

04-001

### **RELATIONSHIP BETWEEN SOCIOECONOMIC STRATIFICATION AND EXPOSURE TO PARTICULATE MATTER (PM10 AND PM2.5) IN THE URBAN AREA OF BOGOTA (COLOMBIA).**

Cortés Duarte, María Carolina <sup>(1)</sup>; Cremades Oliver, Lázaro V. <sup>(1)</sup>; Gómez Yepes, Milena E. <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> UPC, <sup>(2)</sup> Universidad del Quindío

This study determines, through various calculation methods, how the levels of particulate matter pollution (PM10 and PM2.5) in Bogota correlate with the socioeconomic stratification of the city. Data from the Bogota Air Quality Monitoring Network were integrated to carry out the proposed models at the local level on the following variables: population density, property density, percentage of early childhood care, density of health care institutions, income per capita, population vulnerability index, percentage of working age population, percentage of rural productivity, tree density, population vulnerability index due to water regulation, density of commercial establishments, bicycle lanes, approval rate in non-official schools, dropout rate in non-official schools, density of enrolled students in official schools, and density of women who use bicycles. We used weighted geographic regression to detect associations between the quality of life of the inhabitants of Bogota and air pollution. As a result, significant correlations were observed between some sociodemographic and environmental variables and exposure to particulate matter in the 19 localities that make up the Bogotá area.

Keywords: Socioeconomic stratification; particulate matter; Bogota; air pollution; correlation.

### **RELACIÓN ENTRE ESTRATIFICACIÓN SOCIOECONÓMICA Y EXPOSICIÓN AL MATERIAL PARTICULADO (PM10 Y PM2.5) EN EL ÁREA URBANA DE BOGOTÁ (COLOMBIA).**

Este estudio determina a través de varios métodos de cálculo, la forma en que los niveles de contaminación por material particulado (PM10 y PM2.5) en Bogotá se correlacionan con la estratificación socioeconómica de la ciudad. Los datos de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá (RMCAB) se integraron para realizar los modelos propuestos a nivel de localidad sobre las siguientes variables: densidad poblacional, densidad de predios, porcentaje de atención prestada a la primera infancia, densidad de instituciones prestadoras de salud, ingreso per cápita, índice de vulnerabilidad poblacional, porcentaje en edad de trabajar, porcentaje de productividad rural, densidad de árboles, índice de vulnerabilidad poblacional por regulación hídrica, densidad de establecimientos comerciales, ciclovías, tasa de aprobación escolar en colegios no oficiales, tasa de deserción escolar en colegios no oficiales, densidad de matriculados en colegios oficiales, y densidad de mujeres que se movilizan en bicicleta. Se ha usado la regresión geográfica ponderada para detectar las asociaciones existentes entre la calidad de vida de los bogotanos y la contaminación atmosférica. Como resultado, se observan correlaciones significativas entre algunas variables sociodemográficas y ambientales y la exposición al material particulado, en las 19 localidades que conforman el área de Bogotá.

Palabras claves: Estratificación socioeconómica; material particulado; Bogotá; contaminación atmosférica; correlación.

Correspondencia: María Carolina Cortés maria.carolina.cortes@upc.edu Lázaro V. Cremades Oliver lazaro.cremades@upc.edu



© 2021 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

En 2015, la Asamblea General de Naciones Unidas adoptó la Agenda 2030 estableciendo 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y 169 indicadores, dentro de los cuales 3 están relacionados con la calidad del aire y son competencia de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Ante eso, los 194 estados miembros de la OMS adoptaron recientemente un marco normativo para responder a los efectos adversos de la contaminación en el aire para la salud y una hoja de ruta para obtener una respuesta global mejorada. Es precisamente, la salud y el bienestar uno de los ODS impulsados dado el número de muertes anuales atribuidas a la contaminación atmosférica. En 2012, tres millones de muertes se registraron por esa causa, en donde el 87% de las muertes ocurren en países de bajos ingresos, es decir, en países que representan el 85% del total de la población mundial (WHO, 2016).

Bogotá reportó en 2012 cerca de 9.077 muertes a causa de enfermedades crónicas de las vías respiratorias después de las enfermedades cardíacas y las cerebrovasculares (Periódico El Tiempo, 2012). Un estudio (Ortiz & Rojas, 2013) estimó que una reducción a 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la concentración promedio anual de PM10 entre los años 2010 y 2020, evitarían 21.000 muertes en mayores de 30 años y 900 en menores de 1 año por exposición al material particulado a largo plazo, lo que implicaría beneficios económicos de alrededor de los 53 millones de euros en costos de enfermedad.

Desde 1998, Bogotá monitorea a través de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire (RMCAB) de la Secretaría Distrital de Ambiente, la concentración del material particulado, así como otros contaminantes como PST, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO y SO<sub>2</sub> mediante trece estaciones meteorológicas fija y una móvil, reportando para 2021, concentraciones promedio anual de PM10 del orden de los 41  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (SDA, 2021).

A pesar del control y monitoreo constante que tiene la concentración de PM a nivel local, regional y global, es necesario vincular esos esfuerzos a políticas públicas articuladas que no se limiten al control de niveles permisibles de contaminación o sistemas de alarmas. Es primordial conocer relaciones entre la exposición al material particulado (PM2.5 y PM10) y las condiciones de vida de la población para replantear y/o proponer normativas ajustadas al contexto socioambiental de sus territorios. Es el caso de la norma de estratificación socioeconómica implantada en Colombia desde 1993, por la cual se evalúa los subsidios y la tarifa de la prestación de los servicios públicos clasificando a la población por la fachada de su casa, los materiales de construcción y las condiciones en las que se encuentra la vía frente a la vivienda (DNP, 2008).

La relación propuesta se ha investigado en otros ambientes urbanos, encontrando correlaciones empíricas, estadísticas y geoestadísticas entre contaminación atmosférica y salud, pobreza, educación, edad, estado civil, renta, nacionalidad, clima, etc. (Lipfert, 2004; Martins et al., 2004; Laurent et al., 2007; Morgenstern & Sánchez, 2007; Kim & Kim, 2012; Mehta et al., 2014, Escobar et al., 2016).

Lipfert en 2004, analiza tres estudios realizados para determinar relaciones entre el estatus socioeconómico (SES), la salud y la calidad del aire; en los dos primeros se encontraron relaciones entre la mortalidad diaria de la población de Hamilton (Ontario) y la población de Sao Paulo, Brasil, con la exposición al SO<sub>2</sub> y el MP<sub>10</sub>, mientras, el tercer estudio, con contaminantes similares encontró disminuciones de 83 a 86 gramos en el peso de niños al nacer asociadas a niveles medios de PM<sub>10</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, siendo los efectos del O<sub>3</sub> y el SO<sub>2</sub>, poco significativos en Sao Paulo. Por su parte, para Martins et al., en 2003, el efecto de PM<sub>10</sub> se correlacionó negativamente con los porcentajes de personas con educación universitaria y altos ingresos familiares, y se asoció positivamente con el porcentaje de personas que viven en barrios marginales. En 2016, nuevamente con datos obtenidos de las estaciones de

monitoreo disponibles, pero esta vez de la ciudad de Manizales, los sectores en donde la población emplea tiempos diarios promedio de viaje menores a 30 minutos, presenta mayores niveles de contaminación (Escobar et al., 2016).

