

# Evaluación de la concentración de $PM_{10}$ y sus posibles implicaciones a nivel salud en dos puntos de Bogotá D.C.

Assessment of  $PM_{10}$  Concentration and possible Health Implications at two Locations in Bogotá D.C.

Catalina Castro<sup>1</sup>  
Ana Isabel Cuitiva<sup>2</sup>  
Ashley Orbezo Mahecha<sup>3</sup>  
Juan David Torres García<sup>4</sup>  
Astrid Del Socorro Altamar Consuegra<sup>5</sup>  
Oscar Arnulfo Fajardo Montaña<sup>6</sup>  
Sandra Milena Mejía Hoy<sup>7</sup>

<sup>1,3,6,7</sup>Ingeniería Ambiental, Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad Central sede Centro, Bogotá D.C. Email: <sup>1</sup>ccastrc5@ucentral.edu.co, <sup>3</sup>aobergozom@ucentral.edu.co, <sup>6</sup>ofajardom@ucentral.edu.co, <sup>7</sup>smejiah@ucentral.edu.co

<sup>2,4,5</sup>Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Libre sede Bosque Popular, Bogotá D.C. Email: <sup>2</sup>anai-cuitivav@unilivre.edu.co, <sup>4</sup>juand-torrest@unilivre.edu.co, <sup>5</sup>astridd.altamar@unilivre.edu.co

 OPEN ACCESS



**Copyright:**© 2020 Ingenierías USBMed. La revista *Ingenierías USBMed* proporciona acceso abierto a todos sus contenidos bajo los términos de la licencia creative commons Atribución- no comercial- SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

**Tipo de Artículo:** Investigación científica y tecnológica.

**Recibido:** 11-05-2019.

**Revisado:** 18-02-2020.

**Aprobado:** 19-05-2020.

**Doi:** 10.21500/20275846.4400

**Referenciar así:** C. Castro et. al. "Evaluación de la concentración de  $PM_{10}$  y sus posibles implicaciones a nivel salud en dos puntos de Bogotá D.C.," *Ingenierías USBMed*, vol. 11, no. 1 pp. 31-43, 2020.

**Declaración de disponibilidad de datos:** Todos los datos relevantes están dentro del artículo, así como los archivos de soporte de información.

**Conflicto de intereses:** los autores han declarado que no existen conflicto de intereses.

**Editores:** Andrés Felipe Hernández. Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.

**Resumen.** En este trabajo se determinaron *in situ* las concentraciones de material particulado ( $PM_{10}$ ) en dos puntos de la ciudad de Bogotá, uno en la zona centro y el otro en la zona occidental de la misma durante un periodo de muestreo realizado en el segundo semestre del 2018 (30 días válidos de muestreo). Igualmente se evaluó la correlación de las variables meteorológicas (velocidad y dirección de viento, temperatura y precipitación) y la variable concentración de  $PM_{10}$ , de ambos puntos en cuestión mediante el software libre MiniTab. Los impactos sobre la salud de la población expuesta se determinaron empleando la metodología de relación dosis-respuesta para varios indicadores de morbilidad, así como para mortalidad. Se obtuvieron concentraciones promedio de  $21.43 \pm 0.76 \mu g/m^3$  y de  $33.58 \pm 0.51 \mu g/m^3$  de  $PM_{10}$  en la zona centro y zona occidental respectivamente. Contrario a la preconcepción que se tenía debido a la presencia del alto desarrollo urbanístico en el punto de la zona centro y a una amplia zona verde en el punto de la zona occidental, las concentraciones del contaminante fueron constantemente superiores al occidente de la ciudad. La dirección del viento predominante en la zona centro (Sur Este) que genera un arrastre del contaminante hacia la zona occidental de la ciudad y la peatonalización de corredores viales fueron argumentados como las causas plausibles de las diferencias. Un total de 112 y 14 muertes prematuras anuales por cada 100.000 habitantes debido a la exposición de  $PM_{10}$  fueron estimadas para la zona centro y occidental correspondientemente.

**Palabras Clave.** Material particulado, impactos sobre la salud, condiciones atmosféricas, dosis-respuesta; dirección de viento, arrastre del contaminante

**Abstract.** In this work, the concentrations of particulate matter ( $PM_{10}$ ) were determined *in situ* at two points in the city of Bogotá, one in the central zone and the other in the western zone during a sampling period carried out in the second semester of 2018 (30 valid sampling days). The correlation of meteorological variables (wind speed and direction, temperature and precipitation) and the  $PM_{10}$  concentration variable of both points in question were also evaluated using the free software MiniTab. The impacts on the health of the exposed population were determined using the dose-response relationship methodology for several morbidity indicators, as well as for mortality. Average concentrations of  $21.43 \pm 0.76 \mu g/m^3$  and  $33.58 \pm 0.51 \mu g/m^3$  of  $PM_{10}$  were obtained in the central and western zones respectively. Contrary to the preconception that was had due to the presence of the high urban development in the point of the center zone and to a wide green zone in the point of the western zone the concentrations of the pollutant were constantly superior to the west of the city. The predominant wind direction in the central zone (South East) that generates a drag of the pollutant towards the western zone of the city and the pedestrianization of road corridors were argued as the plausible causes of the differences. A total of 112 and 14 annual premature deaths per 100,000 inhabitants due to  $PM_{10}$  exposure were estimated for the central and western areas accordingly.

**Keywords.** Particulate matter, health impacts, weather conditions, dose-response, wind direction, pollutant drag.

## I. Introducción

La calidad del aire es uno de los factores más críticos a la hora de alcanzar una buena calidad de vida. La exposición a la contaminación atmosférica incrementa la mortalidad y la morbilidad de la población, además de acortar su expectativa de vida [1]. Por años, el material particulado ha sido ampliamente estudiado por su potencial impacto negativo en la salud humana, generando la necesidad de controlar y regular su concentración en la atmósfera y los contaminantes adheridos a la superficie de las partículas [2]. Reconocidos estudios internacionales [3] han decretado que la mala calidad del aire es una de las principales causas de morbilidad y mortalidad a nivel mundial, especialmente en países de bajos y medios ingresos como Colombia.

Bogotá es una de las ciudades más pobladas de Latinoamérica y aunque el nivel de contaminación que tiene es considerado como moderado, anualmente presenta tasas altas de excedencia en los estándares nacionales. El contaminante de mayor impacto negativo en el deterioro de la calidad del aire a nivel nacional y local es el material particulado por sus múltiples impactos en salud pública, deterioro de ecosistemas y materiales y pérdida de visibilidad [4].

Es por esto que el monitoreo de la calidad del aire debe ser constante y bien distribuido para evaluar puntualmente las tendencias de la contaminación, de forma que puedan tomarse las medidas correspondientes en su gestión. La red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá (RMCAB) cuenta actualmente con 13 estaciones distribuidas en toda la ciudad [5]. Dada la extensión del territorio capital, estos trece puntos de muestreo no son suficientes para un monitoreo puntual de las concentraciones reales de material particulado al que están expuestos los ciudadanos en diferentes sectores de la ciudad, en especial aquellos alejados de los puntos de muestreo de las estaciones. Por esto, se estimó la relevancia de la evaluación de la calidad del aire en diferentes puntos de la ciudad. Para el presente caso se tomaron puntos de muestreo en la Universidad Libre Sede Bosque Popular y Universidad Central Sede Centro, de forma que se pudiera evaluar las comparaciones en las concentraciones del  $PM_{10}$  encontrados con respecto a las estaciones más cercanas pertenecientes a la RMCAB. Se establecieron correlaciones estadísticas existentes de variables meteorológicas (determinadas por las estaciones de la RMCAB) como lo son: velocidad del viento, temperatura y precipitación con el fin de asociar la contribución de cada una con el comportamiento de la concentración de  $PM_{10}$ . Adicionalmente, para la visualización espacial de los datos de concentración de material particulado  $PM_{10}$  durante el tiempo de campaña en las zonas de muestreo y en las estaciones de la RMCAB se utilizó la herramienta Kriging (mediante el

software GIS ArcGIS) que es el método más empleado para este tipo de análisis visual [6, 7].

