et al., 2014).

Seguidamente, en este trabajo de investigación se tendrá un alcance descriptivo, referente a las variables meteorológicas y topográficas que se tendrán en cuenta para el modelo de dispersión del contaminante  $PM_{2.5}$  (Hernández et al., 2014).

Considerando que es un estudio descriptivo también es correlacional, dado que relaciona el comportamiento del contaminante con la afectación de la salud pública por reportes tanto internacionales a nivel mundial como en la Ciudad de Bogotá que será el área de estudio para la Localidad de Puente Aranda (Hernández et al., 2014).

Se tuvieron en cuenta ciertas actividades por cada objetivo como se muestra en la Tabla 3, en donde el primer objetivo es la caracterización de fuentes de emisión, topografía y meteorología de la localidad; este objetivo se realizó gracias a la información recopilada del aforo vehicular en la Localidad de Puente Aranda, las concentraciones por hora de  $PM_{2.5}$  de la RMCAB, luego calcular el factor de emisión para resuspensión en polvo y por exhosto, junto con los datos meteorológicos, como el promedio de valores mayor a 0,254 mm, y las horas promedio en el día que en este caso son 24 horas, extraídas del modelo meteorológico MM5. Posterior a esto, se

utilizó las herramientas de SIG, como la delimitación del área, el levantamiento del uso del suelo (vías primarias y secundarias) concentración por gramo/hora de PM<sub>2.5</sub> según la vía.

Para el segundo objetivo pertinente a la elaboración del modelo, se adapta la información que arroja el modelo AERMOD en el SIG. El modelo cuenta con información de tres años (2016 – actualmente). De allí, se extraen los resultados del modelo para interpolarlos al SIG y así interpretar los resultados del modelo en la localidad, con el fin de obtener un mapa que muestre el comportamiento de dispersión del PM<sub>2.5</sub> por fuentes móviles en la zona de estudio.

En el tercer objetivo, correspondiente a la validación de la información actual sobre las concentraciones o estimaciones del contaminante PM<sub>2.5</sub>, pretende comparar los resultados del mapa junto con sus análisis estadísticos y los modelos ya estimados por instituciones u organizaciones responsables de informar a la población del estado de calidad del aire. Por esto, la compilación de datos según los reportes, son de importancia para conclusión de la efectividad del modelo elaborado.

*Tabla 3. Diseño metodológico por objetivo específico*

| General                                                                                                                           | Específico                                                                                     | Actividades                                                                                                    | Técnicas                                                                                 | Instrumentos                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>Diseñar y ejecutar un modelo de dispersión del contaminante PM<sub>2.5</sub> en la Localidad de Puente Aranda, Bogotá D.C.</b> | Realizar una caracterización de fuentes de emisión, topografía y meteorología de la localidad. | Recopilar datos del inventario de fuentes móviles de la localidad.                                             | Observación y análisis de puntos de mayor concentración por fuentes móviles.             | Uso de mapas satelitales y shapefiles de la localidad.                |
|                                                                                                                                   |                                                                                                | Reunir los reportes de la RMCAB, en los últimos tres años de PM <sub>2.5</sub> de la estación de Puente Aranda | Análisis de datos de concentración de PM <sub>2.5</sub> y el resultado de los cuartiles. | Uso del software Excel para caja de bigotes, promedios y frecuencias. |

|  |                                                                                                    |                                                                                     |                                                                               |                                                                                                                 |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |                                                                                                    | Recolectar datos meteorológicos y topográficos del área de estudio.                 | Levantamiento de reportes de meteorología y topografía de la zona.            | Datos de precipitaciones, dirección y velocidad del viento, uso del suelo, tipo de vías.                        |
|  | Elaborar el modelo de dispersión AERMOD del contaminante PM <sub>2.5</sub> para el área de estudio | Calcular la concentración del contaminante por vía principal de la zona de estudio. | Análisis de las concentraciones comparado con la norma                        | Ecuaciones de factor de emisión según la EPA y la EEA.                                                          |
|  |                                                                                                    | Adaptar los cálculos y datos de la zona al logaritmo AERMOD.                        | Análisis de factores que puedan influir en el modelo de dispersión.           | Reportes de las estaciones de la RMCAB en Puente Aranda.                                                        |
|  |                                                                                                    | Interpolarse e interpretar los resultados arrojados por el modelo AERMOD al SIG.    | Histogramas por cada capa en el SIG, percentiles y promedios de cada variable | Uso del software QGIS con la herramienta de interpolación y tabla de frecuencias.                               |
|  | Validar la información actual con respecto a los resultados del modelo.                            | Compilar los reportes o políticas actuales en Bogotá o en Colombia.                 | Comparación de datos actuales según la norma y los resultados del modelo.     | Reportes de calidad del aire en Bogotá y Puente Aranda. Modelo de concentración de PM <sub>2.5</sub> de la OMS. |

Fuente: Autor, 2018

## 9. Resultados y análisis de resultados

### • Caracterización de fuentes de emisión, topográfica y meteorológica de la zona

A partir del aforo vehicular se determina la cantidad promedio en horas que pasan por las vía principal (Avenida las Américas) de la localidad, tomando esta referencia como indicador predominante para las demás vías, ya que por parte de los inventarios de fuentes móviles para Bogotá, no se encuentra actualizado, por lo tanto, se tomó este aforo vehicular como fuente principal para calcular las concentraciones de  $PM_{2.5}$  de cada tramo de vía.

El cálculo se realiza de la siguiente manera:

Para el foro vehicular, a partir de la identificación del tipo de vehículo junto con la cantidad que se monitoreó por hora en la vía Avenida las Américas, se realiza un promedio de peso en kilogramos por cada tipo de vehículo; en donde se puede observar que la cantidad promedio es de 136.974 vehículos por hora. De allí, se realiza la fracción que corresponde a la cantidad de tipo de vehículo por la totalidad de la cantidad de vehículos. Luego, se multiplica el peso promedio (M) de cada tipo de vehículo por la fracción (kg), generando un total en kilogramos por cada tipo de vehículo. Finalmente, se hace una sumatoria de la multiplicación entre la fracción y el total de cada tipo de vehículo, arrojando un resultado de 687 kilogramos por vía (kg/V) (ver Tabla 4), es decir, 0,69 ton/V mostrando que la mayoría de vehículos son livianos ya que tienen un equivalente al 0,69 toneladas.

*Tabla 4. Aforo vehicular y el cálculo w*

| <b>Tipo</b>             | <b>M(kg)</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Fracción<br/>(kg)</b> | <b>Total(kg)</b> | <b>Total (kg/V)</b> |
|-------------------------|--------------|-----------------|--------------------------|------------------|---------------------|
| Carros                  | 1.600        | 80.905          | 0,59                     | 945              | 687                 |
| Motos                   | 98           | 42.291          | 0,31                     | 30               |                     |
| Camiones                | 28.600       | 5.998           | 0,04                     | 1,252            |                     |
| Buses y<br>transmilenio | 20.000       | 7.772           | 0,06                     | 1,135            |                     |
| Mulas                   | 228.500      | 8               | 0,0                      | 13               |                     |
| Total                   |              | 136.974         |                          |                  |                     |

Fuente: Autor, 2018

**Ecuación 4.** Factor de emisión resuspensión en polvo

$$E = 0,15(0,1)^{0,91}(0,69ton)^{1,2} = 0,0118g/VKT \quad (4)$$

$$E = \frac{0,0118g}{VKT} * \frac{136.974Veh}{h} = 1619,37 \frac{g}{km - h} \quad (5)$$

**Ecuación 5.** Factor de emisión total

$$E = 0,15(0,1)^{0,91}(0,69ton)^{1,2} \left(1 - 1,2 \frac{1.868mm}{24}\right) = 0,010ton \frac{g}{VKT} \quad (6)$$

Ahora, para el cálculo de concentración de PM<sub>2.5</sub> por cada tramo de vía, anteriormente se realiza una identificación de las vías principales de Puente Aranda, por medio del software QGIS, con la herramienta objeto espacial; el cual permite dibujar dentro del mapa en QGIS una delimitación por cada vía junto con sus atributos, en este caso son los kilómetros que se representa en el mapa.