A diferencia de los estudios anteriores, en 2007, Laurent et al., no consiguió confirmar o excluir relaciones entre estatus socioeconómicos (SES) y contaminación del aire a partir de estaciones de monitoreo, sin embargo, recomienda recoger el mayor número de indicadores SES a diferentes resoluciones geográficas para identificar de manera discriminatoria los riesgos relativos de mortalidad asociados con la contaminación atmosférica. Otras investigaciones, como las de Kim & Kim en 2012 han determinado relaciones en diferentes escalas geográficas de Seúl, estudiando variables como el porcentaje de personas con educación universitaria mayores de 20 años, satisfacción con el transporte público y porcentaje de la población por debajo de la línea de pobreza. De lo anterior es concluyente que las personas con mayores índices de pobreza son las más afectadas por la contaminación; relación no predominante en otras investigaciones.

En el presente estudio se desarrollan modelos locales, haciendo uso de la correlación espacial, los indicadores locales de asociación espacial (LISA, *Local Indicators of Spatial Association*) y la noción de la Ley de Tobler o primera Ley de la Geografía, la cual establece que “*todas las cosas están relacionadas entre sí, pero las cosas más cercanas están más relacionadas que las cosas distantes*” (Huitrón Mendoza, 2020). Dado que se trata de un procedimiento netamente geográfico, requiere del procesamiento de metadatos procedentes de plataformas públicas que almacenen información geográfica de la ciudad. En Bogotá lo administra la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital (UAECD, 2021) a través de la Infraestructura de Datos Espaciales de Bogotá (IDECA, 2021).

Con este tipo de correlación, a diferencia de la correlación empírica, se concentra el análisis en el *Índice de Moran (I)*, verificando la contribución de cada unidad espacial a la formación del valor general, así como el grado de asociación y el aporte de heterogeneidad de cada una de ellas con respecto a las demás (Aji et al., 2004; Celemín, 2009; Fu et al., 2014).

## 2. Objetivos

Este estudio busca determinar la correlación espacial existente entre los niveles del material particulado reportado por las estaciones meteorológicas de Bogotá, en los tamaños de diámetros 2,5 y 10  $\mu\text{m}$ , y el entorno, en términos de demografía, salud pública, economía y educación.

## 3. Metodología

### 3.1. Tipo de estudio

La autocorrelación espacial, también conocida como regresión geográficamente ponderada, se empleó en este estudio para el diseño de las pruebas de hipótesis del índice de Moran (*I*), las validaciones estadísticas, la interpretación y el reporte de los resultados. Se optó por este tipo de estudio porque, a diferencia de las correlaciones realizadas mediante la regresión de mínimos cuadrados, la autocorrelación espacial produce numerosos modelos locales y, por ende, múltiples regresiones, generando un modelo de regresión por cada punto de datos espaciales (Hipp & Chalise, 2015).

### 3.2. Población

Los datos espaciales publicados a nivel geográfico constituyen la población del estudio. Bogotá cuenta con 19 localidades que dividen el territorio, que a su vez se subdividen en 70 Unidades de Planeamiento Zonal (UPZ) y éstas, en barrios. Según la normativa aplicable “La

*Unidad de Planeamiento Zonal tiene como propósito definir y precisar el planeamiento del suelo urbano, respondiendo a la dinámica productiva de la ciudad y a su inserción en el contexto regional, involucrando a los actores sociales en la definición de aspectos de ordenamiento y control normativo a escala zonal" (Secretaría Distrital de Planeación [SDP], 2021).*

Los datos extraídos de los recursos del IDECA contienen un conjunto de estándares, políticas, tecnologías y acuerdos institucionales, que, de forma integrada y sostenida, facilitan la producción, disponibilidad y acceso a la información geográfica de Bogotá por localidad y en el mejor de los casos por UPZ. Tanto los recursos obtenidos de “*Mapas de Bogotá*” como “*Datos abiertos de Bogotá*” disponen de datos en formatos: Esri REST, WMS, WFS, HTML, GPKG, GeoJSON, SHP, KML o DXF (IDECA, 2021).

### 3.3. Muestra

Como los datos de la población se encuentran reportados por las entidades del Gobierno Distrital en temáticas diversas, se optó por conformar seis grupos, previa revisión de la calidad y pertinencia de los datos. Finalmente, se seleccionaron dos individuos por cada uno de los grupos, entre ellos: material particulado (1), demografía (2), salud y protección social (3), economía y finanzas (4), inclusión social y reconciliación (5) y educación (6). La Tabla 1 integra las características de la muestra por grupo.

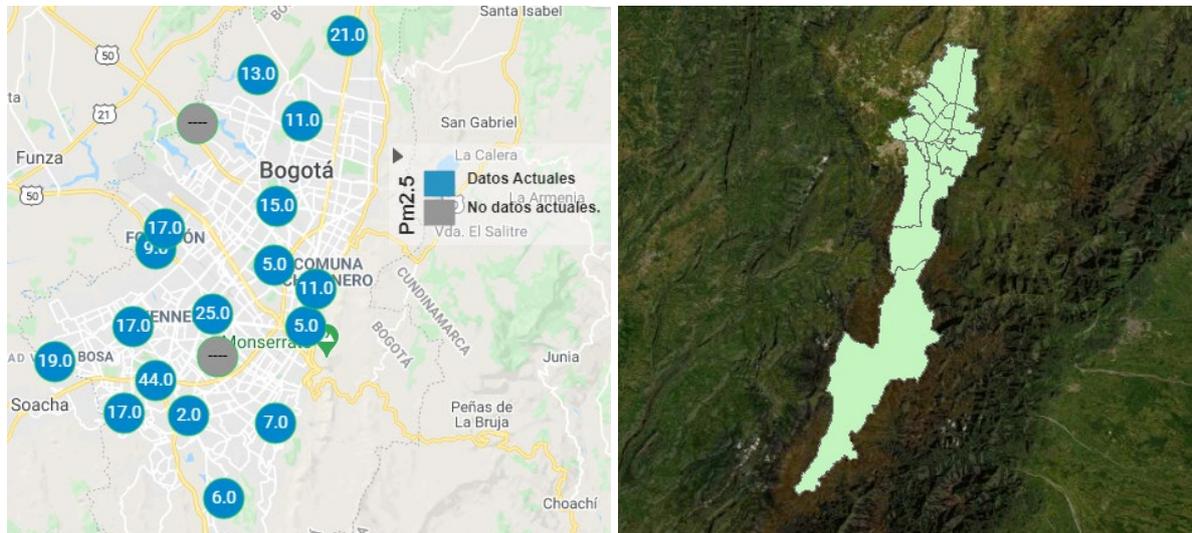
**Tabla 1: Características de la muestra seleccionada**

