



**ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA CALIDAD DEL AIRE DETERMINADA POR  
EL MATERIAL PARTICULADO PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub> EN EL PARQUE INDUSTRIAL MUNICIPIOS  
DE NOBSA, CORRALES Y SOGAMOSO (BOYACÁ)**

**MIGUEL ÁNGEL GIL SERRANO**

**COD: 11792119211**

**JULIÁN EDGARDO TOBO PAIPILLA**

**COD: 11792114874**

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL**

**ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

**BOGOTÁ D.C.**

**2022**

**ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA CALIDAD DEL AIRE DETERMINADA POR  
EL MATERIAL PARTICULADO PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub> EN EL PARQUE INDUSTRIAL MUNICIPIOS  
DE NOBSA, CORRALES Y SOGAMOSO (BOYACÁ)**

**MIGUEL ÁNGEL GIL SERRANO  
JULIÁN EDGARDO TOBO PAIPILLA**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Especialista en Sistemas de Información Geográfica**

Director (a):

Dr. Andrés Felipe Carvajal Vanegas

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
BOGOTÁ D.C.**

**2022**

**TABLA DE CONTENIDO**

<b>RESUMEN.....</b>	<b>7</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>8</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>1. OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS.....</b>	<b>13</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
<b>3. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....</b>	<b>17</b>
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>23</b>
<b>4.1 LOCALIZACIÓN Y GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>23</b>
<b>4.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....</b>	<b>27</b>
<b>4.3 PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....</b>	<b>30</b>
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>34</b>
<b>5.1 RESULTADOS.....</b>	<b>34</b>
<b>5.1.1 Análisis Temporal.....</b>	<b>34</b>
<b>5.1.2 Análisis Espacial.....</b>	<b>43</b>
<b>5.2 DISCUSIÓN.....</b>	<b>55</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>58</b>
<b>7. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>60</b>

<b>8. ANEXOS .....</b>	<b>61</b>
<b>9. REFERENCIAS .....</b>	<b>68</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Estado del conocimiento .....	18
<b>Tabla 2.</b> Características de las estaciones del sistema especial de vigilancia de la calidad del aire de la zona industrial Nobsa, Corrales y Sogamoso. ....	29

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización del área de estudio- zona industrial municipios de Nobsa, Corrales y Sogamoso .....	23
<b>Figura 2.</b> Precipitaciones promedio multianual 1981-2018.....	25
<b>Figura 3.</b> Temperaturas promedio multianual 1981-2018.....	26
<b>Figura 4.</b> Red de drenaje zona industrial municipios de Nobsa, Corrales y Sogamoso. ....	27
<b>Figura 5.</b> Localización estaciones zona de estudio .....	28
<b>Figura 6.</b> Aplicación herramienta IDW.....	32
<b>Figura 7.</b> Pasos que componen el desarrollo metodológico del proyecto.....	33
<b>Figura 8.</b> Valores de $PM_{10}$ en la Estación UPTC (Periodo 2019-2021) .....	34
<b>Figura 9.</b> Valores de $PM_{10}$ en la Estación Hospital (Periodo 2019-2021) .....	34
<b>Figura 10.</b> Valores de $PM_{10}$ en la Estación Sogamoso-Recreo (Periodo 2019-2021) ..	35
<b>Figura 11.</b> Valores de $PM_{10}$ en la Estación Sogamoso-Koica (Periodo 2019-2021).....	36
<b>Figura 12.</b> Valores de $PM_{10}$ en la Estación SOGAMOSO-Sena (Periodo 2019-2021) .	37
<b>Figura 13.</b> Valores de $PM_{10}$ en la Estación NOBSA-Nazareth (Periodo 2019-2021)....	37
<b>Figura 14.</b> Valores de $PM_{10}$ en la Estación Nobsa -Bomberos (Periodo 2019-2021) ...	38
<b>Figura 15.</b> Valores de $PM_{2.5}$ en la Estación Sogamoso-Recreo (Periodo 2019-2021)..	39
<b>Figura 16.</b> Valores de $PM_{2.5}$ en la Estación Sogamoso-Koica (Periodo 2019-2021) ....	39
<b>Figura 17.</b> Valores de $PM_{2.5}$ en la Estación Nobsa-Nazareth (Periodo 2019-2021) ....	40
<b>Figura 18.</b> Valores de $PM_{2.5}$ en la Estación Nobsa-Bomberos (Periodo 2019-2021) ...	41
<b>Figura 19.</b> Valores máximos mensuales de $PM_{10}$ (Periodo 2019-2021).....	42
<b>Figura 20.</b> Valores máximos mensuales de $PM_{2.5}$ (Periodo 2019-2021).....	43
<b>Figura 21.</b> Mapa espaciotemporal para el valor máximo anual de $PM_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), (Periodo 2019-2021).....	44
<b>Figura 22.</b> Mapa espaciotemporal para el valor promedio anual de $PM_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), (Periodo 2019-2021).....	44
<b>Figura 23.</b> Mapa espaciotemporal para el valor mínimo anual de $PM_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), (Periodo 2019-2021).....	44
<b>Figura 24.</b> Mapa espaciotemporal para el valor máximo anual de $PM_{2.5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 2019-2021 .....	45

<b>Figura 25.</b> <i>Mapa espaciotemporal para el valor medio anual de <math>PM_{2.5}</math> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>), 2019-2021</i>	46
<b>Figura 26.</b> <i>Mapa espaciotemporal para el valor mínimo anual de <math>PM_{2.5}</math> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>), 2019-2021</i>	46
<b>Figura 27.</b> <i>Mapa espaciotemporal del valor máximo mensual de <math>PM_{10}</math> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>), Enero-Diciembre. 2019-2021</i>	48
<b>Figura 28.</b> <i>Mapa espaciotemporal del valor promedio mensual de <math>PM_{10}</math> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>), Enero-Diciembre 2019-2021</i>	49
<b>Figura 29.</b> <i>Mapa espaciotemporal para mínimo mensual de <math>PM_{10}</math> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>), Enero-Diciembre 2019-2021</i>	50
<b>Figura 30.</b> <i>Mapa espaciotemporal para Máximo mensual de <math>PM_{2.5}</math> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>), Enero-Diciembre 2019-2021</i>	52
<b>Figura 31.</b> <i>Mapa espaciotemporal para valor medio mensual de <math>PM_{2.5}</math> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>), Enero-Diciembre 2019-2021</i>	53
<b>Figura 32.</b> <i>Mapa espaciotemporal para mínimo mensual de <math>PM_{2.5}</math> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>), Enero-Diciembre 2019-2021</i>	54

#### LISTA DE FIGURAS

<b>Anexo 1.</b> Estación UPTC valores de $PM_{10}$ , (Periodo 2019-2021)	61
<b>Anexo 2.</b> Estación Hospital valores de $PM_{10}$ , (Periodo 2019-2021)	61
<b>Anexo 3.</b> Estación Sogamoso-Recreo valores de $PM_{10}$ , (Periodo 2019-2021)	62
<b>Anexo 4.</b> Estación Sogamoso-Koica valores de $PM_{10}$ , (Periodo 2019-2021)	62
<b>Anexo 5.</b> Estación Sogamoso-Sena valores de $PM_{10}$ , (Periodo 2019-2021)	62
<b>Anexo 6.</b> Estación Nobsa-Nazareth valores de $PM_{10}$ , (Periodo 2019-2021)	63
<b>Anexo 7.</b> Estación NOBSA-Bomberos valores de $PM_{10}$ , (Periodo 2019-2021)	63
<b>Anexo 8.</b> Estación Sogamoso-Recreo valores de $PM_{2.5}$ , (Periodo 2019-2021)	63
<b>Anexo 9.</b> Estación Sogamoso-Koica valores de $PM_{2.5}$ , (Periodo 2019-2021)	64
<b>Anexo 10.</b> Estación NOBSA-Nazareth valores de $PM_{2.5}$ , (Periodo 2019-2021)	64
<b>Anexo 11.</b> Estación NOBSA-Bomberos valores de $PM_{2.5}$ , (Periodo 2019-2021)	64
<b>Anexo 12.</b> Promedio mensual de valores máximos de $PM_{10}$ Y $PM_{2.5}$ , (Periodo 2019-2021)	65
<b>Anexo 13.</b> Promedio mensual de valores promedios de $PM_{10}$ Y $PM_{2.5}$ , (Periodo 2019-2021)	65
<b>Anexo 14.</b> Promedio mensual de valores mínimos de $PM_{10}$ Y $PM_{2.5}$ , (Periodo 2019-2021) Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 – 2021	66
<b>Anexo 15.</b> Promedio anual de valores máximos $PM_{10}$ Y $PM_{2.5}$ .	66
<b>Anexo 16.</b> Promedio anual de valores promedios $PM_{10}$ Y $PM_{2.5}$ .	67
<b>Anexo 17.</b> Promedio anual de valores mínimos $PM_{10}$ Y $PM_{2.5}$ .	67

## RESUMEN

Este documento presenta la distribución espacial y temporal del material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el parque industrial municipios de Nobsa, Corrales y Sogamoso del Departamento de Boyacá. Con el fin de evaluar las concentraciones del material particulado mediante el uso de datos históricos mensuales de estaciones de monitoreo del área de influencia tomadas del portal SISAIRE instaladas por la corporación autónoma de Boyacá CORPOBOYACA en el periodo comprendido entre 2019-2021. Para el material Particulado  $PM_{10}$ , se tomaron datos de 7 estaciones UPTC, HOSPITAL, SOGAMOSO-KOICA, SOGAMOSO-SENA, SOGAMOSO-RECREO, NOBSA-NAZARETH, NOBSA-BOMBEROS, mientras que para el material particulado  $PM_{2.5}$ , se tomaron 4 estaciones SOGAMOSO-KOICA, SOGAMOSO-RECREO, NOBSA-NAZARETH, NOBSA-BOMBEROS. Para el análisis temporal, los valores de las concentraciones (valores máximos, valores promedios y valores mínimos mensuales organizaron en Microsoft Excel, mientras que para el análisis espacial, con los datos de las concentraciones (mensuales y anuales) y con las coordenadas geográficas de cada una de las estaciones, se procedió a generar un archivo espacial que permitió visualizar en el Software ArcGis versión 10.5, con la herramienta “Análisis Espacial” la cual permite explorar la variabilidad de datos de cada estación y con el modelo determinístico de interpolación espacial: distancia inversa ponderada (IDW), se generaron los mapas de distribución espacial.

Mediante el análisis temporal estadístico del material particulado, se evidencia un comportamiento en las estaciones Sogamoso-Sena, Nobsa-Bomberos, que superan los límites máximos permisibles para el periodo evaluado de 2019 al 2021 e identificando la problemática del deterioro de la calidad del aire. Esto nos afirma que el valor de material particulado es inversamente proporcional a las precipitaciones, dado que en los meses de lluvia los niveles de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  bajan considerablemente. Por otro lado, las concentraciones de material particulado

tienden hacer altas en los meses Enero, Febrero, Julio, Agosto, Diciembre de baja precipitación y temperaturas altas, mientras que en temperaturas bajas y precipitaciones altas marzo, Abril, Mayo, Junio, Septiembre, Octubre Y Noviembre concentraciones de material particulado se hacen más bajas.

Con el análisis espacial se observó mayor concentración de  $PM_{10}$  en el área de las zonas industriales, y de extracción de minerales. Por otra parte, las partículas de  $PM_{2.5}$  debido a que son más ligeras (diámetro  $2.5 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ ) tiende a dispersarse con mayor facilidad de la zona donde se generan, en este caso industrias cementeras y de extracción de minerales (canteras).

### **ABSTRACT**

This research focus on the time-space distribution of particle called  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  in the industrial park located in the municipalities of Nobsa, Corrales and Sogamoso in the Department of Boyacá. In order to evaluate the concentrations of particulate matter through the use of monthly historical data from monitoring stations in the area of influence taken from the SISAIRE portal installed by the autonomous corporation of Boyacá CORPOBOYACA in the period between 2019 - 2021. For particulate material  $PM_{10}$ , data was taken from 7 stations UPTC, HOSPITAL, SOGAMOSO-KOICA, SOGAMOSO-SENA, SOGAMOSO-RECRO, NOBSA-NAZARETH, NOBSA - BOMBEROS, while for particulate material  $PM_{2.5}$ , 4 stations were taken SOGAMOSO - KOICA, SOGAMOSO-RECRO, NOBSA-NAZARETH, NOBSA-FIREFIGHTERS. To begin with the temporal analysis, the concentration values (maximum values, average values and monthly minimum values) were organized in Microsoft Excel, while for the spatial analysis, with the concentration data (monthly and annual) and with their geographic coordinates for each one of the stations, a spatial file generated allowed us the viewing in the ArcGis Software version 10.5,

with the "Spatial Analyst" tool, which allows exploring the variability of data from each station and with the deterministic model of spatial interpolation: distance inverse weighted (IDW) spatial distribution maps were generated.

On the other hand, through the statistical temporal analysis of particulate material, it can be evidenced an unusual behavior at the Sogamoso - Sena, Nobsa - Bomberos stations, since these exceed the maximum permissible limits for the evaluated period from 2019 to 2021 and identifying the environmental concern for air pollution. This tells us that the value of particulate matter is inversely proportional to rainfall, given that in the rainy months the levels of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  drop considerably. On the other hand, the concentrations of particulate matter tend to be higher in the months of January, February, July, August, December with low precipitation and high temperatures, while in low temperatures and high precipitation March, April, May, June, September, October and November concentrations of particle become lower.

Finally, in the spatial analysis, we could observe a higher concentration of  $PM_{10}$  in both, the industrial zones and mineral extraction areas. As well as  $PM_{2.5}$  particles, but because they are lighter (diameter  $2.5 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ ), they tend to disperse more easily from the area where they are generated, in this case cement and mineral extraction industries (quarries).

## INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica se ha constituido como uno de los principales problemas ambientales que afecta la población en el mundo; el deterioro de la calidad del aire ha propiciado que se disminuyan los estándares de salud debido a los efectos negativos ocasionados sobre el ambiente (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo, 2010). La mayor parte de los problemas de calidad del aire son, actualmente el resultado del desarrollo y las actividades industriales, donde la generación de polución y material particulado atribuida a los medios de transporte, actividades de explotación, la deforestación entre otros conlleva a la contaminación atmosférica.

El material particulado es un contaminante complejo de diferentes tamaños, formas y orígenes que se encuentran en la atmosfera (Arciniégas Suárez, 2011). Las partículas con tamaño aerodinámico no mayor a 10 micras se denominan  $PM_{10}$  y las partículas no mayores a 2,5 micras, se denomina  $PM_{2.5}$  las cuales por su pequeño tamaño pueden ser inhaladas fácilmente y penetrar en el cuerpo humano, afectando la salud de la población que se encuentre expuesta a altas concentraciones de material particulado.

Las concentraciones de los contaminantes en la atmósfera por encima de los máximos fijados en las normas ambientales en largos periodos de exposición, generan gran preocupación para las entidades encargadas de la gestión de la calidad de aire. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece normas nacionales de calidad del aire donde la Resolución 2254 del 1 de noviembre de 2017, establece los niveles máximos permisibles de concentración de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  de 50 y 25  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$  para un tiempo de exposición de un año y 75 y 37  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$  para un tiempo de exposición de 24 horas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Una de las principales actividades económicas del departamento de Boyacá es la explotación de minerales como la arcilla, arena, caliza entre otros, las cuales se concentran en la provincia de Sugamuxi entre los municipios de Nobsa y Sogamoso, en sector denominado Parqué Industrial, donde se ubican grandes empresas como Acerías Paz del Río, Holcim, Argos, Sidenal, acopios de carbón, principales fuentes generadoras de material particulado producto del desarrollo minero a cielo abierto, transporte, acopio y beneficio de los minerales explotados.

Las autoridades departamentales y ambientales como la Gobernación de Boyacá y Corpoboyacá, mediante el diagnóstico semestral de la calidad del aire para el primer semestre del año 2021, determinaron que las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  superan el límite máximo permisible para el período de exposición diario de 24 horas en la zona del parque industrial Nobsa-Sogamoso, con valores de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{10}$  y de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{2.5}$ , no cumpliendo con la normatividad ambiental colombiana vigente según la Resolución 2254 de 2017.

Estas altas concentraciones de material particulado podría provocar efectos adversos sobre la salud de las personas, además de la afectación a la fauna y la flora, principalmente en la zona de influencia, puesto que se comparte la zona industrial con la zona residencial; las enfermedades más comunes en el sector son las enfermedades respiratorias según el sistema de vigilancia de salud pública y la secretaria de salud de Boyacá para el año 2014, siendo ,los más afectados los adultos mayores y los niños, por tal razón las instituciones gubernamentales como Corpoboyacá han implementado un sistema de vigilancia de calidad de aire con seis(6) estaciones sobre el parque industrial de la provincia de Sugamuxi, con el objetivo de recopilar información periódica y detalla de la calidad del aire, logrando tener un monitoreo efectivo el cual se ha fortalecido desde el año 2019, obteniendo parámetros de evaluación para ser comparados con los límites máximos permisibles según la resolución 2254 del 2017, y así exigirle a la industria

principalmente que mitigue dicho impacto y disminuya el material particulado que se genera en los diferentes procesos productivos.

Una vez revisada y analizada la problemática ocasionada por el material particulado sobre la salud humana, se realiza un análisis de la variación temporal y espacial de la concentración de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  para la zona industrial de la provincia de Sugamuxi, comprendida en el corredor de los municipios de Nobsa, Corrales y Sogamoso, a partir de datos obtenidos de las estaciones de monitoreo del área tomados del sistema de información SISAIRE sobre calidad del aire del IDEAM, adicional se cuenta con monitoreos semestrales de empresas privadas, realizando un modelamiento que pretende obtener las áreas de influencia directa del material particulado y que población está expuesta mediante la utilización de las herramientas de SIG.

Por lo tanto, este proyecto da a conocer la distribución espacial y temporal del material particulado en el parque industrial de los municipios de Nobsa, Corrales y Sogamoso, mediante la elaboración de mapas, conociendo áreas vulnerables, además de los periodos con mayor y menor concentración de material particulado. La importancia que tiene realizar un análisis espacial y temporal del material particulado, radica en que la contaminación atmosférica que afecta a la zona del Parque Industrial entre los municipios de Nobsa – Sogamoso, provincia de Sugamuxi, desde hace algunas décadas afecta la salud de las personas, de allí, a mediados de año 2000 fue catalogada como la más contaminada del país por encima de complejos industriales de grandes ciudades como Medellín, Cali (Jumbo) y Bogotá, por lo tanto la corporación autónoma de Boyacá y la Gobernación de Boyacá se propusieron tomar medidas para disminuir este impacto y alertar y sensibilizar a los ciudadanos, ya que ellos pueden ser actores invisibles de tan importante afectación.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la distribución espacial y temporal del material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la zona industrial Nobsa, Corrales y Sogamoso, mediante el uso de datos provenientes de estaciones de monitoreo de calidad de aire en el periodo comprendido entre 2019 y 2021.

### 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Reconocer la distribución espacial de las concentraciones de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la zona industrial Nobsa, Corrales y Sogamoso, durante el periodo 2019 al 2021.
- Analizar el comportamiento temporal del material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la zona industrial Nobsa, Corrales y Sogamoso durante el periodo 2019 al 2021.

## 2. MARCO TEÓRICO

### ¿Cuál es la calidad del aire que respira?

La calidad del aire es un requisito esencial para la salud de los seres humanos. No obstante, la contaminación del aire es una de las problemáticas que tiene un fuerte impacto en el bienestar de las personas: la OMS en el año 2012, estimó que este fenómeno provoca cada año 3 millones de muertes prematuras en ciudades y zonas rurales. De esto nacen las políticas y normas de calidad del aire, que buscan proteger la salud pública de los ciudadanos. Nuestro país se rige por la resolución 610 de 2010, la cual fue modificada por la resolución 2254 de 2017, que entró en vigor el 1º de enero de 2018. En ella se establecen los contaminantes criterios y los niveles máximos permisibles a condiciones de referencia. A continuación, se describen los contaminantes criterios que son monitoreados por el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA).

La calidad del aire es un sistema cíclico influenciado por tres factores, las emisiones de contaminantes, el clima y la administración pública. La finalidad o el objetivo de la calidad del aire es lograr que el aire que respiran los ciudadanos sea bueno y limpio, por ello los ciudadanos deben saber cuál es el aire que respiran, y por ende la información acerca de qué tan limpio o contaminado está el aire debe estar disponible para cualquiera que lo solicite (Hernández, s.f.).

Un aire no contaminado es una de las condiciones más importantes en la salud y bienestar del ser humano. Es importante tener en cuenta cómo está compuesto el aire: 78% nitrógeno (N); 20,94% oxígeno (O<sub>2</sub>); 0,93% argón (Ar) y el porcentaje restante, lo componen cantidades

pequeñas de helio (He), neón (Ne), kriptón (Kr), xenón (Xe), hidrógeno (H) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (Strauss y Mainwaring, 2011).

Uno de los principales agentes contaminantes presentes en el aire es el material particulado cuyo diámetro aerodinámico es inferior a 10 micrómetros, el cual se conoce comúnmente como PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, inferior a 2.5 micrómetros (Blanco- Becerra et al., 2015). Su comportamiento varía de forma irregular y temporal en la atmósfera, debido a las actividades humanas, condiciones atmosféricas inestables y fenómenos meteorológicos (OMS, 2018).

Dentro la Resolución 2254 del 2017 se establecieron los contaminantes que serán objeto de evaluación y monitoreo de la calidad del aire por parte de las diferentes autoridades ambientales que forman parte del sistema nacional ambiental, los contaminantes se definen como aquellos para los cuales existen criterios basados en la afectación a al medio ambiente, la salud y el bienestar de la población, como fundamento para establecer niveles máximos permisibles en el aire ambiente (USEPA, 2015).

