



# **DIAGNÓSTICO DE LOS NIVELES DE PM10 Y PM 2.5 ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DEL CONFINAMIENTO POR COVID-19 PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C**

## **DIAGNOSIS OF PM10 AND PM 2.5 LEVELS BEFORE, DURING AND AFTER CONFINEMENT BY COVID-19 FOR THE CITY OF BOGOTA D.C**

María José Vásquez Cuellar  
3101570  
Ingeniera Ambiental y Sanitaria

Director trabajo de grado:  
Ing. Fredy Alberto Gutiérrez García  
MSc Gestión de la Información y Tecnologías Geoespaciales  
MSc in Geographic Information Science and Systems

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA  
JUNIO DE 2022  
BOGOTÁ D.C COLOMBIA**

# DIAGNÓSTICO DE LOS NIVELES DE PM10 Y PM 2.5 ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DEL CONFINAMIENTO POR COVID-19 PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C

## DIAGNOSIS OF PM10 AND PM 2.5 LEVELS BEFORE, DURING AND AFTER CONFINEMENT BY COVID-19 FOR THE CITY OF BOGOTA D.C

María José Vásquez Cuellar  
Ingeniera ambiental y Sanitaria, Universidad de la Salle  
[est.mariaj.vasquez@unimilitar.edu.co](mailto:est.mariaj.vasquez@unimilitar.edu.co)  
Bogotá, Colombia

### RESUMEN

El presente artículo presenta la evaluación del comportamiento y concentración del Material particulado menor o igual a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>) y Material particulado menor o igual a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>), durante el transcurso del confinamiento a causa del COVID-19, esto con el apoyo de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá – RMCAB, que se encuentra conformada por 20 estaciones, las cuales reportan datos actualizados cada hora sobre la calidad del aire en la ciudad. Para el desarrollo del estudio se consultaron los reportes y datos de monitoreo de cada una de estas estaciones durante el año 2020, analizando los trimestres del año, esto teniendo en cuenta el retorno gradual y progresivo de los ciudadanos a sus actividades regulares y el inicio de la reactivación económica. En los resultados se realiza la confrontación y variación entre los niveles de Material Particulado asociados a sus fuentes de emisión antes, durante el confinamiento y después de este, para contrastarlos con los valores de referencia determinados por las Autoridades Ambientales, para finalmente evaluar la distribución espacio temporal del material particulado en los diferentes periodos de tiempo, a través de mapas generados en el software ArcGIS.

**Palabras Clave:** Localidades, Material Particulado, Calidad del Aire, Emergencia Sanitaria.

### ABSTRACT

Through this article, the behavior and concentration of particulate material less than or equal to 2.5 micrometers (PM<sub>2.5</sub>) and particulate material less than or equal to 10 micrometers (PM<sub>10</sub>) will be evaluated, during the course of confinement due to COVID-19, through the Bogotá Air Quality Monitoring Network – RMCAB, which is made up of

20 stations, which report updated data every hour on air quality in the city. For the development of this application, the reports and monitoring data of each of these stations during the year 2020 will be consulted, analyzing each of the quarters of the year, this taking into account the gradual and progressive return of citizens to their homes. regular activities and the beginning of the economic reactivation. With the objective of carrying out the confrontation and variation between the levels of Particulate Material associated with its emission sources before, during the confinement and after it, to contrast them with the reference values determined by the Environmental Authorities. In addition to defining and evaluating the distribution of the temporal space of the particulate material in the different periods of time, through maps generated through the ArcGIS software.

**Keywords:** Localities, Particulate Matter, Air Quality, Sanitary Emergency.

## INTRODUCCIÓN

Los factores climáticos y la emisión de sustancias a través de fuentes fijas y móviles, siendo estas últimas una fuente importante de emisión de contaminantes, contribuyen al deterioro de la calidad del aire y la contaminación atmosférica, dando origen a la formación del Material Particulado, entre muchas otras repercusiones para el ambiente y la salud que se dan cuando hay una variación o cambio en la composición química de la atmósfera.

El origen del Material Particulado puede ser de tipo natural o antropogénico, tal como lo describen Echeverri y Maya en su investigación [1]:

[...] Las partículas provienen de procesos de combustión, actividades industriales o fuentes naturales. También se originan como resultado de la oxidación de contaminantes gaseosos en la atmósfera y su reacción con vapor de agua. Tanto las fuentes naturales como las antropogénicas emiten partículas a la atmósfera (p.2)

Es así, como partiendo de estas generalidades se realiza un pequeño estudio de los antecedentes de este importante contaminante.

Según el artículo publicado por M. A. Leiva y R. Morales [2], un acercamiento a lo que hoy se define como Material particulado se remonta hacia el año 1840 donde se empezó a estudiar El ozono que tal como lo definen en su obra:

[...] es un compuesto químico constituido por tres átomos de oxígeno, y por tanto, un alótropo del oxígeno... De ahí que el ozono se constituye en un componente fundamental de los procesos de oxidación de especies orgánicas e inorgánicas de la atmósfera, que finalmente dan cuenta de la formación de *aerosoles* de tipo secundario, constituyentes base de las *partículas finas del aire*.

El Material Particulado (PM) se ha definido como uno de los contaminantes atmosféricos más comunes y además de más relevancia teniendo en cuenta que se clasifica como un contaminante criterio y los efectos que estos tienen sobre la salud, este contaminante es definido como “un conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera” E. Mészáros [3]

Teniendo en cuenta que esta mezcla de compuestos es de gran interés por los efectos que causan sobre la salud, tal como se mencionó anteriormente, es importante señalar una de las formas de clasificación de las mismas, que corresponde a la categorización según su tamaño; por lo que las partículas finas son las de diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5  $\mu\text{m}$ , PM<sub>2,5</sub> y las partículas gruesas o inhalables son aquellas cuyo diámetro aerodinámico se centra alrededor de las 10 micras, PM<sub>10</sub>.

Según el protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire para Colombia en cuanto a los avances para el seguimiento de contaminantes atmosféricos expone lo siguiente: [4]

Desde el año 1967 se han realizado esfuerzos para controlar la contaminación del aire. En ese año se instalaron las primeras redes de monitoreo de calidad del aire. Sólo hasta 1973, se expidió la Ley 23, cuyo objetivo era “Prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, para defender la salud y el bienestar de todos los habitantes del territorio nacional” (p.18)

Posteriormente el MADS expide el decreto 948 de 1995 donde se encuentra el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire a partir del cual se realizan diferentes modificaciones desde el año 1995 hasta la actualidad.

Teniendo en cuenta la relevancia e importancia que adquiere el tema de la calidad del aire a causa de los efectos que tienen los contaminantes sobre los humanos y los ecosistemas se resaltan las siguientes investigaciones acercándose el siglo XXI:

Monitoreo de material particulado en emisiones [5], Diseño de Sistemas de Control de Emisiones de Material Particulado Fino en Procesos termoeléctricos [6] y Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias [7]

Se mencionan los anteriores artículos con el fin de dar una pequeña idea del interés existente por parte de diferentes países en relación a la investigación del Material particulado emitidos a la atmosfera con el fin de poder determinar a través del monitoreo sus niveles, composición y origen.