La metodología de análisis de dosis-respuesta ha sido ampliamente utilizada para valorar los impactos en salud pública causados por la contaminación atmosférica en múltiples estudios a escala global y nacional. El Banco Mundial ha realizado estudios de este tipo en diversos países como China y Colombia [8, 9]. En estos se han evaluado, como indicadores de interés, los casos de mortalidad prematura, visitas médicas o eventos cardiovasculares asociados a la exposición a las concentraciones promedio de los respectivos sitios evaluados. Un estudio realizado en Colombia en el 2012, basado en concentraciones del año 2009, determinó que uno de los problemas con más impacto económico asociados con la degradación del ambiente es la contaminación del aire en sus zonas urbanas y estimó 7.147 casos de muertes prematuras, 6.604 casos de bronquitis crónica y 162.573.864 síntomas respiratorios asociados al material particulado en las ciudades con más de 100.000 habitantes.

Más recientemente el Departamento Nacional de Planeación (DNP) realizó una evaluación similar [10] en donde pudo determinar que para el año 2015 aproximadamente 8 mil muertes estarían relacionadas con la baja calidad del aire a nivel nacional y adicionalmente se estarían presentando 51 millones de síntomas respiratorios relacionados. Se evidencia así la problemática en términos de salud pública generada por la exposición recurrente a un aire contaminado. Cabe resaltar que estos estudios se basan en reportes de concentración de material particulado entregados por los sistemas de monitoreo de calidad del aire instalados. Sin embargo, estas mediciones no reflejan las verdaderas concentraciones a las que está expuesto el ciudadano en sus movimientos cotidianos en las zonas urbanas junto a vías de circulación vehicular o zonas industriales.

De acuerdo con esta evidencia se propuso el estudio de caso de las concentraciones del material particulado  $PM_{10}$  determinadas in situ en dos sectores de Bogotá para ser comparadas con los reportes de la RMCAB en las estaciones más próximas a los puntos de muestreo y así verificar las diferencias que puedan existir a la hora de evaluar la exposición de la población. Finalmente, usando la metodología de dosis-respuesta se considera la variación en los casos de interés de mortalidad prematura y eventos de morbilidad que dichas discrepancias puedan causar en los estudios de este tipo.

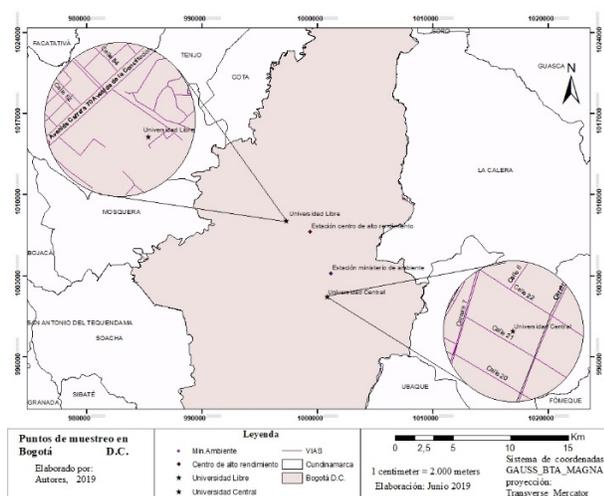
## II. Metodología

### A. Selección y descripción de puntos de muestreo

Se determinaron dos puntos de muestreo para el estudio, de forma que permitieran un análisis comparativo de las situaciones predominantes. En la zona centro la renovación urbanística ha traído consigo múltiples puntos de construcciones civiles que se consideraron

de interés dentro del impacto que pudieran tener en la calidad del aire y la exposición de los ciudadanos que frecuentan la zona. En la zona occidental se encuentra el denominado pulmón de la ciudad, donde se ubica tanto el parque metropolitano más grande de Bogotá (Parque Simón Bolívar), como el Jardín Botánico, zona que es frecuentada diariamente por personas que buscan alejarse de los altos niveles de contaminación que se encuentran en otros sectores.

Se tuvieron en cuenta factores de seguridad de los equipos, facilidad de acceso a la zona de instalación y una adecuada instalación de la red eléctrica para el funcionamiento de los muestreadores, así como locaciones sin estructuras elevadas con apropiada circulación de las corrientes atmosféricas. En la Figura 1 se evidencia la ubicación de la selección de los dos puntos de instalación de los equipos. En la zona centro el muestreador se instaló sobre una terraza a 8.26 metros sobre el nivel de suelo, y en la zona occidental a una altura de 3.5 metros.



**Figura 1.** Ubicación de puntos de muestreo y estaciones de referencia en Bogotá D.C.

**Fuente:** Autores, 2019

## B. Muestreo de Material Particulado $PM_{10}$

Las campañas de medición de material particulado  $PM_{10}$  se realizaron simultáneamente en los puntos de muestreo entre los meses de septiembre y noviembre de 2018 por un periodo de 6 semanas. Los muestreos tuvieron lugar de lunes a viernes con tiempos efectivos de 23 horas y 1 hora para verificación de los equipos e instalación de filtros para la siguiente medición. Las mediciones se realizaron de acuerdo con los requerimientos planteados por el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial para el muestreador de aire de alto volumen Hi-Vol aprobado por la EPA conforme a un análisis gravimétrico bajo el protocolo

CFR-50 Apéndice j de la EPA [11]. Este incluye las fases de premuestreo (fase de preparación), muestreo (recolección de muestras en campo) y postmuestreo (procesamiento de las muestras) [12].

La determinación de la concentración del material particulado  $PM_{10}$  (concentración real) por análisis gravimétrico consiste en la diferencia de peso final con el inicial (expresada en miligramos), que es correspondiente a la cantidad de material particulado retenido en el filtro. Se realizaron las correcciones requeridas para determinar las concentraciones a condiciones estándar que permitieran la comparación con los reportes de la RMCAB. Estas concentraciones estándar son comparadas con las concentraciones entre las dos estaciones más cercanas de la RMCAB –estación Centro de Alto Rendimiento Deportivo (CDAR) y Ministerio de Ambiente (MinAmbiente)– con los dos puntos de muestreo de la zona occidente y centro respectivamente. Asimismo, comparaciones entre los dos puntos de medición de las universidades, esto con el fin de analizar datos, tendencias o determinar posibles relaciones.

## C. Caracterización meteorológica de los puntos de muestreo

El comportamiento de las variables meteorológicas se obtuvo mediante la información recolectada de las dos estaciones de monitoreo de la RMCAB localizadas en puntos cercanos a las zonas de estudio durante el mismo periodo de la campaña. Para el caso de la velocidad del viento, temperatura y precipitación se construyeron gráficos de dispersión simple mediante el Software libre Minitab, donde se correlacionaron estos parámetros (variables independientes) con la concentración de material particulado  $PM_{10}$  (variable dependiente) en las dos zonas de estudio. La determinación de la correlación se basó en el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ), que identifica el grado de intensidad de la posible relación entre dos variables cuantitativas empleando el modelo estadístico directamente en el programa Minitab [13].

A partir de las velocidades y direcciones de viento se realizaron rosas de viento mediante el uso del programa Software libre WRPLOT, con el fin de evidenciar la frecuencia por rango de los vientos durante el periodo de datos recopilados mensuales acorde al tiempo de muestreo. Igualmente se revisó la Nota Técnica del IDEAM:007 de 2010 [14].

La visualización espacial de los datos de la concentración de  $PM_{10}$ , siendo este un análisis univariado, se enfoca en la interpretación visual mediante la ayuda de la herramienta Kriging que proporciona el software ArcGis (ArcMap) [15], lo cual, a partir de los datos promedio de las campañas de medición de los puntos (las dos zonas de estudio y la RMCAB), logra un enfoque localizado de cómo se concentra este contaminante en la ciudad de Bogotá D.C.