Luego de tener ya establecidas las vías principales de Puente Aranda, se multiplica los kilómetros de cada vía por la ecuación (4), es decir, 0,118 (g/VKT) y nos arroja un total en gramos de concentración de PM<sub>2.5</sub> por cada vía como se puede ver a continuación en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Cálculo de concentración por vía

| Vía                 | km    | E (g/VKT) | Total (g/VKT) |
|---------------------|-------|-----------|---------------|
| 1. Carrera 68       | 6.438 | 0,1182    | 0.076         |
| 2. Av. Las Américas | 2.993 |           | 0.035         |
| 3. Calle 22         | 4.206 |           | 0.050         |
| 4. Autopista Sur    | 7.500 |           | 0.089         |
| 5. Av. Carrera 50   | 5.388 |           | 0.064         |
| 6. Calle 13         | 3.842 |           | 0.045         |
| 7. Calle 6          | 2.643 |           | 0.031         |
| 8. Av. Calle 3      | 3.412 |           | 0.040         |
| 9. Calle 8 Sur      | 3.213 |           | 0.038         |
| 10. Av. 1 de Mayo   | 2.263 |           | 0.027         |

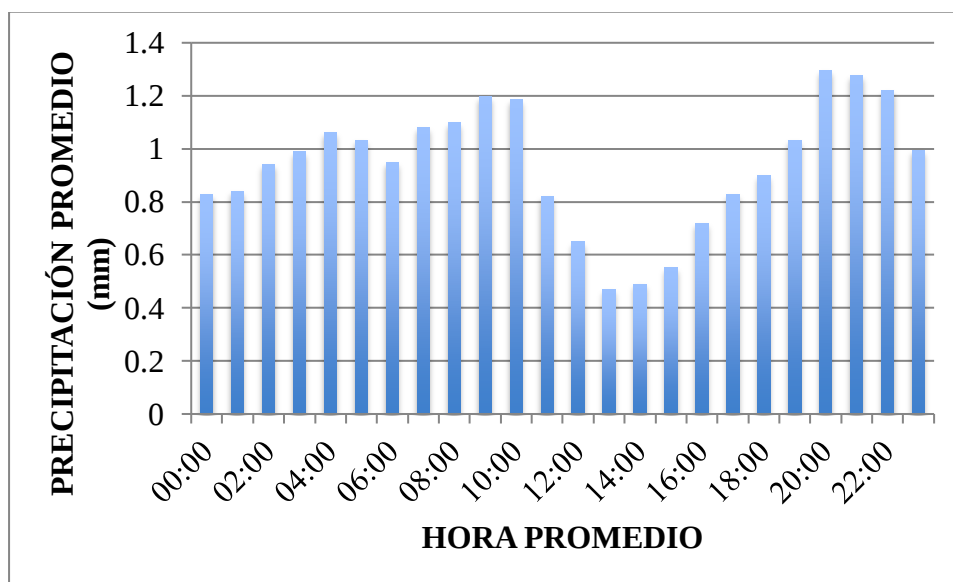
| Vía                | km    | E (g/VKT) | Total (g/VKT) |
|--------------------|-------|-----------|---------------|
| 11. Transversal 53 | 4.751 |           | 0.056         |
| 12. Calle 19       | 1.040 |           | 0.012         |

\*Las unidades mostradas son gramos por vehículo kilómetro viajado (g/VKT por sus siglas en inglés).

Fuente: Autor, 2018

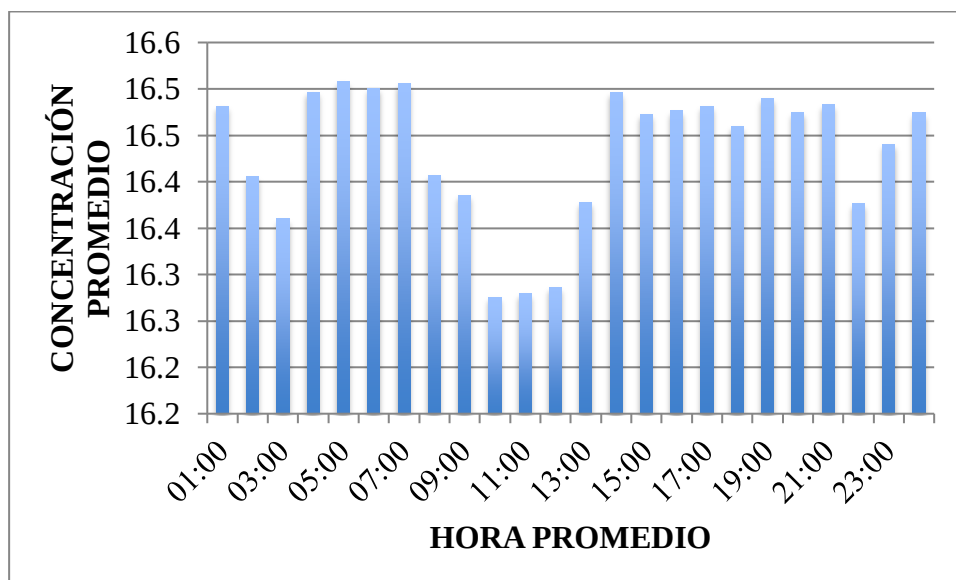
A continuación se recolectan el promedio de precipitación por hora durante tres años (ver Figura 5), mostrando un promedio de 0,9 mm aproximadamente; esto nos muestra que en la localidad las lluvias son bajas, por lo tanto, el material particulado que se genera en la zona, se encuentra suspendida en el aire, permitiendo la fácil inhalación del contaminante, ya que en el mayor tiempo no hay descenso de las partículas contaminantes, por la baja precipitación durante el año.

*Figura 5. Promedio de precipitación (mm)*



Posterior, se encuentra de forma resumida la información de concentración de PM<sub>2.5</sub> en horas (ver Figura 6) cabe resaltar, que el promedio de concentración de PM<sub>2.5</sub> es de 16,43 µg/m<sup>3</sup> por hora; este valor nos permite reconocer que es una concentración promedio alta, comparado con la normatividad de la OMS que señala que para evitar riesgos en la salud los promedios son 10 µg/m<sup>3</sup> (media anual) y 25 µg/m<sup>3</sup> (media diaria).