### **Material particulado el mayor contaminante**

En primera instancia se define lo que es material particulado (PM), es un conjunto de partículas sólidas y líquidas emitidas directamente al aire, tales como el hollín de diésel, polvo de vías, el polvo de la agricultura y las partículas resultantes de procesos productivos (Arciniégas Suárez, 2011). El material particulado además posee una amplia gama de propiedades morfológicas, químicas, físicas y termodinámicas ((EPA, 2004). Respecto al PM<sub>10</sub>, material particulado de diámetro aerodinámico inferior a 10 micrómetros, su comportamiento varía de forma irregular y temporal en la atmósfera, debido a las actividades humanas, condiciones atmosféricas inestables y fenómenos meteorológicos. Las Partículas Suspendidas Totales (PST) contienen al PM<sub>10</sub> y a

la fracción inhalable de diámetro mayor, que no sedimentan en periodos cortos, sino que permanecen suspendidas en el aire debido a su tamaño y densidad.

Teniendo en cuenta las distintas posturas sobre la calidad del aire, los valores y la distribución del material particulado (PM) se continua con el análisis de datos mediante la elaboración de un modelo temporal y espacial.

### **¿Qué es un modelo temporal y espacial?**

El modelado temporal se basa en el análisis de series de tiempo, el cual agrupa un conjunto de variables aleatorias que dependen de un parámetro o de un argumento, en el análisis de estas series la variable es el tiempo; esta serie de datos permite un análisis exploratorio de datos mediante la estadística básica, como valores mínimos, medios, máximos entre otros.

Ahora, El modelado espacial o cartográfico comprende el análisis con sistemas de información geográfica (SIG) de datos espaciales con ayuda de operaciones booleanas, usadas frecuentemente para identificar áreas con características únicas de combinación en mapas con entidades georreferenciadas (por ejemplo, la aptitud de la tierra para la producción de cultivos agrícolas). Las operaciones en el modelo (SIG) se pueden hacer por separado o estrechamente asociadas con un software que los vincule de modo que los datos pasen del modelo a los SIG o viceversa (Ramírez, 2007).

### 3. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

A continuación se observa una recopilación de la bibliografía indagada y consultada en diferentes bibliotecas virtuales, páginas web y en entidades departamentales y nacionales, como el IDEAM, Ministerio de medio ambiente, vivienda y desarrollo mostrando normatividad vigente de la calidad del aire, además de estudios realizados a nivel nacional e internacional, enfocados en las diferentes problemáticas de salud (OMS) y ambiente desarrolladas entorno a la temática principal, a su vez se encuentran perspectivas en cuanto a los análisis de los respectivos contaminantes del material particulado (PM) en la atmosfera y los diferentes alcances e impactos resaltando los centros urbanos (Franco, 2012). A su vez, se indaga la mirada de referentes teóricos que afirman las diferentes problemáticas sobre la calidad de aire que encontramos en el diario vivir (Tabla 1).

**Tabla 1. Estado del conocimiento**

Título	Autores	Tema de investigación	Contribución a la monografía	Marco al que se vincula el artículo
Ley 99 de 1993	(Gobierno Nacional de Colombia , 1993)	La ley informa sobre la creación del ministerio de Medio Ambiente para regular gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables.	Es la ley vigente de Colombia y rige toda la parte ambiental.	Normativo, institucional, antecedentes, teórico, conceptual, metodológico.
How contribute emission of PM10 and meteorology to concentrations of fine particles in the Netherlands.	(Van der Wal & Jansen , 2000)			
Metodología de la investigación	(Fernández Collado, Baptista Lucio , & Hernandez Sampieri , 2014)	Se estudian las definiciones de los alcances en una investigación para determinar si ésta se clasifica como exploratoria, descriptiva, correlacional o explicativa.	El texto me permite comprender cuál es el alcance que le quiero dar a mi trabajo de investigación. Es categorizado como un trabajo de alcance descriptivo y correlacional. Métodos: deductivo y comparativo, y por último contribuye a asignarle a la investigación, un enfoque mixto (cuantitativo- cualitativo).	Metodológico
Effects of meteorological conditions on PM10 concentrations a study in Macau. Environmental Monitoring and assessment, 102, 201-223.	(Meng Monk & Hoi, 2005)			
Distribución espacial y temporal de la concentración de material particular en Santa Marta Colombia.	(García, Agudelo, & Jiménez, 2006)	Se estudian los diferentes escenarios para la contaminación atmosférica en Bogotá, incluyendo sus alcances e impactos.	Nos aportó para la metodología, introducción y marco teórico conceptual.	Teórico conceptual

Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá.	(Gaitán , Cancino, & Behrentz, 2007)	Trata sobre un análisis que se realizó a los registros que posee la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá.	Ayuda a fortalecer la introducción y a mostrar cómo se encuentran las distintas zonas de Bogotá respecto a la carga de contaminantes atmosféricos.	Teórico
Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire – Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire.	(MINISTERIO DE AMBIENTE V. Y., 2008))	Este manual presenta los lineamientos que se deben considerar para llevar a cabo el diseño y la operación de los sistemas de vigilancia de la calidad del aire en Colombia.	Un documento muy importante ya que me aporta las normas, políticas y lineamientos que deben seguir las empresas para que se garantice la vigilancia de la calidad del aire en el país, a la hora de adelantar proyectos e intervenir ecosistemas.	Institucional, normativo, teórico, antecedentes.
Política de prevención y control de la contaminación del aire.	(Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo, 2010).	Esta política regula los contaminantes de la atmósfera que pueden afectar la salud humana y el bienestar de la población, fijando niveles adecuados para proteger la salud de la población y el bienestar humano.	Esta política ayuda a establecer los niveles adecuados permisibles de los contaminantes para que estos, no afecten la salud humana.	Marco institucional, normativo.
Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM10 concentrations in Istanbul metropolitan area. Atmospheric Environment.	(Unal , Toros, Deniz, & Incecik, 2011)	Se estudian los diferentes escenarios para la contaminación atmosférica en Estambul, incluyendo sus alcances e impactos.	Nos aportó para la metodología, introducción y marco teórico conceptual	Teórico- conceptual
Resolución No. 610 del 24 de marzo de 2010 por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006.	(MINISTERIO DE AMBIENTE V. Y., 2010).	Resolución que fija los valores permisibles de contaminación, y las medidas necesarias fijadas por las autoridades para mitigarlas.	Importante para consolidar el marco normativo que defendió los análisis de las encuestas.	Normativo, institucional.
Contaminación atmosférica en centros urbanos. Desafío para lograr su sostenibilidad: Caso de estudio Bogotá.	(Franco, 2012)	Se estudian los diferentes escenarios para la contaminación atmosférica en Bogotá, incluyendo sus alcances e impactos.	Nos aportó ejemplos claros para la metodología, introducción y marco teórico conceptual.	Teórico- conceptual

Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental	(Ministerio de ambiente, 2012)	Centraliza las principales enfermedades que afectan la salud humada y que tienen que ver con el entorno ambiental de los sujetos.	Aporta información sobre al aumento anual de las enfermedades respiratorias en Colombia.	Metodológico teórico- conceptual.
Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia	(Tyler, Acevedo, Bocarejo, & Velásquez, 2013))	Brinda un marco teórico sobre la contaminación del aire, aclarando cuales son los contaminantes, sus orígenes e importancia para la salud y el medio ambiente. También menciona que el transporte es uno de los mayores contribuyentes a esta problemática.	Ayuda a fortalecer el marco normativo con algunos decretos y resoluciones de la calidad del aire en Colombia.	Normativo
Informe del estado de la calidad del aire en Colombia	(IDEAM, 2016)	Muestra cómo el deterioro de la calidad del aire ha sido una de las causas de mortalidad y morbilidad y con esto los efectos adversos a la salud que varían dependiendo del tipo de contaminante. Además, presenta el estado de la calidad del aire en Colombia entre 2011 y 2015 para cada uno de los contaminantes criterio.	Aporta información para el marco normativo, teórico y para la elaboración de la introducción. La información consultada tuvo por objeto respaldar la teoría que se presentó: "el nivel de contaminación es moderado, pero no quiere decir que esté bien".	Conceptual, institucional, normativo y teórico.
Climatic variability and morbidity and mortality associated with particulate matter	(Rodrigues, Pinheiro, Junger, Ignotti, & Hacon, 2017)	Un modelo el cual incluye la parte temporal, temperatura y humedad y el PM2.5, se realizó un cálculo del aumento porcentual del riesgo relativo a muertes y hospitalizaciones por el aumento lineal de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2.5, concluyendo que el PM2.5 se asocia con morbilidad y mortalidad por causas de origen cardiovascular, las enfermedades y sus efectos pueden verse potenciados por el calor y la baja humedad durante la estación seca.	Este estudio me aportó en la discusión sobre el riesgo de las enfermedades y muertes por el PM2.5, especialmente en la discusión del objetivo 3 (categorías de riesgo).	Antecedentes, teórico- conceptual.
Política para el mejoramiento de la calidad del aire.	(CONPES, 2018)	El documento CONPES 3943 informa sobre todas las medidas que tomaron las autoridades y que deben tomar para mejora la calidad de aire.	Esta información es valiosa para incluir en la discusión de los resultados de la encuesta y sobre el objetivo de la categorización del riesgo.	Normativo, teórico, institucional

Calidad del aire y salud	(OMS, 2018)	Informar sobre los riesgos que representa la contaminación del aire para la salud, dando también ejemplos de políticas fructíferas para disminuirla.	Contribuye a la monografía datos muy importantes de los riesgos de salud para la población urbana por los diferentes contaminantes y un plan para su mejoría.	Conceptual y normativo
Air quality in Europe - 2019	(European Environment Agency, 2019)	Este informe presenta una descripción y análisis actualizados de la calidad del aire en Europa del año 2000 al 2017. Se revisan las directrices establecidas por las dos Directivas de calidad del aire de la Unión Europea (UE) y en dirección hacia las directrices de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Una frase importante encontrada en el informe: "La contaminación del aire que respiramos no es solo un problema medioambiental, sino también económico y social".	Me ayudó a contrastar como Europa maneja la contaminación del aire con respecto al manejo que le damos en el país. Además, de brindarme la información necesaria en materia de leyes, políticas y directrices internacionales referente al aspecto de la protección ambiental.	Normativo
Resolución No. 2254 de 01 de noviembre de 2017 por la cual se adopta la norma de calidad de aire ambiente y se dictan otras disposiciones.	(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017))	La Resolución informa sobre la norma completa de 2017 que regula la calidad de aire y es la parte fundamental para las autoridades y la población para prever el riesgo sobre la salud.	Esta última norma vigente de Colombia sobre la calidad de aire es base para la discusión de los resultados.	Normativo, institucional, antecedentes, teórico, conceptual, metodológico
Concentración promedio anual de material particulado menor a 10 micras en el aire (PM10)	(IDEAM, 2010)	El Observatorio informa sobre la concentración media mensual del PM10, en las localidades de Bogotá.	Esta información de las concentraciones del PM10, hace parte de los resultados del estudio de estas tres localidades.	Normativo, institucional, antecedentes, teórico,

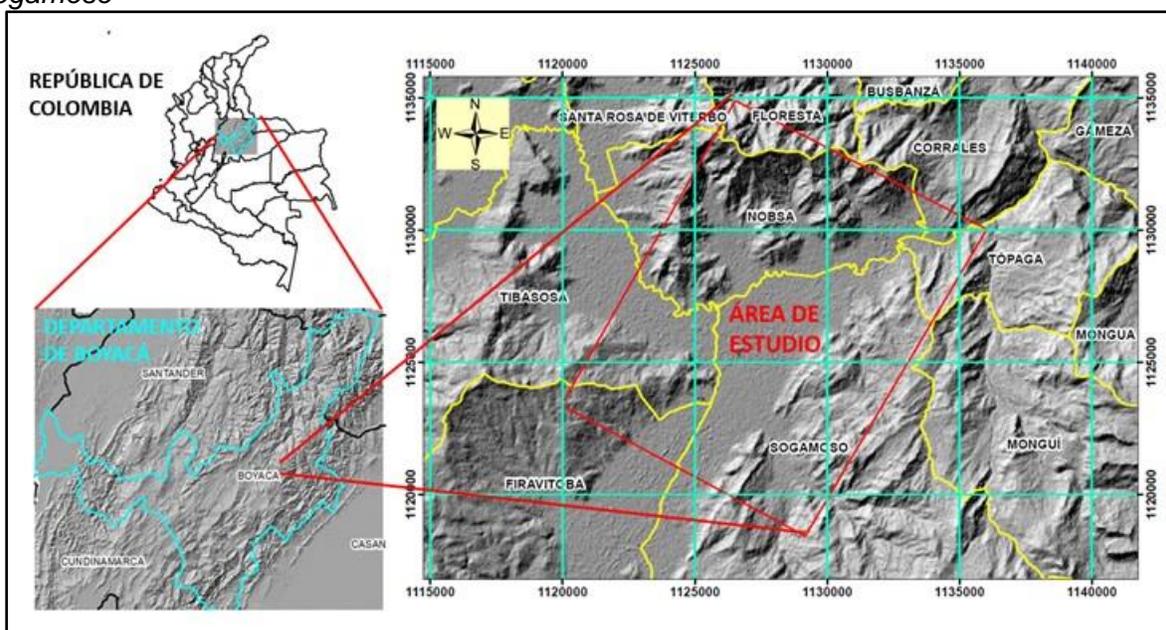
<p>Ambient air pollution and depression: A systematic review with meta-analysis up to 2019</p>	<p>(Fan, y otros, 2019)</p>	<p>Este artículo de revisión informa que la contaminación del aire se ha convertido en un importante problema ambiental mundial. Según el reciente informe Global Burden of Diseases, la contaminación del aire ha sido responsable de 4,90 millones de muertes. Más recientemente, los efectos peligrosos de la contaminación del aire sobre la salud mental, como la depresión, han generado interés de investigar.</p>	<p>La información sobre el efecto de la contaminación atmosférica es importante para alertar en el trabajo de grado sobre el peligro de esta y también como la depresión de los afectados está aumentando en la población.</p>	<p>Teórico conceptual.</p>
--	-----------------------------	---	--	----------------------------

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 LOCALIZACIÓN Y GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó, en los municipios de Nobsa, Corrales y Sogamoso en el Departamento de Boyacá, en la zona industrial conformada por las principales industrias cementeras y siderúrgicas del país, allí se encuentran empresas reconocidas como Acerías Paz del Río, Sidenal, Cementos Argos y Holcim, las cuales generan importantes aportes a la economía regional, pero a la vez una serie de impactos negativos como lo es el aporte de material particulado (PM) a la atmósfera.

**Figura 1.** Localización del área de estudio- zona industrial municipios de Nobsa, Corrales y Sogamoso



*Nota. Adaptado por los autores 2021. Fuente: cartografía IGAC.*

El área de estudio se ubica topográficamente en el departamento de Boyacá, en los municipios de Nobsa, Corrales y Sogamoso; cartográficamente se localiza dentro de las planchas topográfica No. 172-III-A Y 172-III-C del Instituto Agustín Codazzi (IGAC) a escala 1:25000.

El departamento de Boyacá está situado en el centro del país, en la cordillera oriental, cuenta con una superficie de 23189 Km<sup>2</sup>, su relieve es principalmente montañoso con cimas alargadas

y estrechas entre valles alargados conocidos con la altiplanicie boyacense es allí donde se ubican las principales ciudades del departamento con Tunja, Duitama, Paipa y Sogamoso. Su clima es principalmente frío debido a la altura predominante sobre el nivel de mar que oscila entre los 2000 y 4000 msnm, la economía está basada en la agricultura y minería principalmente y en menor proporción la ganadería y el turismo. (Planeación Gobernación de Boyacá, 2021)

Ahora, en cuanto a los elementos climáticos a analizar en el presente estudio son los siguientes: precipitación, brillo solar, vientos, temperatura y humedad relativa; información que fue suministrada por el IDEAM. El área del proyecto se encuentra ubicada a una altura que va de los 2500 a los 2950 m.s.n.m correspondiente al piso térmico frío a muy frío, con temperatura promedio entre 13° y 20°C. La estación meteorológica representativa para el área de estudio corresponde a las Estación BELENCITO con código de estación No. 24035150, estación SENA con código No 24030940, las cuales registran valores de precipitación y temperatura.

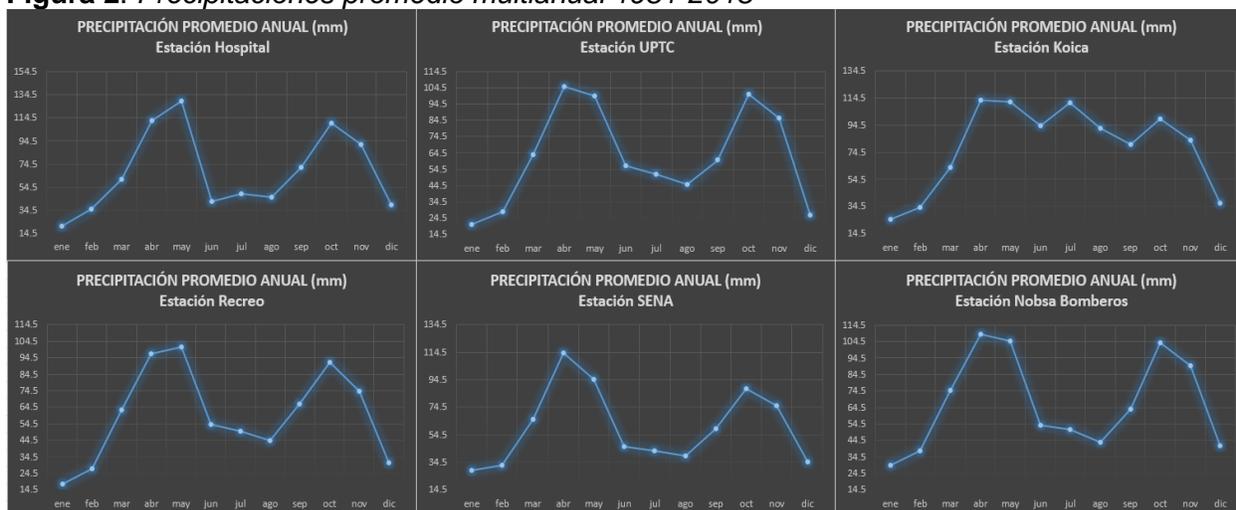
De acuerdo con la clasificación ecológica colombiana, el sector pertenece a la vida de Bosque Seco Montano Bajo. En general, la región muestra precipitaciones medidas anuales del orden de los 670 a 1000 mm, caracterizada por la presencia de dos periodos lluviosos, el primero se extiende de marzo a mayo y el segundo comprende de los meses de septiembre a noviembre, las otras dos fases del año son secas.

Respecto a el clima, es importante desde el punto de vista físico-biótico por su directa intervención en la evolución de los suelos y el paisaje. Además, por ser uno de los elementos o insumos necesarios para la determinación de las amenazas naturales y desde el punto de vista socioeconómico por su influencia en la decisión de utilización de las tierras para determinados usos.

Con lo anterior, las lluvias predominantes en toda la región son de tipo orográfico. Este tipo de lluvia es característica de las zonas tropicales y presenta grandes precipitaciones de corta duración. La distribución temporal de la precipitación en la región es de tipo bimodal, con un descenso considerable o tiempo seco en los meses de diciembre a febrero, teniendo al mes de enero como el más seco con valores que no superan los 30 mm, y moderada de junio a agosto. La primera temporada lluviosa comienza en marzo y se extiende hasta mayo, siendo más prolongada y homogénea con valores que oscilan entre 60 y 120 mm, y la segunda empieza en septiembre y se extiende hasta noviembre con registros que varían entre los 60 y 100 mm (Figura 2).

Según información de las estaciones se presenta una variación desde los 670 mm para los años menos lluviosos hasta los 1000 mm para los años de mayor precipitación.

**Figura 2.** *Precipitaciones promedio multianual 1981-2018*

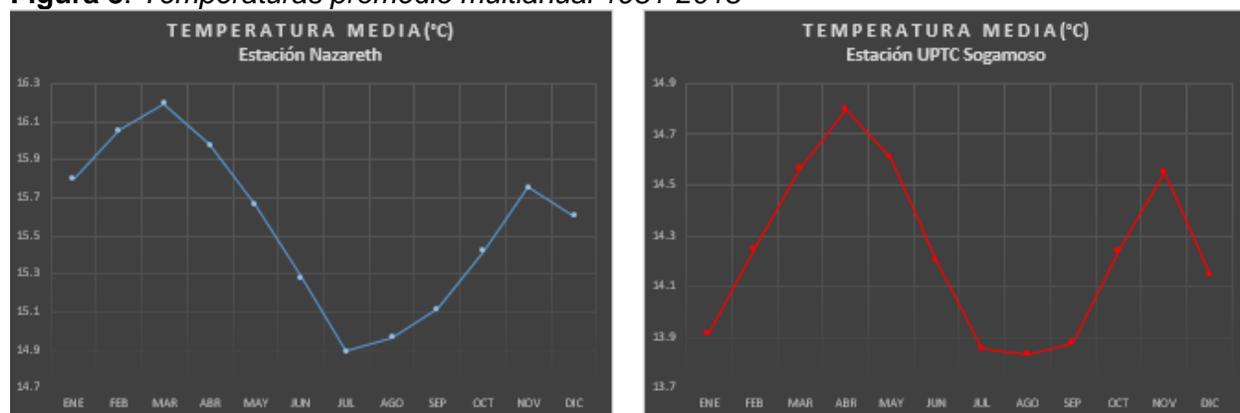


*Nota. Adaptado por los autores 2018. Fuente: Datos IDEAM*

La temperatura media del aire presenta muy poca variación según las estaciones en mención las cuales registran valores que fluctúan entre 13,7°C y 14,8°C; los meses de junio y agosto presenta los valores más bajos, abril y noviembre los más altos. Las temperaturas máximas presentan poca variación durante el año y por lo general se mantienen entre 22,4°C y 24,9°C; los valores

de temperaturas mínimas varían muy poco durante el año. Sin embargo, los registros indican variaciones que oscilan por lo general entre 3,2°C y 6,4°C, en los meses de diciembre y enero, se presentan las denominadas heladas (Figura 3).