Adicional a lo anterior, tal como se menciona en el informe de, A. Peroza y D. Galarza “La Organización Mundial de la Salud (OMS) realizó un estudio de comparación de las distintas regiones en el mundo, concluyendo que Asia y Latinoamérica tienen concentraciones mayores de PM<sub>10</sub> que Europa y Norteamérica debiéndose principalmente a su crecimiento en producción industrial y el uso de combustibles de baja calidad” [8]

Además, también es importante al abordar este tema conocer que, tal como se citó en [9]

Las partículas inhalables pueden ser generadas tanto por fuentes móviles como estacionarias, de manera natural o antropogénica. Se asocian generalmente a la combustión no controlada, algunas están relacionadas con la desintegración mecánica de la materia o la re-suspensión de partículas en el ambiente. Esto incluye procesos de combustión en vehículos, principalmente aquellos que usan Diesel, industrias de fundición, pinturas, cerámica y plantas de energía (p.2)

Una vez conocidas y planteadas las principales razones por las que el MP debe ser analizado y vigilado, se hace relevante llevar a cabo una aplicación, que puede ser una herramienta fundamental para el análisis de Contaminantes Atmosféricos. La contaminación atmosférica urbana es un problema que se plantea de forma más o menos gradual en todas las grandes ciudades. Las principales causas de la contaminación urbana local son tres: las zonas industriales, calefacción y tráfico. En los tres casos el problema deriva de la utilización de combustibles fósiles, carbón o petróleo, como fuente de energía, pasando los residuos de la combustión a la atmósfera; es así como partiendo de esta premisa y teniendo en cuenta que durante la emergencia Sanitaria por COVID-19, la mayoría de estas causas pudieron verse detenidas en su desarrollo normal se hace relevante analizar por medio de Software GIS el impacto de la suspensión de actividades normales en la ciudad y población y como esto se vio reflejado en la concentración de este contaminante comparando valores de tendencia antes, durante y después del evento.

Dada la representatividad de Bogotá como capital del país, su epicentro industrial, su población y sistema de transporte, parte la necesidad de realizar un análisis que a partir de herramientas SIG permita examinar y visualizar el comportamiento de uno de los contaminantes con más efectos adversos sobre la salud en las diferentes localidades de Bogotá a través de la información recolectada por la RMCAB para el año 2020. El año 2020 resulta ser el periodo apropiado de estudio teniendo en cuenta las condiciones particulares que ocurrieron a causa de la emergencia sanitaria por COVID-19, donde es posible analizar el comportamiento y concentración del contaminante por trimestres, teniendo en cuenta el desarrollo y las medidas tomadas durante diferentes etapas de la pandemia para este año.

Es importante resaltar que Bogotá es atravesada por 36 avenidas, en las cuales la mayor parte del tiempo el flujo vehicular es alto por lo cual se circula a bajas velocidades y, por consiguiente, son una fuente importante de contaminantes por lo que se hace relevante realizar una comparación antes durante y después del Aislamiento Obligatorio Preventivo, para este contaminante teniendo en cuenta los cambios en la movilidad que trajo consigo la pandemia a causa de las restricciones y excepciones que se presentaron durante este periodo, lo que limitó el uso de vehículos particulares y públicos y detuvo varios sectores y empresas en la ciudad.

Adicionalmente, es importante resaltar que la población, las instituciones educativas, y los negocios son un factor importante que aporta significativamente al deterioro de la calidad del aire generando condiciones que facilitan la formación del Material

Particulado y que a causa del detenimiento de las actividades normales en la ciudad durante un periodo de tiempo del año 2020 pudo obtener variaciones significativas en el comportamiento del contaminante que serían de gran importancia analizar.

Con base a lo anterior se planteó como objetivo general de la aplicación que presenta este artículo, el establecer a través de la RMCAB el comportamiento de la concentración de PM 2.5 y PM 10 antes, durante y después del Aislamiento Obligatorio Preventivo, con el fin de establecer si los cambios en la dinámica poblacional para esta temporada de tiempo disminuyeron los valores de concentración del contaminante y si con esto hubo mejoras en la calidad del aire de la ciudad.

A nivel de objetivos específicos se buscó:

- Analizar los valores de concentración de material particulado PM2.5 y PM10, para posteriormente realizar la confrontación con los valores de referencia establecidos por las autoridades ambientales y centros de investigación.
- Identificar la relación entre el comportamiento del material particulado y las principales fuentes precursoras en Bogotá.
- Evaluar la distribución espacio temporal del material particulado mediante la generación de salidas graficas que permitan la visualización de dicho comportamiento en Bogotá, a partir del uso de herramientas del software ArcGIS.

## **1. MATERIALES Y MÉTODOS**

El desarrollo de la aplicación se basó principalmente en el enfoque analítico (cuantitativo) en el cual se aceptaron como reales los fenómenos que pudieron ser medidos objetivamente por medio de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de Bogotá a través de procedimientos de tipo estadístico.

### **Tipo de Investigación**

Los tipos de investigación empleados en el desarrollo de la investigación fueron:

- Exploratoria: ya que permite establecer una visión general de la concentración y comportamiento del Material Particulado en la zona de estudio. Dado que la Emergencia Sanitaria por COVID-19 es una problemática reciente y los estudios realizados sobre su impacto en el ambiente son escasos para este tema en específico, se considera como una de las primeras aproximaciones al tema que posteriormente servirá como punto de partida para nuevas investigaciones, motivo por el cual se seleccionó este tipo de investigación.
- Descriptiva: a partir de los resultados obtenidos se establecen las correlaciones existentes entre las medidas sanitarias adoptadas y la calidad del aire que se ve afectada con el origen del material particulado. Permitiendo establecer como vario su comportamiento y formación durante este periodo de tiempo

## Desarrollo Metodológico

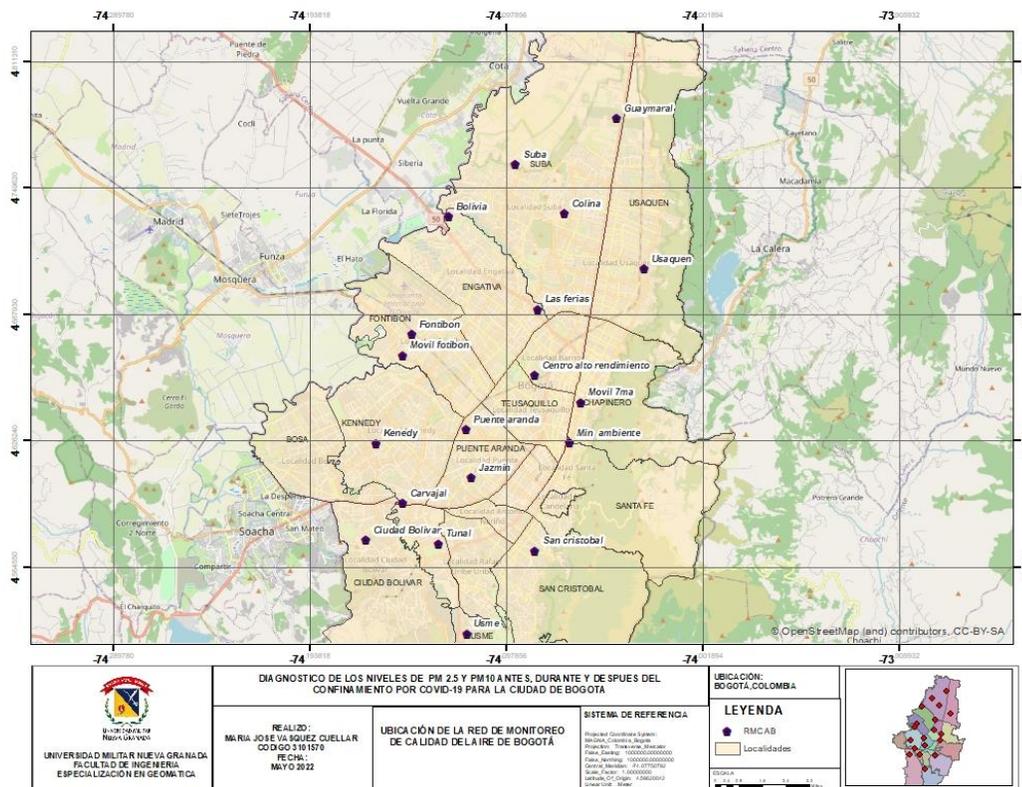
### Fase Preliminar

En esta fase se realizó una compilación y selección de datos que posteriormente serían utilizados para alimentar la aplicación.