Variable	Id.	Fecha del metadato	Fuente (UAECD, 2021)
<b>Material particulado</b>			
Concentración promedio anual de material particulado inferior a 10 µm (PM10)	001_VA	2014	Datos abiertos Bogotá
Concentración promedio anual de material particulado inferior a 10 µm (PM10)	002_VA	2019	Datos abiertos Bogotá
Concentración promedio anual de material particulado inferior a 2.5 µm (PM2.5)	003_VA	2014	Datos abiertos Bogotá
Concentración promedio anual de material particulado inferior a 2.5 µm (PM2.5)	004_VA	2019	Datos abiertos Bogotá
<b>Demografía</b>			
Densidad de la población por Unidad de Planeación Zonal (UPZ)	001_VD	2017	Laboratorio urbano de Bogotá
Población en edad de trabajar	002_VD	2017	Mapas de Bogotá
<b>Salud y protección social</b>			
Instituciones prestadoras de salud	001_VS	2020	Datos abiertos Bogotá
Pensionados activos del FONCEP por localidad	002_VS	2020	Datos abiertos Bogotá
<b>Economía y finanzas</b>			

Variable	Id.	Fecha del metadato	Fuente (UAECD, 2021)
Ingreso per cápita	001_VE	2017	Mapas de Bogotá
Empresas creadas	002_VE	2018	IDECA
Inclusión social y reconciliación			
Demografía de la población víctima por localidad	001_VI	2019	IDECA
Bono de alimentación	002_VI	2019	IDECA
Educación			
Matrícula total en colegios oficiales.	001_VM	2020	IDECA
Tasa de deserción escolar colegios oficiales Bogotá	002_VM	2018	Mapas de Bogotá

Las variables identificadas como **001VA** y **002VA** corresponden a los datos de concentración promedio anual de material particulado inferior a 10  $\mu\text{m}$  (PM10) reportados por estación meteorológica para los años 2014 y 2019, mientras las variables **003VA** y **004VA** constituyen los datos de concentración promedio anual de material particulado inferior a 2.5  $\mu\text{m}$  (PM2.5), para los mismos años. Este set de datos contiene la concentración de material particulado de las estaciones de la RMCAB tal y como se indica en la Figura 1.

**Figura 1: Ubicación de las estaciones meteorológicas de Bogotá indicando el índice IBOCA para PM2.5 (IDECA, 2021).**



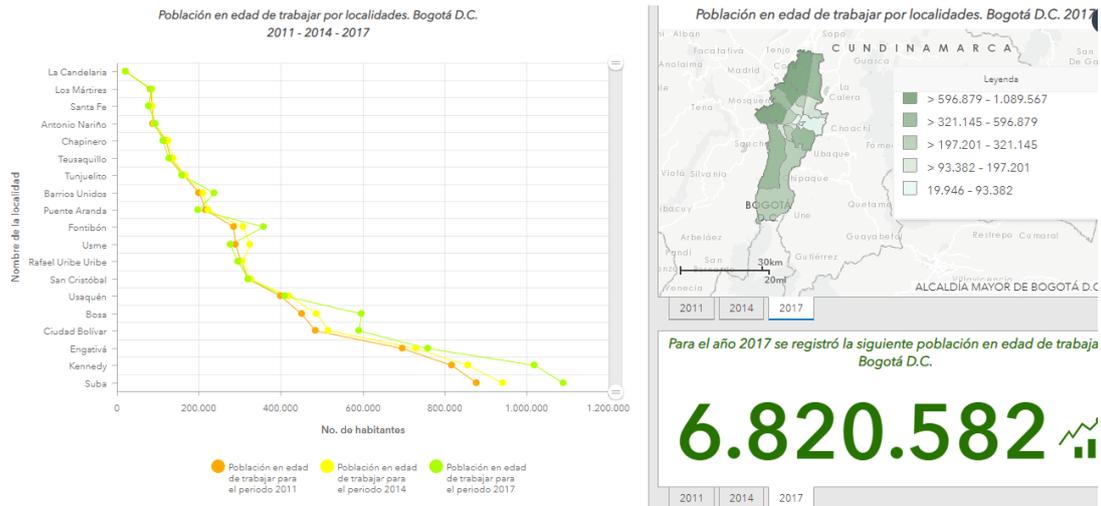
La Tabla 2 resume la localización geográfica de cada una de las estaciones meteorológicas funcionales de la ciudad.

**Tabla 2: Ubicación de las estaciones meteorológicas de la RMCAB (IDECA, 2021).**

Estación	Latitud	Longitud	Localidad	Tipo
Guaymaral	4°47'1.52"N	74°2'39.06"W	Suba	De fondo
Usaquén	4°42'37.26"N	74°1'49.50"W	Usaquén	De fondo
Suba	4°45'40.49"N	74°5'36.46"W	Suba	De fondo
Bolivia	4°44'9.12"N	74°7'33.18"W	Engativá	De fondo
Las Ferias	4°41'26.52"N	74°4'56.94"W	Engativá	Tráfico
P. Simón Bolívar	4°39'30.48"N	74°5'2.28"W	Barrios Unidos	De fondo
Sagrado Corazón	4°37'31.75"N	74°4'1.13"W	Santa Fe	Tráfico
Fontibón	4°40'12.36"N	74°8'29.58"W	Fontibón	Industrial
Puente Aranda	4°37'54.36"N	74°7'2.94"W	Puente Aranda	Industrial
Kennedy	4°37'30.18"N	74°9'40.80"W	Kennedy	De fondo
Carvajal	4°35'44.22"N	74°8'54.90"W	Kennedy	Tráfico Industrial
Tunal	4°34'34.41"N	74°7'51.44"W	Tunjuelito	De fondo
San Cristóbal	4°34'21.19"N	74°5'1.73"W	San Cristóbal	De fondo
Móvil	---	---	---	-

En el segundo grupo se han seleccionado los datos provenientes de las capas “Densidad de la población por Unidad de Planeación Zonal (UPZ)” y la “Población en edad de trabajar”, cada una identificada para el estudio como **001\_VD** y **002\_VD**, respectivamente. La primera de las capas tiene información por UPZ acerca de población, composición y densidad urbana para la ciudad de Bogotá al año 2009 y aunque el periodo inicial es de 2009, se tomaron los datos de 2017 publicados por la Secretaria de Planeación de Bogotá para el Laboratorio Urbano. En cuanto a **002\_VD**, el panel que resume la información geográfica empleada para este estudio se muestra en la Figura 2.