**Figura 3.** Temperaturas promedio multianual 1981-2018



R

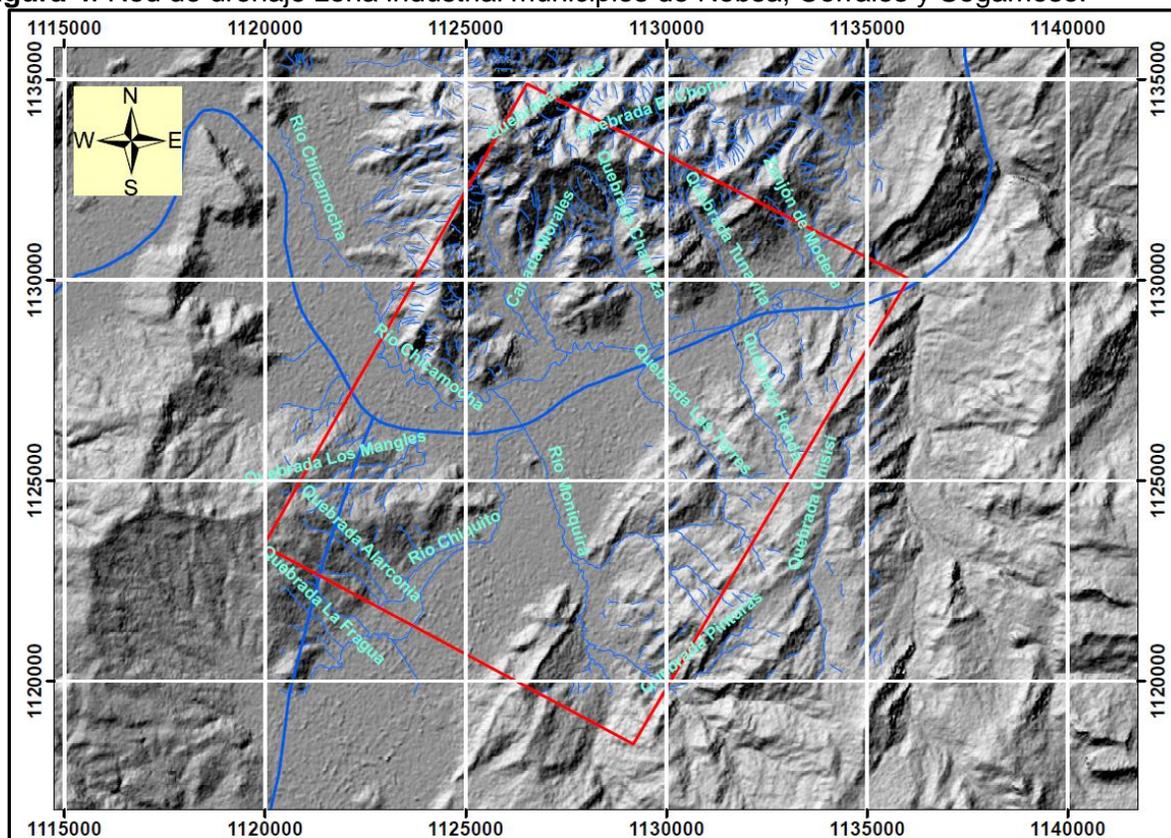
*Nota. Adaptado por los autores 2018. Fuente: Datos IDEAM*

A partir del análisis realizado sobre las dos estaciones más cercanas al proyecto, la humedad relativa se mantiene por encima de 69% llegando hasta el 76%, el número de horas de brillo solar se halla influenciado en la zona en gran medida por la precipitación en los diferentes meses del año. El registro heliográfico muestra que el periodo seco es la mayor insolación al igual que el periodo de transición de diciembre-enero el cual arroja un valor que supera las 200 horas mensuales.

En cuanto a la velocidad de los vientos, la dirección predominante en la zona de influencia del proyecto es hacia el este a partir del mes de mayo hasta septiembre y diciembre, y hacia el sur durante los meses de octubre y noviembre. En enero y febrero se tornan hacia el sureste. Las corrientes presentan velocidades que se mantienen entre los 0,5 a 1 m/seg durante gran parte del año. Hacia los meses de agosto y octubre se presentan velocidades cernas a los 2.3 m/seg.

Por último, la hidrografía del área de estudio se ubica en la cuenca media del Río Chicamocha, con afluentes que desembocan sus aguas al río Chicamocha entre ellos, la quebrada Honda, Ombachita, Monquirá, Grande, El cedro, Tunavita, Modeca entre otras. El río que posteriormente vierte sus aguas al río Sogamoso y luego al Río Magdalena atravesando departamentos de Boyacá y Santander (Figura 4).

**Figura 4.** Red de drenaje zona industrial municipios de Nobsa, Corrales y Sogamoso.



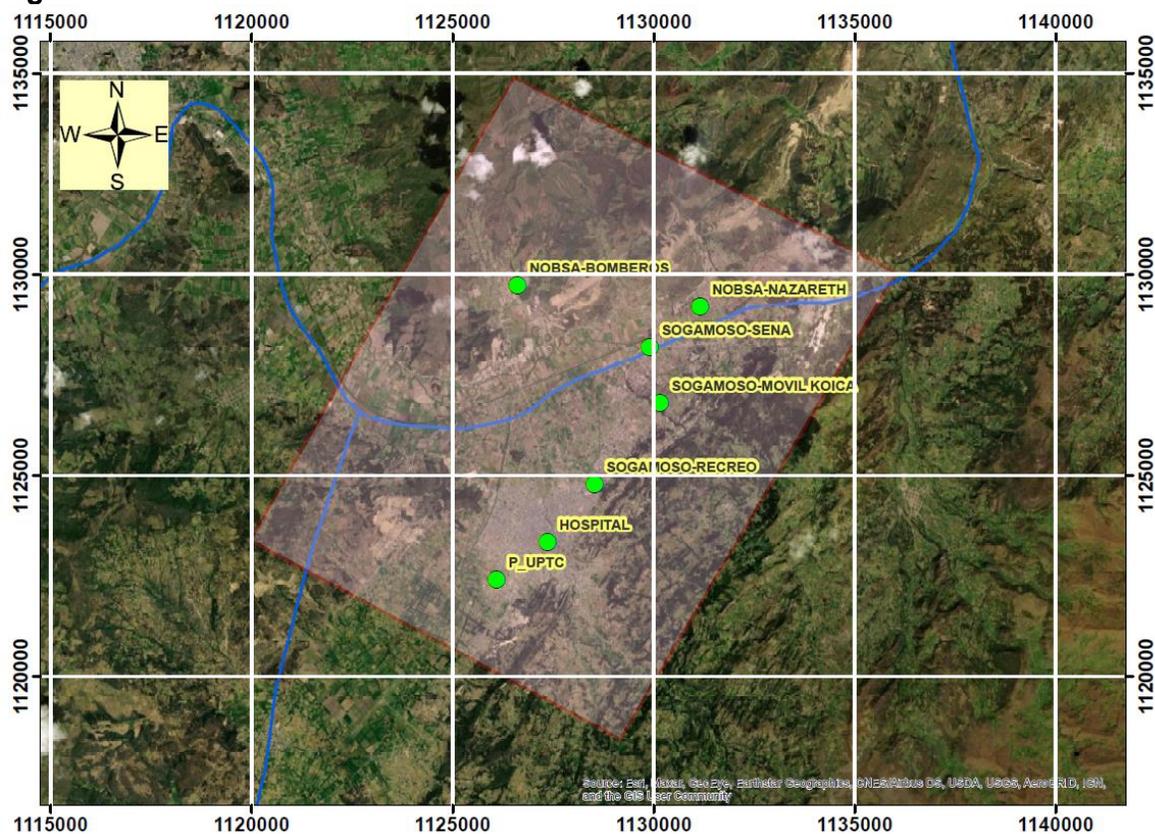
*Nota. Adaptado por los autores 2021. Fuente: cartografía IGAC.*

## 4.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizaron series de datos mensuales durante un periodo de 3 años (2019-2021) disponibles de las estaciones de monitoreo del sistema especial de vigilancia de calidad del aire dispuestas en el área de influencia de la zona industrial y minera entre los municipios de Nobsa, Corrales y Sogamoso del Departamento de Boyacá, (Figura 5, Tabla 2).

Para el material particulado de 10 micras ( $PM_{10}$ ) y material particulado de 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ ), se tomaron datos de 7 estaciones denominadas así: estación Hospital, UPTC, Sogamoso-Koica, Sogamoso-Recreo, Sogamoso-Sena, Nobsa Bomberos, Nobsa –Nazareth.

**Figura 5.** Localización estaciones zona de estudio



*Nota: Imagen de fondo Esri, Maxar, Geoeye, earthstar Geographies. Fuente: elaboración Propia.*

**Tabla 2.** Características de las estaciones del sistema especial de vigilancia de la calidad del aire de la zona industrial Nobsa, Corrales y Sogamoso.

Nombre Estación	Categoría	Departamento	Municipio	Escala	Latitud	Longitud	Tipo/ Clase Estación	Altitud (msnm)	Altura de ref. (m)	Comentario de instalación	Fecha de instalación	¿Es Automática? Estado	SVCA
HOSPITAL	CAI	BOYACÁ	SOGAMOSO	LOCAL	5.713364	-72.93136	FIJA AMBIENTAL	2531	0	FUE INSTALADO EN EL CUARTO TRIMESTRE DEL 2010.	25/08/2011	No / Activa	SISAIRE - CORPOBOYACA
P_UPTC	CAI	BOYACÁ	SOGAMOSO	LOCAL	5.704833	-72.94278	FIJA AMBIENTAL	2523	0	UBICADA EN LA UPTC EN UNA AZOTEA DEL SEGUNDO PISO	16/09/2019	Si / Activa	SISAIRE - CORPOBOYACA
SOGAMOSO-MOVIL KOICA	CAI	BOYACÁ	SOGAMOSO	LOCAL	5.744536	-72.90609	FIJA AMBIENTAL	2510	0	ESTACION DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE MOVIL UBICADA EN EL COLEGIO JUAN JOSE RONDON DE SOGAMOSO BOYACA	1/12/2016	Si / Activa	SISAIRE - CORPOBOYACA
SOGAMOSO-RECREO	CAI	BOYACÁ	SOGAMOSO	LOCAL	5.726325	-72.92091	FIJA AMBIENTAL	2476	0	ESTACION UBICADA EN EL PARQUE RECREACIONAL DEL NORTE DE SOGAMOSO	1/12/2016	Si / Activa	SISAIRE - CORPOBOYACA
SOGAMOSO-SENA	CAI	BOYACÁ	SOGAMOSO	REGIONAL	5.756944	-72.90833	FIJA AMBIENTAL	2476	0	UBICADO EN LAS INSTALACIONES DEL SENA, MUNICIPIO DE SOGAMOSO	14/02/2017	Si / Activa	SISAIRE - CORPOBOYACA
NOBSA-BOMBEROS	CAI	BOYACÁ	NOBSA	REGIONAL	5.770917	-72.93796	FIJA AMBIENTAL	2499	0	ESTACION INSTALADA EN FEBRERO DE 2015	2/03/2017	Si / Activa	SISAIRE - CORPOBOYACA
NOBSA-NAZARETH	CAI	BOYACÁ	NOBSA	LOCAL	5.766163	-72.89686	FIJA AMBIENTAL	2479	0	ESTACION DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE UBICADA EN EL COLEGIO TECNICO DE NAZARETH	1/12/2016	Si / Activa	SISAIRE - CORPOBOYACA

*Nota: Adaptado por los autores de Sisaire IDEAM 2021. Fuente: Sisaire, Ideam.*

Se utilizó como fuente la base de datos de las concentraciones históricas mensuales de PM10 y PM2.5 de los últimos tres años (2019,2020,2021), tomados del subsistema de información sobre calidad del aire. Se utilizaron las estaciones de influencia a la zona industrial y minera de los municipios de Nobsa, Corrales y Sogamoso.

### **4.3 PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN**

Después de obtener los datos de material particulado (PM) mensuales (valores máximos, mínimos y promedios) proporcionados por las estaciones de monitoreo y descargados del portal SISAIRE, mediante la herramienta de Microsoft Excel se organizaron y analizaron los datos, de tal manera que queden filtrados para su posterior carga en el programa ArcGIS, donde quedarán georreferenciados según la coordenada de cada estación.

Según los dos tipos de análisis que se realizarán en el presente estudio se organizarán los datos de la siguiente manera:

- **Análisis temporal**

Por medio de Microsoft Excel se organizaron los valores mínimos, valores máximos y promedio aritmético mensuales de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, para los años 2019 - 2021 de las respectivas estaciones.

Para el componente climatológico, como lo es precipitación y temperatura se organizaron datos de dos estaciones que contienen datos para los años 2019 - 2021, corresponden a la estación UPTC y Nobsa-Nazareth, las demás estaciones se encuentran suspendidas.

- **Análisis espacial**

Son los mismos valores analizados y evaluados del análisis temporal valores de máximos, mínimos y promedio aritmético de las concentraciones de material particulado, pero obteniendo los promedios mes a mes y anuales. Posteriormente se realiza la carga de datos con sus respectivas coordenadas de cada estación utilizando como sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, generando un shape file de puntos.

Teniendo la información montada en ArcGis se procede a utilizar un método determinístico de interpolación, para lo cual se utiliza el método de ponderación conocido como IDW (ponderación inversa a la distancia), este método que calcula el valor de cada celda como la media ponderada de los valores del entorno en función del inverso de la distancia, es decir asume que los puntos más cercanos tendrán más influencia. El método asigna pesos a los datos a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa de la celda que se estima, esto quiere decir que cuanto más cerca está un punto del centro de la celda, más influencia o peso tiene en el valor que adquiere. (GEASIG, 2019)

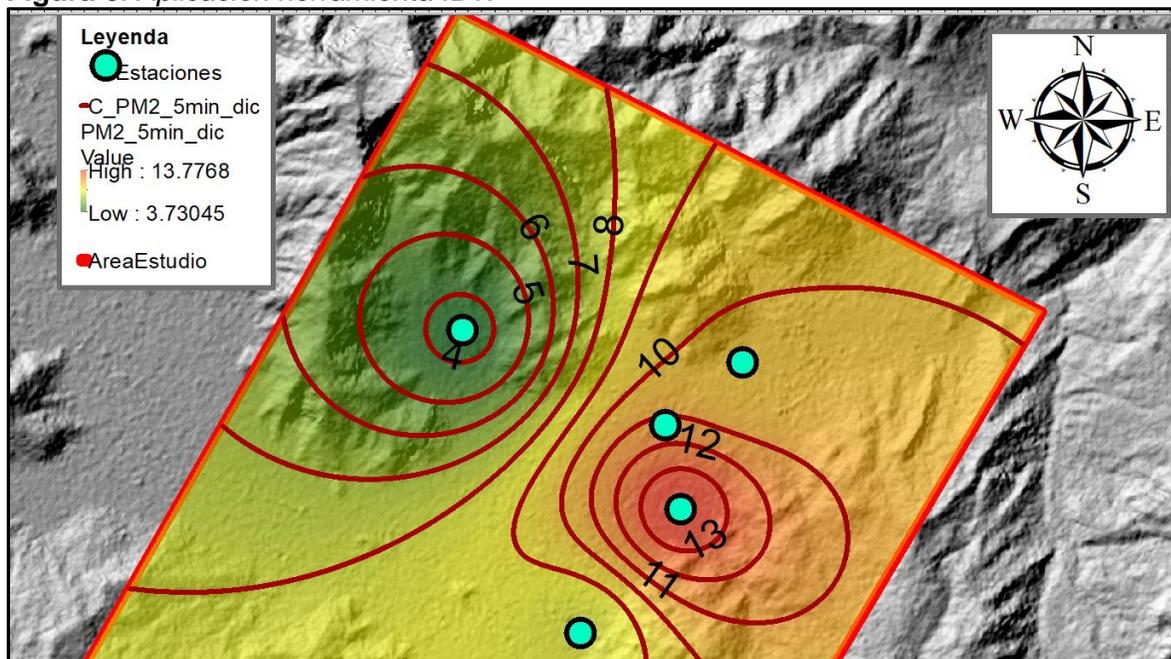
Para determinar el grado de influencia que tendrán los puntos en función de la distancia podemos configurar dos parámetros:

Potencia: Para otorgar mayor importancia a los puntos más cercanos, asignaremos valores de potencia altos y obtendremos como resultado una superficie más detallada; por el contrario, al asignar valores de potencia más bajos indicamos mayor influencia de los puntos más alejados dando como resultado una superficie más suavizada (por lo general se suele utilizar un valor de potencia de 2).

Radio de búsqueda: mediante este parámetro es posible limitar los puntos que consideraremos para calcular el valor de cada celda de salida. Este parámetro puede resultar de gran ayuda puesto que en muchas ocasiones los puntos más alejados de la celda que se está calculando tendrán escasa influencia en su valor por lo que sería innecesario incluirlos en el cálculo. ArcGIS presenta dos opciones diferentes para establecer el radio de búsqueda y en función del que elijamos tendremos que indicar la cantidad de puntos a considerar (un número concreto o un mínimo) y/o una distancia (específica o máxima). (GEASIG, 2019)

Teniendo en cuenta lo anterior, el resultado de la aplicación del IDW se generan los mapas de distribución espacial de material particulado tanto de datos de promedios mensuales como promedios anuales, posteriormente se realiza un recorte al área de estudio mediante la herramienta Extract to mask y se generan líneas de contornos las cuales nos indican el dato ponderado que tendrá cada isolinea. (Figura 6).

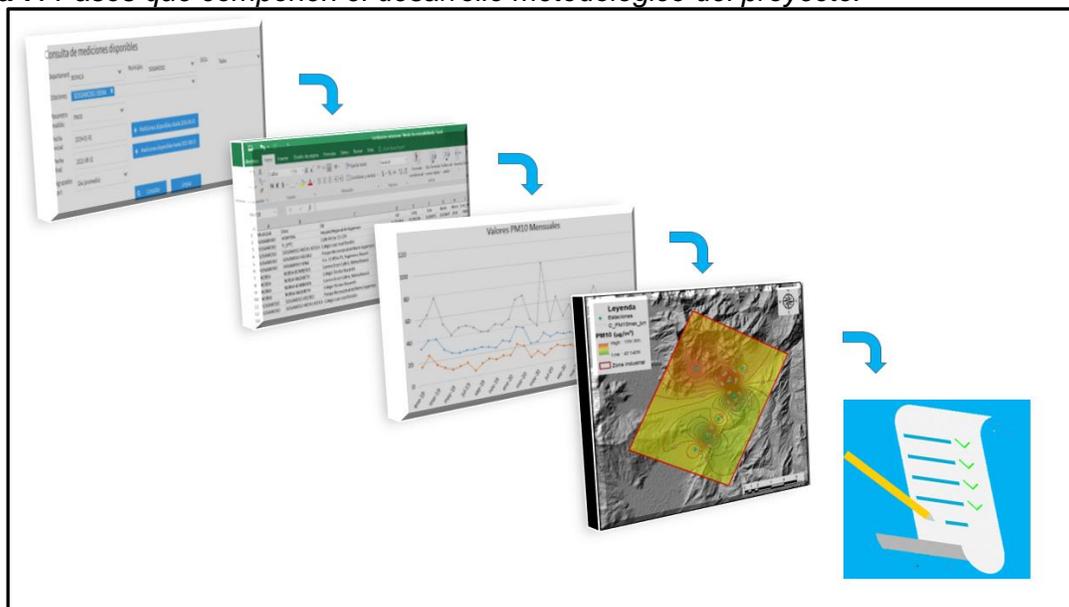
**Figura 6.** Aplicación herramienta IDW



Fuente: Elaborado por los autores con los datos de estudio.

Por último, se observa la secuencia correspondiente al desarrollo metodológico de la investigación. (Figura 7).

**Figura 7.** Pasos que componen el desarrollo metodológico del proyecto.



Fuente: Elaborado por los autores con los datos de estudio.

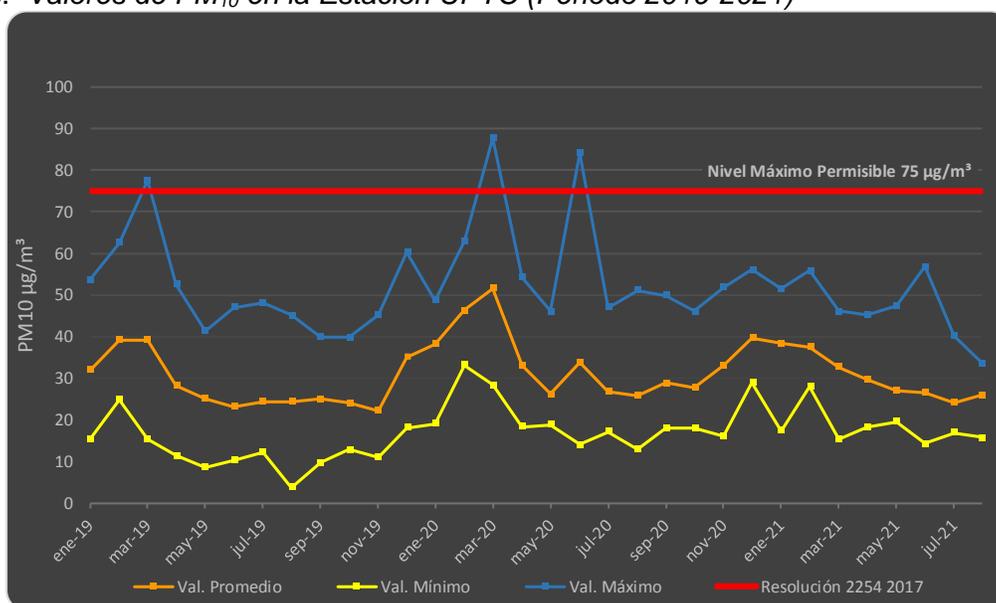
## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 RESULTADOS

#### 5.1.1 Análisis Temporal

En la estación UPTC de  $PM_{10}$ ; se observó que los valores máximos, promedio aritmético y mínimo, presentaron concentraciones de  $87.7826 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $51.6393 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $28.4091 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el mes de enero de 2020 (Figura 8).

