



Análisis de contaminación de PM2.5 a través de herramientas geográficas en la ciudad de Bogotá

Pollution analysis of PM2.5 using geographic tools in the city of Bogotá

Diana Carolina Hurtado Pulido¹



Cómo citar este artículo: Hurtado Pulido, D. (2017). Análisis de contaminación de PM2.5 a través de herramientas geográficas en la ciudad de Bogotá. *Análisis Geográficos*, 53, 121-141.

Resumen

Las partículas en suspensión de tamaño inferior a 2,5 micras son generadas en su mayoría por actividades humanas como, por ejemplo, la combustión vehicular. Se ha comprobado que estas partículas pueden generar graves problemas pulmonares y cardiovasculares, por lo cual es de suma importancia mantener control sobre este tipo de contaminación.

En esta investigación se determinó qué sectores de la ciudad se ven más afectados por la concentración de partículas de PM2.5 y cómo influye el comportamiento del viento en su concentración, para lo cual se utilizó la información del Observatorio Ambiental de Bogotá a partir del 2014.

Se elaboró un SIG en el cual se evaluó el comportamiento anual y promedio mensual de índices de contaminación en Bogotá, y se obtuvo como resultado que el occidente de la ciudad, particularmente la localidad de Kennedy, es donde se encuentran las estaciones con mayor concentración de PM2.5. Los meses de febrero, marzo y noviembre son en los que se reporta mayor contaminación por este tipo de partículas a causa de la reducida velocidad del viento, lo cual prolonga su permanencia en la zona.

Palabras clave: contaminación, PM2.5, calidad ambiental, atmosfera, Bogotá.

¹Estudiante de Ingeniería Catastral y Geodesia. Correo: dchurtadop@correo.udistrital.edu.co.



Abstract

The particles in suspension with lower size than 2.5 microns are created mostly by human activities, for example, the vehicular combustion. It has been proved that these particles can generate serious pulmonary and cardiovascular problems therefore is of great importance the control this type of contamination.

It was determined which sectors of the city were the most affected by the concentration of particles PM2.5 and how the behavior of the wind influences this concentration. For this purpose, information of the environmental Observatory from Bogota was used dating from 2014.

A GIS was made to evaluate the annual and monthly average pollution index, getting as a result that the west area of the city, in particular the locality of Kennedy, is where higher concentration of PM2.5 was found. Even more, in Bogota city the months of February, March and November shows the higher contamination levels are reported by this kind of particles because the reduced wind speed prolongs its permanence in the zone.

Keywords: *pollution, PM2.5, environmental quality, atmosphere, Bogotá.*



Introducción

El material particulado del que trata el presente artículo tiene un diámetro inferior a 2,5 micras, por lo cual se clasifica como *partículas finas*, las cuales, en gran medida, son resultado de transformaciones químicas procedentes de actividades como la circulación de vehículos con funcionamiento a base de diésel (Sbarato et al., 2000). Dichas partículas pueden ser sólidas o líquidas y se encuentran en suspensión en la atmósfera. Debido a su pequeño tamaño, hacen parte de la fracción respirable del aire, es decir que pueden ser adsorbidas por el sistema respiratorio al 100%. Cabe destacar que en material particulado, en general, puede clasificarse de la siguiente manera según el grado de absorción de las vías respiratorias del ser humano (Franco, 2015):

- Las partículas inhalables inferiores a 100 nm son retenidas en la nariz y la boca.
- Las partículas torácicas inferiores a 10 nm penetran hasta la laringe.
- Las partículas respirables inferiores a 4 nm llegan hasta los alveolos pulmonares.

Las partículas analizadas (PM2.5), por lo general, poseen pH ácido y forman agrupaciones que, entre otros, contienen hollín y derivados de la combustión vehicular e industrial. Los compuestos químicos que más se encuentran en este tipo de partículas son: “sulfato, amonio, iones de hidrógeno, carbón elemental, componentes orgánicos secundarios, especies orgánicas primarias de quemaduras y combustión y ciertos metales de transición” (Quijano, Quijano & Henao, 2010, p. 3).

Esta composición depende de las fuentes contaminantes, la intensidad con que se generan las partículas y, finalmente, de la interacción molecular. Para el caso específico de Bogotá, se han realizado varios estudios para caracterizar la composición química de este contaminante, entre los cuales se destaca el de Arango, Bustos y Narváez (2007), en el cual se analizó el combustible diésel utilizado en el parque automotor del transporte público de la ciudad y sus alrededores y se concluyó que los vehículos que usaban diésel contenían fracciones de metales pesados como cobre, níquel, cromo y manganeso.