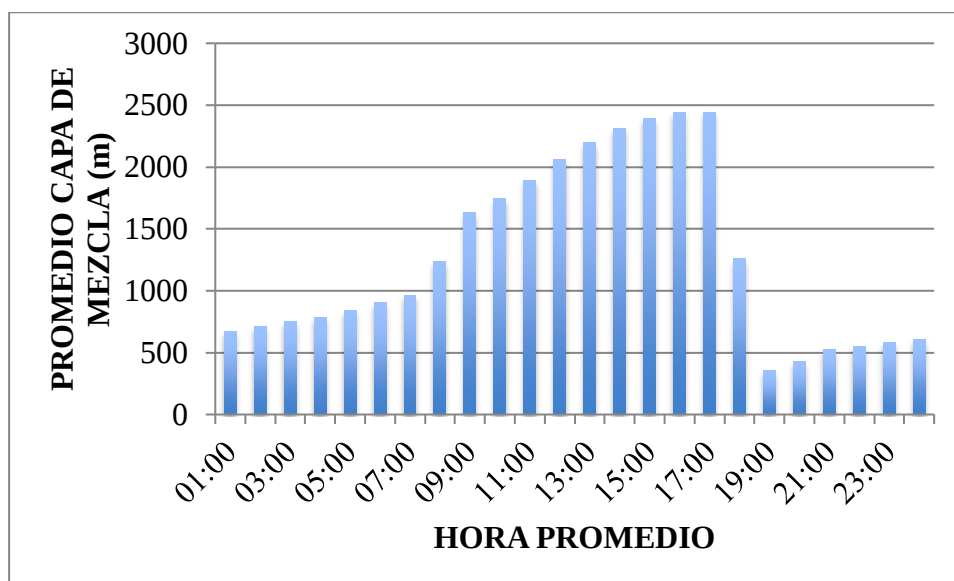
**Figura 6.** Concentración promedio de PM<sub>2.5</sub> (g/m<sup>3</sup>)



Ahora, para fines del modelo de dispersión de PM<sub>2.5</sub> en Puente Aranda, se tuvo en cuenta las siguientes variables que se muestran en las Figuras 7, 8 y 9; ya que éstas variables influyen tanto en su dispersión como en su concentración.

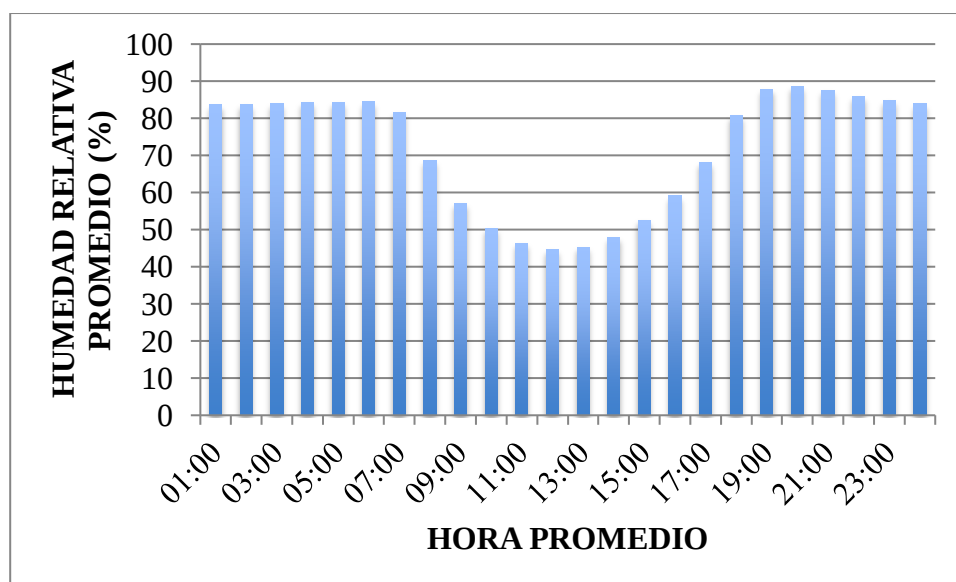
El promedio de capa de mezcla que es de 1.300 metros hace referencia al cambio de altura por diferencia de densidades del viento y la velocidad del viento, haciendo que el material particulado se pueda dispersar más fácil.

**Figura 7.** Promedio para altura de capa de mezcla (m)



La humedad relativa representa el vapor de agua que se encuentra en el aire, esto conlleva a la condensación de las partículas en el aire; el promedio para la Localidad de Puente Aranda es de 80% (ver Figura 8) es decir, alta, por lo tanto puede concentrarse en zonas mas húmedas generando un pico alto de concentración de  $PM_{2.5}$ .

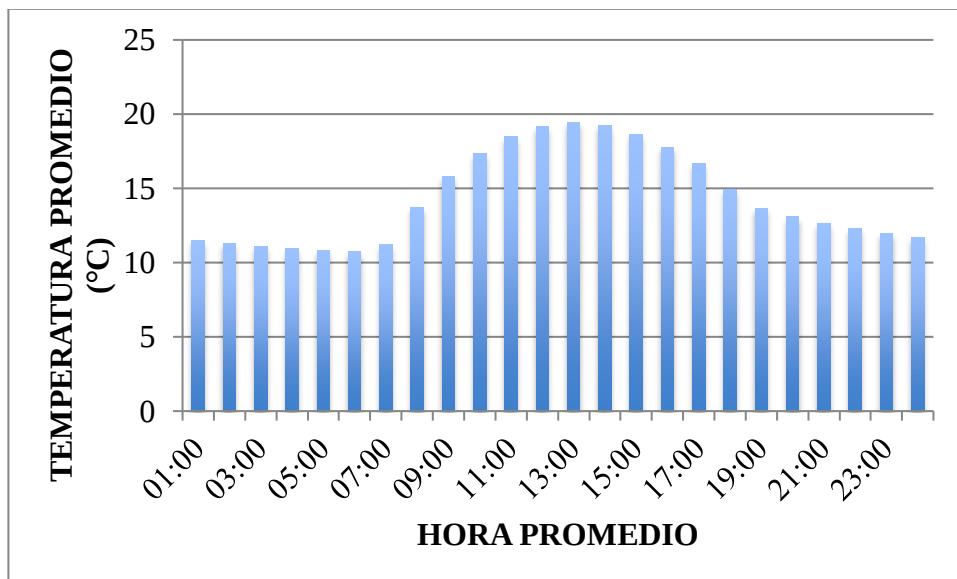
**Figura 8.** Humedad Relativa (%)



Por último, la variable temperatura influye en la concentración de  $PM_{2.5}$  en el aire, debido a que a menor temperatura, mayor concentración de contaminante se registra; es por esto que en las madrugadas la concentración de material particulado es mucho mas alta que en horas de la tarde

en donde hay probabilidad de una mayor temperatura. Para el caso de Puente Aranda el promedio de temperatura es de 14°C (ver Figura 9).

**Figura 9.** Promedio de temperatura (°C)



Para esta investigación se utilizó únicamente los datos de las fuentes móviles debido a que las fuentes fijas no presentan datos exactos como lo menciona el CONPES 3943, afirmando que a fines de reducción y control de contaminantes atmosféricos por parte de las fuentes fijas, la información contiene falencias que puede llegar a generar un error en los modelos de dispersión. Además, el CONPES 3943, señala que la mayoría de emisiones de contaminantes atmosféricos es por parte de las fuentes móviles debido a la concentración de población existente, lo cual hace vulnerable a las ciudades grandes de Colombia como es Bogotá (Departamento Nacional de Planeación et al., 2018). Por lo tanto, para este modelo de dispersión se puede realizar un análisis de la distribución del contaminante  $PM_{2.5}$  por medio de la complejidad vial.