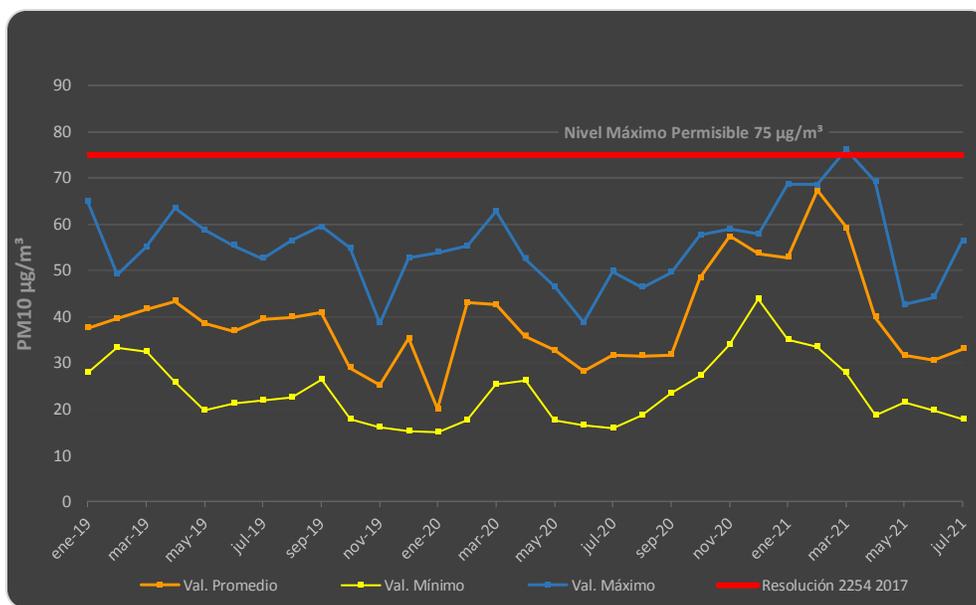
**Figura 8.** Valores de  $PM_{10}$  en la Estación UPTC (Periodo 2019-2021)



Fuente: Elaboración Propia.

Para la estación HOSPITAL de  $PM_{10}$ , el valor máximo o la concentración más alta se presentó en marzo de 2021 ( $76.21456 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), para el promedio aritmético el valor fue  $67,2376 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y para el valor mínimo ( $43.6957 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) registrando sus máximas concentraciones para febrero de 2021 y diciembre de 2020 respectivamente. Igualmente se presentaron concentraciones bajas de los valores máximo, promedio y mínimo de los cuales son  $38.5417$ ,  $19.9648$  y  $14.9167 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de los meses de noviembre de 2019, enero de 2020, respectivamente (Figura 9).

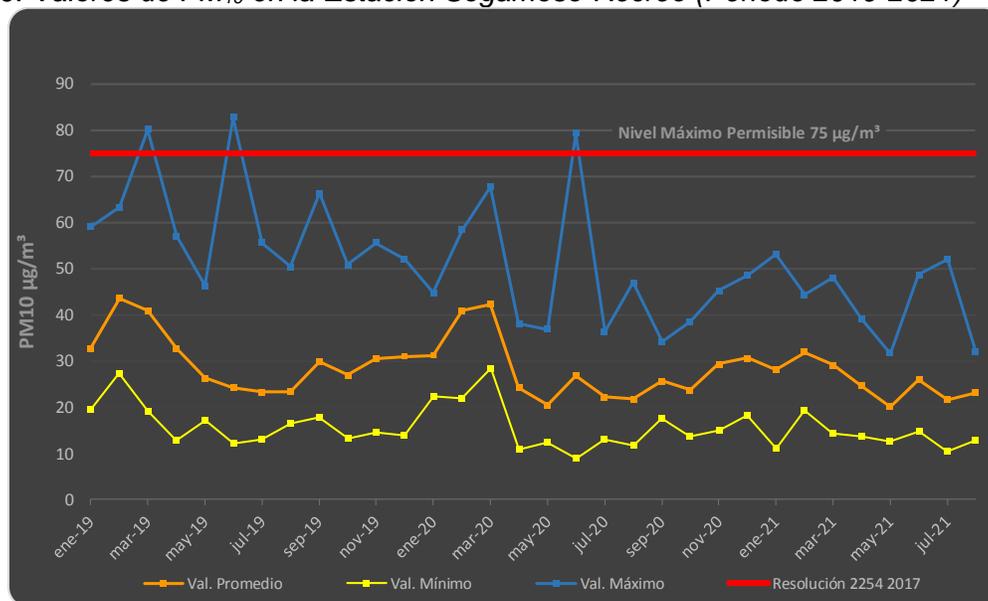
**Figura 9.** Valores de  $PM_{10}$  en la Estación Hospital (Periodo 2019-2021)



Fuente: Elaboración Propia.

En la estación **Sogamoso-Recreo de PM<sub>10</sub>**, las máximas concentraciones de los valores máximo, promedio y mínimo fueron 82.7214, 24.2068 y 12.0658 µg/m<sup>3</sup> en el mes de agosto de 2021 y las mínimas concentraciones para dichos valores: 31.5933, 20.0587 y 8.9365 µg/m<sup>3</sup> de los meses enero de 2020 y junio de 2021 (Figura 10).

**Figura 10.** Valores de PM<sub>10</sub> en la Estación Sogamoso-Recreo (Periodo 2019-2021)

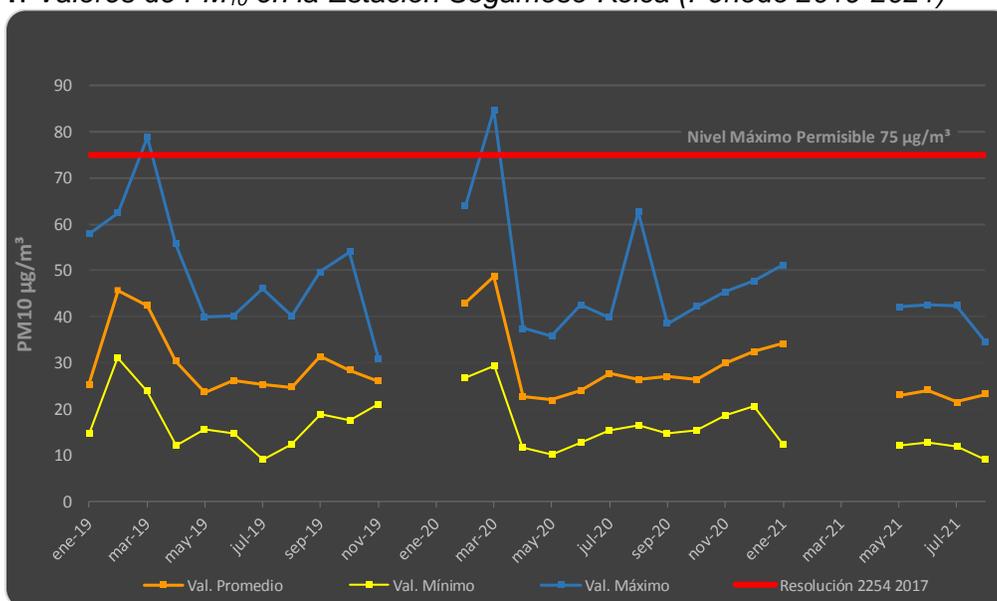


Fuente: Elaboración Propia.

Un análisis general es que las mayores concentraciones de PM<sub>10</sub>, se presentaron en los meses de enero, marzo y julio, las menores en julio y noviembre. (Figura 11, 12, 13 y 14).

Siguiendo con el análisis, para **la estación Sogamoso-Koica de PM<sub>10</sub>**, las concentraciones máximas de PM<sub>10</sub> de valores máximo, promedio y mínimo arrojaron los siguientes resultados: 84.6958  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 48.7199  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 31.1295  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para marzo de 2020, febrero de 2019. Y las concentraciones mínimas son 30.8429, 21.5206 y 8.965  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de noviembre 2019, julio de 2021 y julio de 2019 en su orden. Se observa también q para los meses de diciembre de 2019, enero de 2020 y los meses de febrero, marzo y abril de 2021 no se presentan datos (Figura 11).

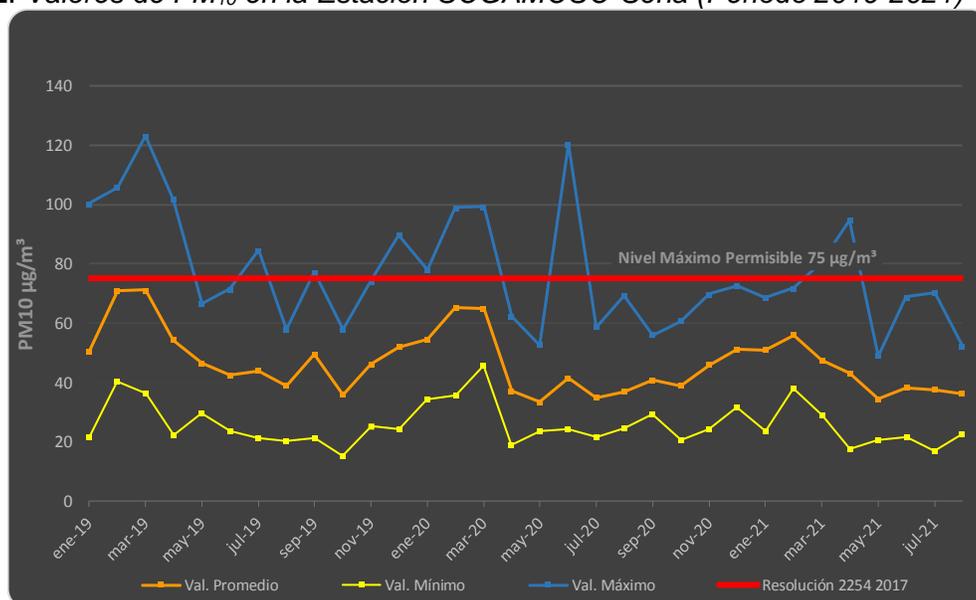
**Figura 11.** Valores de PM<sub>10</sub> en la Estación Sogamoso-Koica (Periodo 2019-2021)



Fuente: Elaboración Propia.

En cuanto a **la estación Sogamoso-Sena de PM<sub>10</sub>** las concentraciones máximas de PM<sub>10</sub> en los valores de máxima, promedio y mínimo los resultados fueron los siguientes: 123.1138, 65.0532 y 45.6783  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para marzo de 2019. Las concentraciones mínimas para dichos valores están en mayo de 2021 (49.0029  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en mayo de 2020 (33.3737  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y octubre de 2019 (15.2447  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (Figura 12).

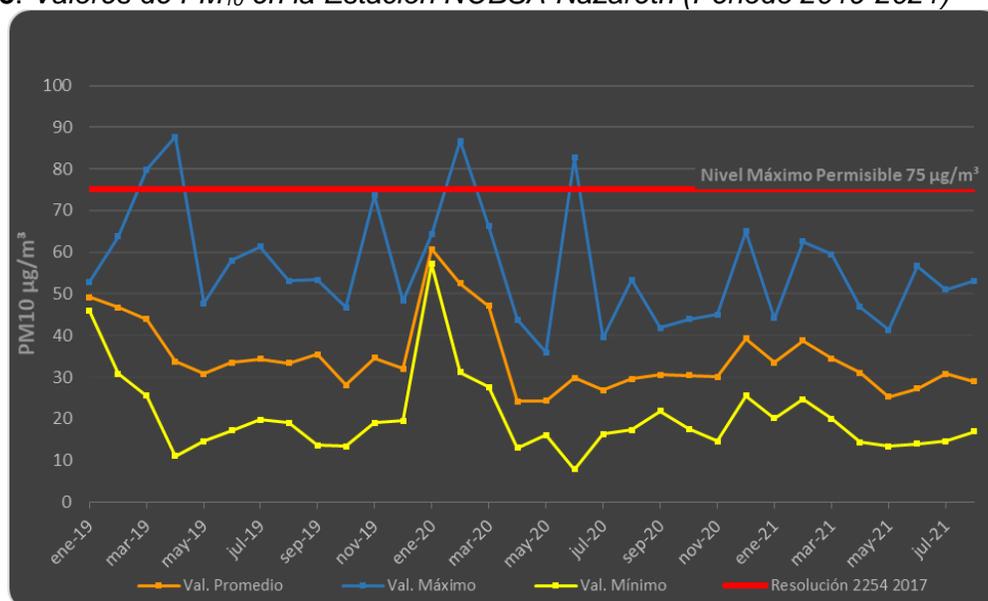
**Figura 12.** Valores de  $PM_{10}$  en la Estación SOGAMOSO-Sena (Periodo 2019-2021)



Fuente: Elaboración Propia.

En la **estación Nobsa-Nazareth de  $PM_{10}$** , los valores más altos de concentraciones de  $PM_{10}$ , para valores máximos 87.722, 60.70899 y 57.1606 (abril de 2019 y enero de 2020), y los valores más bajos (35.8952, 24.1762 y 7.8417 (mayo de 2020, abril de 2020 y junio de 2020) (Figura 13).

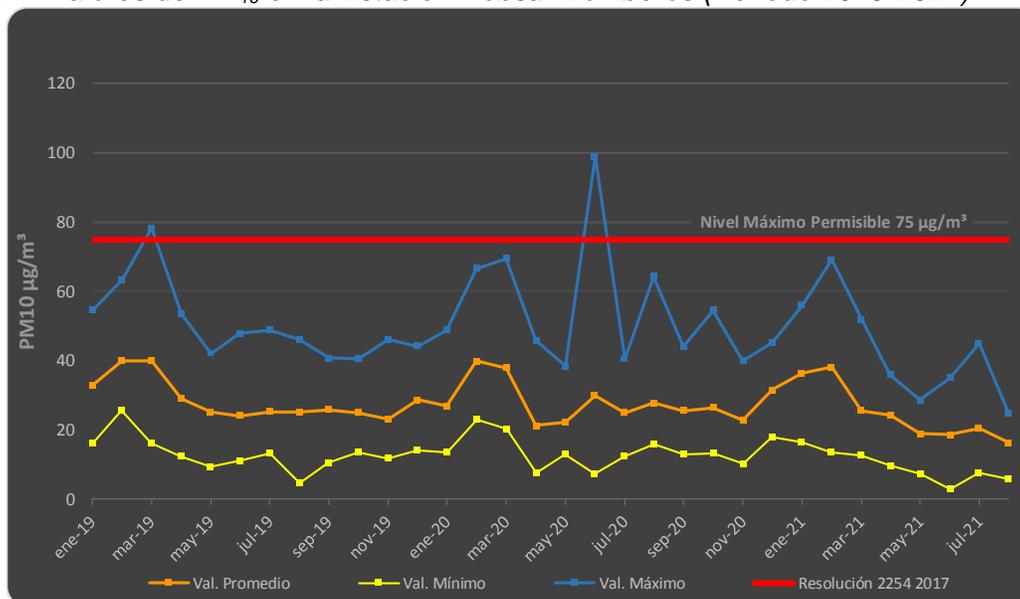
**Figura 13.** Valores de  $PM_{10}$  en la Estación NOBSA-Nazareth (Periodo 2019-2021)



Fuente: Elaboración Propia.

Por último, para la **estación Nobsa-Bomberos de PM<sub>10</sub>**, los valores más altos de la concentración de PM<sub>10</sub> en sus valores máximo, promedio y mínimo fueron 98.8032, 39.99196 y 25.6533, junio de 2020, febrero de 2019, los valores más bajos de dichos valores son en mayo de 2021, agosto de 2021 ordenadamente (Figura 14).

**Figura 14.** Valores de PM<sub>10</sub> en la Estación Nobsa -Bomberos (Periodo 2019-2021)

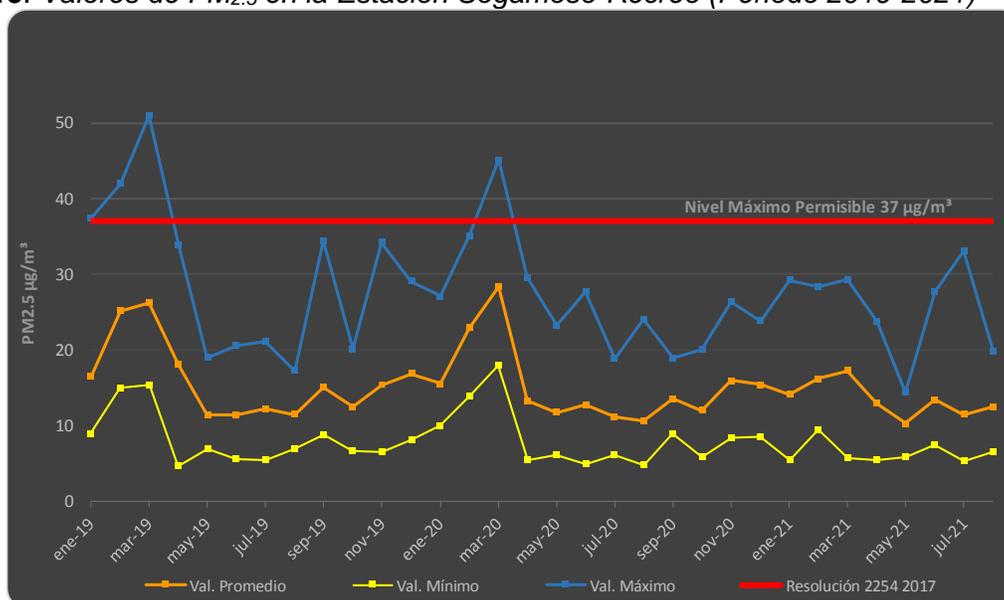


Fuente: *Elaboración Propia.*

Posteriormente, Un análisis general sobre las concentraciones de mayor valor de PM<sub>2.5</sub> se concentran durante los meses de febrero, marzo y junio primeros de cada año y las concentraciones de menor valor se concentran en agosto, octubre y noviembre. (Figura 15, 16, 17 y 18).

En el caso de la **Estación Sogamoso-Recreo de PM<sub>2.5</sub>** las concentraciones más altas de los valores máximo, promedio y mínimo se expresaron en su orden: marzo de 2019 (51.04 µg/m³), marzo de 2020 (28,37254 µg/m³) y en marzo de 2020 (18,0074 µg/m³), las concentraciones bajas de dichas variables están en mayo de 2021 (14.4225 µg/m³), en mayo de 2021 (10.3192 µg/m³) y abril de 2019 (4.6729 µg/m³) (Figura 15).

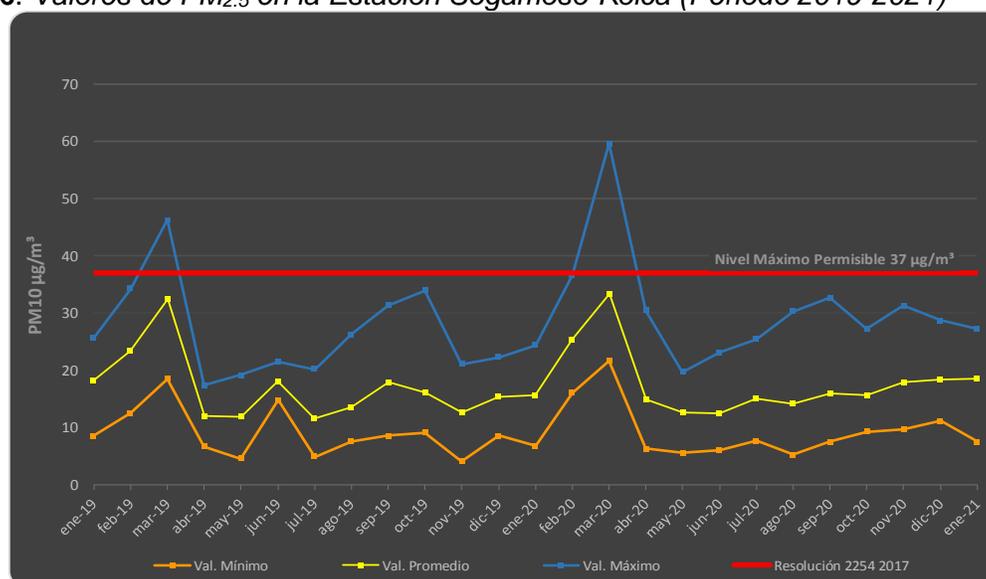
**Figura 15.** Valores de  $PM_{2.5}$  en la Estación Sogamoso-Recreo (Periodo 2019-2021)



Fuente: Elaboración Propia.

Para la **Estación Sogamoso-Koica de  $PM_{2.5}$**  las concentraciones de  $PM_{2.5}$  más altos de los valores máximo, promedio y mínimo están marzo de 2019 ( $59.6658 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), marzo de 2020 ( $33.3411 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y marzo de 2020 ( $21.6658 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), las concentraciones bajas de dichas variables están en abril de 2019 ( $17.35481583 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en julio de 2019 ( $11.4914 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y noviembre de 2019 ( $4.105 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (Figura 16).