#### D. Determinación de impactos en salud por relaciones dosis-respuesta

La relación existente entre las concentraciones de contaminantes del aire y los efectos sobre la salud pueden ser determinados bajo diversas metodologías y herramientas dependiendo de la información que se posea. El presente estudio empleó la metodología dosis-respuesta que se usa generalmente para presentar la relación entre contaminación ambiental del aire y sus efectos en morbilidad y mortalidad [16] estimados en función de una relación matemática a partir de estudios epidemiológicos [17]. Dichos efectos para la salud son: incidencia anual de bronquitis, atención en urgencias por causas respiratorias segregado a población menor a 5 años y mayor a 5 años, admisiones respiratorias en hospitales segregado a población menor a 5 años y mayor a 5 años (morbilidad infantil) y por último síntomas respiratorios en menores de 5 años.

#### E. Identificación de la relación dosis-respuesta y parámetros requeridos

La determinación del número estimado de personas afectadas (E) por exposición al material particulado  $PM_{10}$  en las zonas de estudio requiere encontrar el riesgo relativo (RR) (1), que refiere el número de casos donde una población está expuesta a un factor de riesgo frente al número de casos de la población que está menos expuesta a una concentración del contaminante (C). Esta concentración es el promedio de  $PM_{10}$  obtenido durante el periodo de muestreo en los dos puntos, y una concentración inicial referencia ( $C_0$ ) de  $5 \mu g/m^3$  para mortalidad y de  $0 \mu g/m^3$  para morbilidad en las cuales se considera que no habría impacto negativo [18].

El riesgo relativo (RR) es expresado por la relación:

$$RR = \exp[\beta * (C - C_0)] \quad (1)$$

La fracción atribuible (AF) (2) hace referencia al porcentaje de casos que pueden evitarse en la población al suprimir el factor de riesgo. Se determina a partir del riesgo relativo (RR) para cada coeficiente  $\beta$ .

$$AF = \left( \frac{RR - 1}{RR} \right) \quad (2)$$

Finalmente, en el número de casos estimado en cada evento de salud atribuido al aire se tiene en cuenta el índice de incidencia actual ( $f_p$ ) por cada factor  $\beta$ , en función de la población de estudio (P) y la fracción atribuible (AF) obtenida anteriormente, de la siguiente manera (3):

$$E = AF * f_p * P \quad (3)$$

A partir de información epidemiológica consultada de enfermedades respiratorias, se halló el coeficiente empírico de aumento de efectos en salud ( $\beta$ ) del informe

realizado por el Banco Mundial en Colombia [18] y adoptados para la población expuesta en ambos puntos, como se evidencia en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Coeficientes para mortalidad y morbilidad [18]

Parámetro dosis-respuesta	Coefficiente
Mortalidad	$\beta_1 = 0.00240$
Bronquitis Crónica	$\beta_2 = 0,00009$
Admisiones respiratorias en hospitales (< 5 años)	$\beta_2 = 0.012$
Admisiones respiratorias en hospitales (> 5 años)	$\beta_3 = 0.012$
Atención en urgencias por causas respiratorias (< 5 años)	$\beta_3 = 0.24$
Atención en urgencias por causas respiratorias (> 5 años)	$\beta_4 = 0.24$
Síntomas respiratorios (< 5 años)	$\beta_5 = 18$

#### F. Caracterización de la población expuesta

La determinación de la población expuesta se basó en información del censo 2005 realizado por el DANE [19] bajo un polígono del área de estudio en el cual se identificó el número de niños y adultos en la zona. Este resultado se proyectó al año 2018 usando las tasas vigentes de crecimiento poblacional de cada sector reportadas por la Secretaria Distrital de P [20].

Para el caso de la zona central, el polígono se tomó desde la carrera 10 con calle 19 hasta la carrera 3 con calle 19 y la calle 24 con carrera 10 hasta la carrera 24 con calle 3. Este polígono abarca un área de  $0,37 \text{ km}^2$ , como se observa en la Figura 2



**Figura 2.** Polígono del área de estudio para determinación de población expuesta en la zona centro  
**Fuente:** Geoportal del DANE [19]

Para el caso de la zona occidental, el polígono se tomó desde la carrera 68 con calle 63 hasta la carrera 70 con calle 49. Este polígono abarca un área de  $1,1 \text{ km}^2$  (Figura 3), teniendo en cuenta que en esta zona existe una alta cantidad de población flotante (habitante temporal), debido a que se encuentran entidades educativas como el Colegio Militar Simón Bolívar, Colegio Protección de la Joven Amparo de Niñas y espacios de

recreación pasiva y activa como la caja de compensación Compensar, Unidad Deportiva el Salitre y el Jardín Botánico José Celestino Mutis. Sin embargo, existe presencia de un pequeño barrio residencial (Luis María Fernández) de tan solo dos cuadras, según el Diagnóstico local con participación social localidad Engativá de 2009-2010 [20].



**Figura 3.** Polígono del área de estudio para determinación de población expuesta en la zona occidental.  
Fuente: Geoportal del DANE [19]

### III. Resultados y discusiones

#### A. Concentración de material particulado

El número total de muestras recolectadas durante la campaña de medición fue de 30 para cada punto. Se tuvo pérdidas de muestras debido a fallas en el flujo energético en algunos días que imposibilitaron un muestreo durante el periodo completo (23 horas). Las concentraciones de  $PM_{10}$  determinadas durante la campaña de medición variaron para la zona centro entre un mínimo de  $4.50 \pm 3.16 \mu g/m^3$ , un máximo de  $35.11 \pm 0.53 \mu g/m^3$  y un valor medio de  $21.43 \pm 0.76 \mu g/m^3$ . Para la zona occidental fue entre un mínimo de  $16.09 \pm 0.57 \mu g/m^3$  y un máximo de  $63.88 \pm 0.54 \mu g/m^3$  con un valor promedio de  $33.58 \pm 0.51 \mu g/m^3$ .

Los valores obtenidos de las dos zonas de estudio y sus respectivas estaciones más cercanas en la RMCAB se evidencian en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Datos de material particulado en  $\mu g/m^3$  de las zonas de estudio y estaciones de la RMCAB más cercanas.

	[PM <sub>10</sub> ] U. C.	[PM <sub>10</sub> ] U. L.	[PM <sub>10</sub> ] M. A.	[PM <sub>10</sub> ] C. A. R.
Promedio	21.43	33.58	31.78	32.11
Mínimo	4.5	16.09	17.71	9
Máximo	35.11	63.88	57.12	59.4
D. E.	8.11	12.45	11.29	14.13

U. C.: Universidad Central, U.L.: Universidad Libre, M. A.: Min Ambiente, C. A. R.: Centro de Alto Rendimiento, D.E.: Desviación estándar.

Los valores de las concentraciones hallados en la zona de estudio en el occidente (U Libre) con respecto

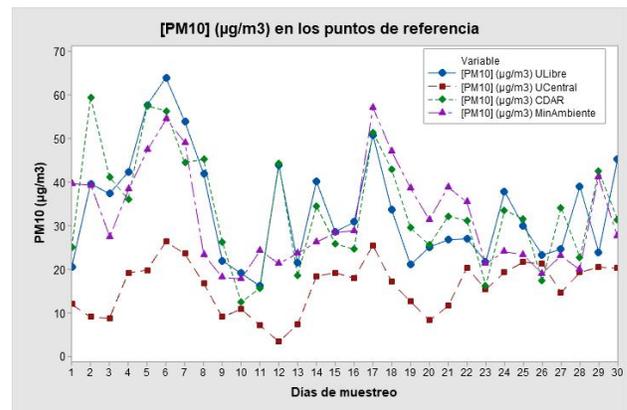
a la zona de estudio en el centro (U Central) son superiores. Esto contradice la preconcepción que existe para estas zonas con respecto a la calidad del aire, teniendo en cuenta que la Universidad Libre se encuentra cerca al parque metropolitano Simón Bolívar, al Jardín Botánico José Celestino Mutis, al Centro de alto rendimiento y al instituto de recreación y deporte, lugares con abundante arborización y zonas verdes a diferencia de la Universidad Central ubicada en el centro de la capital con amplio desarrollo urbanístico.