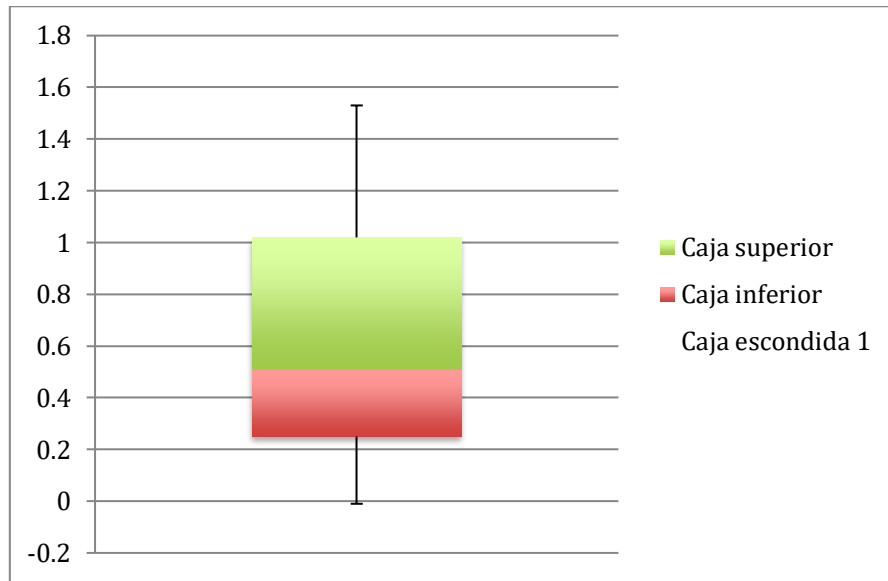
Por otro lado, mediante la herramienta de Excel, se realizan cajas de bigotes por cada variable meteorológica, exponiendo los cuartiles que son los valores en horas divididos en partes iguales; además permiten estimar la dispersión o distribución de los datos de interés. De allí se puede interpretar, que: la distribución de datos para precipitación están entre 0,3 y 1 mm (ver Figura 10); la concentración de  $PM_{2.5}$  se distribuye entre los valores 5 y 25  $\mu g/m^3$  (ver Figura 11); la temperatura oscila entre los 12 y 16 °C (ver Figura 12); en la altura de capa de mezcla los

valores se distribuyen entre los 500 y 2.100 metros (ver Figura 13); por último para la variable humedad relativa oscila entre el 57 y 87% (ver Figura 14). Cabe resaltar que éstos valores son tomados durante dos años (2016-2017) por hora, y son extraídos mediante el método meteorológico MM5, explicado anteriormente.

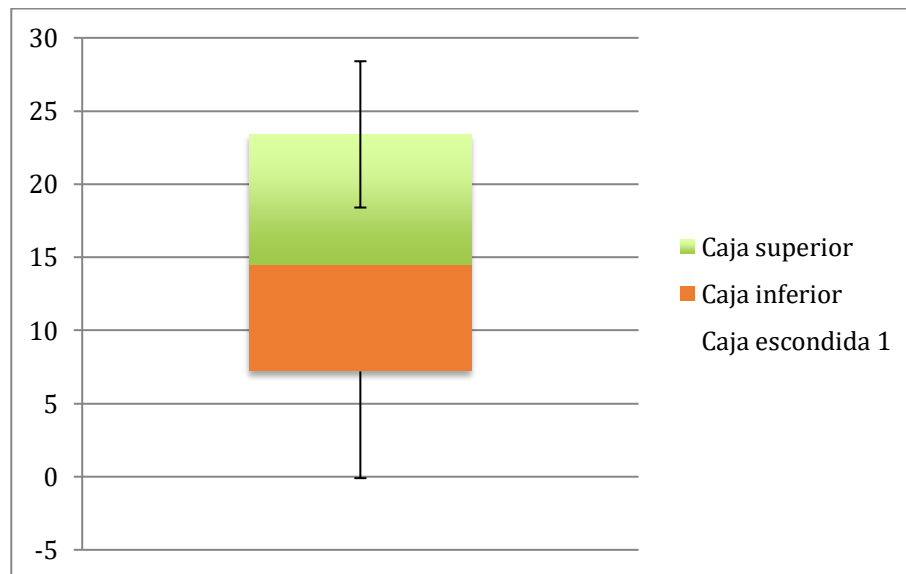
Para éstas tres últimas variables, influyen en la concentración, teniendo en cuenta que la temperatura cuando es baja, la concentración del contaminante tiende a elevarse, es decir, es inversamente proporcional; la humedad relativa afecta a la concentración ya que con ella puede suspenderse las partículas contaminantes en el aire o elevarse, esto quiere decir que entre menos humedad mayor concentración de contaminante. Ahora, para la altura de capa de mezcla está relacionada con las densidades y la velocidad del viento, por lo tanto, en la noche se presentan bajos valores de la variable debido a que no hay radiación solar.

Adicional, con la capa ráster de la altura de obstáculos de la zona de Puente Aranda como se muestra a continuación (ver Figura 15), en el software QGIS, se realiza en análisis donde se muestra que Puente Aranda está a 2.500 m.s.n.m aproximadamente.

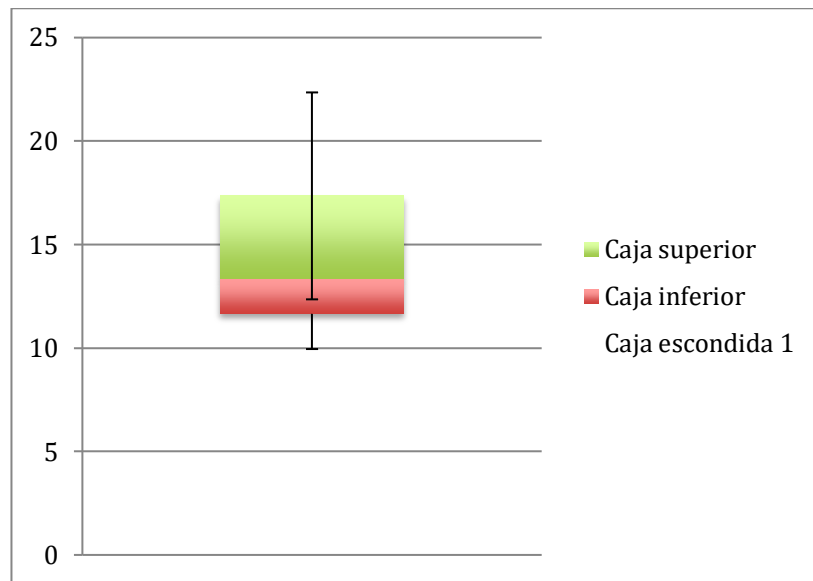
**Figura 10.** Caja de bigotes de precipitación



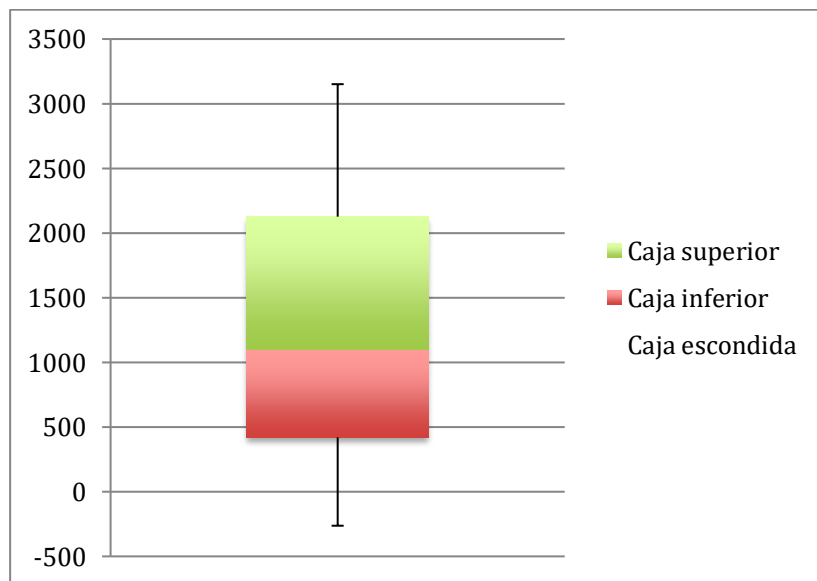
**Figura 11.** Caja de bigotes de concentración de PM2.5