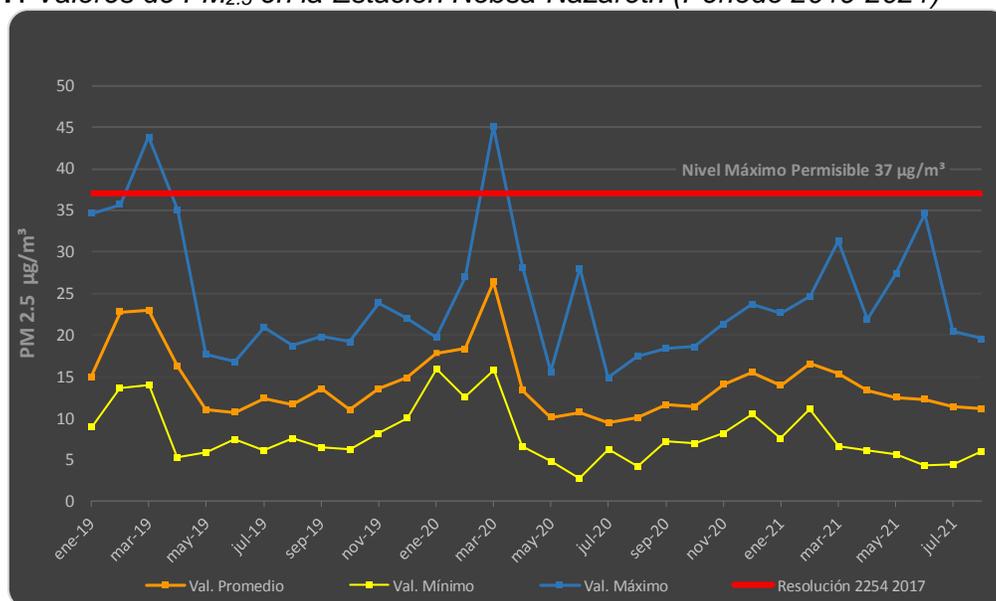
**Figura 16.** Valores de  $PM_{2.5}$  en la Estación Sogamoso-Koica (Periodo 2019-2021)



Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, se puede decir que para la **Estación Nobsa-Nazareth de  $PM_{2.5}$**  las concentraciones altas de valores máximo, promedio y mínimo se presentaron de la siguiente forma: en marzo de 2020 se presentó ( $87.7826 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), ( $51.6393 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y febrero de 2020 ( $33.0833 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), las concentraciones bajas de dichas variables están en agosto de 2021 ( $33.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en noviembre de 2019 ( $22.1809 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y agosto de 2019 ( $3.7267 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (Figura 17).

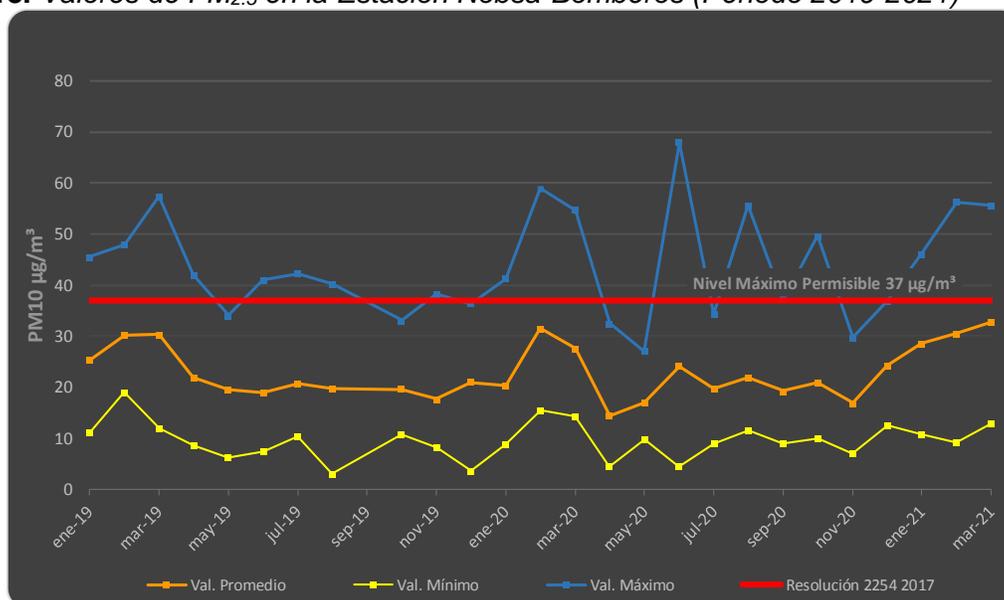
**Figura 17.** Valores de  $PM_{2.5}$  en la Estación Nobsa-Nazareth (Periodo 2019-2021)



Fuente: Elaboración Propia.

En el caso de la **Estación Nobsa-Bomberos de  $PM_{2.5}$**  las concentraciones altas de los valores máximo, promedio y mínimo se expresaron así; junio de 2020 ( $67.9655 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), marzo de 2021 ( $32.7715 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y febrero de 2019 ( $19.0858 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), las concentraciones bajas de dichas variables están en mayo de 2020 ( $27.1269 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en abril de 2020 ( $14.4823 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y agosto de 2019 ( $3.1383 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (Figura 18).

**Figura 18.** Valores de  $PM_{2.5}$  en la Estación Nobsa-Bomberos (Periodo 2019-2021)

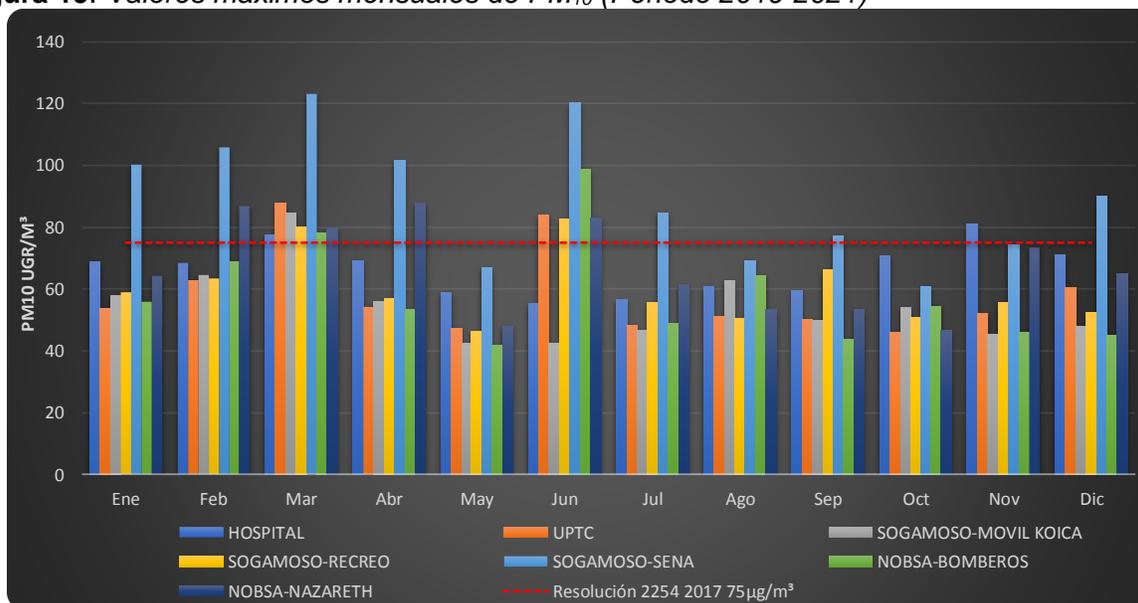


Fuente: Elaboración Propia.

### PM10 - Valores Máximos mensual (2019-2021)

Para el caso del material particulado  $PM_{10}$  menor a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se observó que a partir del cambio normativo se registraron excedencias en el periodo de 2019 a 2021 sobrepasando la norma diaria de  $75 \text{ mg}/\text{m}^3$  en la mayoría de las estaciones para los meses de marzo y junio. Se puede apreciar que las estaciones SOGAMOSO-Sena, registraron los valores más altos de este contaminante, superando los  $60 \text{ mg}/\text{m}^3$ . El comportamiento de la contaminación en las estaciones SOGAMOSO-Recreo, SOGAMOSO-Koica, UPTC y NOBSA-Bomberos fue de los más bajos durante el periodo de estudio en comparación al resto de puntos en donde se midió este contaminante. Así mismo se puede observar que el comportamiento de este contaminante, fue mucho más alto en todas las estaciones durante los meses de febrero, marzo y junio (Figura 19).

**Figura 19.** Valores máximos mensuales de  $PM_{10}$  (Periodo 2019-2021)

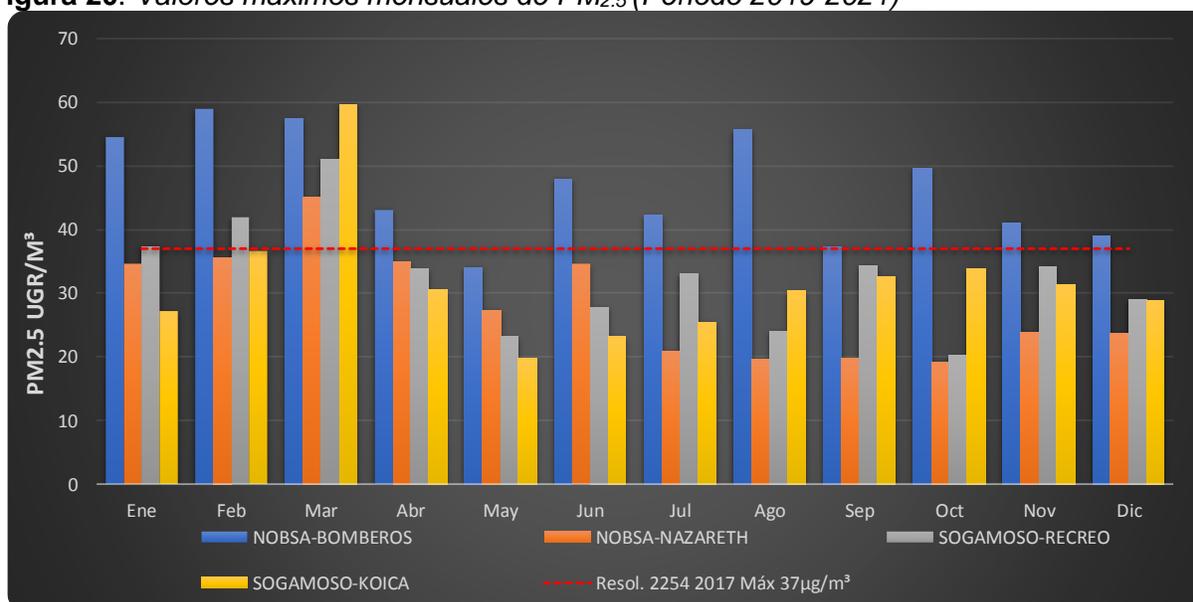


Fuente: Elaboración Propia.

### PM<sub>2.5</sub> – Valores máximos mensuales (2019-2021)

Un análisis general para el caso del material particulado  $PM_{2.5}$  menor a  $2.5 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ , se registró excedencias de la norma diaria de  $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en la estación NOBSA-Bomberos de superando los  $37 \text{ mg}/\text{m}^3$  durante todos los meses excepto en el mes de mayo y septiembre que toca el límite, es importante mencionar, que aunque los datos no cumplen con el criterio de representatividad del 75% para estos meses, el valor obtenido sirve como criterio para hacer análisis mucho más detallado en parte de la zona de estudio, se resalta la estación Sogamoso-koica durante el mes de febrero registro un valor de  $PM_{2.5}$  muy cercano de límite permisible, mientras que en el mes de marzo si sobrepasa el límite permitido., la estación Nobsa-Nazareth registró los niveles bajos de este contaminante pero en el mes de marzo sobrepasa el límite, mientras que la estación Sogamoso-Recreo, teniendo hacia un comportamiento constante de  $PM_{2.5}$  y sobrepasa el límite en los meses de enero, febrero y marzo. (Figura 20).

**Figura 20.** Valores máximos mensuales de  $PM_{2.5}$  (Periodo 2019-2021)



Fuente: Elaboración Propia.

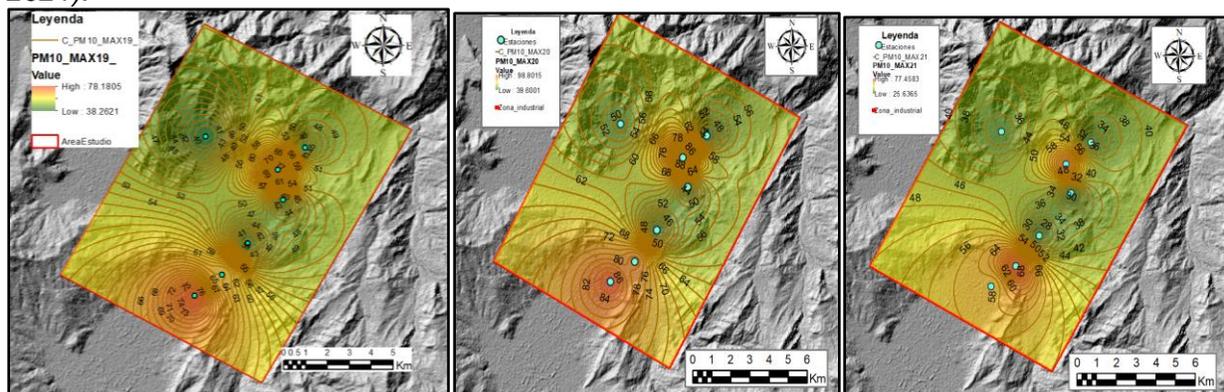
### 5.1.2 Análisis Espacial

Evaluado los valores máximos anuales de  $PM_{10}$  se tiene que la mayor concentración se encuentra en el año 2020 con un valor del  $98.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que corresponde a la estación Sogamoso-SENA, debido a la influencia directa de la industria cementera y minería a cielo abierto, cercanía a la zona poblada de la vereda belencito del municipio de Nobsa (Figura 21).

Para los valores promedio se encuentran entre  $37.2$  y  $42.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , valor que nos indica la tendencia central de los datos y que estaría por debajo del nivel máximo permisible según la resolución 2254 del 2017. (Figura 22).

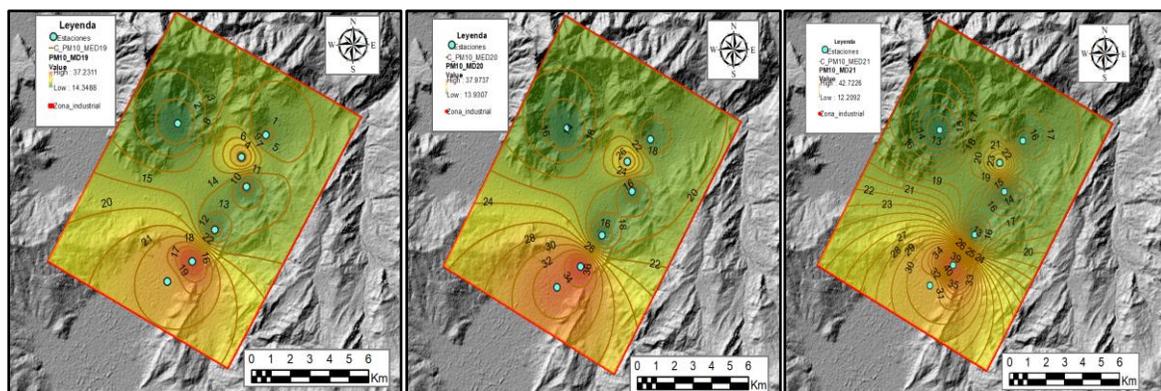
Los valores mínimos oscilan entre  $7.7$  y  $17.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , tenemos que para el año 2019 se presenta en valor mínimo de  $7.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que se encuentra en la estación Hospital del municipio de Sogamoso, zona desprovista de las actividades mineras e industriales. (Figura 23).

**Figura 21.** Mapa espaciotemporal para el valor máximo anual de  $PM_{10}$  ( $\mu g/m^3$ ), (Periodo 2019-2021).



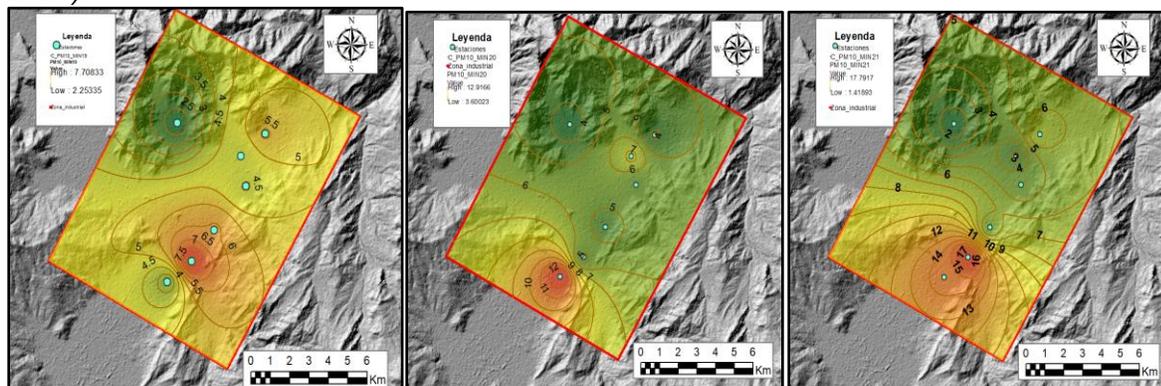
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 22.** Mapa espaciotemporal para el valor promedio anual de  $PM_{10}$  ( $\mu g/m^3$ ), (Periodo 2019-2021).



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 23.** Mapa espaciotemporal para el valor mínimo anual de  $PM_{10}$  ( $\mu g/m^3$ ), (Periodo 2019-2021).



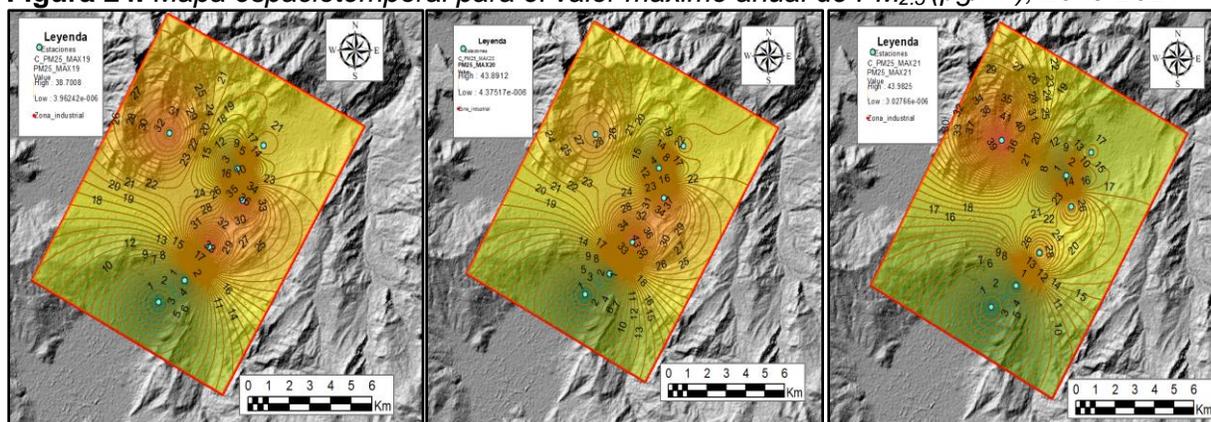
Fuente: Elaboración Propia.

De igual manera se realizó mediante la herramienta IDW los mapas espaciotemporales con los valores anuales de  $PM_{2.5}$ , para lo cual se tiene que la mayor concentración se encuentra en el año 2021 con un valor del  $43.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que corresponde a la estación Nobsa-Bomberos, debido a la influencia directa del transporte de carga pesada que circula por este corredor industrial, la población afectada corresponde a la cabeza urbana del municipio de Nobsa. (Figura 24).

Para los valores promedio se encuentran entre  $15.08$  y  $16.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , valor que nos indica la tendencia central de los datos y que estaría por debajo del nivel máximo permisible según la resolución 2254 del 2017. (Figura 25).

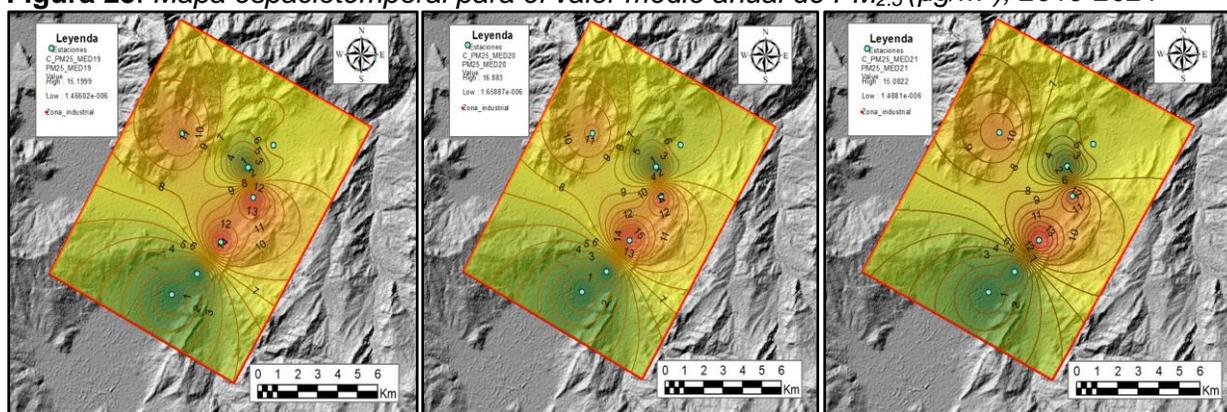
Los valores mínimos oscilan entre  $6$  y  $7.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , tenemos que para el año 2019 se presenta en valor mínimo de  $6.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que se encuentra en la estación Sogamoso-Sena del municipio de Sogamoso, zona intervenida por la industria siderurgia. (Figura 26).