Los efectos producidos por el PM2.5 en la salud de los seres humanos, especialmente en las grandes urbes, son grandes y perjudiciales, lo cual se ha demostrado en múltiples estudios, como el de Linares y Díaz (2009), en el cual concluyen que este es el único contaminante primario relacionado con los ingresos hospitalarios y que causa mayor perjuicio en menores de 10 años, ya que esta población tiene mayor vulnerabilidad debido, entre otras cosas, a que su frecuencia respiratoria es mayor, respiran más cantidad de aire por kilogramo de peso y su exposición al contaminante es alta debido a su estatura y al tiempo en el cual frecuentan parques y espacios al aire libre.

Otros factores importantes a considerar para analizar los efectos que pueden provocar estos contaminantes y su comportamiento son la topografía y la meteorología, ya que existe correlación entre el aumento del contaminante y la disminución de temperatura (Zamorano, Márquez, Aránguiz, Bedregal & Sánchez, 2003), por lo cual en las temporadas frías y de precipitación alta se presenta más cantidad de casos hospitalarios por problemas respiratorios.



La Corporación Autónoma regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (2016) realizó un análisis de la dispersión de diferentes contaminantes atmosféricos, entre ellos el PM_{2.5}, en el cual consideró los diferentes tipos de fuentes de emisión (móviles, fijas y áreas); como era de esperarse, al unir diferentes tipos de fuentes aumenta el grado de contaminación existente. En la creación de este modelo se concluyó que el comportamiento del viento, es decir, la velocidad y la extensión de las corrientes de aire, determinan, en parte, la acumulación del contaminante, pero además se tiene que la topografía suave permite mayor dispersión y circulación de los vientos y de las partículas; por el contrario, la topografía variable hace que circulen más lentamente las partículas y, por lo tanto, que estén más tiempo en la zona.

Con respecto a la normatividad nacional, se reglamentó, en principio, la Resolución 601 de 2006 por parte del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. En este documento se estableció un valor máximo permisible para cada contaminante a excepción del PM2.5, el cual debía empezar a medirse en caso de que se identificara que estas partículas estaban afectando la salud humana y, en tal caso, tenía el máximo permitido de la reglamentación de la Environmental Protection Agency (EPA). Posteriormente se crea la Resolución 610 de 2010, la cual modifica la resolución anterior puesto que ahora se indica un máximo permitido fijo por reglamentación propia; sin embargo, aún no es obligatoria su medición.

Desarrollo teórico y metodológico

Recolección y clasificación de la información

La información fue adquirida del Observatorio Ambiental de Bogotá, el cual recolecta datos de PM_{2.5} desde el 2013 aunque en este año no se consideró, puesto que muy pocas estaciones realizaron mediciones constantes de este contaminante.

En principio se observó que de las 11 estaciones instaladas en el territorio de la ciudad solo 10 de ellas contaban con mediciones del contaminante de estudio, por lo cual la estación del Tunal no se tuvo en cuenta. Para determinar el volumen de PM_{2.5} en el ambiente se obtuvieron los datos de PM_{2.5}, de la velocidad y la dirección del viento.

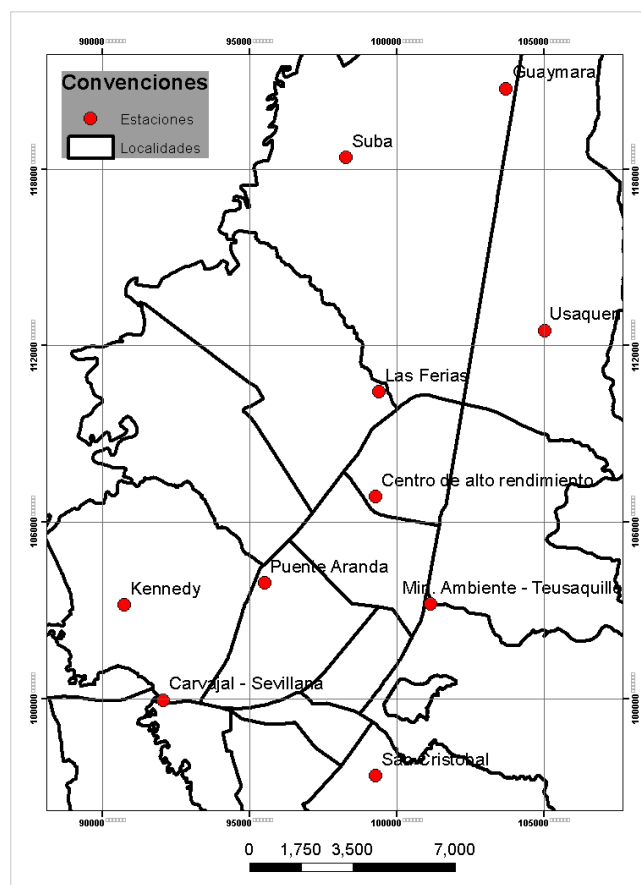


Figura 1. Ubicación de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de la Secretaría Distrital de Ambiente

Fuente: elaboración propia.