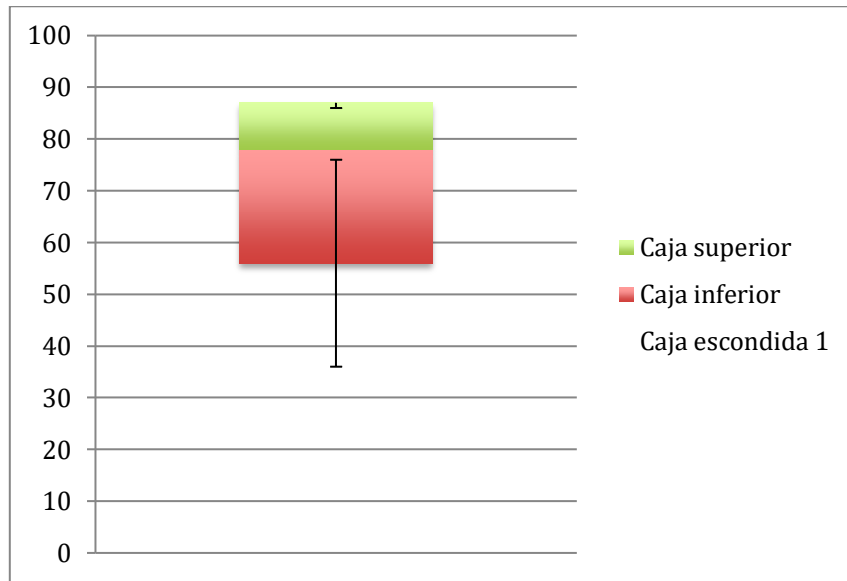
**Figura 12.** Caja de bigotes de temperatura



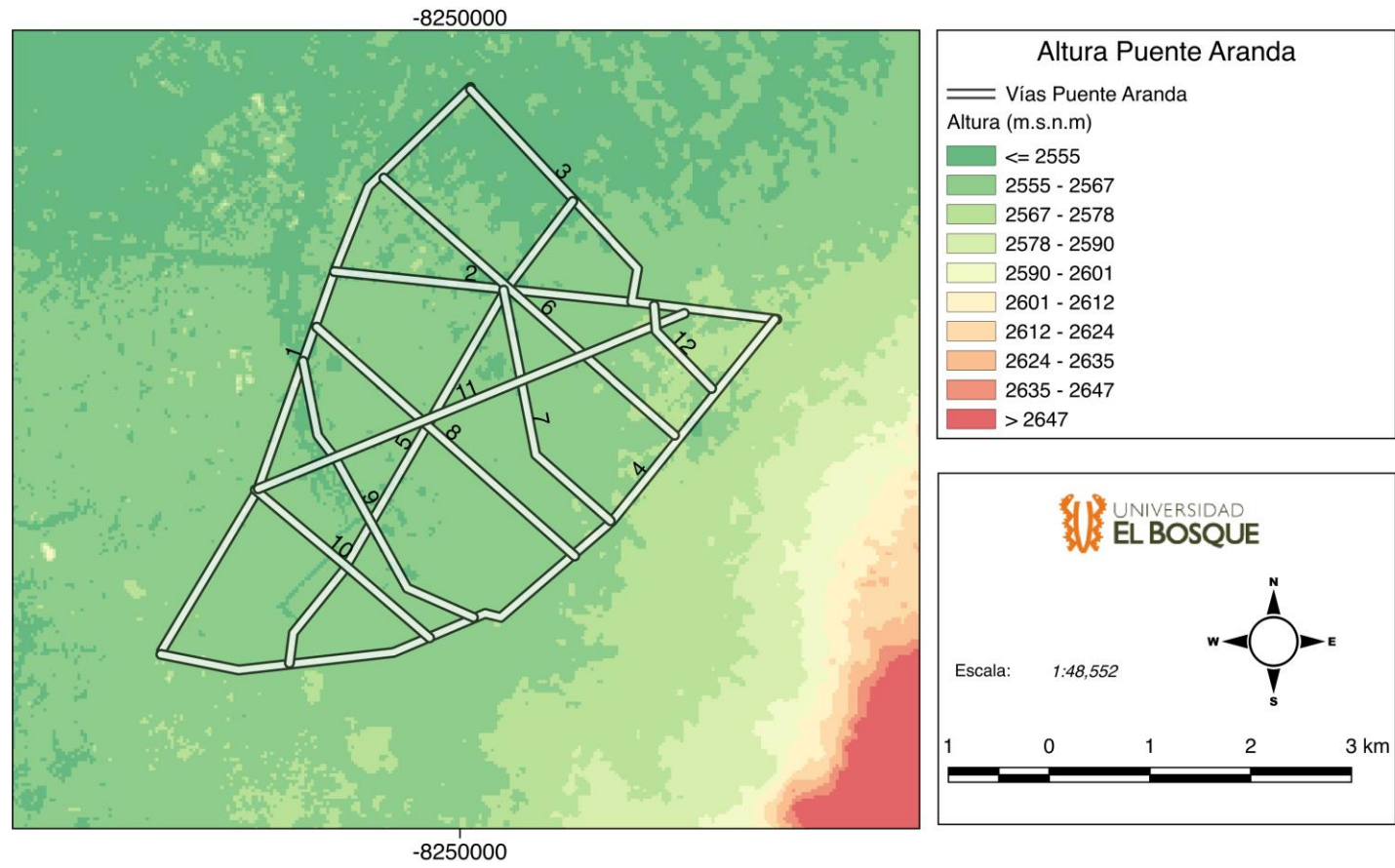
**Figura 13.** Caja de bigotes de altura de capa de mezcla