**Figura 24.** Mapa espaciotemporal para el valor máximo anual de  $PM_{2.5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 2019-2021



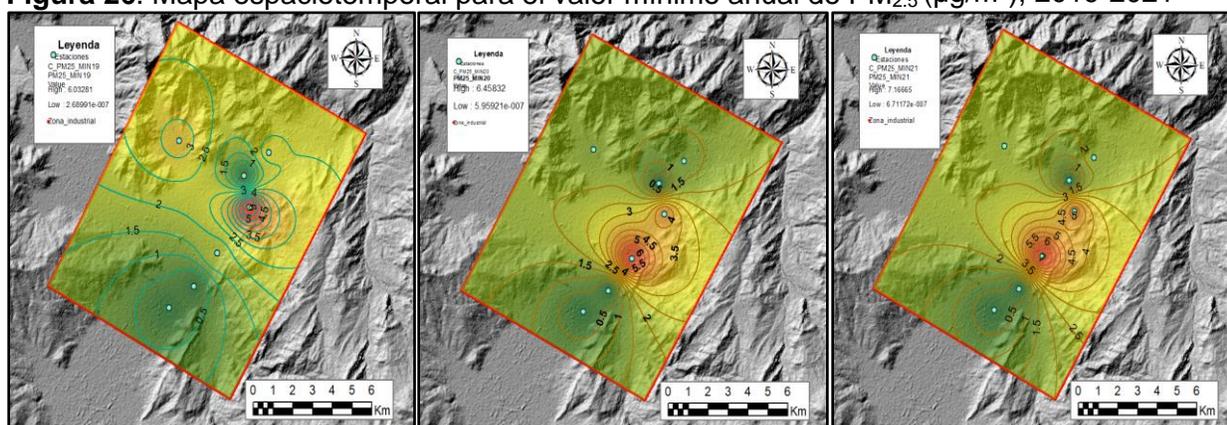
Nota: Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 25.** Mapa espaciotemporal para el valor medio anual de  $PM_{2.5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 2019-2021



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 26.** Mapa espaciotemporal para el valor mínimo anual de  $PM_{2.5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 2019-2021



Fuente: Elaboración Propia.

Continuando con el análisis temporal y espacial de datos se hace necesario aplicar la herramienta IDW para genera mapas espaciotemporales. Evaluado los valores máximos anuales de  $PM_{10}$  se tiene que la mayor concentración se encuentra en el año 2020 con un valor del  $98.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que corresponde a la estación Sogamoso- SENA, debido a la influencia directa de la industria cementera y minería a cielo abierto, cercanía a la zona poblada de la vereda belencito del municipio de Nobsa. Los valores mínimos oscilan entre  $7.7$  y  $17.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , tenemos que para el año 2019 se presenta en valor mínimo de  $7.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que se encuentra en la estación Hospital del municipio de Sogamoso, zona desprovista de las actividades mineras e industriales. Para los valores promedio se encuentran entre  $37.2$  y  $42.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , valor que nos indica la tendencia central

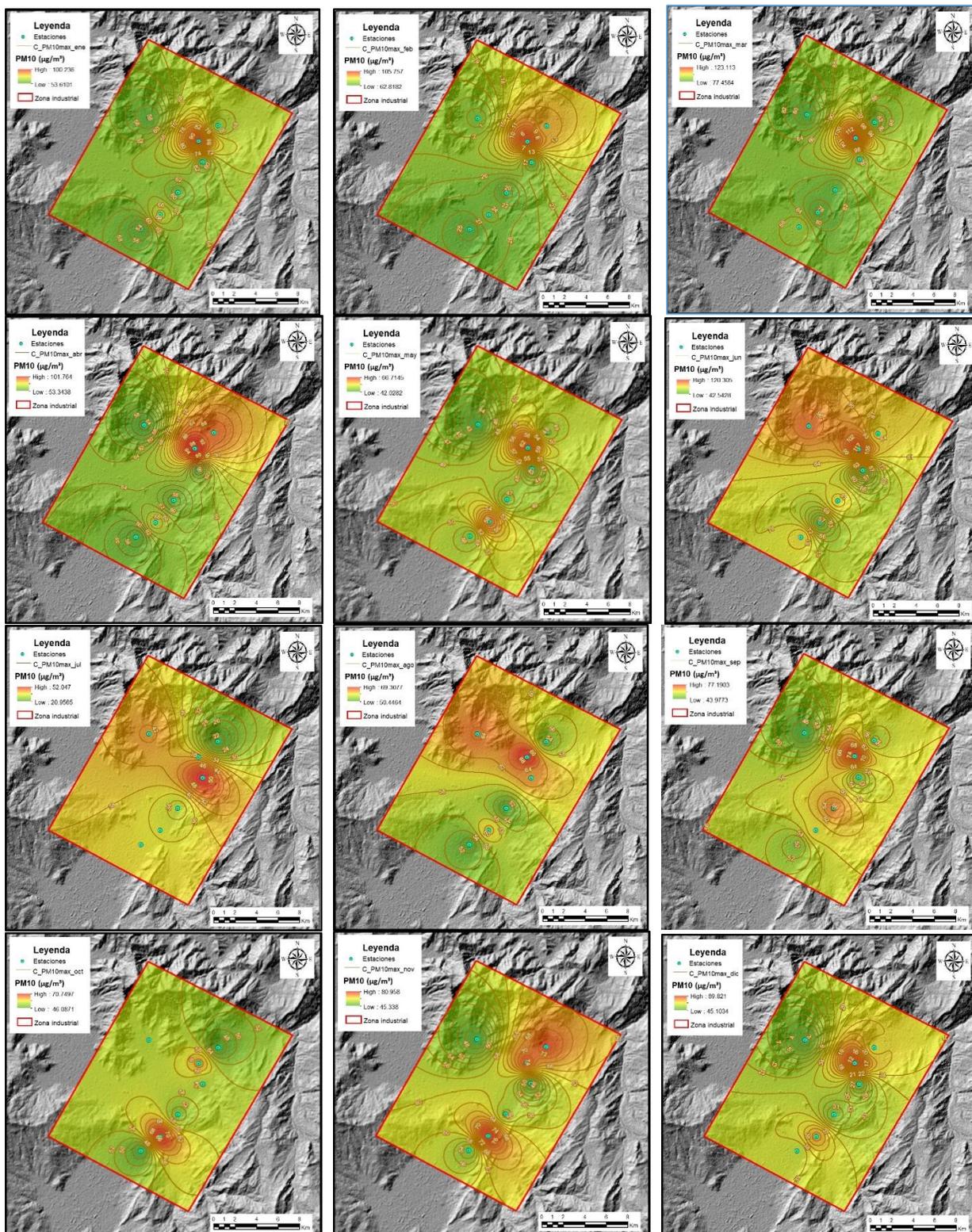
de los datos y que estaría por debajo del nivel máximo permisible según la resolución 2254 del 2017. (Figura 27).

Se observa que las concentraciones más altas de  $PM_{10}$ , se presentan en los meses de enero, febrero, marzo, junio y diciembre, mientras que las concentraciones bajas se presentan en los meses de mayo y Julio. Los municipios que presenta mayor concentración del contaminante atmosférico la zona industrial de Nobsa Sogamoso. (Figura 27).

Se puede apreciar, que enero y febrero son los meses que mayor se presentan las concentraciones de material particulado  $PM_{10}$ . Además, La zona industrial de los municipios de Sogamoso y Nobsa, presentan las mayores concentraciones de este contaminante, mientras que hacia la parte sur de Sogamoso no presentan concentraciones. Para los meses de junio, julio y octubre el contaminante tiende a dispersar por todo el límite municipal. Para los meses de octubre y noviembre la concentración de este contaminante se centra en el municipio de Nobsa, y nuevamente las estaciones koica y Nobsa Bomberos, son las que registran altos valores de material particulado. (Figura 28).

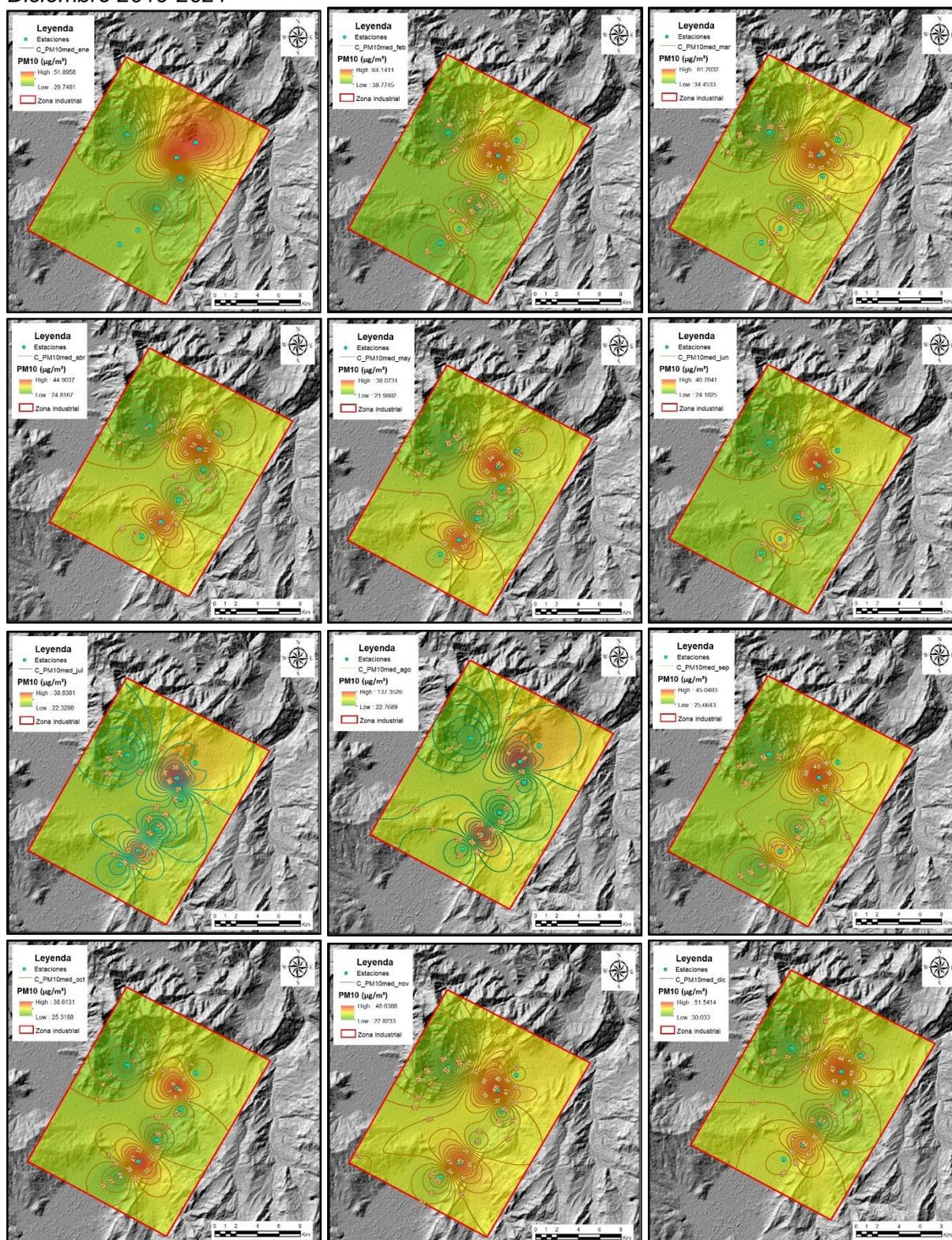
Para los meses de febrero y marzo la concentración de este contaminante  $PM_{10}$  presenta los valores más altos de los valores mínimos mensuales, y los valores más bajos se presentan en los meses de mayo, junio, agosto y noviembre, nuevamente las estaciones koica y Nobsa Bomberos, son las que registran bajos valores de material particulado  $PM_{10}$ . (Figura 29).

**Figura 27.** Mapa espaciotemporal del valor máximo mensual de  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Enero-Diciembre, 2019-2021



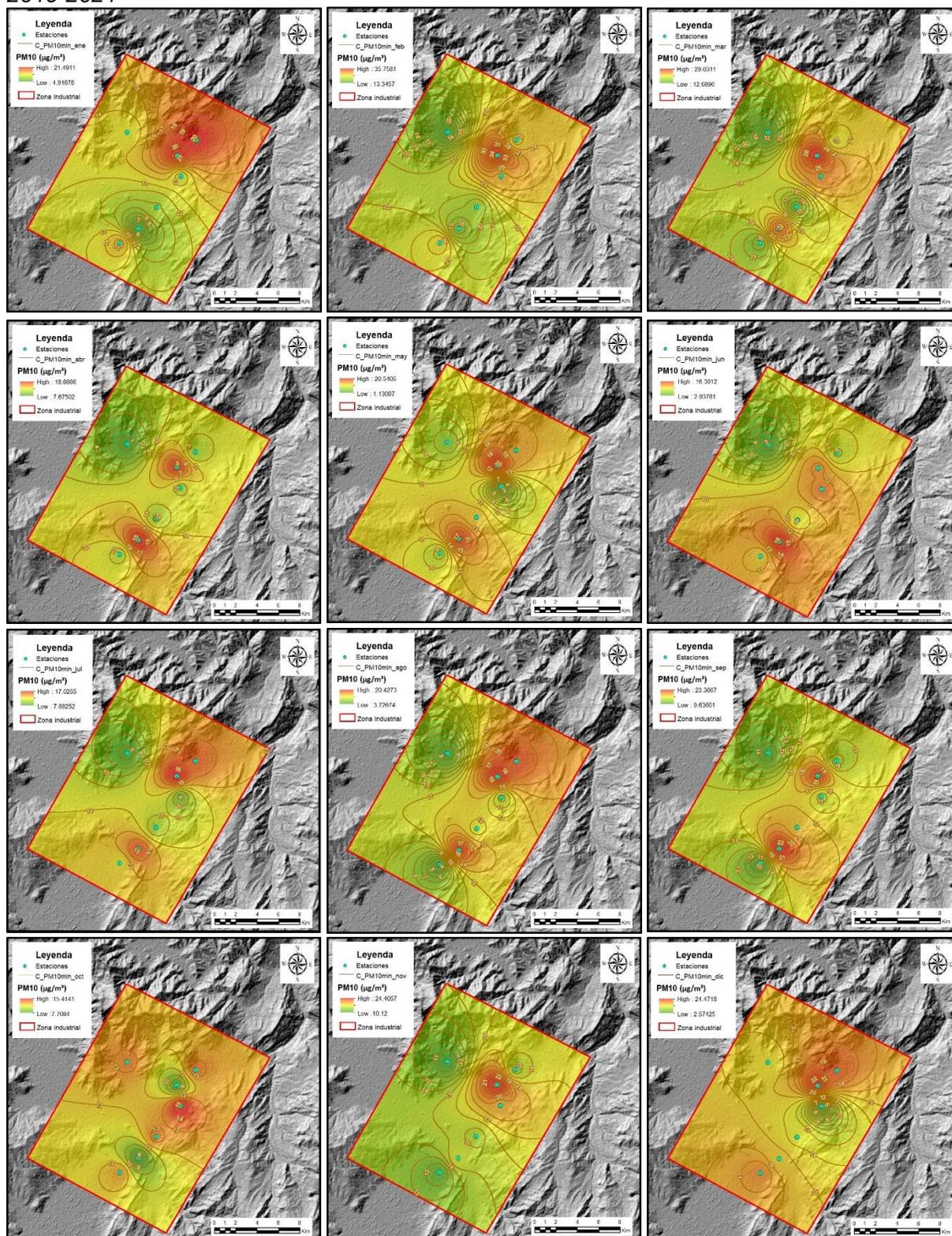
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 28.** Mapa espaciotemporal del valor promedio mensual de  $PM_{10}$  ( $\mu g/m^3$ ), Enero-Diciembre 2019-2021



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 29.** Mapa espaciotemporal para mínimo mensual de  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Enero-Diciembre 2019-2021



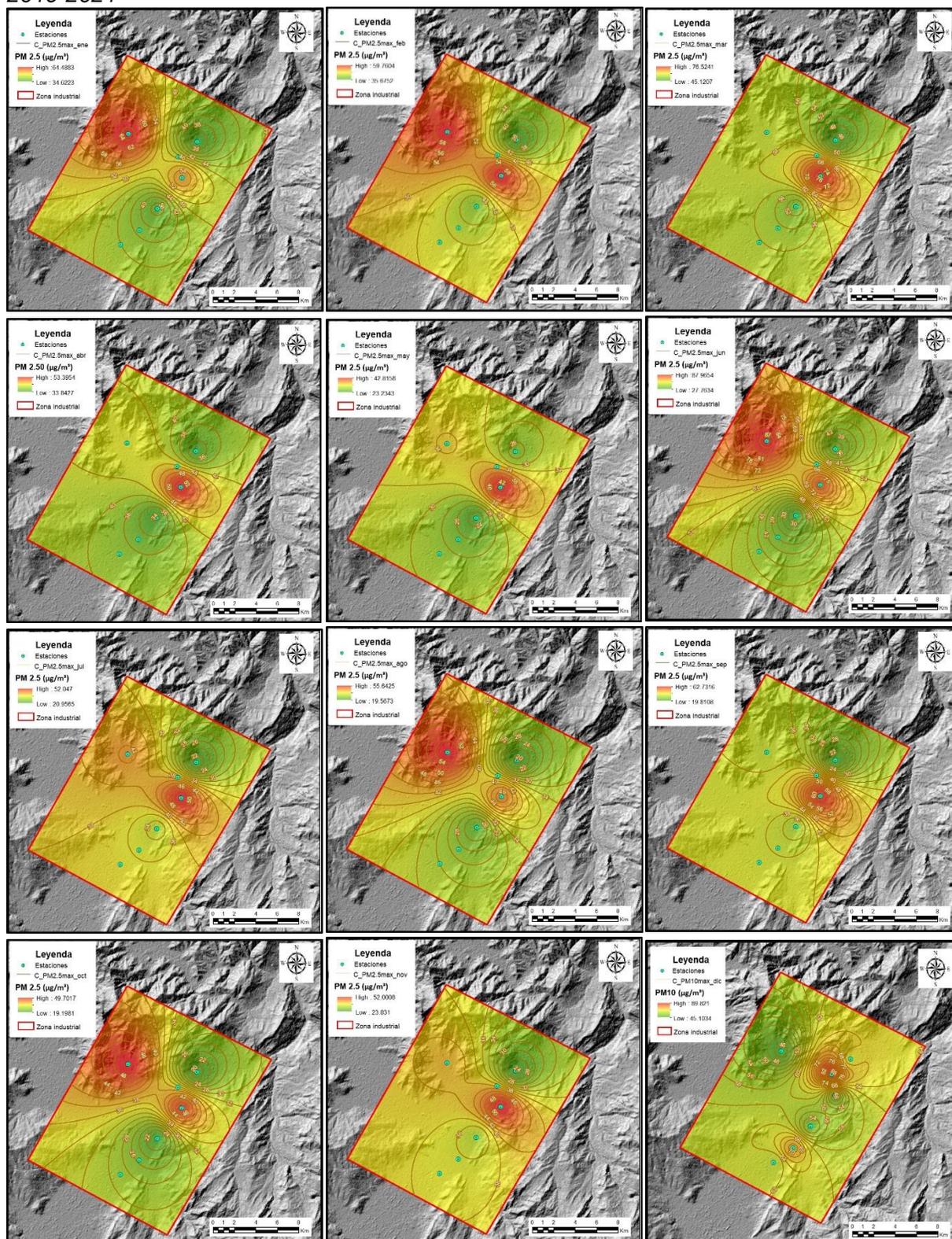
Fuente: Elaboración Propia.

Se observó, que en los meses de Enero, Febrero, Junio, Agosto y Septiembre el contaminante se dispersa por toda la zona industrial de los municipios de Nobsa y Sogamoso, este fenómeno se debe a que el  $PM_{2.5}$  es una concentración de material particulado más ligera y liviana (Figura 30).

Así mismo se tiende a alejar de las zonas de extracción del mineral. Para los meses con mayor concentración de  $PM_{2.5}$  se registra el valor más alto de este contaminante ( $87.9654 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), ( $76.5241 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), y ( $64.4883 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Igualmente se puede interpretar que en el mes de Mayo las concentraciones de  $PM_{2.5}$  tiene su máximo valor en zona industrial de Sogamoso (Estación Koica), mientras que para los demás meses el material particulado se centra hacia el municipio de Nobsa. (Figura 32).