**Figura 2: Población en edad de trabajar (IDECA, 2021).**



Para el grupo de salud y protección social, se descargaron los datos de las “Instituciones prestadoras de salud” (**001\_VS**) y los “Pensionados activos por localidad” (**002\_VS**). Los datos de **001\_VS** contienen información geográfica organizada por localidad referente al conjunto de entidades que han sido aprobadas por la Secretaría Distrital de Salud para prestar de forma parcial en 2020 junto con los procedimientos que se demanden con ocasión de cumplir con el Plan Obligatorio de Salud (POS), mientras la información recogida en **002\_VS** corresponde a los datos públicos relevantes de la población pensionada activa según el Fondo de Prestaciones Económicas, Cesantías y Pensiones (FONCEP), reportados del año 2020.

Por su parte, el “Ingreso per cápita” (**001\_VE**) y las “Empresas creadas” (**002\_VE**), conforman el grupo de economía y finanzas con datos procedentes en los dos casos de la Secretaría Distrital de Desarrollo Económico, el primero de ellos muestra el ingreso de la población de la ciudad de 2017 y el segundo subgrupo, muestra la cantidad de compañías en Bogotá que han creado su registro mercantil en el año 2018.

En el aspecto social, los subgrupos analizados son “Demografía de la población víctima por localidad” identificado como **001\_VI** y “Bono de alimentación” como **002\_VI**. En la primera capa se encuentra la información de la población de víctimas del conflicto armado en el distrito capital a nivel Localidad del 2019. La capa 002\_VI muestra las medidas de ayuda humanitaria de alimentación que la Alta Consejería para los Derechos de las Víctimas, Paz y Reconciliación (ACDVPR), otorga mediante un bono a las víctimas del Conflicto Armado Interno que llegan a la ciudad y cumplen con los requisitos de ley por localidad para el año 2019 (República de Colombia, 2011).

Finalmente, el grupo de educación lo integran las capas **001\_VM** y **002\_VM** siendo esas la “Matrícula Total en Colegios Oficiales” del año 2020 y la “Tasa de Deserción Escolar Colegios Oficiales Bogotá” de 2018. La matrícula total es el registro que permite organizar y controlar el proceso de matrícula a nivel general en todos los ciclos educativos incluyendo la matrícula en población con discapacidad. A través del sistema integrado de matrícula SIMAT impulsado por el Ministerio de Educación, es posible conocer los estudiantes que han sido matriculados en las instituciones oficiales y no oficiales de la ciudad, en el marco de la política de cobertura educativa de la Secretaría de Educación del Distrito (SDE, 2021). La misma secretaría también reporta la segunda capa seleccionada la cual contiene el cociente entre el número de alumnos que desertaron el curso en el que estaban matriculados en el año 2018 sobre el total de matriculados (aprobados+ reprobados + abandonos) en este mismo periodo de tiempo para entidades no oficiales, por UPZ. Este indicador varía entre 0 y 100.

### 3.4. Instrumentación

El estudio se realizó haciendo uso del software Geoda® (Anselin, 2003) y el Sistema de Información Geográfico de ESRI, ArcGis®. El primer software fue desarrollado por el Centro de Ciencias Sociales espacialmente integradas (CISIS) y el Centro Nacional de Información y Análisis Geográficos desde 1993 para conseguir la armonización entre ArcInfo de ESRI y SpaceStat®. Consiste en un entorno interactivo que combina mapas con gráficos estadísticos para el análisis de datos espaciales. De manera adicional, se usó la aplicación de Arcgis® de Autocorrelación Espacial de Morans I, disponible a través de las herramientas “*Analyzing Patterns*”, con el objetivo de medir simultáneamente la autocorrelación espacial en función de las ubicaciones y sus características. Estas herramienta han sido empleadas recientemente por varios autores para el estudio de patrones espaciales en contextos específicos (Fu et al., 2014; Hipp & Chalise, 2015) .

### 3.5. Método analítico

Las dos herramientas empleadas calculan el Índice de Moran, evaluando si el patrón expresado está agrupado, disperso o es aleatorio. Las salidas de las herramientas son el valor del índice junto con una puntuación  $z$  y un valor  $P$  para validar el estadístico de prueba de dos colas y evaluar la significancia de dicho índice. Este tipo de autocorrelación es multidireccional y multidimensional, pero, a diferencia de los coeficientes de correlación, no mide exclusivamente la correlación perfecta. La estructura del índice de Moran ( $I$ ) para la autocorrelación espacial está dada por (Celemín, 2009):

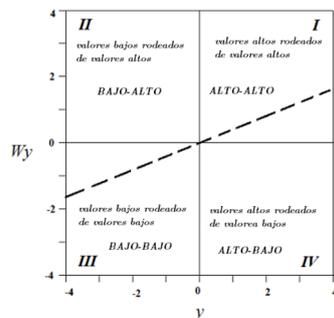
$$I = (n / S_o) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i / \sum_{i=1}^n z_i^2 \quad (1)$$

Donde  $S_o$  es la suma de los elementos de la matriz de pesos:

$$S_o = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (2)$$

$Z$  representa desviaciones de la media ( $x_i - \bar{x}$ ) o ( $x_j - \bar{x}$ );  $x_i$  es el valor de una variable en una unidad espacial y  $x_j$  es el valor de la variable en otra localización, normalmente las vecinas a  $x_i$ . Según el índice obtenido se pueden definir patrones espaciales y tipos de dispersión. Para ello, Geoda® complementa el resultado de ArcGis®, permitiendo analizar las agrupaciones de la información con su respectiva significancia mediante gráficos con cuatro cuadrantes y una línea con pendiente igual a  $I$  (Figura 3).

Figura 3: Gráfica de Moran (Huitrón Mendoza, 2020).



Las matrices de pesos espaciales por contigüidad empleadas para el estudio desde Geoda® son de tipo “*Reina de orden 1*”, semejante a la pieza de ajedrez, donde los vecinos de cada unidad espacial están a un paso de distancia entre sí y comparten vértice o arista.

Una vez arrojados los cálculos y las gráficas para cada variable o subgrupo seleccionado por parte de las herramientas, se siguen los pasos para evaluar estadísticamente los resultados haciendo el planteamiento de la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alternativa ( $H_a$ ), donde la  $H_0$  es de no autocorrelación espacial ( $I \sim 0$ ) y la  $H_a$  es de autocorrelación espacial ( $I \neq 0$ ). Después de dicho planteamiento se elige el nivel de significancia o máximo de nivel de error tolerado. En este caso, se opta por un nivel de significancia del 5% con un valor  $\alpha = 0,05$  y nivel de confianza del 95%. Con lo anterior, se determina la zona de rechazo y no rechazo de la  $H_0$ , siendo una prueba de dos colas la esperada. A partir de eso, se rechaza  $H_0$  si el estadístico de prueba está en la región crítica, de lo contrario, no se rechaza  $H_0$ . Además, el valor  $z$  complementa la inferencia porque un valor positivo indicará que los datos esta espacialmente agrupados mientras un valor negativo denota un modo competitivo entre dato y dato. El valor  $z$ , a ese nivel de significancia y en una distribución normal, es de  $\pm 1.96$  (Huitrón Mendoza, 2020).