**Figura 14.** Caja de bigotes de humedad relativa



**Figura 15.** Mapa de altura de obstáculos de Puente Aranda

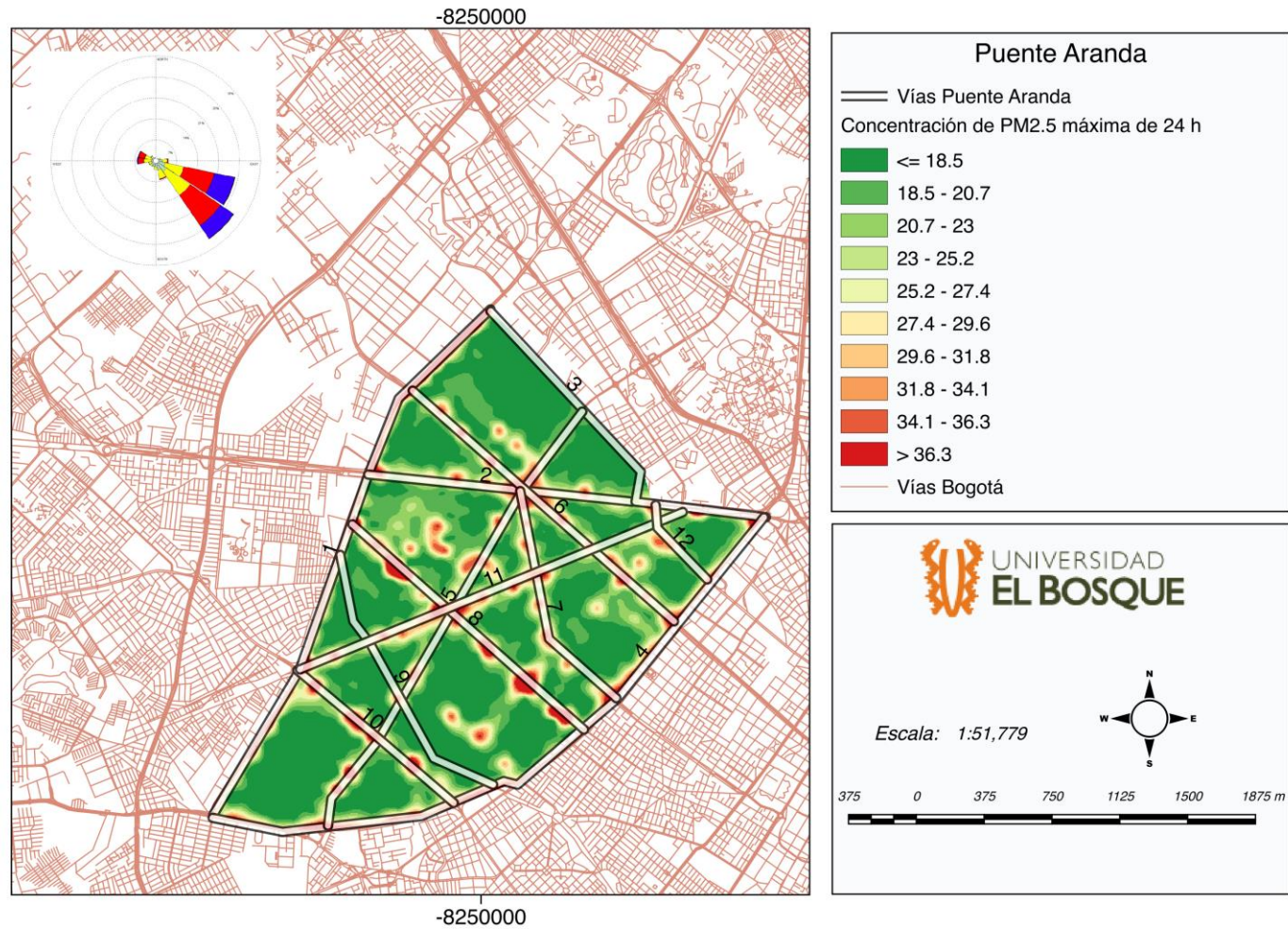


Fuente: Autor, 2018

- **Elaborar el modelo de dispersión AERMOD del contaminante PM<sub>2.5</sub> para el área de estudio.**

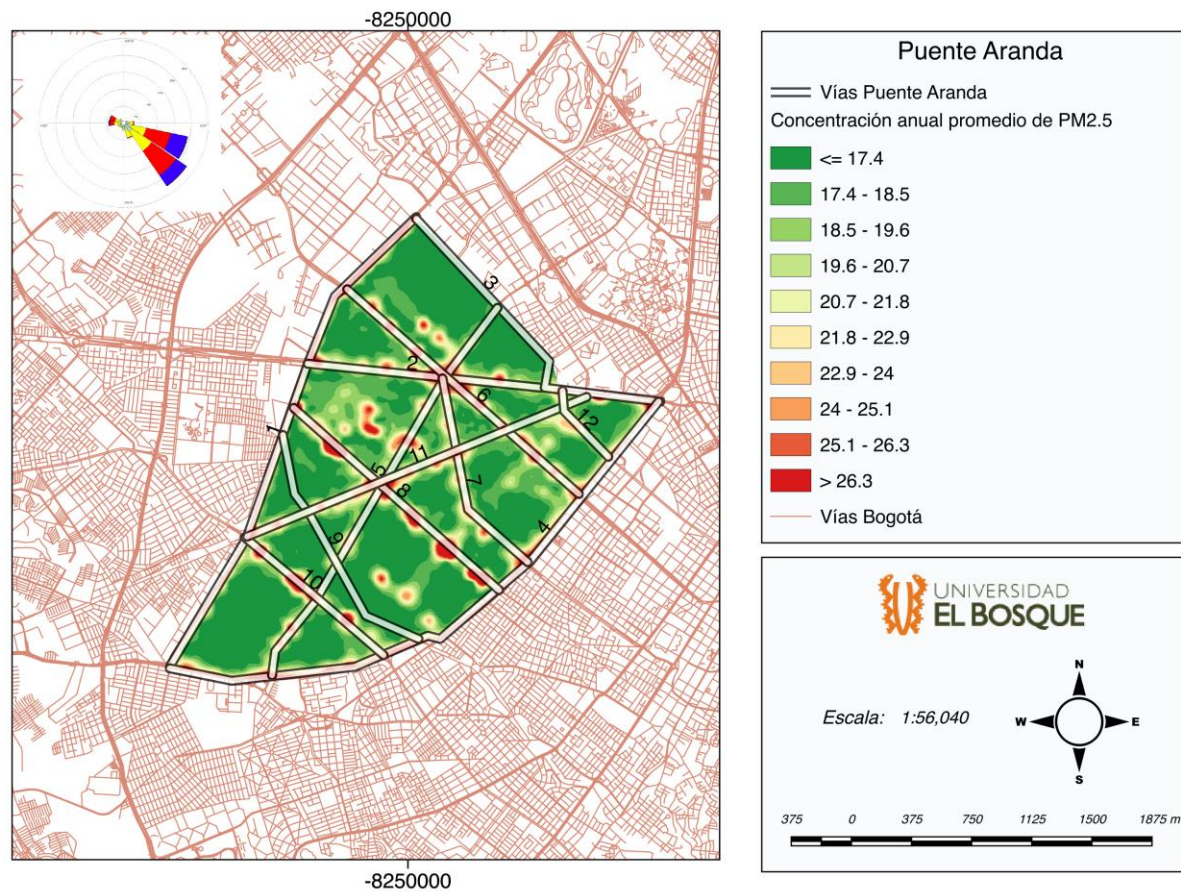
A partir del algoritmo AERMOD, recomendado por la EPA, se realiza el modelo de dispersión, teniendo en cuenta los valores calculados, y las variables que influyen en el modelo como el viento, la topografía y la meteorología, explicados anteriormente. Finalmente se procesan los datos arrojados por el modelo mediante el software QGIS, mediante la interpolación de los resultados del modelo, generando dos mapas; el primero muestra la concentración de PM<sub>2.5</sub> para un máximo de 24 horas (ver Figura 16) y el segundo mapa muestra una concentración de PM<sub>2.5</sub> promedio anual (ver Figura 17) como se muestra a continuación.

**Figura 16.** Mapa de dispersión de PM2.5 máximo de 24 horas



Fuente: Autor, 2018

**Figura 17.** Mapa de dispersión de PM2.5 anual promedio



Fuente: Autor, 2018

Se puede analizar a través de las leyendas que las concentraciones varían para tipo anual promedio y para un máximo de veinticuatro horas; ya que anualmente las concentraciones de material particulado para la Localidad de Puente Aranda son menores a comparación de la concentración máxima de 24 horas; sin embargo, se muestra un patrón de concentraciones mayores en las vías en la Avenida Calle 3, Avenida 1 de Mayo, Avenida las Américas y la Transversal 53. Esto puede relacionarse con la concentración comercial que hay en esta zona, generando éstas altas concentraciones.