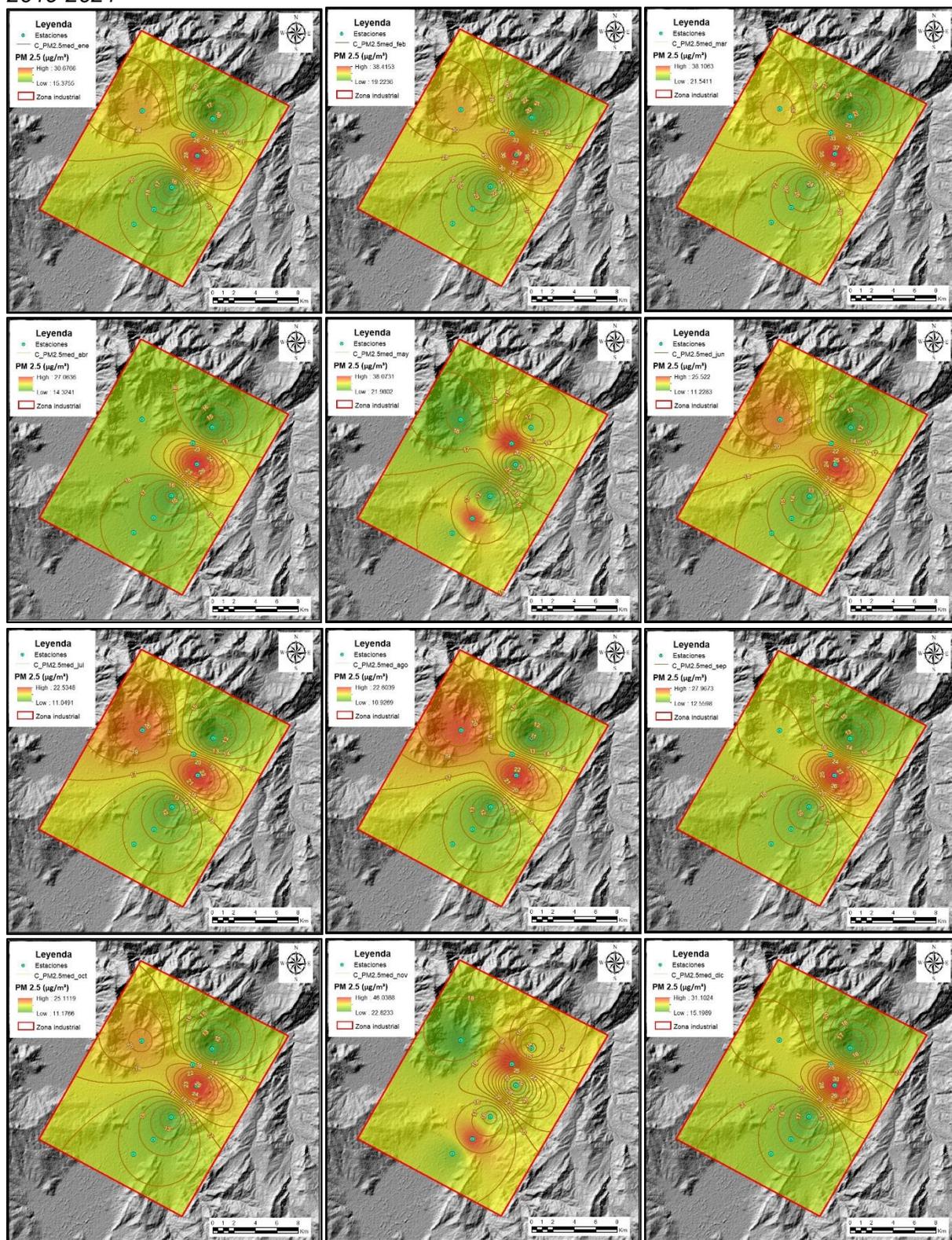
Los meses de Abril, Mayo y Noviembre el contaminante tiene sus niveles más bajos en las concentraciones en la zona industrial de los municipios Sogamoso y Nobsa. Para Mayo la zona industrial no tiende a estar presentando este contaminante, mientras que en la zona de la estación Sena sí. El valor más alto registrados (promedio mensual) es en febrero y noviembre con  $38.4153 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $46.0388 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. (Figura 31).

**Figura 30.** Mapa espaciotemporal para Máximo mensual de  $PM_{2.5}$  ( $\mu g/m^3$ ), Enero-Diciembre 2019-2021



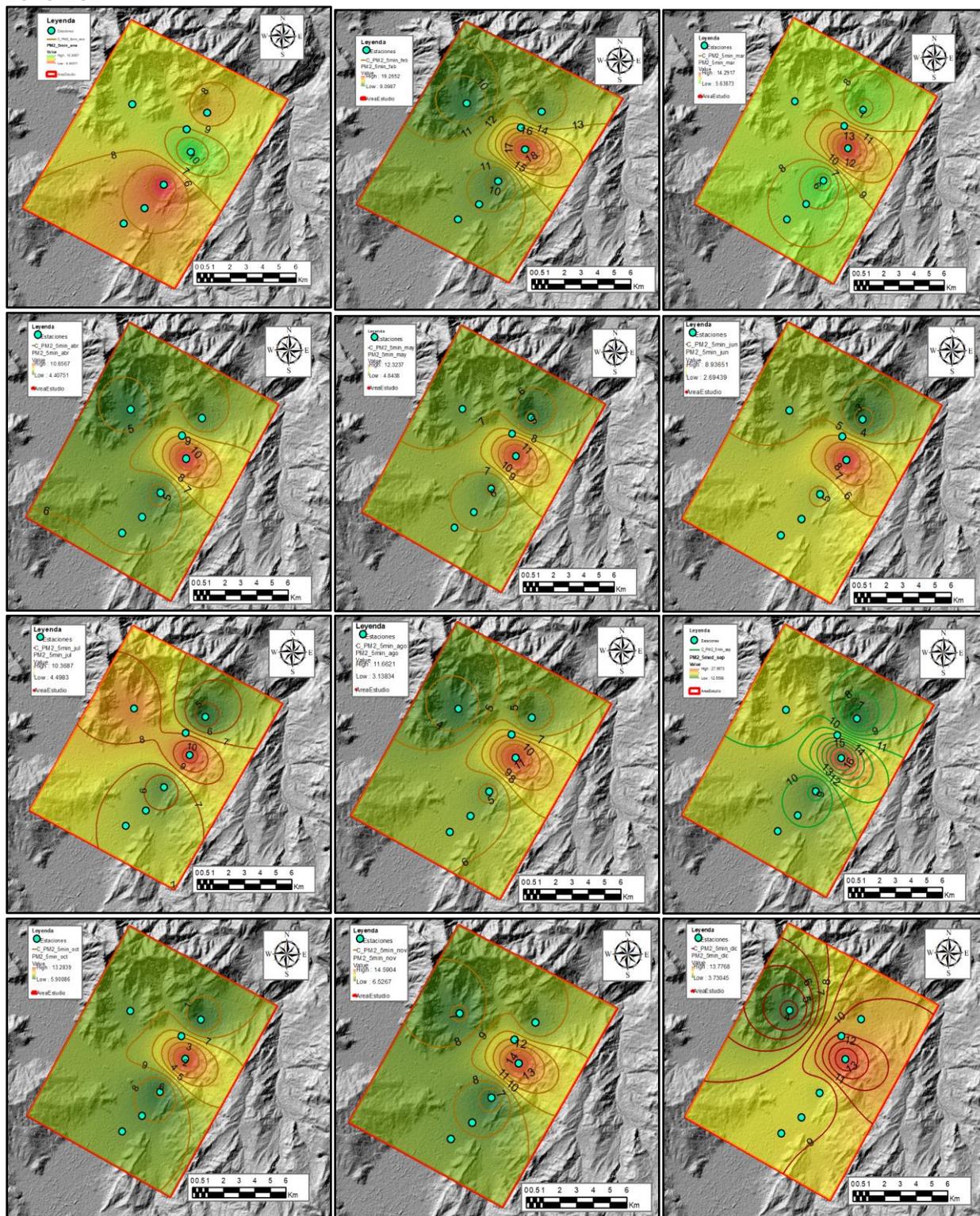
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 31.** Mapa espaciotemporal para valor medio mensual de  $PM_{2.5}$  ( $\mu g/m^3$ ), Enero-Diciembre 2019-2021



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 32.** Mapa espaciotemporal para mínimo mensual de PM<sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Enero-Diciembre 2019-2021



Fuente: Elaboración Propia.

## 5.2 DISCUSIÓN

Investigaciones recientes relacionadas con el material particulado se han realizado en todo el mundo. En Italia (Perrone et al., 2005), España (Viana et al., 2006), Beijing (Wu et al., 2008), Suecia (Sternbeck et al., 2002), China (Zhang et al., 2006), México (García, Ramírez, Ulloa, Arias, & Pérez, 2012) y Estados Unidos (Wilhelm, Qianc & Ritz, 2009), entre otras. Estas investigaciones demuestran la presencia de material particulado en la atmosfera bien sea por causas naturales y antropogénicas, conllevando a que la comunidad académica y de salud decida adelantar estudios detallados relacionados con los efectos causados en la salud humana y el medio ambiente con el fin de implementar estrategias de control.

Estudios realizados en el Valle de Aburrá, en relación con partículas en suspensión total (PST), arrojaron que el nivel de contaminación está aumentando en los últimos años y los niveles de ( $PM_{10}$ ) superan los  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , muy por encima de los niveles de precaución para la salud, definidos por la Organización Mundial de la Salud –OMS– ( $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Si se considera el material particulado respirable ( $PM_{10}$ ), el diagnóstico se confirma en su tendencia ascendente con niveles muy altos ( $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) con respecto al umbral de precaución fijado por la Organización Mundial Salud ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para niveles de exposición crónica (Bedoya et al., 2009).

En la ciudad de Medellín se realizaron diferentes mediciones con el fin de determinar las concentraciones de fondo de material particulado y sus variaciones, temporal y espacial. Otras mediciones estuvieron encaminadas a caracterizar física y químicamente el material particulado recolectado. Obteniendo como resultado la variación temporal y espacial de las concentraciones de metales, con valores representativos para el caso de metales como el calcio, hierro y magnesio en las muestras del material colectado (Echeverri, 2000).

Según los estudios realizados sobre la calidad del aire en la ciudad de Santa Marta, las concentraciones más altas coinciden con el periodo de escasas lluvias, entre enero y abril. Al analizar las medias geométricas mensuales de material particulado, se observa que durante todo el periodo de estudio se registraron concentraciones superiores a los  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la mayor parte del área urbana de Santa Marta. Se encontró, además, que en todos los meses los mayores niveles de contaminación referida a la concentración de material particulado en el aire, se registran en el área del centro de la ciudad (García, Agudelo & Jiménez, 2006).

En la ciudad de Santa Fe de Bogotá, el estudio determinó una asociación significativa entre el incremento en la concentración másica de material particulado en el aire y el aumento en el número de consultas por enfermedad de vía aérea, superior en menores de 14 años, basado en datos de los hospitales de los barrios Venecia, Bosa y Trinidad Galán. El estudio predice, a partir de sus resultados, que una disminución de  $\text{PM}_{10}$  en  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  produciría una disminución del 17% en el número de consultas por síntomas de enfermedades respiratorias. (Solarte et al., 1999).

En Bucaramanga se caracterizaron mediante análisis físico-químicos de muestras de Material Particulado, los metales presentes en el aire-fracción respirable  $\text{PM}_{10}$  detectando en los resultados Al, Ca, Fe, Mg y Zn en todas las estaciones y en menor proporción se encontró Pb y algo de Ni y Cu (Quijano, 2004).

En la mayoría de los estudios citados anteriormente, los niveles de los promedios geométricos anuales superan la norma colombiana para PST y  $\text{PM}_{10}$ , sin embargo, no superan la norma diaria. Mientras que los resultados de las investigaciones para caracterizar la composición mineral, están principalmente asociados a polvos fugitivos de fracciones carbonáceas emitidas por la combustión de las fuentes móviles y fijas, además de elementos metálicos, cuyas fuentes

obedecen en su mayoría a contribuciones antropogénicas y a la resuspensión de partículas por la acción del viento (Arciniégas Suárez, 2011).

Se ha venido realizando estudios de monitoreo de partículas suspendidas en la atmósfera de las principales ciudades colombianas, estos estudios deben ser complementados con trabajos investigativos de partículas cada vez más pequeñas. Para el caso colombiano, solo hasta la vigencia de la Resolución 610 de 2010, se reglamentó la concentración de partículas con diámetro aerodinámico de 2.5 micras.

En el presente estudio de material particulado en la zona industrial de los municipios de Sogamoso, Nobsa, Corrales, se enfoca en el análisis temporal y espacial, verificado la concentración de estas partículas ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ), en correlación con la precipitación y temperatura se demuestra que en los periodos secos se presenta aumento de material particulado y con valores máximos que superan el límite permisible según la resolución 2254 de 2017; comparado el estudio realizado con resultados de estudios similares del país, se presenta un comportamiento con las mismas tendencias en cuanto a la relación inversa con el clima y los valores máximos permisibles por encima de la norma nacional e internacional.

## 6. CONCLUSIONES

El análisis de material particulado para el periodo de estudio (2019-2021) de las 7 estaciones de monitoreo de la calidad del aire que forman parte de las jurisdicciones de Corpoboyacá y de la plataforma SISAIRE ubicadas en los municipios de Sogamoso, Corrales y Nobsa, presentan concentraciones altas de los contaminantes  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , superando el límite máximo permisible para un periodo de exposición diario de 24 horas.

Mediante el análisis temporal estadístico del material particulado, se evidencia un comportamiento en las estaciones Sogamoso-Sena, Nobsa-Bomberos, que superan los límites máximos permisibles para el periodo evaluado de 2019 al 2021 ratificando que el valor de material particulado es inversamente proporcional a las precipitaciones, dado que en los meses de lluvia los niveles de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  bajan considerablemente y las concentraciones de material particulado tienden hacer altas en los meses enero, febrero, marzo, julio, agosto, y diciembre de baja precipitación y temperaturas altas, mientras que en temperaturas bajas y precipitaciones altas, en los meses de abril, mayo, junio, septiembre, octubre y noviembre, las concentraciones de material particulado se hacen más bajas; identificando la problemática del deterioro de la calidad del aire en la zona de estudio.

Los valores máximos de material particulado  $PM_{10}$  para el periodo 2019 - 2021, en el corredor industrial se presentan cuando las empresas aumentan su actividad industrial y de explotación, especialmente en la industria cementera y explotación a cielo abierto de calizas, arenas y arcillas.

La concentración de material particulado  $PM_{10}$  más alta, se presenta en la estación Sogamoso-Sena del municipio de Sogamoso con un valor de  $124 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , superando el límite máximo permisible de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  según resolución 2254 de 2017 para 24 horas.

Con el análisis espacial se observó mayor concentración de  $PM_{10}$  en el área de la zona industrial y de extracción de minerales. Por otra parte, las partículas de  $PM_{2.5}$  debido a que son más ligeras tienden a dispersarse con mayor facilidad del lugar donde se generan, en este caso industrias cementeras y de extracción de minerales (canteras).

La concentración de material particulado  $PM_{2.5}$  más alta, se presentó en la estación Nobsa-Bomberos con un valor de  $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el mes de junio de 2020, superando el límite máximo permisible de  $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$  según resolución 2254 de 2017.

Las concentraciones de material particulado  $PM_{10}$  más bajas, se presentan en las estaciones Nobsa-Bomberos y Sogamoso-Recreo en los meses de Abril - Mayo y Octubre – Noviembre ( $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), correspondiendo a los periodos de alta precipitación.

## 7. RECOMENDACIONES

Se recomienda hacer un estudio más detallado, y tomar las medidas pertinentes para cumplir la meta para el año 2030, establecida en la resolución 2254 del 01 de noviembre de 2017, que consiste en disminuir los niveles máximos permisibles a condiciones de referencia de  $PM_{10}$  de  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , anual y para el  $PM_{2.5}$  de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  anual.

Se recomienda realizar un análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de las concentraciones de ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) con las afectaciones a las Salud publica en la población de influencia de la zona industrial de los municipios de Nobsa, Corrales y Sogamoso.

Se recomienda realizar una zonificación de la dispersión de material particulado involucrando el factor climático de movilidad del viento.

## 8. ANEXOS

### Anexo 33. Estación UPTC valores de PM<sub>10</sub>, (Periodo 2019-2021)

<b>VALORES PM10 ESTACIÓN UPTC</b>												
Mes - Año	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	31.934	39.212	39.141	28.312	25.053	23.167	24.390	24.391	25.003	24.056	22.181	35.063
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	15.389	24.873	15.349	11.434	8.594	10.272	12.267	3.727	9.631	12.794	10.989	18.000
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	53.610	62.453	77.402	52.564	41.374	47.017	48.100	45.195	39.893	39.755	45.238	60.364
Mes - Año	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	jul-20	ago-20	sep-20	oct-20	nov-20	dic-20
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	38.199	46.337	51.639	32.957	26.188	33.720	26.825	25.883	28.833	27.818	32.944	39.676
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	19.000	33.083	28.409	18.250	18.739	14.000	17.042	12.917	17.958	17.913	16.125	28.958
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	48.609	62.818	87.783	54.208	46.167	84.153	46.913	51.043	49.875	46.087	51.867	56.042
Mes - Año	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sep-21	oct-21	nov-21	dic-21
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	38.341	37.440	32.680	29.712	27.096	26.573	24.136	25.911				
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	17.333	27.958	15.375	18.208	19.458	14.333	16.833	15.792				
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	51.435	55.792	46.130	45.208	47.333	56.750	40.125	33.500				

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

### Anexo 34. Estación Hospital valores de PM<sub>10</sub>, (Periodo 2019-2021)

<b>VALORES PM10 ESTACIÓN HOSPITAL</b>												
Mes Año	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	37.446	39.512	41.619	43.326	38.491	36.844	39.415	39.848	40.785	28.934	25.149	35.239
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	27.833	33.292	32.292	25.625	19.667	21.217	21.917	22.458	26.375	17.783	15.958	15.182
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	65.000	49.125	55.000	63.542	58.833	55.333	52.565	56.565	59.500	54.833	38.542	52.696
Mes Año	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	jul-20	ago-20	sep-20	oct-20	nov-20	dic-20
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	19.965	42.966	42.572	35.804	32.667	28.172	31.555	31.455	31.710	48.345	57.419	53.653
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	14.917	17.458	25.333	26.134	17.478	16.391	15.833	18.696	23.375	27.250	33.875	43.696
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	53.792	55.250	62.833	52.500	46.458	38.636	49.783	46.283	49.542	57.750	58.958	57.875
Mes Año	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sep-21	oct-21	nov-21	dic-21
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	52.742	67.238	59.301	39.900	31.583	30.480	32.944					
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	34.875	33.412	27.958	18.667	21.417	19.625	17.792					
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	68.667	68.542	76.215	69.292	42.542	44.167	56.565					

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 3. Estación Sogamoso-Recreo valores de PM<sub>10</sub>, (Periodo 2019-2021)**

<b>VALORES PM10 ESTACIÓN SOGAMOSO-RECREO</b>												
Mes Año	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	32.646	43.613	40.817	32.556	26.287	24.207	23.220	23.414	29.932	26.930	30.526	30.933
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	19.514	27.305	19.075	12.700	17.195	12.066	13.037	16.426	17.800	13.284	14.590	13.777
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	59.007	63.282	80.046	56.917	46.337	82.721	55.568	50.446	66.253	50.828	55.522	52.109
Mes Año	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	jul-20	ago-20	sep-20	oct-20	nov-20	dic-20
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	31.200	40.835	42.326	24.221	20.479	26.798	22.126	21.790	25.691	23.707	29.346	30.674
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	22.273	21.868	28.494	10.857	12.324	8.937	12.913	11.662	17.470	13.748	14.914	18.181
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	44.828	58.313	67.719	38.085	36.843	79.200	36.304	46.925	34.105	38.427	45.224	48.588
Mes Año	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sep-21	oct-21	nov-21	dic-21
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	28.184	31.875	29.177	24.698	20.059	25.936	21.640	23.102				
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	10.959	19.265	14.292	13.746	12.482	14.698	10.369	12.764				
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	53.131	44.373	47.999	39.111	31.593	48.657	52.047	31.974				

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 4. Estación Sogamoso-Koica valores de PM<sub>10</sub>, (Periodo 2019-2021)**

<b>VALORES PM10 ESTACIÓN SOGAMOSO-KOICA</b>												
Mes Año	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	25.290	45.690	42.431	30.399	23.606	26.068	25.260	24.656	31.333	28.377	25.958	
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	14.810	31.130	23.858	12.027	15.583	14.792	8.965	12.400	18.788	17.577	21.074	
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	57.934	62.519	78.925	55.771	39.917	40.056	46.060	40.152	49.705	53.942	30.843	
Mes Año	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	jul-20	ago-20	sep-20	oct-20	nov-20	dic-20
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	42.911	48.720	22.779	21.952	23.901	27.642	26.366	27.038	26.339	29.927	32.438	
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	26.620	29.266	11.641	10.130	12.689	15.279	16.344	14.607	15.414	18.573	20.570	
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	64.053	84.696	37.526	35.891	42.543	39.783	62.669	38.439	42.178	45.338	47.752	
Mes Año	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sep-21	oct-21	nov-21	dic-21
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )			22.963	24.058	21.521	23.119						
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )			12.166	12.786	11.827	9.065						
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )			42.042	42.456	42.398	34.488						

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 5. Estación Sogamoso-Sena valores de PM<sub>10</sub>, (Periodo 2019-2021)**

<b>VALORES PM10 ESTACIÓN SOGAMOSO-SENA</b>												
Mes Año	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	50.286	71.042	71.174	54.354	46.438	42.493	43.889	38.987	49.387	35.916	46.186	52.014
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	21.491	40.247	36.478	22.206	29.539	23.755	21.227	20.428	21.361	15.245	25.386	24.472
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	100.237	105.758	123.114	101.765	66.715	71.605	84.580	57.887	77.191	57.847	74.263	89.822
Mes Año	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	jul-20	ago-20	sep-20	oct-20	nov-20	dic-20
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	54.407	65.336	65.053	37.175	33.374	41.451	34.988	36.887	40.710	38.933	45.893	51.069
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	34.430	35.758	45.678	18.883	23.577	24.363	21.509	24.600	29.347	20.781	24.406	31.684
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	78.142	98.929	99.250	62.287	52.617	120.307	58.628	69.308	55.983	60.731	69.838	72.679
Mes Año	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sep-21	oct-21	nov-21	dic-21
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	50.996	56.047	47.384	43.183	34.409	38.350	37.638	36.185				
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	23.541	38.028	29.031	17.503	20.541	21.783	17.026	22.660				
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	68.636	71.825	80.743	94.811	49.003	68.879	70.321	52.096				

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 6. Estación Nobsa-Nazareth valores de PM<sub>10</sub>, (Periodo 2019-2021)**