## 4. Resultados y Discusión

### 4.1. Análisis del índice de Morán univariante

El tratamiento de cada una de las variables permitió recolectar los resultados de la Tabla 2 y la Figura 4 y validar si hay patrones espaciales en los datos antes de continuar con el análisis del índice  $I$  de Morán bivalente entre el material particulado y el resto de las variables.

Del primer grupo, solamente los patrones de asociación espacial de las variables **001\_VA** y **004\_VA** son estadísticamente significativos y tienden a estar agrupados en el espacio, mientras en las variables **002\_VA** y **003\_VA** no se da el mismo comportamiento. Si bien el  $I$  de Morán empírico guarda distancia con el estimado en los dos casos, los valores de  $z$  en la región de aceptación de  $H_0$  (1,6233, -0,3210). Eso significa que la distribución de los datos en **002\_VA** y **003\_VA** no se debe a estructuras espaciales sino a la casualidad.

En el grupo (2), la variable **001\_VD** no pasó el estadístico de prueba porque el valor ***p-value*** se alejó de cero (0,14825) y el valor de  $z$  se encontró lejos del valor de referencia fijado para el estadístico situándose en la zona de aceptación de la  $H_0$ . Es importante indicar que la salida de ArcGIS indicó dispersión aleatoria (zona *random*) mientras que en Geoda el software por defecto removió la matriz de pesos antes de reproducir la gráfica. En cuanto a la segunda variable de este grupo, los resultados demostraron que la distribución para **001\_VD** no se debe a la casualidad, sino que se debe a estructuras especiales, generando un *input* para proceder con el análisis del  $I$  de Morán bivalente.

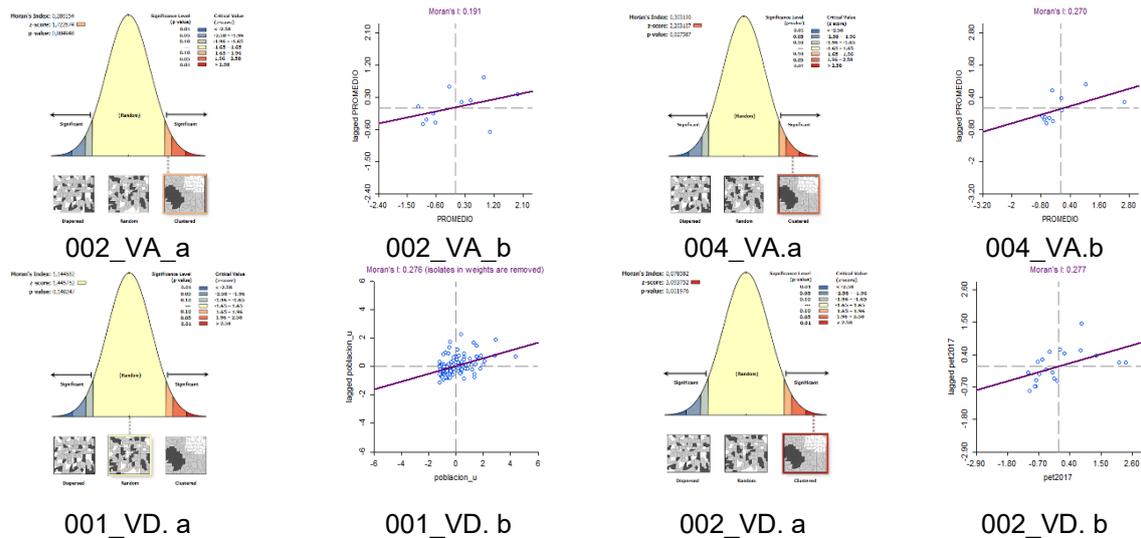
De acuerdo con la evidencia estadística del grupo (3), la variable **002\_VS** presenta un valor de  $z$  crítico, con un 95% de confianza, en el área de aceptación de  $H_0$ , lo cual significa que no existe autocorrelación espacial, además que se cumplen otras condiciones para aceptar la hipótesis como índices de Moran empíricos con valores muy cercanos al estimado y ***p-value*** alejado de cero (0,18100). Caso contrario sucede con la otra variable del grupo; la distribución de la variable **001\_VS** no es producto del azar y se mantiene para el análisis bivalente.

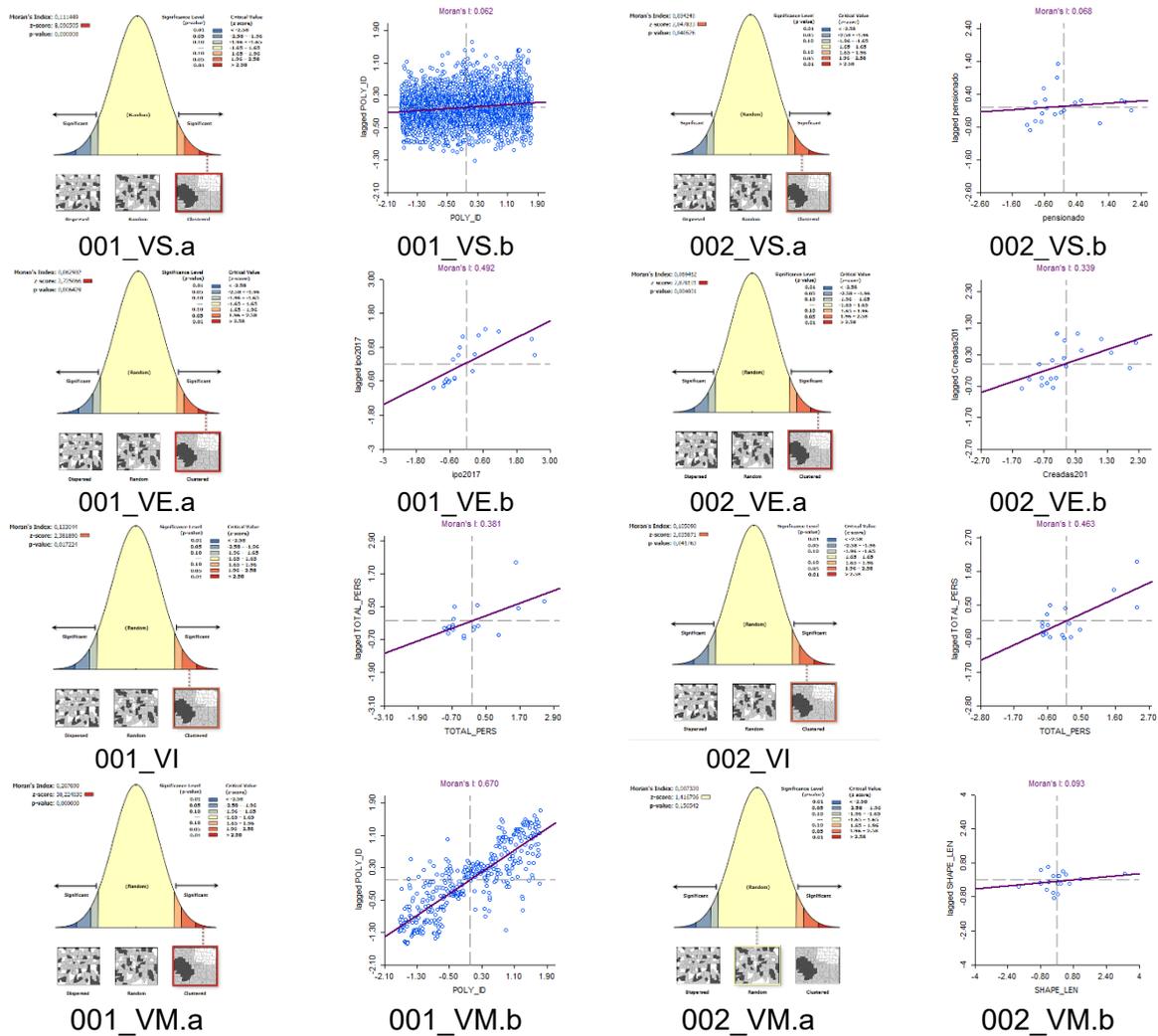
Para los grupos restantes (4), (5) y (6), las dos variables en cada uno de los casos mantienen patrones de asociación espacial dado la prueba de hipótesis verificada, con excepción de la última de las variables del grupo 6, correspondiente a **002\_VM**, que queda descartada para la estimación del índice de Moran bivalente teniendo en cuenta que los cálculos discrepan de una herramienta a otra y a su vez cuenta con un ***p-value*** alejado de cero así como un valor ***z-value*** cercano al  $z$  crítico establecido para la prueba estadística, entre -1.96 y 1.96.