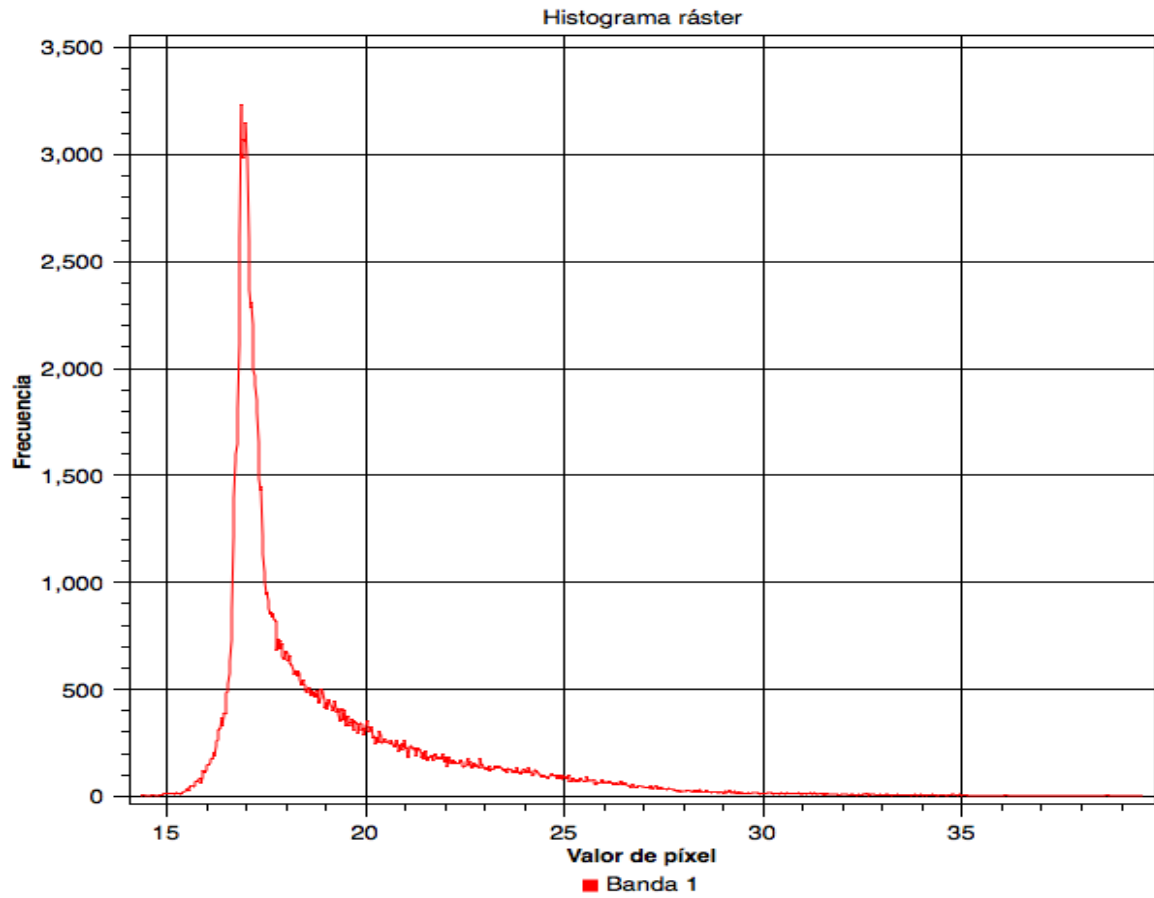
Adicionalmente, con la herramienta QGIS los histogramas para concentración promedio anual y para un máximo de veinticuatro horas se muestra de la siguiente manera:

El histograma anual muestra una concentración mínima  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con un máximo de  $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y un incremento típico anual correspondiente a  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La concentración máxima esperada es de  $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (figura 18).

Ahora, el histograma para un máximo de 24 horas presenta un mínimo de  $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un máximo de  $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con un incremento típico de  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y una concentración máxima esperada de  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 19) de concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  que se presenta en la localidad.

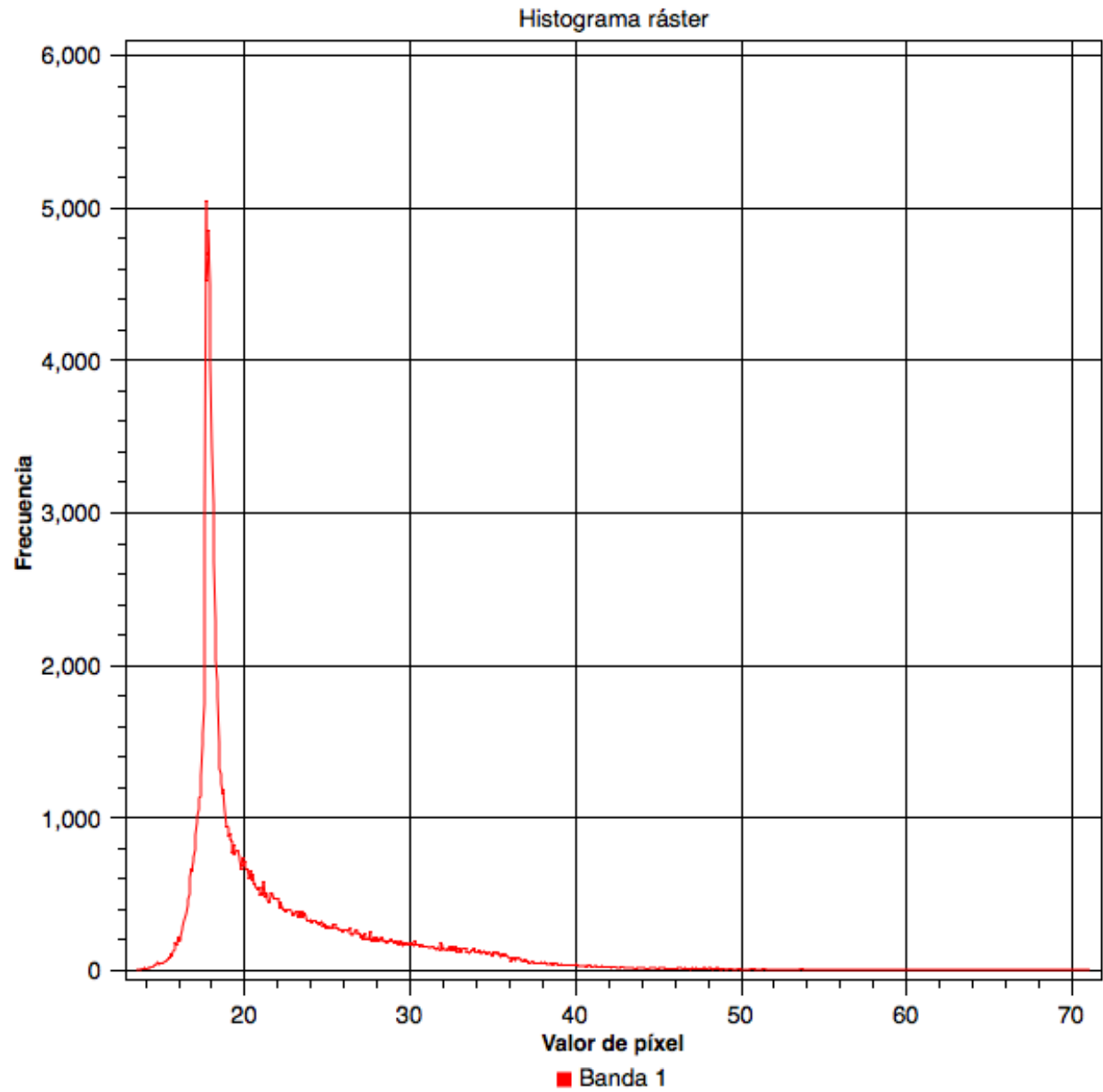
Con los valores mencionados anteriormente, se puede resaltar que estos incrementos son efectos de la densidad vial de la localidad.