- *Inventario y revisión de información que se recolecta en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire:*

Para esta etapa inicial se procedió a revisar la información disponible en relación a los reportes generados por cada estación que conforma la Red de Monitoreo de Calidad de Aire para Bogotá donde tal como se evidencia en la Figura 1, se encontró un total de 19 estaciones, que monitorean Material Particulado PM2.5 y PM10.

Figura 1. Distribución de la RMCAB



Fuente: Elaboración propia

Cada de las estaciones consignadas en la Figura 1 se encarga de vigilar las concentraciones de contaminantes criterio (material particulado de diámetro menor a 10 y 2.5 micras - PM10 y PM2.5, Ozono - O3, dióxido de azufre - SO2 y dióxido de nitrógeno - NO2 y monóxido de carbono – CO).

Es importante resaltar que las estaciones no monitorean de manera continua, por lo que existen brechas en el conjunto de datos ya sea por aspectos de seguridad, fallas

en la transmisión de datos, calibración, conexión, cortes de energía, etc. Por lo que para esta fase fue necesario validar en que estaciones se encontraba información disponible para el contaminante analizado, además de determinar si la cantidad de datos era representativa para realizar la aplicación.

- *Revisión Bibliográfica y de antecedentes sobre el Material Particulado y sus impactos:*

Se realizó una consulta acerca de los estudios previamente efectuados en el tema de análisis del Material Particulado para la ciudad de Bogotá, con el fin de estudiar los protocolos de muestreo de cada investigación, además, de obtener información y resultados representativos que pudieran aportar al estudio.

Sumado a lo anterior, se revisó bibliografía relacionada a los métodos y el análisis de interpolación que pueden ser ejecutados en software SIG, como una herramienta primordial a la hora de analizar gráfica y espacialmente la información obtenida. Conforme a las funciones disponibles se determinó que el método de interpolación más apropiado para la aplicación era el *Inverse Distance Weighting (IDW)*:

El IDW es un método matemático de interpolación que usa una función inversa de la distancia, parte del supuesto que las cosas que están más cerca son más parecidas, por lo tanto, tienen más peso e influencia sobre el punto a estimar, [10]. Matemáticamente se expresa como:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i)$$

En el cual  $Z(S_0)$  es el valor a predecir,  $N$  es el número de muestras alrededor del punto a predecir,  $\lambda_i$  son los pesos asignados a cada punto vecino y  $Z(S_i)$  son los valores medidos. Los pesos de los puntos vecinos están dados por:

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}}$$

En el cual  $d$  es la distancia entre el lugar de predicción ( $S_0$ ) y el lugar muestral ( $S_i$ );  $P$  es un factor de reducción de peso, cuyo valor se encuentra minimizando el error cuadrático medio o error de predicción.

Fase de Obtención de la información y Procesamiento

- *Criterios de selección*

Los criterios establecidos para la selección de los datos obtenidos por medio de la RMCAB en el área de estudio para el periodo seleccionado fueron:

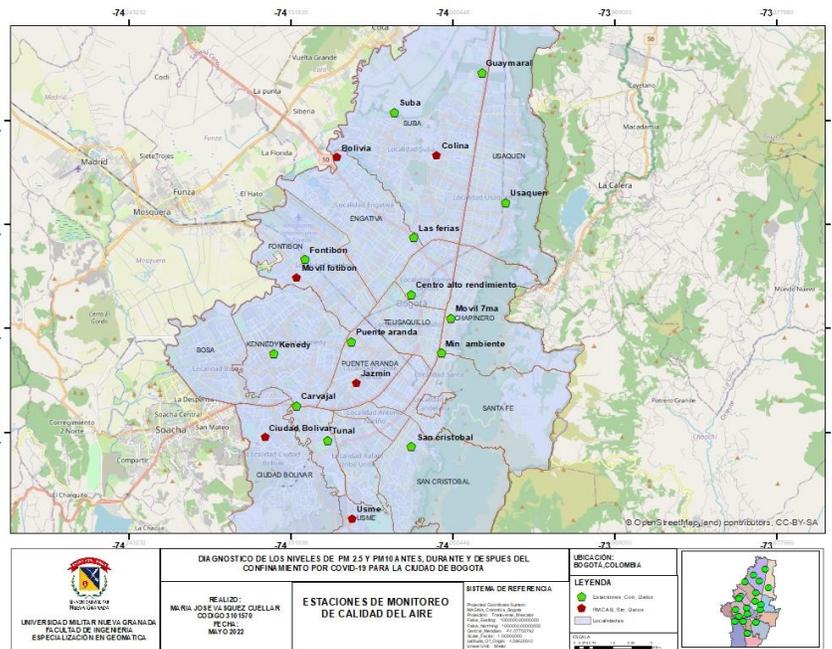
- La representatividad, que corresponde a que las estaciones seleccionadas estuvieran ubicadas de tal manera que cubrieran la totalidad del área de estudio, y de ser posible, se encontraran próximas a las vías de mayor flujo vehicular, dado

que son consideradas como las principales fuentes precursoras de dicho contaminante.

Se resalta según la información obtenida por medio de la Secretaria de Ambiente, que las estaciones ubicadas a lo largo de la ciudad de Bogotá no cubren las localidades de Ciudad Bolívar, Usme, Sumapaz, Rafael Uribe, Bosa y San Cristóbal. Siendo la zona Norte y Central de la ciudad la que tiene mayor presencia de estaciones de monitoreo, esta circunstancia hizo que las predicciones se realizaran solo para las zonas en las que se tenía una muestra de datos.

Del total de las 19 estaciones de la RMCAB se determinó que para el caso de PM2.5 solo 13 estaciones contenían datos representativos para la aplicación, por lo que se descartaron las estaciones de Colina, Bolivia, Móvil Fontibón, Jazmín, Ciudad Bolívar y Usme, por no registran datos capturados asociados al contaminante para el año en consideración, para PM10 se encontró un total de 12 estaciones con información asociada al contaminante, se descartaron las estaciones mencionadas anteriormente además de la estación de Usaquén que solo registró información para el año 2020 a partir del mes de octubre; en la Figura 2 se muestra el resumen de las estaciones con datos disponibles para Material Particulado durante el año 2020.

**Figura 2. Estaciones de la RMCAB con y sin dato disponibles para el año 2020**



Fuente: Elaboración propia

- Frecuencia de Medición: teniendo en cuenta el criterio de representatividad mencionado anteriormente y con las primicias encontradas para las estaciones con datos disponibles para PM10 Y PM2.5, se exportaron los reportes anuales de cada una de estas estaciones seleccionadas, teniendo en cuenta que los datos

registrados para cada día del mes no estaban totalmente completos ya que el sistema de vigilancia puede ser intermitente, tal como ya se mencionó, partiendo de esta información se siguió lo establecido para el Manejo Estadístico de Datos [4] y se procedió a comprobar que para cada uno de estos reportes el porcentaje de información perdida no igualara o superara el 25% de la muestra.

Tal como lo establece el Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la calidad del aire [4], se empleó el promedio aritmético con el fin de poder tratar los datos según lo establecido para el Material Particulado y así comprobar que la cantidad de estaciones con datos cumplieran con los criterios necesarios para la generación de los planos por medio del software GIS.