Tabla 2: Resumen de resultados calculados en ArcGis® y en Geoda®.

Grupo	Variable	Geoda®				ArcGis			
		I Moran estimado	sd	z-value	p-value	I Moran estimado	z-score	p-value	>%
1	001_VA	0,408	0,1596	3,2018	0,00400	0,50962	2,86324	0,00419	1
1	002_VA	0,191	0,1727	1,6233	0,06700	0,28615	1,72267	0,08495	10
1	003_VA	0,155	0,1651	-0,3210	0,40900	0,04847	0,67559	0,49929	-
1	004_VA	0,270	0,1319	2,7484	0,00600	0,30310	2,20311	0,02759	5
2	001_VD	0,276	0,0582	4,9354	0,00100	1,14458	1,44575	0,14825	*
2	002_VD	0,277	0,1407	2,3885	0,01900	0,07858	3,09375	0,00197	1
3	001_VS	0,062	0,0087	7,1072	0,00100	0,11145	8,09659	0,00000	1
3	002_VS	0,068	0,1423	0,8824	0,18100	0,03424	2,04783	0,04057	5
4	001_VE	0,492	0,1341	4,0739	0,00100	0,06290	2,72506	0,00643	1
4	002_VE	0,339	0,1401	2,8085	0,01300	0,06946	2,87810	0,00400	1
5	001_VI	0,381	0,1366	3,2227	0,00500	0,13304	2,38189	0,01722	5
5	002_VI	0,463	0,1381	3,7768	0,00300	0,10509	2,03587	0,04176	5
6	001_VM	0,670	0,0285	23,574	0,00100	0,20769	30,2246	0,00000	1
6	002_VM	0,093	0,1221	1,1754	0,11800	0,00732	1,41679	0,15654	-

Figura 4: Gráficos de ArcGis (a) y de Geoda (b)





#### 4.2. Análisis del índice de Morán bivalente

Partiendo de los resultados anteriores se procedió a calcular nuevamente los criterios, pero esta vez para verificar si existe autocorrelación espacial entre la concentración de material particulado y el resto de las variables que presentaron autocorrelación espacial.

El estadístico de prueba empleado en el análisis univariante así como el peso y la contigüidad en Geoda® (Reina de orden 1) se mantuvo para el análisis bivalente. En cada caso, se verificaron tres aspectos: i) que el I de Moran empírico estuviera lo suficientemente alejado del I de Moran simulado, ii) que p-value se encontrara cercano a cero y, iii) el valor crítico z en la zona de rechazo o no rechazo de la Ho. La Tabla 3 resume los resultados.

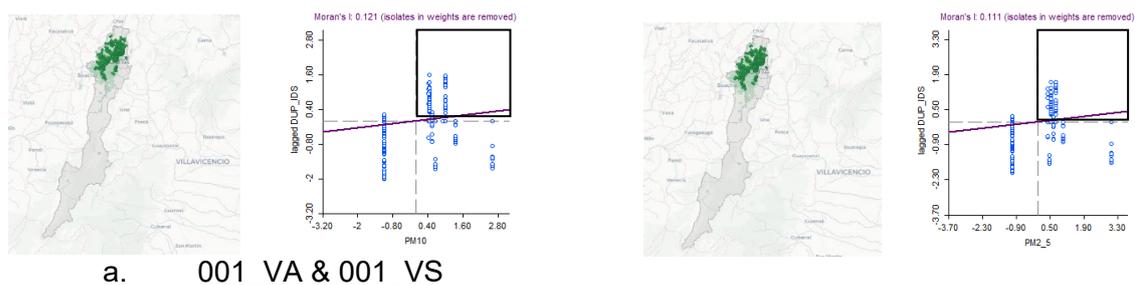
**Tabla 3: Resumen de resultados calculados por Geoda® para el análisis bivalente.**