Por otra parte, se evidencia la similitud de las concentraciones del punto de muestreo y la estación de la zona occidental (U libre y Centro de alto rendimiento) debido a la cercanía existente entre estos con una distancia de 2.8 km, encontrando una tendencia entre estos.

En la zona centro la distancia entre la estación más cercana del RMCAB y el punto de muestreo es mayor que la distancia en la zona occidental con un valor de 3.8 Km, motivo por el cual los valores no tienen la misma cercanía que los hallados en la otra zona de estudio. Sin embargo, la tendencia es la misma.

La dispersión de los valores obtenidos es mayor en la zona de estudio de occidente, en donde las concentraciones se veían significativamente repercutidas por las condiciones climatológicas en los días de muestreo. Por otra parte, en la zona centro, el desarrollo urbanístico afecta la medición de variables climatológicas, lo que pudo atenuar la dispersión de los valores hallados en esta zona.

Se realizó una comparación de las concentraciones obtenidas durante la campaña de muestreo y las reportadas por las dos estaciones de referencia de la RMCAB (MinAmbiente para zona centro y CDAR para la zona occidental). Es observable en la Figura 4 una misma tendencia en las concentraciones para cada punto de muestreo.



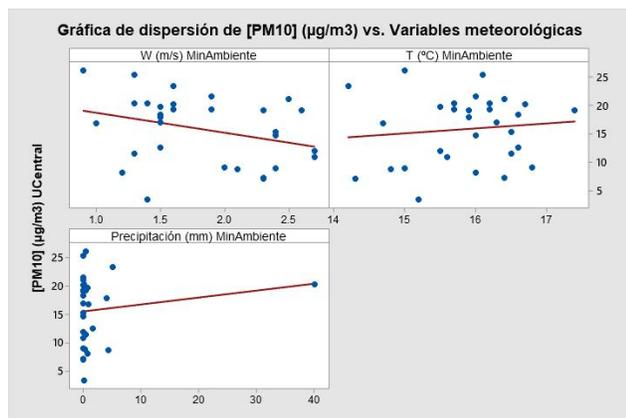
**Figura 4.** Concentración de material particulado en los cuatro puntos de referencia. Elaborado en software libre MiniTab.

Fuente: Autores, 2019

Al realizar la comparación de las concentraciones determinadas *in situ* con las concentraciones que reporta la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) en las estaciones más cercanas, se encontró que a mayor distancia se encuentra la población de una estación de la red, menos representativa es la información para la determinación de la exposición real al material particulado. Aunque esto parecería obvio, todas las inferencias epidemiológicas que se realizan usan solamente la información que la red puede proveer, generando grandes incertidumbres en la verdadera carga de enfermedad asociada.

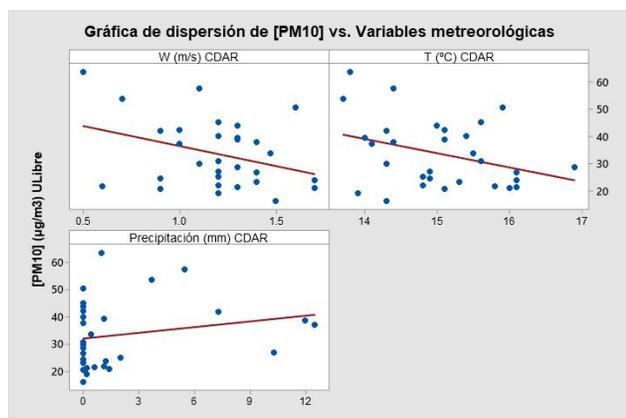
### B. Variables meteorológicas

En las Figura 5 y Figura 6 se presenta la dispersión de los datos del contaminante  $PM_{10}$  en las dos zonas de estudio con respecto a variables meteorológicas obtenidas de las estaciones de la RMCAB más cercanas.



**Figura 5.** Concentración de  $PM_{10}$  vs. variables meteorológicas Universidad Central. Elaborado en software libre MiniTab.

Fuente: Autores, 2019



**Figura 6.** Concentración de  $PM_{10}$  vs. variables meteorológicas Universidad Libre. Elaborado en software libre MiniTab.

Fuente: Autores, 2019

Se tiene en cuenta la distribución de los puntos y cómo se genera la nube para determinar la correlación existente entre las variables analizadas, con la posibilidad de ser positiva (nube de puntos con crecimiento en X y Y), negativa (nube de puntos con crecimiento en X y disminución en Y) o nula (no hay relación alguna) [21].

Con respecto a la anterior interpretación se procede a realizar la correlación entre las variables meteorológicas (X) y la concentración de material particulado  $PM_{10}$  (Y), obteniendo coeficientes entre el rango de -1 a 1, siendo de menor relación cuando se aproxime a 0. En la Tabla 3 se evidencian los significados de los rangos de valores resultado del coeficiente de la relación de Pearson.

**Tabla 3.** Valores y significados de los rangos de los coeficientes de correlación de Pearson

Valores	Correlación
-1	Negativa grande y perfecta
-0.9 a -0.99	Negativa muy alta
-0,7 a -0,89	Negativa alta
-0,4 a -0,69	Negativa moderada
-0,2 a -0,39	Negativa baja
-0,01 a -0,19	Negativa muy baja
0	Nula
0,01 a 0,19	Positiva muy baja
0,2 a 0,39	Positiva baja
0,4 a 0,69	Positiva moderada
0,7 a 0,89	Positiva alta
0,9 a 0,99	Positiva muy alta
1	Positiva grande y perfecta

Este procedimiento se realiza mediante el software libre MiniTab, el cual arroja directamente el coeficiente de Pearson y los valores p. Estos últimos son la probabilidad de influencia correcta o nula. Ahora, si los valores de p son menores a 0,05 la influencia es nula sin existencia de relación lineal [22].

En la Figura 7 y la Figura 8 se observan las correlaciones de Pearson y los valores p (para la zona centro y occidente) de la variable meteorológica velocidad del viento y la concentración de material particulado, obteniendo valores de p 0,093 y 0,062 respectivamente, resultando positivas las influencias entre estos. Los coeficientes de correlación de Pearson arrojados por el programa fueron de -0.31 y -0.34, los cuales representan correlaciones negativas bajas con respecto a los rangos de la Tabla 3.

1) Correlaciones en parejas de Pearson

Muestra 1	Muestra 2	Correlación	I. C. 95%	Valor <i>p</i>
[PM10] ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	UCentral W (m/s) MinAmbiente	-3.13	(-0.605,0.054)	0.093

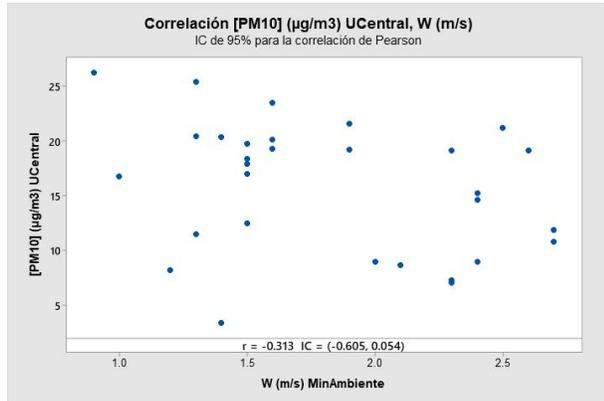


Figura 7. Correlación de material particulado  $PM_{10}$  en la zona centro y la velocidad de viento.

Fuente: Autores 2019. Elaborado en software libre MiniTab

2) Correlaciones en parejas de Pearson

Muestra 1	Muestra 2	Correlación	I. C. 95%	Valor <i>p</i>
[PM10] ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	ULibre W (m/s)	-3.45	(-0.628,0.017)	0.062

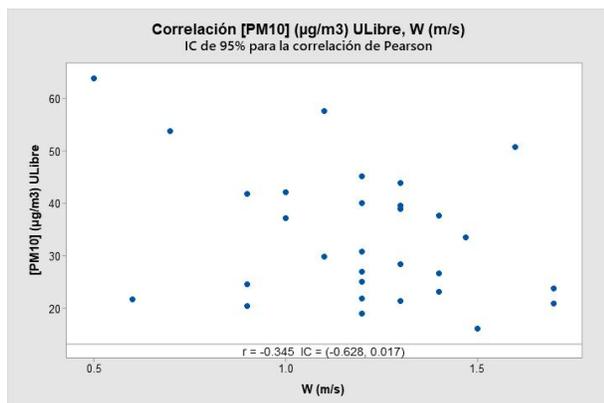


Figura 8. Correlación de material particulado  $PM_{10}$  en la zona occidental y la velocidad del viento.