#### *Promedio aritmético*

Promedio de todos los  $n$  datos recolectados en determinado período de tiempo.

$$(C_{prom})_j = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad \text{Para } i=1,2, 3, \dots, n;$$

Donde:

- $(C_{prom})_j$ : concentración promedio del período de tiempo  $j$
  - $\sum_{i=1}^n C_i$  : Suma de los  $n$  datos de concentración del contaminante  $i$  obtenido en el período de tiempo  $j$
  - $n$ : cantidad de datos obtenidos en el período de tiempo  $j$
- 
- Métodos de Referencia: este criterio se tuvo en cuenta con el fin de evidenciar si durante el año 2020 el contaminante excedió los límites máximos permisibles para PM10 y PM2.5, además de permitir comparar este periodo de tiempo con otros eventos a lo largo de los meses del año y evidenciar si efectivamente el confinamiento tuvo un efecto positivo para la calidad del aire. Para esto es importante tener en cuenta que para monitorear los contaminantes criterio, con el fin de realizar la comparación con los límites máximos permisibles establecidos por la normativa nacional, se deben utilizar los métodos de referencia o métodos equivalentes publicados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, previa aprobación del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Para el caso del presente diagnostico se tomaron los Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio según lo establecido para PM10 y PM2.5 en la Resolución 610 de 2010 y Resolución 2254 de 2017.

**Tabla 1. Niveles Máximos permisibles de Contaminantes Criterio**

<b>Contaminante</b>	<b>Nivel Máximo Permissible (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Tiempo de Exposición</b>
<b>PST</b>	100	Anual
	300	24 horas
<b>PM10</b>	50	Anual
	100	24 horas
<b>PM2.5</b>	25	Anual
	50	24 horas
<b>SO2</b>	80	Anual
	250	24 horas
	750	3 horas
<b>NO2</b>	100	Anual
	150	24 horas
	200	1 hora
<b>O3</b>	80	8 horas
	120	1 hora
<b>CO</b>	10	8 horas
	40	1 hora

Fuente: Resolución 2254 de 2017

- *Procesamiento de la información*

Posterior a la selección de las estaciones y a fin de que la generación de los planos representase correctamente la realidad del comportamiento del PM2.5 y PM10, se procedió a realizar una compilación de cada uno de los reportes mensuales generados para el año 2020 por estación, obteniendo un total de 13 reportes para PM2.5 y 12 reportes para PM10.

Tal como se indicó en el apartado de los criterios de selección de datos y según lo establecido en el manual [4], para el correcto funcionamiento de la aplicación y la generación de las interpolaciones, el siguiente paso consistió en realizar un tratamiento estadístico a fin de obtener los respectivos resúmenes mensuales por estación para el año 2020, para esto se tomó el valor del promedio aritmético para cada mes en cada una de las estaciones.

Dichos reportes, donde se registran los valores mensuales de concentración para PM10 y PM2.5 se analizaron en los cuatro trimestres del año. La recolección de la información se realizó a través de la página web de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá en la sección reportes, donde es posible obtener un archivo en Excel por estación con el dato de la concentración de Material particulado en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Una vez obtenidos los resúmenes para cada estación por mes, el siguiente paso consistió en realizar un análisis del comportamiento del PM2.5 y PM10 para cada uno

de los cuatro trimestres del año, identificando así que la tendencia de cada uno de los cuatro trimestres se comportara similar a la de cada mes en el transcurso del año; una vez comprobada esta semejanza en el comportamiento de la concentración del contaminante se procedió a generar a través de la

herramienta IDW en el software ArcGIS cada una de las interpolaciones de manera independiente para PM2.5 y PM10, obteniendo así el comportamiento de la concentración de PM2.5 y PM10, en un total de cuatro salidas graficas que representa el total del año para cada uno, respectivamente.

Fase de análisis de la información

- *Análisis comparativo de los resultados:*

A partir de los datos obtenidos mediante la RMCAB se determinó el nivel de concentración de Material Particulado PM2.5 y PM10 en la ciudad de Bogotá y su correlación con las medidas sanitarias interpuestas para el año 2020 a consecuencia de la emergencia por COVID-19, lo cual permitió obtener las predicciones a lo largo de las localidades con estaciones de monitoreo y datos representativos. También se compararon los datos obtenidos para este periodo de tiempo con los informes anuales de Calidad del Aire de Bogotá, con el fin de determinar si efectivamente los cambios en la dinámica poblacional favorecieron a la disminución y formación del contaminante comparado respecto a otros años. Finalmente, se confrontaron dichas concentraciones con los valores de referencia establecidos por las autoridades ambientales, tal como se mencionó en el apartado de *Métodos de Referencia*.

- *Análisis final y presentación de resultados:*

Para la presentación final de los resultados obtenidos y con apoyo del SIG, se realizaron mapas de distribución espacio-temporal con los valores promedio para cada trimestre del año con la concentración de PM10 y PM2.5 por estación, mediante el uso de la herramienta IDW del software ArcGIS. Además, se constituyeron diferentes gráficos con el fin de presentar la tendencia del contaminante en el tiempo o las relaciones entre los datos utilizados.

## **2. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

A fin de analizar el comportamiento del Material particulado PM2.5 de manera más detallada durante el año 2020 se presenta la figura 3, que permite analizar, que las concentraciones más altas corresponde a la estación de Carvajal durante todo el año hacia el suroccidente de la ciudad, mientras que la concentración anual más baja se localizó en San Cristóbal, en la zona suroriente de la ciudad.

Se puede observar que durante el mes de enero las estaciones que sobrepasaban el máximo permisible corresponden a Carvajal y Kennedy, mientras que

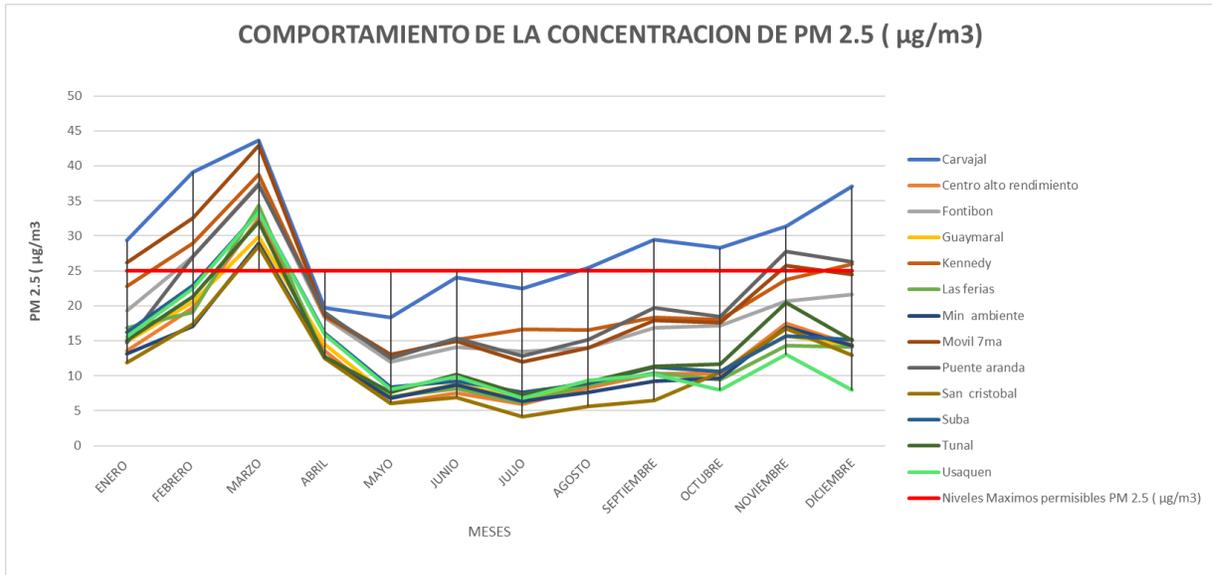
aproximadamente a partir de mediados de enero empieza a subir la concentración del contaminante en otras zonas de la ciudad, haciendo que estaciones como Fontibón y puente Aranda se sumen a las zonas que sobrepasan los niveles máximos permisibles; este comportamiento se puede atribuir al hecho de que una vez inició el año 2020 todos los ciudadanos retomaron sus actividades laborales o estudiantiles hacia mitad/finales del mes de enero razón por la cual la concentración del PM2.5 se vio en aumento hasta llegar a un pico en el mes de marzo, donde ninguna estación cumplió con la normatividad, sin embargo hacia la llegada del mes de abril y justo cuando se decreta el aislamiento preventivo obligatorio (20 de marzo) se puede observar como la concentración del contaminante cae, incluso para la estación de Carvajal, que según el informe anual de calidad del aire 2020 para la RMCAB, en el comportamiento histórico del PM2.5, es la estación que excede los límites permisibles desde el año 2017.