Posteriormente se separaron los datos por estación para poder determinar cuál era el comportamiento en cada ubicación en donde existían mediciones, considerando el viento en la zona y además la topografía característica del lugar, puesto que, como se indicó, este factor podía determinar en gran medida la conducta del contaminante (Zamorano et al., 2003).

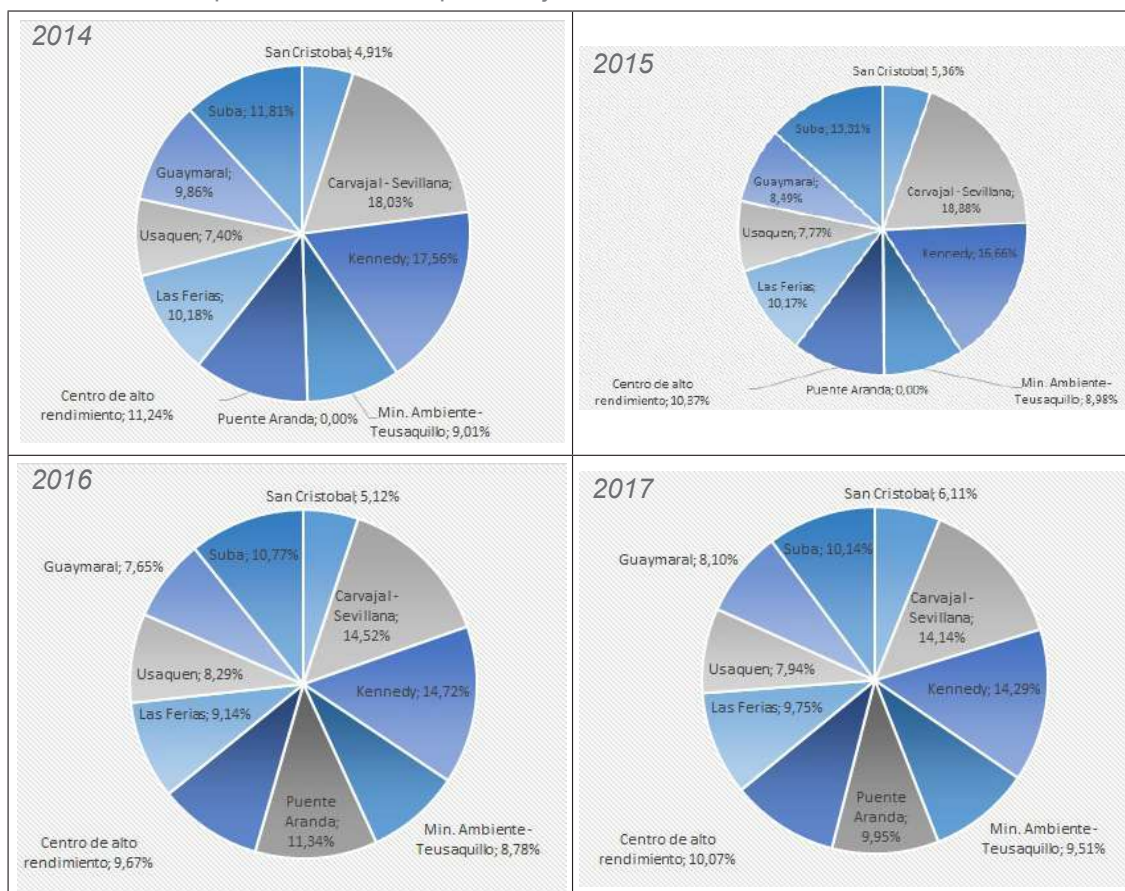
Interpretación estadística descriptiva

Con la información ordenada y clasificada de la manera requerida se realizó un análisis estadístico descriptivo por estación, considerando la información por año y por mes. Al realizar este proceso se obtuvo una visión de los datos más clara, pues permitió conocer el comportamiento

que estos tienen y además se consiguieron valores más apropiados para introducir más adelante en el sistema de información geográfica a trabajar. Las mediciones más relevantes fueron la media aritmética y la desviación estándar.