Fuente: Autores 2019. Elaborado en software libre MiniTab

En la Figura 9 y la Figura 10 se evidencia para las zonas centro y occidental los coeficientes de Pearson de 0.11 y -0.34 y los valores *p* de 0.558 y 0.429 respectivamente. Estos corresponden a la temperatura y concentración de material particulado, siendo las correlaciones: positiva muy baja y negativa baja para cada zona (con respecto a los rangos de la Tabla 3).

3) Correlaciones en parejas de Pearson

Muestra 1	Muestra 2	Correlación	I. C. 95%	Valor <i>p</i>
[PM10] ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	UCentral T ( $^{\circ}\text{C}$ ) MinAmbiente	0.111	(0.259,0.453)	0.558

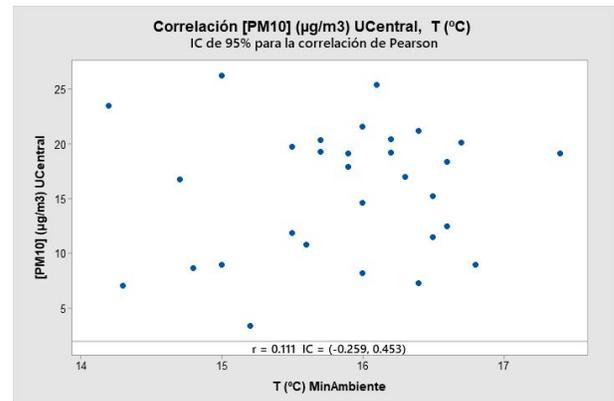


Figura 9. Correlación de material particulado  $PM_{10}$  en la zona centro y la temperatura.

Fuente: Autores 2019. Elaborado en software libre MiniTab

4) Correlaciones en parejas de Pearson

Muestra 1	Muestra 2	Correlación	I. C. 95%	Valor <i>p</i>
[PM10] ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	ULibre T ( $^{\circ}\text{C}$ )	-3.44	(-0.627,0.018)	0.062

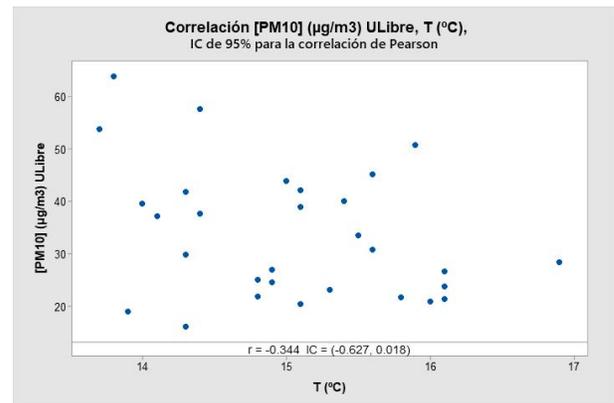


Figura 10. Correlación de material particulado  $PM_{10}$  en la zona occidental y la temperatura.

Fuente: Autores 2019. Elaborado en software libre MiniTab

En la Figura 11 y la Figura 12 se observan las correlaciones de Pearson y los valores *p* (para las zonas centro y occidental) de la variable meteorológica precipitación y la concentración de material particulado, obteniendo valores en *p* de 0.429 y 0.272 respectivamente y resultando positivas las influencias entre estos. Los coeficientes de correlación arrojados por el programa fueron de 0.150 y 0.207, siendo correlaciones positivas muy baja según la Tabla 3.

### 5) Correlaciones en parejas de Pearson

Muestra 1	Muestra 2	Correlación	I. C. 95%	Valor p
[PM10] ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	UCentral Precipitación (mm) MinAmbiente	0.150	(-0.222,0.484)	0.429

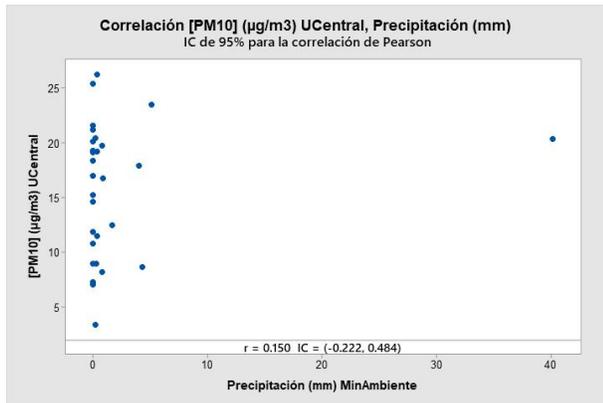


Figura 11. Correlación de material particulado  $PM_{10}$  en la zona centro y la precipitación.

Fuente: Autores 2019. Elaborado en software libre MiniTab

### 6) Correlaciones en parejas de Pearson

Muestra 1	Muestra 2	Correlación	I. C. 95%	Valor p
[PM10] ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	ULibre Precipitación (mm)	0.207	(-0.166,0.528)	0.272

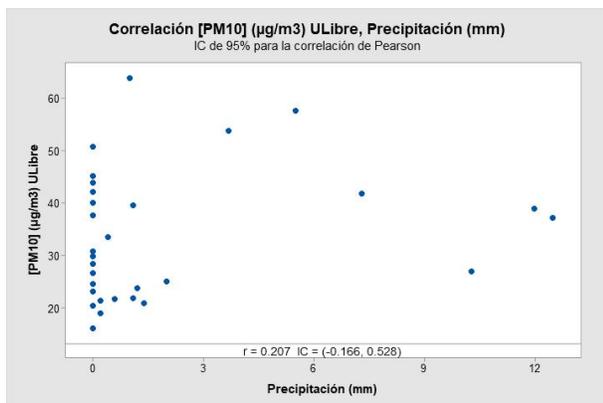


Figura 12. Correlación de material particulado  $PM_{10}$  en la zona occidente y la precipitación.

Fuente: Autores 2019. Elaborado en software libre MiniTab

Analizando las anteriores correlaciones con respecto a las variables meteorológicas, se obtiene una relación negativa baja para velocidad del viento en los dos puntos de muestreo, es decir, a mayor velocidad del viento se obtienen menores concentraciones de material particulado, debido a que existe mayor dispersión y transporte de este contaminante. En cuanto a la

temperatura, la relación no se mantiene en ambos puntos al aplicar una regresión lineal simple, esto puede presentarse por la alta dispersión de la información recolectada. Una relación nula para la concentración del contaminante con la precipitación fue encontrada para ambos puntos, por lo que no se pudo comprobar el efecto conocido que la lluvia y el lavado tienen en la reducción de la concentración de material particulado, especialmente de aquel con tamaños de partícula mayores.

Las rosas de viento (Figura 13 y Figura 14) para cada punto de medición muestran la dirección predominante en cada uno de los sectores analizados en la ciudad. En la zona centro de Bogotá hay una dirección predominante hacia el sudeste de la ciudad, lo que genera el arrastre del contaminante hacia la zona occidental de la capital, fenómeno congruente con la idea de convergencia de masas de aire para este sector que es conocida con anterioridad. Es por esto que se justifica que existan concentraciones mayores en la zona occidental que en la central para el presente estudio.