Tal como se observa en la Figura 3 la concentración del PM2.5, se mantuvo por debajo de la norma en todas las estaciones hasta el mes de agosto, donde se destaca que del 20 de marzo se extendió el aislamiento preventivo obligatorio hasta el 26 de abril, posterior a esto, el 27 de abril, se informó que se mantendría el principio de aislamiento preventivo obligatorio hasta el 31 de mayo de 2020, sin embargo para esta época algunas actividades empiezan a ser exceptuadas. Es así como desde el 31 de mayo hasta el 30 de agosto se mantuvo el aislamiento preventivo obligatorio, pero para Bogotá D.C la Alcaldía Mayor siguió implementando la cuarentena por localidades; posterior al 30 de agosto la reapertura de sectores fue paulatina, en julio empiezan los planes pilotos de reaperturas de restaurantes además que se permite la recuperación de vida productiva y apertura de comercio.

Se hace importante realizar la línea del tiempo mencionada anteriormente para comprender como se comportó el contaminante a medida que avanzaron las acciones para la prevención por la emergencia sanitaria y que, según lo observado en la gráfica, representa de manera lógica el comportamiento del contaminante versus las acciones tomadas.

Retomando en el mes de agosto, la única estación que sobrepasó los límites permisibles fue Carvajal, mientras que el resto de estaciones se comportaron sin mayor irregularidad en la concentración hasta el mes de octubre, donde las estaciones de Puente Aranda, Kennedy y Móvil 7ma tuvieron un nuevo pico en la concentración. Es de resaltar que para esta época se podía transitar de manera libre dentro de ciertos horarios y en algunas zonas establecidas por la alcaldía por lo que puede presumirse que esto originó el cambio en estas zonas, mientras que el resto de estaciones presentaron un ligero aumento en la concentración del contaminante, sin embargo, no excedieron la norma.

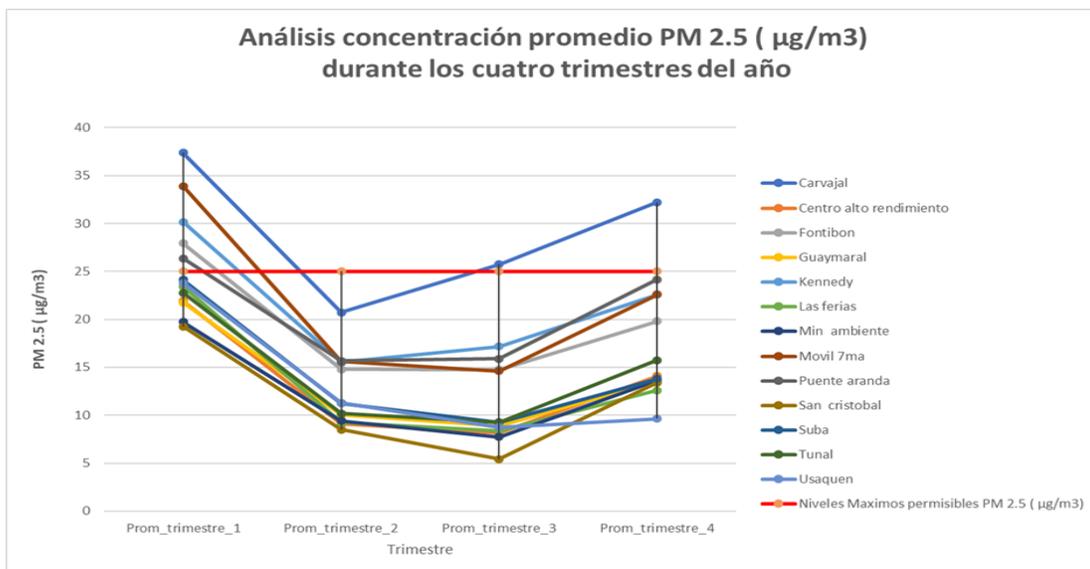
**Figura 3. Comportamiento de la concentración de PM<sub>2.5</sub> durante el año 2020**



Fuente: RMCAB, 2020.

La figura 4 presenta a lo largo del tiempo el comportamiento del contaminante PM<sub>2.5</sub>, esta vez el análisis se realiza con el promedio de la concentración del contaminante para cada uno de los cuatro trimestres del año por estación. En general el comportamiento del PM<sub>2.5</sub> a lo largo de los trimestres (a pesar de que es un promedio de los valores obtenidos para cada triada de meses que componen el año) tiene un comportamiento muy similar al observado en la Figura 3, dando como resultado por estación que los trimestres dos (abril, mayo y junio) y tres (julio, agosto y septiembre) obtuvieron un comportamiento de la concentración menor al de los otros trimestres.

**Figura 4. Concentración promedio de PM<sub>2.5</sub> durante los cuatro trimestres del año**



Fuente: RMCAB, 2020.

## Distribución espacio temporal del PM2.5 para la ciudad de Bogotá

En la figura 5 se presenta el resultado de la aplicación a través del uso de las herramientas SIG, gráficamente se muestra el resultado de la interpolación para cada uno de los cuatro trimestres de año, analizando el comportamiento del PM2.5 alrededor de las 13 estaciones con datos disponibles para la ciudad de Bogotá durante el año 2020.