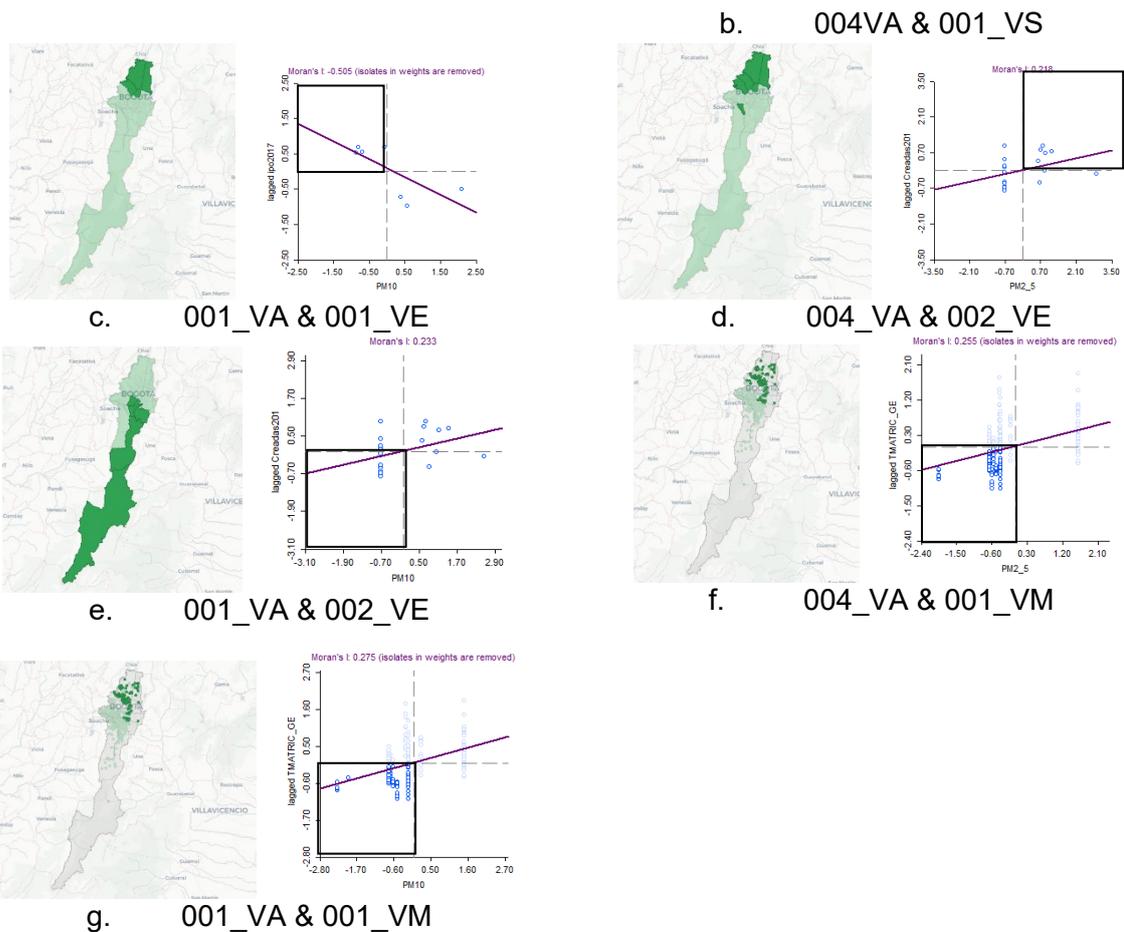
Variables	I Moran estimado	sd	z-value	p-value
001VA : 002_VD	0,173	0,2020	1,2034	0,12600
004VA : 002_VD	0,028	0,1861	0,4751	0,30000
001VA : 001_VS	0,121	0,0193	21,336	0,00100
004VA : 001_VS	0,111	0,0192	20,314	0,00100
001VA : 001_VE	-0,505	0,2665	-2,1465	0,01900
004VA : 001_VE	-0,311	0,2486	-1,4179	0,07000
001VA : 002_VE	0,233	0,1208	2,2328	0,02800
004VA : 002_VE	0,218	0,1201	2.1212	0,03500
001VA : 001_VI	-0,065	0,1932	-0,6801	0,22200
004VA : 001_VI	-0,020	0,1930	-0,4386	0,27600
001VA : 002_VI	-0,047	0,1033	-0,3030	0,38300
004VA : 002_VI	-0,036	0,1009	-0,1716	0,45100
001VA : 001_VM	0,257	0,0345	7,4454	0,00100
004VA : 001_VM	0,255	0,0341	7,4662	0,00100

Si bien algunas de las variables individuales presentaban autocorrelación espacial en el análisis univariante, al combinar las dos variables y proceder con el cálculo bivalente, se encontró correlación espacial en siete tratamientos. Se obtuvo evidencia estadística de correlación espacial entre el material particulado PM10 y, 001\_VS, 001\_VE, 002\_VE y 001\_VM, mientras para el otro contaminante, es decir, para PM2.5, se encontraron patrones de asociación espacial solamente con: 001\_VS, 002\_VE y 001\_VM. La figura 5 recoge el reporte gráfico suministrado por Geoda®, después del cálculo del I de Moran.

De la Figura 5 se destaca que la única correlación especial que mostró un valor **z** negativo fue la nombrada como **c.001\_VA & 001\_VE**, lo que supone que hay datos agrupados en un modo competitivo; es decir, los valores altos repelen a otros valores altos y los valores negativos repelen a otros valores negativos. El resto de las correlaciones espaciales presentaron valores **z** positivos lo que significa que los datos están agrupados en algún modo. En esa condición, las gráficas **a.001\_VA & 001\_VS**, **b.004VA & 001\_VS** y **d.004\_VA & 002\_VE**, muestran altas frecuencias en los datos del primer cuadrante, lo que sugiere que los valores altos procedentes de las dos variables están rodeados entre sí por los valores más altos. Todo lo contrario, sucede en las gráficas **e.001\_VA & 002\_VE**, **f.004\_VA & 001\_VM** y **g.001\_VA & 001\_VM** que recae sobre el tercer cuadrante, donde los valores bajos de una de las variables están rodeados por los valores bajos de la otra.

Figura 5: Índice de Moran e histogramas de cada una de las correlaciones.





## 5. Conclusiones

La concentración promedio anual de los contaminantes atmosféricos (PM10 y PM2.5) censadas por la RMCAB en las 19 localidades de Bogotá se sometieron a correlación espacial con la densidad de la población por UPZ (2017), población en edad de trabajar (2017), instituciones prestadoras de salud (2020), pensionados activos (2020), ingreso per cápita (2017), empresas creadas (2018), demografía de la población víctima por localidad (2019), bono de alimentación (2019), matrícula total en colegios oficiales (2020) y finalmente, tasa de deserción escolar en colegios oficiales (2018). Se optó por dicha selección dada la heterogeneidad en las fechas de los metadatos y los formatos de descarga disponibles en los recursos del IDECA. En ese sentido, se atiende la recomendación hecha por Laurent et al., (2007), asumiendo mayor cantidad de variables socioeconómicas en estudios de este tipo.

En primer lugar, se analizaron individualmente los datos seleccionados de la muestra a través de Geoda®. Se encontró un agrupamiento espacial significativo de la concentración promedio anual de PM10 del año 2014 y PM2.5 del 2019, a nivel localidad en Bogotá. Sin embargo, la evidencia estadística no fue suficiente para concluir lo mismo para PM10 del año 2019 y PM2.5 de 2014. En el grupo de variables que integraba aspectos demográficos sólo los datos de población en edad de trabajar pertenecientes de 2017 son estadísticamente significativos y tienden a estar agrupados en el espacio lo que implicó su uso posterior en el análisis del índice de Morán bivalente. Situación semejante presentaron las variables de instituciones prestadoras de salud, con datos de 2020, el ingreso per cápita de 2017, las empresas creadas en 2018, así como la demografía de la población víctima por localidad del año 2019, el bono de alimentación del mismo año y la matrícula total en colegios de 2020, exceptuando la tasa

de deserción escolar de colegios del grupo de educación de 2018, por caer en la zona de aceptación de la hipótesis nula ( $H_0$ ).