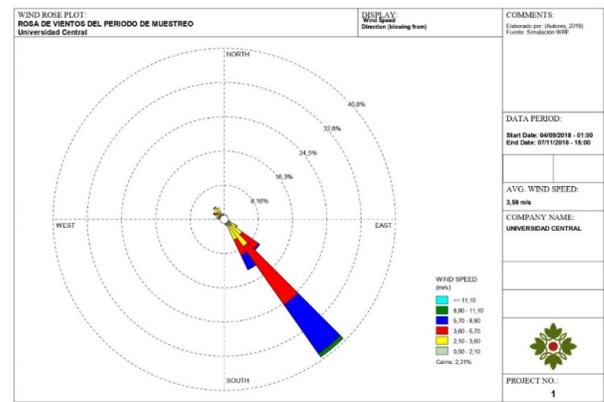


Figura 13. Rosa de vientos del periodo de muestreo en la Universidad Central

Fuente: Autores 2019. Elaborada en WRPLOT

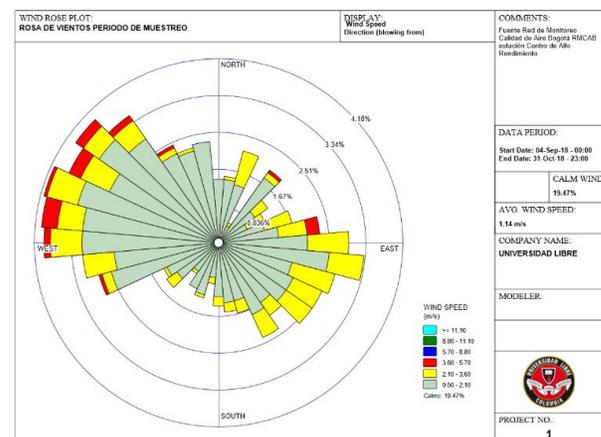


Figura 14. Rosa de vientos del periodo de muestreo en la Universidad Libre.

Fuente: Autores 2019. Elaborada en WRPLOT

Analizando las dos rosas de viento generadas, es posible identificar mayores velocidades en la zona centro. Este es un factor que junto a la dirección del viento permite el arrastre del contaminante, demostrando que gran parte del material particulado es transportado a la zona occidental de la ciudad donde permanece estable.

Los resultados nos indican que la velocidad y la dirección de los vientos tienen alta influencia en la concentración de material particulado menor a diez micras para ambos puntos, pero de formas muy distintas.

La zona central, a pesar de encontrarse en un área con alto flujo vehicular y actividades de construcción cercanas, no presenta resultados significativos de contaminación, siendo el valor máximo de  $35.11 \pm 0.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$  producto del aumento de la velocidad del viento con un rango de 1.28 – 63 m/s en la dirección predominante, y para la zona occidental una concentración máxima de  $\text{PM}_{10}$  de  $63.88 \pm 0.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con un rango de velocidad de 0.5-1.7 m/s.

Adicionalmente, la peatonalización de la avenida séptima, uno de los principales corredores viales del sector, puede haber influido en la disminución de las emisiones vehiculares cercanas en la zona centro, reduciendo en una mejor calidad del aire. Sin embargo, cabe anotar que para confirmar dicha hipótesis se requiere la evaluación de concentraciones de material particulado en la zona antes del proceso de peatonalización actual. A la terminación de este trabajo no se contaba con tal información, por lo que se propone que una siguiente etapa de análisis profundice en este punto.

En el mapa (Figura 15) se evidencian las concentraciones del material particulado  $\text{PM}_{10}$ , definiendo 10 niveles de concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y diferenciando los valores bajos (azul) y altos (rojos) del mismo.

La interpretación visual del mapa generado nos muestra que las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  en las dos zonas de Bogotá D.C. durante el periodo de muestreo no excedieron el nivel máximo permisible establecido en la resolución 2254 de 2017 para un tiempo de exposición de 24 horas que es de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sin embargo, se observa una mayor concentración de  $\text{PM}_{10}$  en la zona suroccidental (estaciones de monitoreo Carvajal y Kennedy) y menor concentración en la zona centro (estación de monitoreo MinAmbiente), como lo corrobora el informe mensual de calidad del aire en Bogotá de la Secretaría Distrital de Ambiente para el mes de septiembre del año 2018 [23].

### C. Relaciones dosis-respuesta

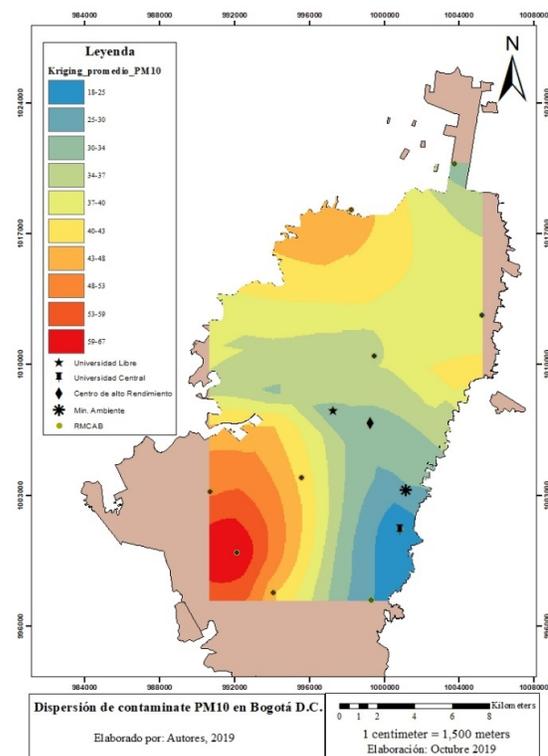
Los cálculos pertenecientes a la metodología dosis-respuesta se realizaron para los datos de concentraciones promedio de  $\text{PM}_{10}$  encontrados *in situ*, al igual que para las concentraciones reportadas por las estaciones de monitoreo de la RMCAB más cercanas a las respectivas zonas de estudio. Para su evaluación se tomó como base de cálculo la población establecida según el

geoportal del DANE para ambas zonas de estudio. Los resultados se pueden observar en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Número de casos estimados anualmente para las cuatro zonas de estudio (zona centro y occidental con mediciones *in situ*) y estaciones RMCAB (Min Ambiente y cdar) por cada 100.000 habitantes.

Fuente: Autores, 2019.

Parámetro dosis-respuesta	Número de casos			
	Zona centro	Min Ambiente	Zona Occ.	CDAR
Mortalidad	112	180	14	14
Bronquitis crónica	999	1.480	112	112
Admisiones respiratorias en hospitales (<5 años)	95	2.654	185	10
Admisiones respiratorias en hospitales (>5 años)	9.853	14.414	53	1.020
Atención en urgencias por causas respiratorias (<5 años)	22	613	43	2
Atención en urgencias por causas respiratorias (>5 años)	16.360	17.213	60	1.164
Síntomas respiratorios (<5 años)	8	167	11	1



**Figura 15.** Mapa de concentración de  $\text{PM}_{10}$  en Bogotá D.C. usando Kriging.

Fuente: Autores 2019

El efecto más crítico sin duda alguna es la mortalidad generada por la exposición al material particulado. En la zona centro, se estimaron 112 casos por este efecto y en la zona occidente 14. La diferencia en densidad poblacional en ambos sectores refleja la diferencia numérica encontrada. Una ciudad más densamente habitada, manteniendo concentraciones elevadas del contaminante, se traduciría en un incremento significativo de los casos esperados de mortalidad y morbilidad asociados.

Como se puede observar en la Tabla 4, el número de casos por atención en urgencias en personas mayores a 5 años es preocupante. En la zona centro se hallaron 17.213 casos, a diferencia de la zona occidente con 60 casos. Se evidencia la relación de la densidad poblacional con el número de casos presentes ya que en esta es significativamente elevado. Se debe tener en cuenta que la población perteneciente a la zona occidente en su mayoría es una población flotante, la cual no se encuentra expuesta permanentemente, a diferencia de la población perteneciente a la zona centro.

Del mismo modo, se evidencia que el número de casos presentados en las estaciones RMCAB para la misma población expuesta analizada en cada zona de estudio (zona central vs. MinAmbiente y zona occidental vs. CDAR) varía notoriamente, de forma que no se puede asumir que las afectaciones a la salud en la población expuesta al contaminante alrededor de las estaciones RMCAB sea la misma que la población analizada en ambos puntos del estudio.