**Figura 18.** Histograma anual de concentración de PM2.5



Fuente: Autor, 2018

**Figura 19.** Histograma máximo de 24 horas de concentración de PM2.5



Fuente: Autor, 2018

- **Validar la información actual con respecto a los resultados del modelo.**

*Tabla 6. Comparación de valores de concentración de PM<sub>2.5</sub>*

| <b>Concentración PM<sub>2.5</sub><br/>µg/m<sup>3</sup></b> | <b>OMS 2005</b> | <b>Resolución 2254 de<br/>2017</b> | <b>Modelo de<br/>dispersión</b> |
|------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Diaria                                                     | 25              | 50                                 | 70                              |
| Anual                                                      | 10              | 25                                 | 20                              |

Según la Resolución 2254 de 2017, el criterio que se tiene para las concentraciones en Colombia para el contaminante PM<sub>2.5</sub> es de 25 µg/m<sup>3</sup> anual y 50 µg/m<sup>3</sup> 24 horas; Para tener mejor información sobre que nivel esta presente en términos normativos, se debe calcular el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) según como lo indica la Resolución 2254 de 2017.

No obstante, el modelo arroja concentraciones de 20 µg/m<sup>3</sup> como mínimo para 24 horas y un máximo de 70 µg/m<sup>3</sup>; para anual arroja también un promedio de concentración no menores a 15 µg/m<sup>3</sup> y no mayores a 40 µg/m<sup>3</sup>. Con respecto a la OMS, éstas concentraciones pueden tener un riesgo en la salud pública, ya que los límites permisibles están por encima de los valores permitidos para la salud, indicando que la Localidad de Puente Aranda puede tener incrementos de morbilidad y mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiacas.

## **10. Conclusiones**

- La ausencia de información por parte de las organizaciones/instituciones en Colombia, hace que haya falencias en los modelos de dispersión, ya que no se encuentra información actualizada o coherente. como es el monitoreo constante de cada tipo de fuente de emisión.
- Debido a que no hay información por parte de la Alcaldía Mayor de Bogotá, se tuvo que recurrir a una fuente particular para obtener información sobre el flujo vehicular de la Localidad de Puente Aranda, el cual hace parte del cálculo de factor de emisión.

- Se puede afirmar que tanto investigaciones como informes por parte de las autoridades encargadas del ámbito ambiental, concuerdan con que la Localidad de Puente Aranda, representa una de las mayores áreas que influyen en el deterioro de la calidad del aire por la condensación de población, comercio e industria, como lo rectifica el modelo realizado en esta investigación.
- Con la elaboración del modelo de dispersión AERMOD, se puede realizar una predicción del comportamiento de dispersión de contaminante  $PM_{2.5}$  para futuras estrategias o lineamientos que puedan reducir o eliminar las fuentes de emisión de los contaminantes que afectan a la salud pública.
- Los resultados del modelo AERMOD del contaminante  $PM_{2.5}$  para la Localidad de Puente Aranda, concuerda con investigaciones anteriores sobre la molestia que presenta la población de Puente Aranda, con respecto a enfermedades respiratorias y cardíacas.
- A partir de la información extraída del modelo, se puede realizar un estudio más a fondo, teniendo en cuenta que en esta investigación se supuso la cantidad de carros promedio por hora en solo una vía, generando una incertidumbre en el modelo.

## 11. Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio mas afondo sobre el inventario de las fuentes móviles en la ciudad de Bogotá, y poder clasificarlos por localidades, para tener un mayor detalle a la hora de diseñar o ejecutar un modelo de dispersión según el contaminante de interés.

Adicionalmente, se recomienda realizar estrategias o políticas con lineamientos sobre la calidad del aire en zonas pobladas, o industriales, ya que éstas representan el mayor aporte de fuente de contaminación del aire, como lo es Puente Aranda.

Para finalizar se recomienda gestionar nuevas metodologías para la elaboración de modelos de dispersión a nivel nacional y no basados en datos o metodologías internacionales.

## 12. Referencias

- Alcaldía Local Puente Aranda. (2012). Plan ambiental local Puente Aranda, 55. Retrieved from <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/2883174/PAL+Puente+Aranda+2013-2016.pdf>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2018). DE 2018 DÍA SIN CARRO Y SIN MOTO Febrero 1 – Día Sin Carro y Sin Moto en Bogotá 20ava . Jornada Sin Carro y 5ta Sin Moto Día Sin Carro y Sin Moto.
- Carmona Aparicio, L. G., Rincón Pérez, M. A., Castillo Robles, A. M., Galvis Remolina, B. R., Sáenz Pulido, H. E., Manrique Forero, R. A., & Pachón Quinche, J. E. (2016). Conciliación de inventarios top-down y bottom-up de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia. *Revista Tecnura*, 20(49), 59.  
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a04>
- Cimorelli, A. J., Perry, S. G., Venkatram, A., Weil, J. C., Paine, R. J., Wilson, R. B., ... Paumier, J. O. (2004). AERMOD : DESCRIPTION OF MODEL FORMULATION. *EPA*, 91.
- CONPES 3943. (2018). *Política para el mejoramiento de la calidad del aire*. Bogotá D.C. Retrieved from [http://www.andi.com.co/Uploads/CONPES 3943 Calidad del Aire.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/CONPES%203943%20Calidad%20del%20Aire.pdf)
- Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Comercio Industria y Turismo, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, & Ministerio de Transporte. (2018). *CONPES 3943*. Bogotá D.C.
- De Nevers, N. (1997). *Ingeniería de control de la contaminación del aire*. (J. H. Castellanos, Trans.) México: The McGraw-Hill Companies.
- Di Sabatino, S., Buccolieri, R., Pulvirenti, B., & Britter, R. (2007). Simulations of pollutant dispersion within idealised urban-type geometries with CFD and integral models. *Atmospheric Environment*, 41(37), 8316–8329.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.06.052>
- Environmental Protection Agency. (1980). *Miscellaneous Sources*. October (Vol. 80).
- European Environment Agency. (2016). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016*. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2016*.  
<https://doi.org/10.2800/247535>
- Gaviria, C., Benavides, P., & Tangarife, C. (2011). Contaminación por material particulado

- (PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub>) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 29(3), 241–250.
- Gutiérrez, H., Romieu, I., Corey, G., & Fortoul, T. (1997). *Contaminación del aire; Riesgos para la salud*. (J. Á. Valdivieso, Ed.) México D.F., México: El Manual Moderno, S.A. de C.V.
- Haagenson, P. L., Grell, G. A., & Stauffer, D. R. (1994). The Penn State / NCAR Mesoscale Model ( MM5 ) Source Code Documentation Table of Contents. *NCAR Technical Note NCAR/TN-392*.
- Hernández, R., Collado, C. F., & Lucio, M. del P. B. (2014). Metodología de la investigación. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1–589.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J. R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N., ... Zhong, M. (2017). *The Lancet Commission on pollution and health. The Lancet* (Vol. 6736).  
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0)
- Maddocks, M., & Higginson, I. J. (2017). *Implications for the science of air pollution and health. The Lancet Respiratory Medicine* (Vol. 5). [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(17\)30396-X](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(17)30396-X)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental, (2040), 93–223. Retrieved from  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/10972>
- Organización Mundial de la Salud. (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. *Organización Mundial de La Salud*.
- Palacio-Soto, D., Zafra-Mejía, C., & Rodriguez, J. (2014). Evaluación de la calidad del aire mediante un laboratorio móvil : Puente Aranda ( Bogotá D . C ., Colombia ). *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 71(2), 153–166. <https://doi.org/10.1023/A:1013170528551>
- QGIS. (2016). Descarga e instalación del QGIS.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2010). *Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá*. Retrieved from  
[http://ambientebogota.gov.co/en/c/document\\_library/get\\_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886](http://ambientebogota.gov.co/en/c/document_library/get_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886)