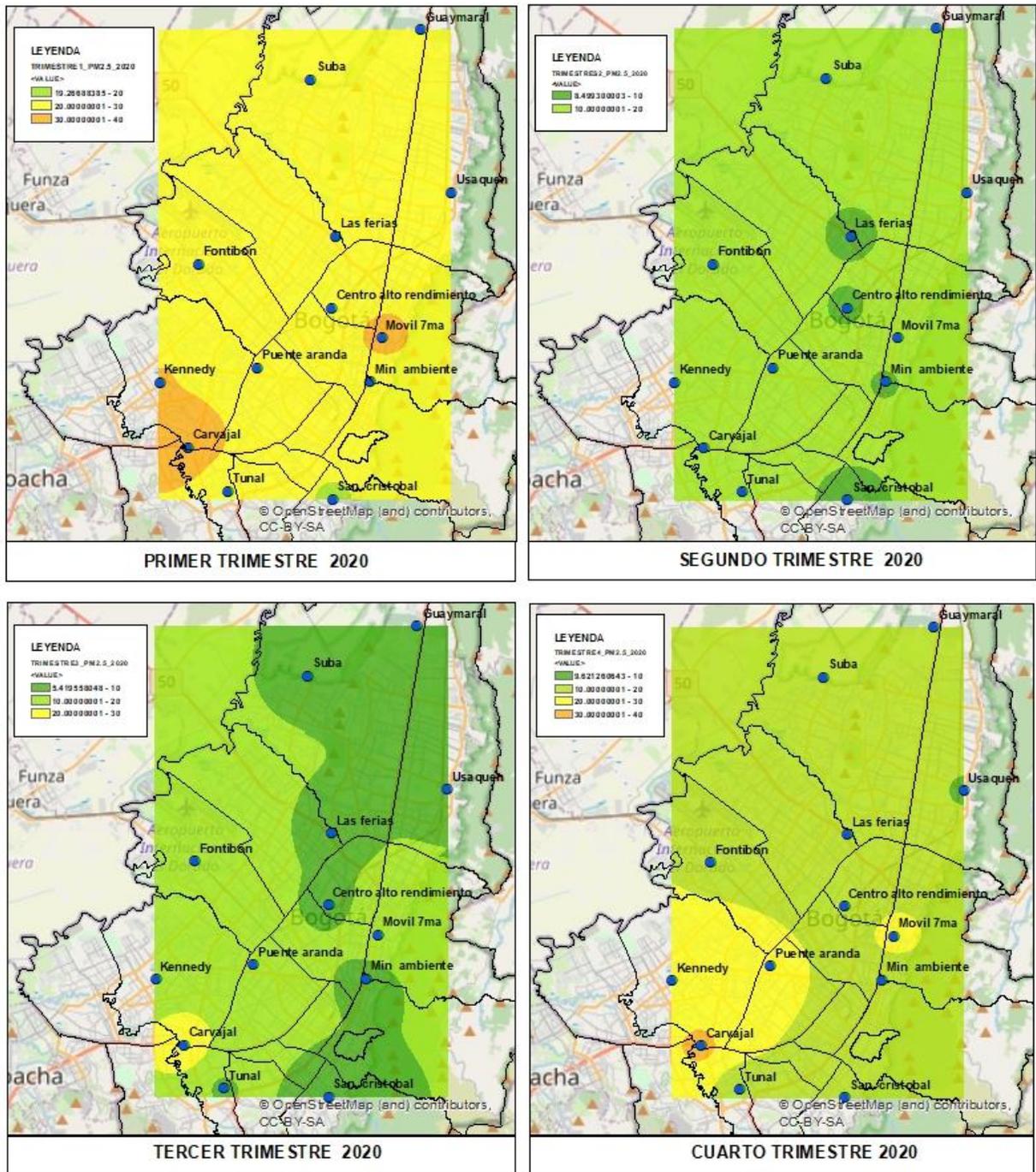
Para el primer trimestre del año se obtienen valores de concentración entre 19  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , estos valores se distribuyen a lo largo de las localidades donde su distribución espacial muestra que las concentraciones más altas se encuentran en las Localidades de Kennedy y Chapinero.

En el segundo trimestre del año la disminución de la concentración del contaminante se hace notoria y se encuentran valores de concentración entre 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , siendo las estaciones de Las Ferias, Centro de alto rendimiento, Min ambiente y San Cristóbal las zonas con menor contaminación, para este trimestre del año es importante mencionar que la movilidad de vehículos particulares estaba restringida, el servicio de transporte público no estaba en total funcionamiento y las actividades laborales estaban detenidas en varios sectores debido al Aislamiento Obligatorio en el que se encontraba la Ciudad de Bogotá, razón por la cual se atribuye la disminución del contaminante.

El tercer trimestre del año 2020 evidencia como los niveles de concentración siguen disminuyendo de manera significativa en comparación al segundo trimestre, las localidades de Suba, Usaquén, Engativá, Barrios Unidos, Candelaria, Santa Fe y Tunal tienen concentraciones mínimas que van desde 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El único valor atípico respecto al comportamiento que ha tenido el contaminante durante estos dos trimestres se evidencia en la localidad de Kennedy en la estación Carvajal, esto podría atribuirse a que es una zona con gran cantidad de industrias, movilidad de vehículos de carga y su cercanía a la autopista sur, donde además, para el tercer trimestre del año, ya empezaba la reapertura del sector manufacturero y de construcción.

Finalmente, para el cuarto trimestre del año y conforme a lo mencionado anteriormente en cuanto al cambio y flexibilización de las medidas en las acciones para la prevención del COVID-19, además del fin del aislamiento preventivo obligatorio, desde el 30 de agosto del 2020, es posible observar que la concentración del contaminante tuvo un aumento en las mismas localidades que presentaban las mayores concentraciones en el primer trimestre, antes de que ocurriera el aislamiento preventivo obligatorio, sin embargo a pesar de que en estas zonas la concentración aumentó en comparación al segundo y tercer trimestre, el panorama general demuestra que la concentración del contaminante siguió siendo mejor que durante el primer trimestre del año.

Figura 5. Mapa del comportamiento del PM<sub>2.5</sub> durante los cuatro trimestres del año 2020



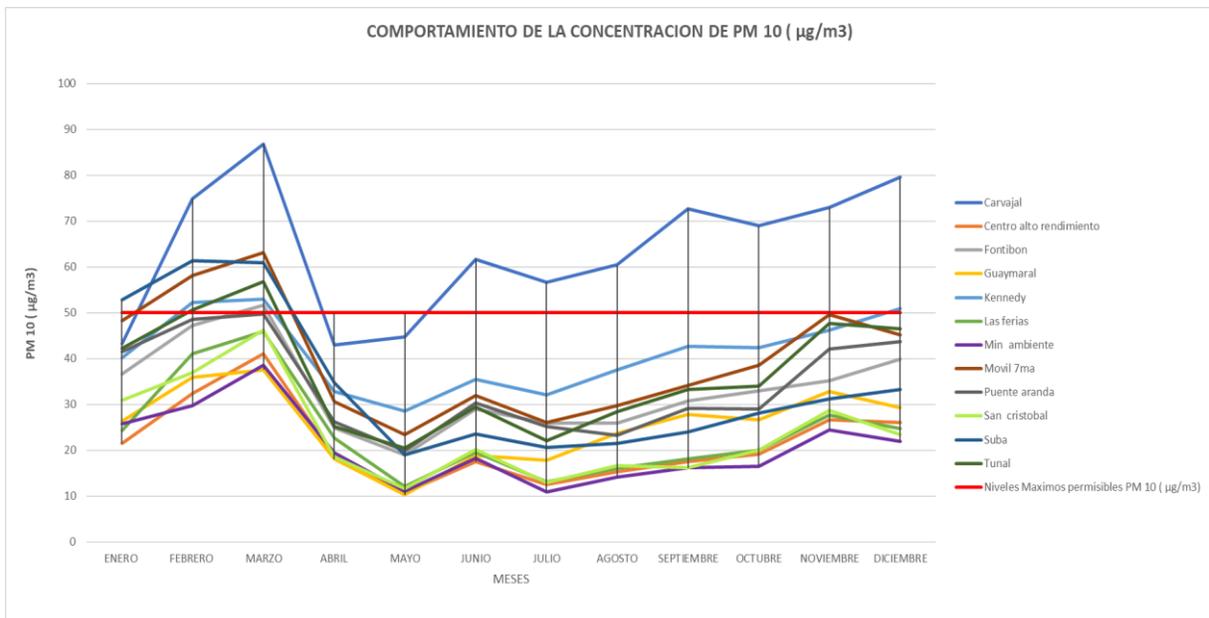
 <p>UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA FACULTAD DE INGENIERIA ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA</p>	<b>DIAGNOSTICO DE LOS NIVELES DE PM<sub>2.5</sub> ANTES, DURANTE Y DEPUES DEL CONFINAMIENTO POR COVID-19 PARA LA CIUDAD DE BOGOTA</b>		
	REALIZO: MARIA JOSE VA SQUEZ CUELLAR CODIGO 3101570 FECHA: MAYO 2022	UBICACION: BOGOTÁ, COLOMBIA ESCALA 0 0.75 1.5 3 4.5 8 Kilos	

Fuente: Elaboración propia

A fin de analizar el comportamiento del Material particulado PM10 de manera más detallada durante el año 2020 se presenta la figura 6, donde es posible identificar como las concentraciones más altas durante todo el año corresponden a la estación de Carvajal ubicada hacia el suroccidente de la ciudad, mientras que la concentración anual más baja se localizó en Min. Ambiente.