Para corroborar los datos obtenidos anteriormente se hace una comparación con la información reportada en la página de la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá (SDSB) como se observa en la Tabla 5. Aquí se utilizaron los parámetros que más se asemejan a los aplicados en ambas zonas de estudio. En primera instancia se reporta el número de casos donde se presentan síntomas respiratorios como sibilancia y tos en menores de 5 años. Este reporte de datos se basa en encuestas poblacionales respecto a los síntomas respiratorios sin discriminación ante los aportes por factores de calidad del aire. Al realizar la comparación con el parámetro de síntomas respiratorios resultantes del análisis de dosis-respuesta de este documento, se demuestra cómo el dato reportado por la SDSB es mayor. Lo anterior puede atribuirse a que el reporte contempla factores externos al contaminante, como el factor de riesgo de tabaco. Finalmente, el factor presentado sobre la demanda de consulta por enfermedades respiratorias en niños menores de 14 años atendidos en el servicio de urgencias difiere del dato establecido en el análisis de dosis-respuesta de este documento, ya que la población es segregada para los niños menores a 5 años. Tal situación implica un aumento del número de casos en los reportes de ambas localidades en la SDSB. Otro factor que prueba este aumento de casos puede

justificarse en que las consultas al servicio de urgencias no están segregadas por exposición al contaminante.

Es importante destacar que el número de casos que reporta la SDSB fue tomado con base al tamaño poblacional total de las localidades, esto implica que el número varíe en comparación con lo calculado en este estudio, ya que aquí se tomó una población más localizada al punto de muestreo.

**Tabla 5.** Parámetros de la Secretaría Distrital de la Salud [24]

Parámetros analizados por la Secretaría Distrital de la Salud	Número de casos	
	Localidad de Engativá	Localidad de Santa Fé
El síntoma respiratorio como sibilancia presente en menores de 5 años.	59	34
El síntoma respiratorio como tos presente en menores de 5 años.	68	110
La demanda de consulta enfermedades respiratorias en niños menores de 14 años atendidos en el servicio de urgencias.	3630	671

A nivel nacional la aplicación de la metodología dosis-respuesta planteada en el estudio de [9] nos permite tener una estimación de los impactos en la salud que presentaron los ciudadanos en el periodo de elaboración de dicho estudio, el cual evidencia un número de casos para las categorías presentadas en la Tabla 5.

**Tabla 6.** Estimación del impacto en la salud de la contaminación del aire urbano en Colombia con datos de vigilancia de las pm [9]

Categoría de salud	Número de casos
Mortalidad prematura	5.027
Bronquitis crónica	4.675
Admisión a hospitales	9.492
Síntomas respiratorios	104'225.594

Al realizar una estimación de los impactos de la calidad del aire se evidencia que sin importar las bajas concentraciones de PM<sub>10</sub> en la zona centro los problemas de salud pública se siguen presentando. Para la zona centro se estimaron un total anual por cada 100.000 habitantes de 112 muertes prematuras, 95 casos de admisiones hospitalarias para menores de 5 años y 9.853 en personas mayores por problemas respiratorios asociados a la exposición. Del mismo modo, en la zona occidental, las cifras ascendieron a 14 muertes prematuras, 185 casos de admisiones hospitalarias para menores de 5 años y 53 personas mayores por problemas respiratorios asociados a la exposición. Los resultados varían comparativamente con respecto a la menor den-

sidad poblacional encontrada en la zona occidental de acuerdo al DANE, pero con las mayores concentraciones del contaminante.

En la zona occidente la calidad del aire se ve influenciada principalmente por las concentraciones de material particulado que fueron altas en comparación con las concentraciones obtenidas en la zona centro. Esto indica que las condiciones meteorológicas no marcaron la tendencia en el número de casos hallados de los efectos estimados en esta zona.

A pesar de que en la zona centro se hayan obtenido concentraciones menores a la zona occidente, los casos que presenta la estación de MinAmbiente son mayores a los obtenidos en la estación del CDAR y del punto de muestreo de la zona occidente. Por lo tanto, se evidencia que la concentración de material particulado es solo uno de los varios factores involucrados que afectan la calidad del aire. En este caso la concentración de material particulado no determinó la tendencia de los números de casos de los efectos estimados estudiados.

#### IV. Conclusiones

Las concentraciones obtenidas en el muestreo de la zona centro fueron menores y siguieron una tendencia similar a las concentraciones reportadas por la estación de RMCAB más cercana (MinAmbiente). De esto se infiere que las concentraciones del contaminante son promovidas por transporte y no de origen local. Basados en las concentraciones determinadas *in situ* se deduce que la red de monitoreo RMCAB no permite determinar directamente las concentraciones de exposición de la población ni la determinación de la carga en salud pública que esto implica para el sector puntual de estudio. Se necesitaría una mayor cobertura en otros puntos o el empleo de nuevas tecnologías de seguimiento más granular en la ciudad. Esto con el fin de que la información reportada de las concentraciones a la que están expuestos los ciudadanos sea más cercana en tiempo real y por lo tanto el ICA tenga un mayor nivel de precisión. Esta observación en ningún momento busca poner en tela de juicio el desempeño de la tecnología de atenuación beta usada por la RMCAB, siendo esta una de las metodologías equivalentes internacionales para la determinación de las concentraciones másicas de las partículas del aerosol atmosférico.

En este trabajo se concluye que, basados en los datos arrojados por los muestreos en los puntos de la zona centro y occidente, las concentraciones provenientes de las estaciones más cercanas de la RMCAB empleadas para la determinación de la exposición de la población de estudio no son representativas. Esto causa desviaciones en la estimación de eventos de morbilidad o mortalidad en metodologías de dosis-respuesta como las aplicadas en este trabajo. La distancia entre las estaciones de la RMCAB y la población de estudio será una variable

fundamental en la determinación de la aplicabilidad o no para la exposición real. La presencia o ausencia de múltiples fuentes, tanto fijas como móviles, puede desviar las concentraciones reales de exposición. Esta es una problemática reconocida globalmente, de ahí la importancia que se le da hoy en día a la búsqueda de nuevas herramientas de monitoreo más granular.

Ciudades como Medellín han avanzado rápidamente en este frente con el apoyo de la ciudadanía y la implementación de una red de monitoreo alterna basada en sensores de bajo costo. Estos sensores, que aún están en fase de validación en todas partes del mundo, permiten el rompimiento de los viejos paradigmas en la potestad de la medición de la concentración de los contaminantes atmosféricos que recaía únicamente en los entes gubernamentales. Tal propuesta ha permitido abrir la ventana a una nueva forma de empoderamiento de la ciudadanía, quien es directamente afectada por la alta contaminación.

Según el método de dosis-respuesta aplicado en esta investigación, fueron estimadas para la zona centro y occidental un total de 112 y 14 muertes prematuras respectivamente por causa de la exposición al contaminante, teniendo efectos negativos sobre la salud respiratoria de los niños menores de 5 años y adultos mayores, inclusive a niveles inferiores del límite máximo permisible para morbilidad. Las variaciones en los efectos determinados entre las dos zonas dependen tanto de las concentraciones como de la densidad poblacional de las áreas de estudio. A pesar de tener concentraciones significativamente más altas en la zona occidente, el número de efectos en salud fue menor a la zona centro por tener el número más bajo de personas residentes en la zona evaluada.

El trabajo argumenta que medidas como la peatonalización de vías permite la reducción de las concentraciones a las que se expone la ciudadanía. En muchas partes del mundo la definición de zonas de bajas emisiones, zonas de ultrabajas emisiones o incluso zonas de cero emisiones se están haciendo mucho más comunes para atacar los graves problemas de exposición a contaminantes. En Bogotá, o en otras ciudades del país, aún no se presenta esta delimitación de zonas de aire limpio. El presente trabajo puede servir como herramienta de juicio a la hora de su proposición.