<b>VALORES PM10 ESTACIÓN NOBSA-NAZARETH</b>												
Mes Año	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	49.187	46.774	43.949	33.777	30.782	33.485	34.393	33.348	35.426	28.035	34.637	31.965
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	45.870	30.750	25.568	11.066	14.546	17.129	19.730	18.997	13.609	13.357	18.976	19.510
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	52.834	63.733	79.862	87.722	47.740	58.021	61.338	53.094	53.348	46.692	73.559	48.388
Mes Año	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	jul-20	ago-20	sep-20	oct-20	nov-20	dic-20
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	60.709	52.491	47.108	24.176	24.291	29.803	26.884	29.509	30.598	30.440	30.044	39.309
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	57.161	31.137	27.573	13.055	16.068	7.842	16.359	17.282	21.857	17.530	14.617	25.578
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	64.257	86.737	66.239	43.750	35.895	82.676	39.539	53.356	41.787	43.863	44.981	64.998
Mes Año	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sep-21	oct-21	nov-21	dic-21
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	33.430	38.742	34.492	31.017	25.292	27.211	30.784	28.935				
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	20.130	24.646	19.949	14.348	13.407	13.999	14.640	16.962				
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	44.111	62.550	59.482	46.823	41.384	56.651	51.038	53.088				

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 7. Estación NOBSA-Bomberos valores de PM<sub>10</sub>, (Periodo 2019-2021)**

<b>VALORES PM10 ESTACIÓN NOBSA-BOMBEROS</b>												
Mes Año	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	32.714	39.992	39.921	29.092	24.984	24.059	25.170	25.084	25.783	24.836	22.961	28.561
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	16.169	25.653	16.129	12.214	9.374	11.052	13.047	4.507	10.411	13.574	11.769	14.170
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	54.390	63.233	78.182	53.344	42.028	47.797	48.880	45.975	40.673	40.535	46.018	44.135
Mes Año	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	jul-20	ago-20	sep-20	oct-20	nov-20	dic-20
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	26.773	39.845	37.904	21.230	22.124	29.897	24.888	27.775	25.546	26.331	22.686	31.505
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	13.320	22.863	20.113	7.675	12.856	7.200	12.374	15.733	12.955	13.188	10.120	17.990
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	48.802	66.592	69.558	45.646	38.288	98.803	40.557	64.168	43.977	54.415	39.898	45.103
Mes Año	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sep-21	oct-21	nov-21	dic-21
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	36.228	38.080	25.535	24.129	18.833	18.591	20.483	16.242				
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	16.310	13.346	12.690	9.557	7.263	2.838	7.683	5.743				
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	55.928	68.974	51.918	35.799	28.548	34.984	44.764	24.649				

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 8. Estación Sogamoso-Recreo valores de PM<sub>2.5</sub>, (Periodo 2019-2021)**

<b>VALORES PM2.5 ESTACIÓN SOGAMOSO-RECRO</b>												
Mes Año	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	16.424	25.178	26.254	18.058	11.369	11.388	12.172	11.438	15.073	12.460	15.373	16.846
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	8.963	14.992	15.455	4.673	6.927	5.567	5.502	6.940	8.752	6.581	6.527	8.121
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	37.432	41.976	51.040	33.843	19.011	20.596	21.114	17.266	34.423	20.115	34.188	29.069
Mes Año	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	jul-20	ago-20	sep-20	oct-20	nov-20	dic-20
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	15.570	22.892	28.373	13.272	11.702	12.711	11.108	10.596	13.527	11.982	15.942	15.444
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	10.073	13.965	18.007	5.401	6.130	4.853	6.053	4.735	8.869	5.901	8.371	8.549
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	27.110	35.065	45.147	29.538	23.234	27.763	18.826	24.022	18.928	20.058	26.416	23.860
Mes Año	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sep-21	oct-21	nov-21	dic-21
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	14.133	16.227	17.225	12.926	10.319	13.411	11.463	12.497				
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	5.442	9.521	5.639	5.502	5.900	7.410	5.347	6.524				
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	29.246	28.358	29.254	23.744	14.423	27.740	33.128	19.848				

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 9. Estación Sogamoso-Koica valores de PM<sub>2.5</sub>, (Periodo 2019-2021)**

<b>VALORES PM2.5 ESTACIÓN SOGAMOSO-KOICA</b>												
Mes Año	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	18.225	23.379	32.406	12.017	11.848	18.152	11.491	13.595	17.980	16.090	12.573	15.404
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	8.547	12.502	18.515	6.680	4.550	14.763	4.884	7.609	8.568	9.102	4.105	8.543
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	25.659	34.256	46.297	17.355	19.147	21.541	20.175	26.320	31.371	33.963	21.040	22.266
Mes Año	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	jul-20	ago-20	sep-20	oct-20	nov-20	dic-20
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	15.591	25.373	33.341	14.829	12.571	12.543	15.117	14.104	15.990	15.677	17.949	18.363
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	6.785	16.044	21.666	6.297	5.520	6.026	7.692	5.224	7.538	9.256	9.637	11.183
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	24.397	36.605	59.666	30.501	19.715	23.153	25.476	30.330	32.627	27.317	31.309	28.750
Mes Año	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sep-21	oct-21	nov-21	dic-21
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	18.496											
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	7.515											
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	27.264											

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 10. Estación NOBSA-Nazareth valores de PM<sub>2.5</sub>, (Periodo 2019-2021)**

<b>VALORES PM2.5 ESTACIÓN NOBSA-NAZARETH</b>												
Mes Año	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	14.994	22.756	22.922	16.271	11.012	10.717	12.351	11.680	13.525	11.014	13.549	14.859
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	8.925	13.603	14.013	5.259	5.896	7.449	6.113	7.615	6.448	6.209	8.239	10.046
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	34.622	35.675	43.846	34.991	17.671	16.786	20.956	18.696	19.810	19.198	23.831	21.959
Mes Año	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	jul-20	ago-20	sep-20	oct-20	nov-20	dic-20
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	17.843	18.346	26.371	13.366	10.072	10.690	9.444	9.996	11.594	11.339	14.047	15.538
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	15.946	12.528	15.830	6.558	4.844	2.694	6.258	4.173	7.237	6.971	8.164	10.513
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	19.739	26.970	45.120	28.109	15.557	28.007	14.862	17.478	18.391	18.623	21.364	23.687
Mes Año	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sep-21	oct-21	nov-21	dic-21
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	13.948	16.568	15.331	13.335	12.502	12.277	11.351	11.104				
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	7.546	11.121	6.657	6.090	5.648	4.278	4.498	6.020				
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	22.657	24.618	31.366	21.887	27.373	34.604	20.465	19.567				

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 11. Estación NOBSA-Bomberos valores de PM<sub>2.5</sub>, (Periodo 2019-2021)**

<b>VALORES PM2.5 ESTACIÓN NOBSA-BOMBEROS</b>												
Mes Año	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	25.313	30.266	30.354	21.895	19.500	19.015	20.659	19.702	19.619	17.707	20.987	20.270
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	11.059	19.086	11.976	8.577	6.233	7.374	10.427	3.138	10.840	8.146	3.730	8.770
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	45.554	47.979	57.379	41.944	34.131	40.957	42.272	40.225	33.105	38.264	36.358	41.290
Mes Año	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	jul-20	ago-20	sep-20	oct-20	nov-20	dic-20
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	31.553	27.598	14.482	16.971	24.121	19.653	21.821	19.268	20.882	16.914	24.265	28.519
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	15.499	14.233	4.408	9.689	4.467	8.940	11.539	9.045	9.880	6.912	12.555	10.701
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	58.927	54.738	32.552	27.127	67.965	34.350	55.643	37.164	49.702	29.783	36.865	46.130
Mes Año	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sep-21	oct-21	nov-21	dic-21
Val. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	30.542	32.772										
Val. Mínimo (µg/m <sup>3</sup> )	9.099	12.903										
Val. Máximo (µg/m <sup>3</sup> )	56.249	55.640										

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 12.** Promedio mensual de valores máximos de PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub>, (Periodo 2019-2021)

<b>PROMEDIO MENSUAL DE VALORES MÁXIMOS DE PM<sub>10</sub></b>												
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
HOSPITAL	68.667	68.542	77.458	69.292	58.833	55.333	56.565	60.565	59.500	70.750	80.958	70.875
P_UPTC	53.610	62.818	87.783	54.208	47.333	84.145	48.100	51.043	49.875	46.087	51.867	60.364
SOGAMOSO-MOVIL KOICA	57.934	64.533	84.696	55.778	42.417	42.543	46.642	62.669	49.746	53.942	45.338	47.752
SOGAMOSO-RECRO	59.007	63.282	80.046	56.917	46.337	82.721	55.568	50.446	66.253	50.828	55.522	52.109
SOGAMOSO-SENA	100.237	105.758	123.114	101.765	66.715	120.307	84.580	69.308	77.191	60.731	74.263	89.822
NOBSA-BOMBEROS	55.928	68.974	78.182	53.344	42.028	98.803	48.880	64.168	43.977	54.415	46.018	45.103
NOBSA-NAZARETH	64.257	86.737	79.862	87.722	47.740	82.991	61.338	53.356	53.348	46.692	73.559	64.998

<b>PROMEDIO MENSUAL DE VALORES MÁXIMOS DE PM<sub>2.5</sub></b>												
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
NOBSA-BOMBEROS	54.488	58.927	57.379	43.164	34.131	47.965	42.272	55.643	37.164	49.702	41.034	39.047
NOBSA-NAZARETH	34.622	35.675	45.120	34.991	27.373	34.604	20.956	19.567	19.810	19.198	23.831	23.687
SOGAMOSO-RECRO	37.432	41.976	51.040	33.843	23.234	27.763	33.128	24.022	34.423	20.115	34.188	29.069
SOGAMOSO-MOVIL KOICA	27.264	36.605	59.666	30.501	19.715	23.153	25.476	30.330	32.627	33.963	31.309	28.750

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 13.** Promedio mensual de valores promedios de PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub>, (Periodo 2019-2021)

<b>PROMEDIO MENSUAL DE VALORES PROMEDIOS DE PM<sub>10</sub></b>												
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
HOSPITAL	36.971	46.895	45.878	39.786	34.534	31.642	34.693	35.395	36.135	38.613	41.395	44.232
P_UPTC	36.158	40.996	41.153	30.327	26.112	26.765	25.117	25.395	26.918	25.937	27.563	37.370
SOGAMOSO-MOVIL KOICA	29.748	44.300	45.575	26.589	22.840	24.676	24.807	24.713	29.185	27.358	27.943	32.438
SOGAMOSO-RECRO	30.677	38.774	37.440	27.158	22.275	25.647	22.329	22.769	27.812	25.319	29.936	30.804
SOGAMOSO-SENA	51.896	64.142	61.204	44.904	38.073	40.764	38.838	37.353	45.049	37.425	46.039	51.542
NOBSA-BOMBEROS	31.905	39.306	34.453	24.817	21.980	24.182	23.514	23.033	25.664	25.584	22.823	30.033
NOBSA-NAZARETH	47.776	46.002	41.850	29.657	26.788	30.055	30.687	30.597	33.012	29.238	32.340	35.637

<b>PROMEDIO MENSUAL DE VALORES PROMEDIOS DE PM<sub>2.5</sub></b>												
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
NOBSA-BOMBEROS	24.701	30.787	30.241	18.189	18.236	21.568	20.156	20.762	19.268	20.251	17.310	22.626
NOBSA-NAZARETH	15.595	19.223	21.541	14.324	11.195	11.228	11.049	10.927	12.560	11.176	13.798	15.199
SOGAMOSO-RECRO	15.375	21.432	23.950	14.752	11.130	12.503	11.581	11.510	14.300	12.221	15.657	16.145
SOGAMOSO-MOVIL KOICA	17.437	24.376	32.874	13.423	12.209	15.347	13.304	13.849	16.985	15.884	15.261	16.884

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 14.** Promedio mensual de valores mínimos de PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub>, (Periodo 2019-2021)

<b>PROMEDIO MENSUAL DE VALORES MÍNIMOS DE PM<sub>10</sub></b>												
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
HOSPITAL	4.917	17.458	25.333	18.667	17.478	16.391	15.083	18.696	23.375	7.708	15.958	15.182
P_UPTC	15.389	24.873	15.349	11.434	8.594	10.272	12.267	3.727	9.631	12.794	10.989	18.000
SOGAMOSO-MOVIL KOICA	12.274	26.624	23.858	11.646	1.130	12.689	8.965	9.654	14.673	15.414	18.573	2.574
SOGAMOSO-RECREO	10.959	19.265	14.292	10.857	12.324	8.937	10.369	11.662	17.470	13.284	14.590	13.777
SOGAMOSO-SENA	21.491	35.758	29.031	17.503	20.541	12.363	17.026	20.428	21.361	8.308	24.406	24.472
NOBSA-BOMBEROS	13.320	13.346	12.690	7.675	7.263	2.838	7.683	4.507	10.411	13.188	10.120	14.170
NOBSA-NAZARETH	20.130	24.646	19.949	11.066	13.407	7.842	14.640	16.962	13.609	13.357	14.617	19.510

<b>PROMEDIO MENSUAL DE VALORES MÍNIMOS DE PM<sub>2.5</sub></b>												
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
NOBSA-BOMBEROS	8.770	9.099	8.478	4.408	6.233	4.467	8.940	3.138	9.045	7.378	6.912	3.730
NOBSA-NAZARETH	7.546	11.121	6.657	5.259	4.844	2.694	4.498	4.173	6.448	6.209	8.164	10.046
SOGAMOSO-RECREO	5.442	9.521	5.639	4.673	5.900	4.853	5.347	4.735	8.752	5.901	6.527	8.121
SOGAMOSO-MOVIL KOICA	6.785	12.502	18.515	6.297	4.550	6.026	4.884	5.224	7.538	9.102	4.105	8.543

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 – 2021

**Anexo 15.** Promedio anual de valores máximos PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub>.

<b>PROMEDIO ANUAL DE VALORES MAXIMOS DE PM<sub>10</sub></b>			
Estaciones	2019	2020	2021
HOSPITAL	7.708	4.917	17.792
P_UPTC	3.727	12.917	14.333
SOGAMOSO-KOICA	8.965	10.130	9.065
SOGAMOSO-RECREO	12.066	8.937	10.369
SOGAMOSO-SENA	4.673	4.735	5.347
NOBSA-BOMBEROS	4.507	7.200	2.838
NOBSA-NAZARETH	11.066	7.842	13.407

<b>PROMEDIO ANUAL DE VALORES MAXIMOS DE PM<sub>2.5</sub></b>			
Estaciones	2019	2020	2021
NOBSA-BOMBEROS	6.358	3.138	4.408
NOBSA-NAZARETH	5.259	2.694	4.278
SOGAMOSO-RECREO	3.727	12.917	14.333
SOGAMOSO-KOICA	12.066	8.937	10.369

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 16.** Promedio anual de valores promedios PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub>.

<b>PROMEDIO ANUAL DE VALORES PROMEDIOS DE PM<sub>10</sub></b>			
Estaciones	2019	2020	2021
HOSPITAL	37.231	37.974	42.723
P_UPTC	28.533	33.766	30.164
SOGAMOSO-KOICA	30.447	29.936	25.209
SOGAMOSO-RECREO	30.400	28.347	25.145
SOGAMOSO-SENA	15.958	15.142	13.407
NOBSA-BOMBEROS	28.698	27.861	24.418
NOBSA-NAZARETH	35.188	32.604	30.590

<b>PROMEDIO ANUAL DE VALORES PROMEDIOS DE PM<sub>2.5</sub></b>			
Estaciones	2019	2020	2021
NOBSA-BOMBEROS	22.131	22.343	21.332
NOBSA-NAZARETH	14.593	13.743	13.273
SOGAMOSO-RECREO	28.533	33.766	30.164
SOGAMOSO-KOICA	30.400	28.347	25.145

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

**Anexo 17.** Promedio anual de valores mínimos PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub>.

<b>PROMEDIO ANUAL DE VALORES MÍNIMOS DE PM<sub>10</sub></b>			
Estaciones	2019	2020	2021
HOSPITAL	64.091	80.958	77.458
P_UPTC	77.402	87.783	56.750
SOGAMOSO-KOICA	78.925	84.696	51.272
SOGAMOSO-RECREO	76.524	79.200	53.131
SOGAMOSO-SENA	51.040	45.147	33.128
NOBSA-BOMBEROS	78.182	98.803	68.974
NOBSA-NAZARETH	87.722	86.737	62.550

<b>PROMEDIO ANUAL DE VALORES MÍNIMOS DE PM<sub>2.5</sub></b>			
Estaciones	2019	2020	2021
NOBSA-BOMBEROS	64.488	57.379	87.965
NOBSA-NAZARETH	43.846	45.120	34.604
SOGAMOSO-RECREO	77.402	87.783	56.750
SOGAMOSO-KOICA	76.524	79.200	53.131

Fuente: Adaptado por los autores de los valores de las estaciones de SISAIRE 2019 - 2021.

## 9. REFERENCIAS

- Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado Pm10 y Pm2,5 En Lima Metropolitana, Sergio A. Pacsi Valdivia, sept 2016
- Bedoya, J. y Martínez, E. (2009). calidad del aire en el valle de aburrá Antioquia Colombia., Dyna, Vol. 76, Núm. 158, pp. 7-15. Universidad Nacional de Colombia
- Benavides, H. (2003). Pronóstico de la concentración de material particulado por chimeneas industriales en Bogotá. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
- Cely Pulido, J. W., Rangel Sotter, A. P., Sánchez Ipia, A. H., & Siabato Vaca, W. L. (2002). Geoestadística aplicada a estudios de contaminación ambiental. Ingeniería, 7(2), 31-38.
- Corporación Autónoma Regional de Boyaca - CORPOBOYA. (2020). INFORME DE OPERACIÓN DEL SISTEMA ESPECIAL DE VIGILANCIA DE CALIDAD DE AIRE EN LA ZONA CARBONÍFERA DEL DEPARTAMENTO DEL CESAR. Cesar.
- Echeverri, C. y Maya, G. 2005. Relación entre PM2.5 y PM10 y Respirables (PM 10), en la ciudad de Medellín. En: Revista de ingeniería Universidad de Medellín. No 15, Medellín
- European Environment Agency. (2019). *Air quality in Europe — 2019 report*. European Union: Reproduction is authorised provided the source is acknowledged.
- A., P. V. (2016). *Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado Pm10 y Pm2,5 En Lima Metropolitana*. Lima .
- Arciniégas Suárez, C. A. (2011). *DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO: PARTÍCULAS SUPENDIDAS TOTALES Y FRACCIÓN RESPIRABLE PM10*. Manizales: Luna Azul .
- CONPES. (2018). *Política para el mejoramiento de la calidad del aire*. Bogotá.
- Fan, S., Heinrich, J., Bloom, M., Zhao, T., Shi, T., Feng, W., & Dong, G. (2019). *Ambient air pollution and depression: A systematic review with meta-analysis up to 2019*. Science of The Total Environment,.
- Fernández Collado, C., Baptista Lucio, P., & Hernandez Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico: McGraw Hill.
- Franco, J. F. (2012). *Contaminación atmosférica en centros urbanos. Desafíos para lograr su sostenibilidad: caso de estudio Bogotá*. Bogotá: EAN.
- Gaitán, M., Cancino, J., & Behrentz, E. (2007). *Análisis del estado de la calidad del aire*. Bogotá: Revista de ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- García, F., Agudelo, R., & Jiménez, K. (2006). *Distribución espacial y temporal de la concentración de material particulado en Santa Marta, Colombia*. Medellín : Revista Facultad Nacional de Salud Pública.
- García, M., Ramírez, H., Ulloa, H., Arias, S., & Pérez, A. (2012). *LAS INVERSIONES TÉRMICAS Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA*. Guadalajara: Investigaciones geográficas, nº 58.
- GEASIG. (12 de Abril de 2019). *Geasig*. Obtenido de <https://www.geasig.com/isolineas-con-arccgis/>
- Gobierno Nacional de Colombia . (1993). *Ley 99 de 1993*. Colombia.
- IDEAM. (2010). *Concentración promedio anual de material particulado menor a 10 micras en el aire (PM10)*. Bogotá.
- IDEAM. (2016). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia*. Bogotá.
- Meng Monk, K., & Hoi, K. I. (2005). *Effects of meteorological conditions on PM10 concentrations - A study in Macau*. China: Environmental Monitoring and Assessment.
- Ministerio de ambiente. (2012). *Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental*. Bogotá.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución No. 2254 de 01 de noviembre de 2017 por la cual se adopta la norma de calidad de aire ambiente y se dictan otras disposiciones*. Bogotá.

- MINISTERIO DE AMBIENTE, V. Y. (2008). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. Bogotá: FONADE 2062438.
- MINISTERIO DE AMBIENTE, V. Y. (2010). *Resolución No. 610 del 24 de marzo de 2010 por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006*. Bogotá.
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO. (s.f.).
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo. (2010). *Política de prevención y control de la contaminación del aire*. Bogotá.
- OMS. (2018). *Calidad del aire y salud*.
- Planeación Gobernación de Boyacá. (2021). *Generalidades del departamento de Boyacá*. Tunja.
- Rodrigues, P., Pinheiro, S., Junger, W., Ignotti, E., & Hacon, S. (2017). *Climatic variability and morbidity and mortality associated with particulate matter*. *Revista de saude publica*.
- Strauss, W., & Mainwaring, S. (2011). *Contaminacion del aire: causas, efectos y soluciones*. Mexico: Trillas.
- Tyler, N., Acevedo, J., Bocarejo, J., & Velásquez, J. (2013). *Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia*. Bogotá.
- Unal, Y., Toros, H., Deniz, A., & Incecik, S. (2011). *Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM10 concentrations in Istanbul metropolitan area*. Istanbul, Turkey: Atmospheric Environment.
- Van der Wal, J. T., & Jansen, L. (2000). *How contribute emission of PM10 and meteorology to concentrations of fine particles in the Netherlands*. Holanda: Rijksinstituut voor Volksgezondheid.