Teniendo en cuenta las particularidades ya mencionadas para PM2.5 y a fin de no volver reiterativo el análisis y discusión de los resultados, fue posible evidenciar que para PM10, el comportamiento fue muy similar al de PM2.5 a lo largo del año, esto teniendo en cuenta de que se trata de un mismo contaminante, pero su diferencia se basa en su diámetro aerodinámico. Algo importante a resaltar en cuanto al PM10 es que sus niveles de concentración son mucho más altos que los del PM2.5, esto se atribuye a la comparación de tamaño de las partículas, teniendo en cuenta que estas son consideradas como las partículas gruesas que se asocian generalmente a procesos de combustión en vehículos, industrias de fundición, pinturas, cerámica y plantas de energía.

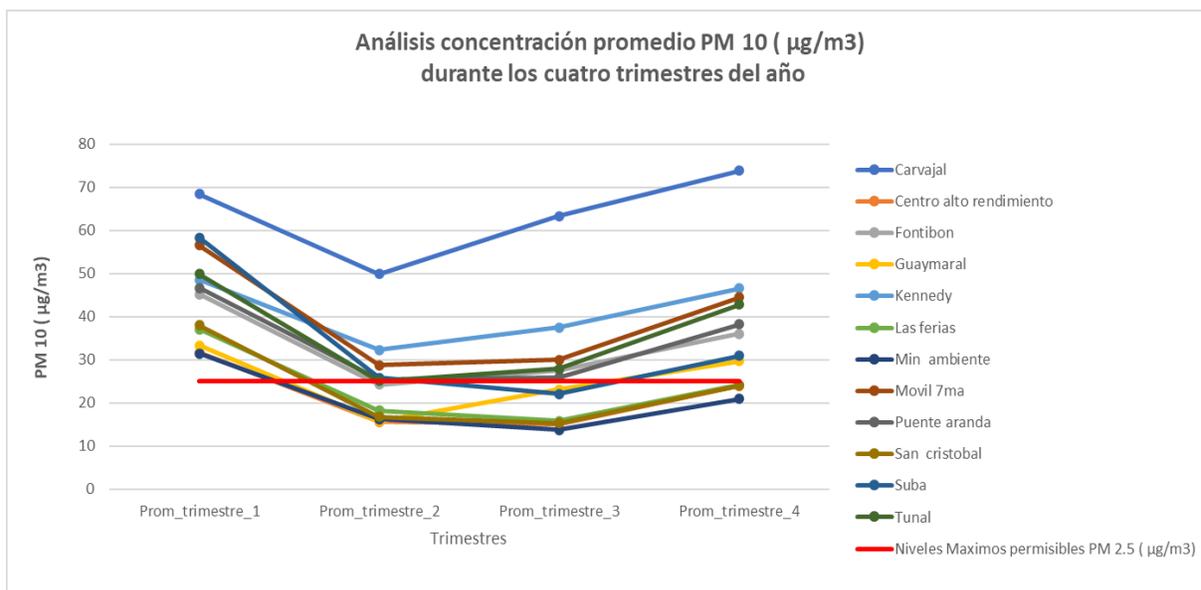
**Figura 6. Comportamiento de la concentración de PM<sub>10</sub> durante el año 2020**



Fuente: RMCAB,2020.

La Figura 7 representa a lo largo del tiempo como se comportó el contaminante PM10; esta vez el análisis se realiza con el promedio de la concentración del contaminante para cada uno de los cuatro trimestres del año por estación. En general el comportamiento del PM10 a lo largo de los trimestres (a pesar de que es un promedio de los valores obtenidos para cada triada de meses que componen el año) tiene un comportamiento muy similar al observado en la Figura 6, dando como resultado por estación que los trimestres dos (abril, mayo y junio) y tres (julio, agosto y septiembre) tuvieron un comportamiento de la concentración menor al de los otros trimestres.

**Figura 7. Concentración promedio de PM<sub>10</sub> durante los cuatro trimestres del año**



Fuente: RMCAB,2020

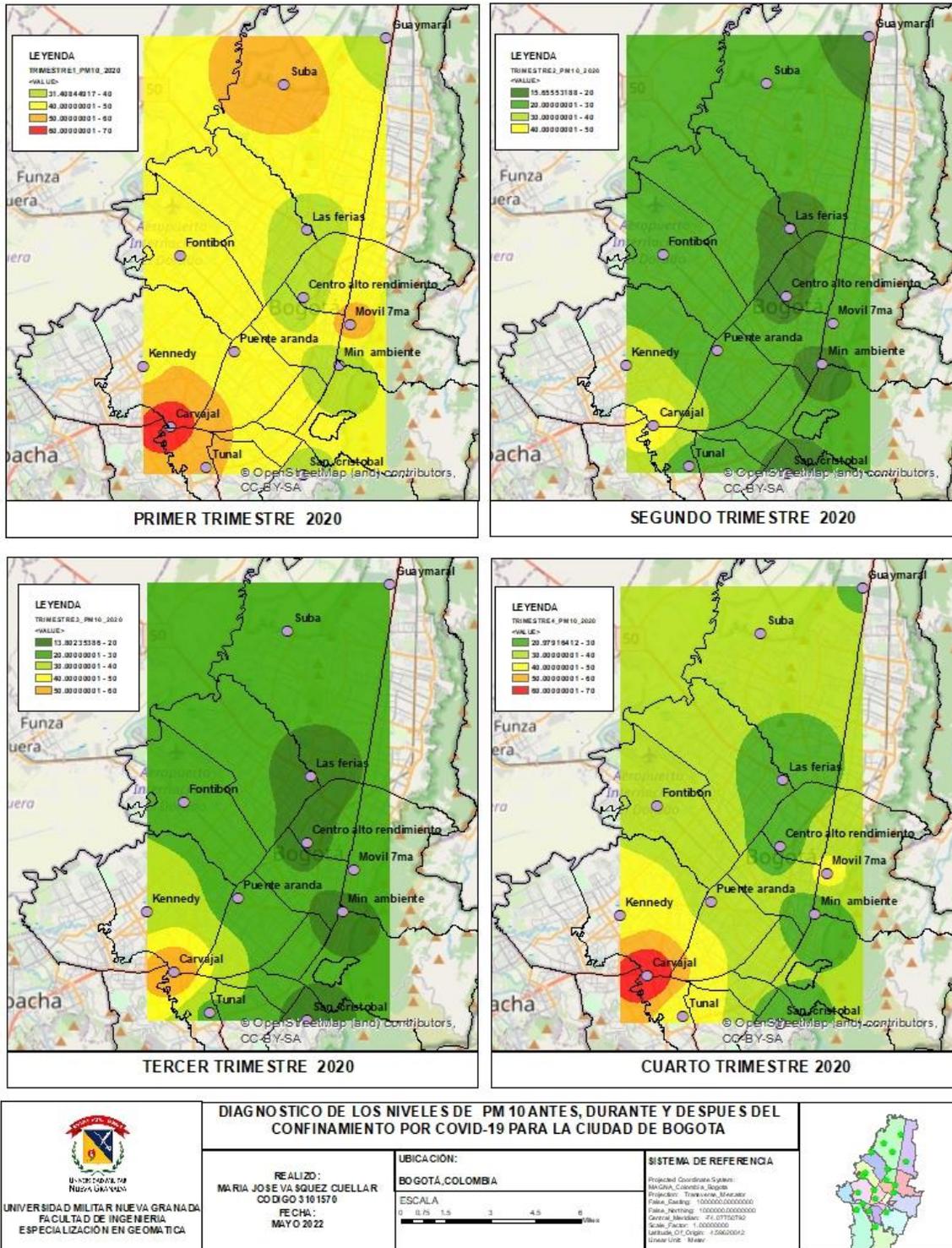
### Distribución espacio temporal del PM10 para la ciudad de Bogotá

En la figura 8 se presenta el resultado de la aplicación a través del uso de las herramientas SIG, gráficamente se muestra el resultado de la interpolación para cada uno de los cuatro trimestres de año, analizando el comportamiento del PM10 alrededor de las 12 estaciones con datos disponibles para la ciudad de Bogotá durante el año 2020.