El resultado que se obtuvo de la relación del comportamiento de variables climatológicas y la concentración de  $PM_{10}$  muestra que la única asociación identificable fue con el parámetro de velocidad del viento, observando un comportamiento inversamente proporcional, es decir que a menor concentración de  $PM_{10}$  mayor velocidad del viento, lo cual indica que esta asociación tiene una relación inversa.

Esta evidencia puede ser usada por entidades gubernamentales encargadas de la salud, para el desarrollo de políticas públicas que permitan mantener a largo plazo el

monitoreo continuo de los niveles contaminantes como criterio para controlar y supervisar el aire en la ciudad. De igual forma, esto ayuda a educar e informar a la población respecto a la calidad del aire en la ciudad y sus consecuencias sobre la salud, todo con el propósito de generar un sistema de vigilancia epidemiológico que permita unificar la información de la calidad del aire y la salud, con miras a implementar la evaluación de estrategias.

## Referencias

- [1] L. Rodríguez, N. Rojas, L. Blanco, V. Herrera, and J. Fernández, “Short-Term Effects of Air Pollution on Respiratory and Circulatory Morbidity in Colombia 2011-2014 A Multi-City, Time-Series Analysis.” *International J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 8, pp. 8–9, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ijerph15081610>.
- [2] A. Quijano, M. J. Quijano, L. A. Quijano, and S. T. Manzano, “Toxicidad del aire de la ciudad de Villa del Rosario en muestras de material particulado-fracción respirable pm 2.5.” *Rev. Colomb. Tecno. Avanz*, vol. 2, no. 26, pp. 2–3, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24054/16927257.v26.n26.2015.2382>.
- [3] V. Feigin, B. Derrick, and R. Krishnamurthi, “The Global Burden of ischemic Stroke: Findings of the GBD 2010 Study.” *Glo. Heart*, vol. 9, no. 1, pp. 2–5, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.gheart.2014.01.001>.
- [4] IDEAM, “Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2011–2015.” Int. IDEAM, Bogotá, Colombia, ISBN: 978-958-8067-84-1, 2016. [Online]. Available: <https://clck.ru/NVyhA>. [Access: 12-marzo-2019].
- [5] Secretaría Distrital de Ambiente, “RMCAB- Informe anual de Calidad del Aire en Bogotá.” Int. SDA, Bogotá D.C., Colombia, 126PM04-PR84-M-2 V4.0, 2018. [Online]. Available: <https://clck.ru/NWKPw>. [Access: 20-marzo-2019].
- [6] R. Cañada, M. J. Vidal, and A. Moreno, “Interpolación espacial y visualización cartográfica para el análisis de la justicia ambiental: ensayo metodológico sobre la contaminación por partículas atmosféricas en Madrid.” *Glo. Heart*, vol. 9, no. 1, pp. 2–5, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.gheart.2014.01.001>.
- [7] H. Rodríguez, “Aplicación de métodos de interpolación y modelamiento geoestadístico en la evaluación de la calidad del aire en Bogotá D.C.” *Repositorio Institucional UMNG - Especializaciones - Facultad de Ingeniería - Geomática*, pp. 14–21, 2015. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10654/13446>. [Access: 10-febrero-2020].
- [8] The World Bank & State Environmental Protection Administration of China, “Cost of pollution in china- economic estimates of physical damages.” in *Int. World Bank Group - State Environmental Protection Administration*, Beijing, China, no. 39236, 2007. [Online]. Available: <https://clck.ru/NWRum>. [Access: 16-abril-2019].
- [9] E. Golub, I. Klytchnikova, G. Sánchez-Martínez, J. C. Belausteguigoitia, and C. M. Molina, “Environmental health costs in Colombia: the changes from 2002 to 2010.” in *Int. World Bank Group - LCSEN The Environment & Water Resources Occasional Paper Series*, Washington D.C., Estados Unidos, no. 92956, 2014. [Online]. Available: <https://clck.ru/NWUMx>. [Access: 16-abril-2019].
- [10] DNP-Departamento Nacional de Planeación, “Calidad del aire una prioridad de política pública en Colombia.” 13-feb-2018. [Foro DNP]. [Online]. Available: <https://clck.ru/NWUwU>. [Access: 23-abril-2019].
- [11] L. Delgado and C. Ramírez, “Determinación de las concentraciones de cromo presentes en muestras de material particulado (TSP, PM<sub>10</sub>) y correlación con los casos de enfermedades respiratorias en grupos sensibles de la localidad de los Martires.” Trabajo de grado - pregrado, Univ. Santo Tomas, Bogotá D.C., Colombia, 2014.
- [12] MAVDT, “Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire.” in *Int. MAVDT*, Bogotá D.C., contrato FONADE 20624382062438, 2010.
- [13] M. M. Sierra, “Establecer la asociación existente entre las variables meteorológicas temperatura, velocidad del viento y precipitación y las concentraciones de PM<sub>10</sub> registradas en la red de calidad del aire de Bogotá D.C.” Trabajo de grado – Pregrado, Univ. La Salle, Bogotá D.C., Colombia, 2006. [Online]. Available: <https://clck.ru/NWWAM>. [Access: 08-enero-2019].
- [14] H. Benavides and L. Ayala, *Análisis descriptivo de variables meteorológicas que influyen en la calidad del aire de los principales centros industriales del país*. Bogotá D.C., Colombia: IDEAM, 2010.
- [15] ESRI, “Arcgis-cómo funciona kriging.” [Online]. Available: <https://clck.ru/NWWUu>. [Access: 12-octubre-2019].
- [16] C. Orihuela and F. Rivera, “El costo económico de la contaminación del aire por PM<sub>10</sub> en Lima Metropolitana: un análisis exploratorio.” *CIES*, no. 82, pp. 53-54, 2013. [Online]. Available: <https://clck.ru/NWWvo>. [Access: 10-febrero-2019].
- [17] Z. Cheng, J. Jiang, O. Fajardo, S. Wang, and J. Hao, “Characteristics and health

- impacts of particulate matter pollution in China (2001–2011).” *Atmos. Environ.*, vol. 65, pp. 188, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.022>.
- [18] World Bank Group, “Environmental health costs in colombia.” *Lat. ame. carib. reg. envi. & wat. resou.*, p. 13, 2014.
- [19] DANE, “Geoportal análisis estadístico.” *DANE*, 2005. [Online]. Available: <https://geoportal.dane.gov.co/analisisestadistico.html>. [Access: 13-abril-2019].
- [20] Secretaría Distrital de Planeación Bogotá, “Proyecciones de población por localidad para Bogotá 2016–2020.” in *Int. SEGPLAN*, Bogotá D.C., Colombia, boletín no. 69, 2014. [Online]. Available: <http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/boletin69.pdf>. [Access: 13-abril-2019].
- [21] Alcaldía Mayor de Bogotá, “Diagnóstico local con participación social localidad Engativá de 2009-2010.” in *Int. Salud Capital*, Bogotá D.C., Colombia, 2010. [Online]. Available: <https://clck.ru/NWYXz>. [Access: 07-mayo-2019].
- [22] A. M. Buitrago and J. M. Tejeiro, “Influencia de las condiciones meteorológicas en las concentraciones de PST y PM<sub>10</sub> en inmediaciones de la Universidad Santo Tomás sede Loma Linda.” Trabajo de grado – Pregrado, Univ. Santo Tomas, Villavicencio, Colombia, 2019. [Online]. Available: <https://clck.ru/NWYgq>. [Access: 09-junio-2019].
- [23] Secretaría Distrital de Ambiente, “Rmcab–Informe mensual de calidad del aire en Bogotá, septiembre 2018.” in *Int. SDA*, Bogotá D.C., Colombia, 126PM04-PR84-M-3 V4.0, 2018. [Online]. Available: <https://clck.ru/NWZGt>. [Access: 07-enero-2019].
- [24] Secretaría Distrital de Salud de Bogotá, “Parámetros analizados por la Secretaria Distrital de la Salud.” in *nt. Salud Capital – Observatorio de Salud*, Bogotá D.C., Colombia, 2019. [Online]. Available: <https://clck.ru/NWZnQ>. [Access: 14-agosto-2019].