Para el análisis bivalente, se calcularon los indicadores *LISA* a través de Geoda®. De acuerdo con los resultados, existe correlación espacial entre el PM10 (2014) y las instituciones prestadoras (2020), el ingreso per cápita (2017), las empresas creadas (2018) y la matrícula total en colegios oficiales (2020). En cuanto al PM2.5 (2019), se infiere que la relación de dicha concentración con las instituciones prestadoras (2020), las empresas creadas (2018) y la matrícula total en colegios oficiales (2020), no se debe a la casualidad sino a estructuras espaciales entre ellas.

Resulta de interés ahondar en la correlación encontrada en el tercer cuadrante de las gráficas de Morán, dado que indican que los valores más bajos de concentración de PM10 (2014) se presentaron en los sitios de Bogotá donde se han creado menos empresas y se han matriculado menos jóvenes en colegios oficiales. Por su parte, en el cuadrante uno, la correlación espacial indica que la población expuesta a las concentraciones PM2.5 (2019) más altas se presentaron en las zonas con mayores unidades prestadoras de salud y más empresas creadas. Estas notables diferencias en los cuadrantes se deben posiblemente a la divergencia en la temporalidad de los datos dada la limitación de los recursos disponibles. Es por ello, que en los próximos estudios de ponderación geográfica de este tipo es recomendable extender el análisis a periodos de tiempo semejantes, normalizar, proyectar y ampliar la batería de las variables, conforme las plataformas cartográficas lo permitan. Es importante precisar que los recursos del IDECA se encuentran en construcción y son alimentados por todas y cada una de las entidades distritales que conforman el gobierno local.

## 6. Referencias

- Aji, K. A., Wen-Chi, P., Hsiao-Yun, L., Huey-Jen, S., Chih-Da, W., & Jhon, D. (2021). Spatial patterns of lower respiratory tract infections and their association with fine particulate matter. *Scientific Reports*. doi.org/10.1038/s41598-021-84435-y.
- Anselin, L. (2003). GeoDaTM 0.9 User's Guide.
- Bogotá, Alcaldía Mayor de (2004). Decreto 190 de 2004. Colombia.
- Celemín, J. P. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. *Revista Universitaria de Geografía*, vol. 18, 2009, pp. 11-31.
- DNP, Departamento Nacional de Planeación (2008). *Evaluación de la estratificación socio-económica como instrumento de clasificación de los usuarios y herramienta de asignación de subsidios y contribuciones a los servicios públicos domiciliarios*. Disponible en: [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Sinergia/Documentos/Evaluacion\\_Politicas\\_Publicas\\_10\\_Estratificacion\\_Socioeconomica.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Sinergia/Documentos/Evaluacion_Politicas_Publicas_10_Estratificacion_Socioeconomica.pdf)
- Fu, W. J., Jiang, P. K., Zhou, G. M., & Zhao, K. L. (2014). Using Moran's I and GIS to Study the Spatial Pattern of Forest Litter Carbon Density in a Subtropical Region of Southeastern China. *Biogeosciences*, 11, 2401–2409. doi:10.5194/bg-11-2401-2014.
- Hipp, J.A., & Chalise, N. (2015). Spatial Analysis and Correlates of County- Level Diabetes Prevalence 2009-2010. *Preventing Chronic Disease*. 1–9. Revista de Salud Pública, 15(1), 90–102. doi.org/10.15446/rsap
- Huitrón Mendoza, J. A. (2020). *Indicadores locales de asociación espacial (análisis LISA)*. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Economía - UNAM, México.
- Kim, M. O, & Kim H. (2012). The role of differences in individual and community attributes in perceived air quality. *Science of the Total Environment*, 425, 20–26.

- Laurent, O., Bard, D., Filleul, F., & Segala, C. (2007). Effect of socioeconomic status on the relationship between atmospheric pollution and mortality. *J. Epidemiology Community Health*, 61, 665–675.
- Lipfert, F. (2004). Air pollution and poverty: Does the sword cut both ways? *Journal Epidemiology Community Health*, 58, 2-3.
- Martins, M. C., Fatigati, F. L., Vespoli, T. C., Martins, L. C., Pereira, L. A. A., Martins, M. A., Saldiva, P. H. N., & Braga, A. L. F. (2004). Influence of socioeconomic conditions on air pollution adverse health effects in elderly people: an analysis of six regions in Sao Paulo, Brazil. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 58,41–46.
- Mehta, S., Sbini, H., Dinh, T.N., Xuan, D., Thi Thanh, L., Thanh, C.T., Le Truong, G., Cohen, A., & Brauer, M. (2014). Effect of poverty on the relationship between personal exposures and ambient concentrations of air pollutants in HoChi Minh City. *Atmospheric Environment*, 95, 571-580.
- Morgenstern, R., & Sánchez, T. E. (2007). Control of Atmospheric Pollution. Environmental Priorities for poverty reduction in Colombia. *World Bank*. 209 -254.
- Ortiz, D. E. & Rojas, R. Y. (2013). Estimación de los beneficios económicos en salud asociados a la reducción de PM10 en Bogotá. *Revista de Salud Pública*, 15(1), 90–102. doi.org/10.15446/rsap.
- Periódico El Tiempo (2012). *¿De qué mueren los bogotanos?* Obtenido el 10 de marzo de 2021, desde <http://www.eltiempo.com/multimedia/especiales/de-que-mueren-los-bogotanos/14634116/1>
- República de Colombia (2011). Ley 1448 de 2011, por la cual se dictan medidas de atención, asistencia y reparación integral a las víctimas del conflicto armado interno y se dictan otras disposiciones. *Diario oficial. no. 48096*. 10 de junio de 2011. pp.1.
- SDA, Secretaría Distrital de Ambiente (2021). [Versión electrónica – mapas interactivos de la RMCAB]. Disponible en: <http://201.245.192.252:81/home/map>
- SDE, Secretaría Distrital de Educación (2021). [Versión electrónica – SIMAT]. Disponible en: <https://www.mineducacion.gov.co/1759/w3-article-168883.html? noredirect=1>
- SDP, Secretaría Distrital de Planeación (2021). [Versión electrónica – DA\_SDP\_013]. Disponible en: <http://www.sdp.gov.co/transparencia/informacion-interes/datos-abiertos/unidad-de-planeamiento-bogota-dc>
- IDECA, Infraestructura de Datos Espaciales de Bogotá (2021). [Versión electrónica – mapas interactivos del IDECA]. Disponible en: [https://www.ideca.gov.co/buscador?topic=All&metadata=All&newest=All&entity=All&resource=All&content\\_type=All&sort\\_by=created&sort\\_order=DESC](https://www.ideca.gov.co/buscador?topic=All&metadata=All&newest=All&entity=All&resource=All&content_type=All&sort_by=created&sort_order=DESC)
- UAECD, Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital (2021). [Versión electrónica – mapas de Bogotá]. Disponible en: <https://datosabiertos.bogota.gov.co/>
- WHO, World Health Organization (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. Geneva, Switzerland.

**Comunicación alineada con los  
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