Para el primer trimestre del año se obtienen valores de concentración entre 31 µg/m<sup>3</sup> hasta 70 µg/m<sup>3</sup>, estos valores se distribuyen a lo largo de las localidades donde su distribución espacial nos muestra que las concentraciones más altas se encuentran en las Localidades de Kennedy, Tunjuelito, Suba y Chapinero. Esto nos muestra que hacia lo zona sur de la ciudad el contaminante aumenta su concentración, además también puede atribuirse a la densidad poblacional que hay en localidades como Suba o Chapinero.

Para el segundo trimestre del año la disminución de la concentración del contaminante se hace notoria y se encuentran valores de concentración entre 15 µg/m<sup>3</sup> hasta 50 µg/m<sup>3</sup>, siendo las estaciones de Guaymaral, Las Ferias, Centro de alto rendimiento, Min ambiente y San Cristóbal las zonas con menor contaminación (Adicional a Guaymaral, estas corresponden a las mismas estaciones que para este trimestre en el análisis PM2.5, también presentaron los niveles más bajos), para este trimestre del año es importante mencionar que la movilidad de vehículos particulares estaba restringida, el servicio de transporte público no estaba en total funcionamiento y las actividades laborales estaban detenidas en varios sectores debido al Aislamiento Obligatorio en el que se encontraba la Ciudad de Bogotá, razón por la cual se atribuye la disminución del contaminante.

Figura 8. Mapa del comportamiento del PM<sub>10</sub> durante los cuatro trimestres del año 2020



Fuente: Elaboración propia

En el tercer trimestre del año 2020 se evidencia como los niveles de concentración se mantienen distribuidos a lo largo de las localidades de manera similar al segundo trimestre del año, las estaciones de Las Ferias, Centro alto Rendimiento, Ministerio de ambiente y San Cristóbal tienen concentraciones mínimas que van desde 13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  hasta 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El único valor atípico respecto al comportamiento que ha tenido el contaminante durante estos dos trimestres se evidencia para la localidad de Kennedy en la estación Carvajal, esto podría atribuirse a que es una zona con gran cantidad de industrias, movilidad de vehículos de carga y su cercanía a la autopista sur, donde además para el tercer trimestre del año ya empezaba la reapertura para el sector manufacturero y de construcción.

Finalmente, para el cuarto trimestre del año y a razón de lo mencionado anteriormente en cuanto al cambio y flexibilización de las medidas en las acciones para la prevención del COVID-19, además del fin del Aislamiento preventivo obligatorio, desde el 30 de agosto del 2020, es posible observar que la concentración del contaminante tuvo un aumento en las mismas localidades (Kennedy, Puente Aranda, Tunjuelito y Chapinero) que presentaban las mayores concentraciones en el primer trimestre del año, antes de que ocurriera el Aislamiento Preventivo Obligatorio exceptuando Suba, sin embargo, a pesar de que en estas zonas la concentración aumentó en comparación al segundo y tercer trimestre el panorama general demuestra que la concentración del contaminante siguió siendo mejor que durante el primer trimestre del año a excepción de la estación Carvajal.

### **3. CONCLUSIONES**

A través de la aplicación se logró determinar por medio de los datos recolectados en la RMCAB el comportamiento de la concentración de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> antes, durante y después del Aislamiento Obligatorio Preventivo, comprobando de manera espacial los cambios en la concentración del contaminante a causa de las restricciones en la dinámica poblacional para cada temporada de tiempo, con lo cual se comprobó la disminución de los valores de concentración del contaminante y en consecuencia hubo mejoras en la calidad del aire de la ciudad.

Se lograron comparar los valores de concentración de material particulado PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, para cada estación a lo largo del año 2020 contra los valores de referencia establecidos en la Resolución 2254 de 2017, donde se evidenciaron incumplimientos a la normatividad principalmente en las estaciones Carvajal, Kennedy, Móvil Séptima, Suba, Puente Aranda y Tunal. A pesar de que las acciones tomadas para la ciudad y el cese de todas las actividades al menos durante el segundo trimestre del año llevarían a pensar que los niveles máximos no serían sobrepasados, se evidenció que al igual que para otros años según lo reportado en el "Comportamiento temporal del Material particulado por estación" de los informes anuales de la RMCAM, estas estaciones siguen incumpliendo, por lo que se puede concluir que la zona industrial ubicada principalmente hacia el sur de la ciudad que es donde se registran los niveles

más altos de concentración, no detuvo sus actividades, sumado a que es una zona con alto tráfico de camiones de carga, teniendo en cuenta que se encuentra la autopista sur

La generación de las salidas graficas a partir de la aplicación para el análisis de la distribución del PM2.5 y PM10 a lo largo de las localidades (distribución espacial) es una herramienta fundamental a la hora de recopilar, almacenar, procesar y visualizar información geográfica que permite entender de manera más clara el comportamiento del material particulado a partir de variables espaciales, conllevando a tomar mejores decisiones a las autoridades que gestionan el control ambiental.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. A. E. L. y. G. J. M. Vasco, «Relación entre las partículas finas (PM 2.5) y respirables PM 10) en la ciudad de Medellín,» Revista Ingenierias Universidad de Medellin, vol. 7, nº 12, 2008.
- [2] M. A. Leiva y R. Morales, «CONTAMINACIÓN POR OZONO, DISTRIBUCIONES FOCALES Y TEMPORALES EN LA CIUDAD DE SANTIAGO,» Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, p. 216, 2006.
- [3] E. Mészáros, «Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry.,» Akadémiai Kiado, 1999.
- [4] M. D. A. V. Y. D. T. MADS, «PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE,» Bogotá, 2008.
- [5] J. Gracia y G. Swayne, «MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO EN EMISIONES,» Revista de Química, p. 1, 1997.
- [6] G. Quevedo, «Diseño se Sistemas de Control de Emisiones de Material Particulado Fino en Procesos termoeléctricos,» Universidad de Puerto Rico-Recinto Universitario de Mayaguez, p. 6, 1997.
- [7] Rodriguez.V, «Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias,» Universidad de Barcelona, p. 3, 2003.
- [8] A. Peroza y D. Galarza, «Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia,» Universidad de los Andes, 2013.
- [9] Canales.M, M. Quintero, T. Romero y R. Garcia, «Las Partículas Respirables PM10 y su Composición Química en la Zona Urbana y Rural de Mexicali, Baja California en México,» Mexico, 2014.
- [10] R. C. e. al, « “Sistemas y análisis de la información geográfica,» Alfaomega, 2008.
- [11] M. Lozano, «Localidad De Chapinero: Ficha Básica. Bogotá D.C.,» Secretaría de Cultura, Recreación y Deportes, 2008.