Para el 2014 se tiene que el valor medio más alto fue el de la estación de Carvajal-Sevillana, seguido de Kennedy, ambas en la localidad de Kennedy, pues entre las dos reportaron casi el 36% de la contaminación de la localidad, mientras que en las estaciones de San Cristóbal y Puente Aranda las mediciones fueron muy bajas. Posteriormente, para los años 2015, 2016 y 2017 se mantiene un comportamiento similar puesto que estas estaciones siguen siendo las que más reportan contaminación por PM_{2.5}, pero su participación sobre el total disminuye con el tiempo.

Tabla 1. Comparación anual del porcentaje de concentración de PM_{2.5} en cada estación



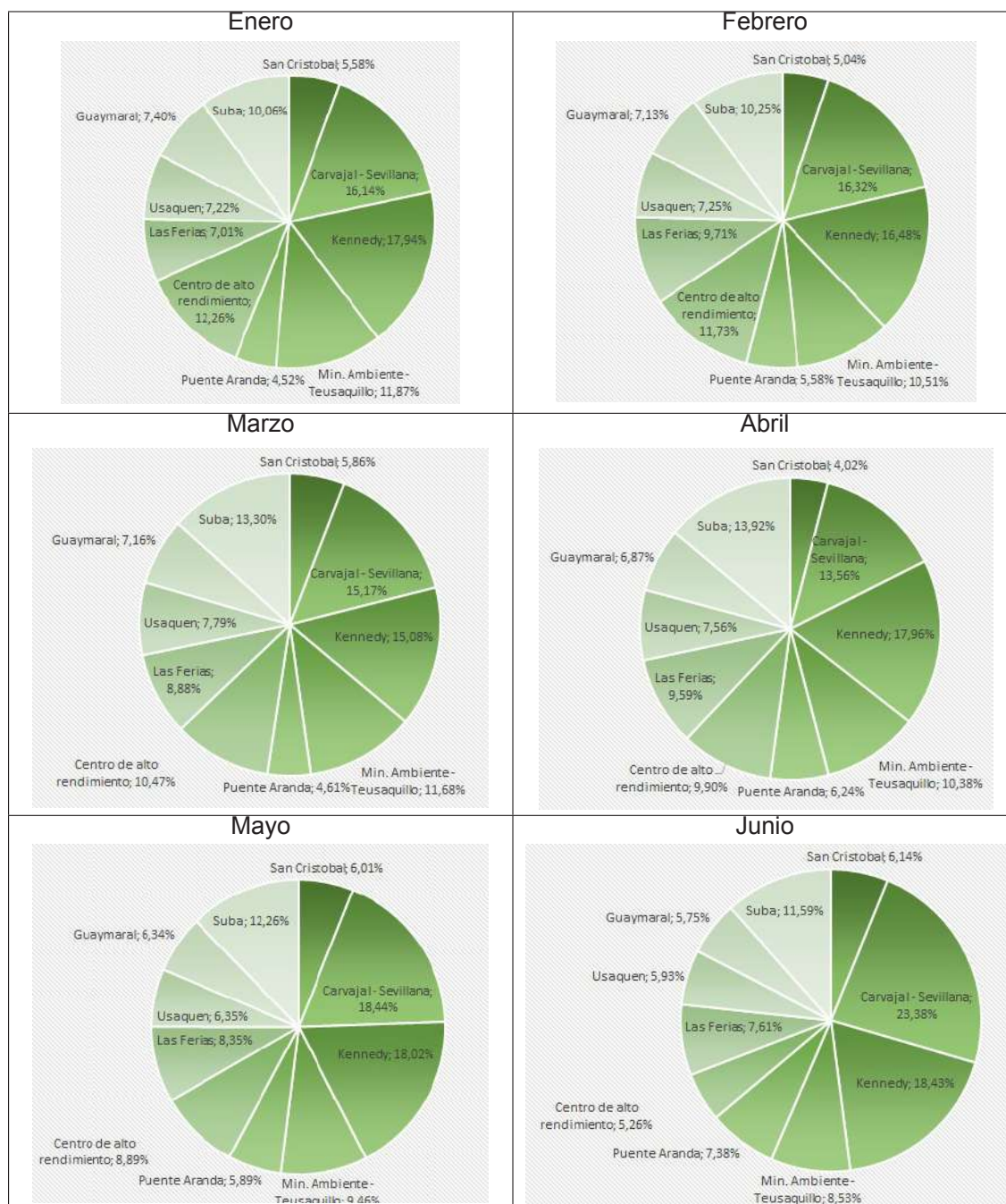
Fuente: elaboración propia.



Se realizó este mismo análisis por cada uno de los meses y se determinó que las estaciones más representativas poseen porcentajes más altos en la temporada de mayo a septiembre, pues alcanzan valores

casi del 20%, y el resto del año oscila en torno al 15%. Lógicamente la participación porcentual de las otras estaciones es menor en los meses más críticos.

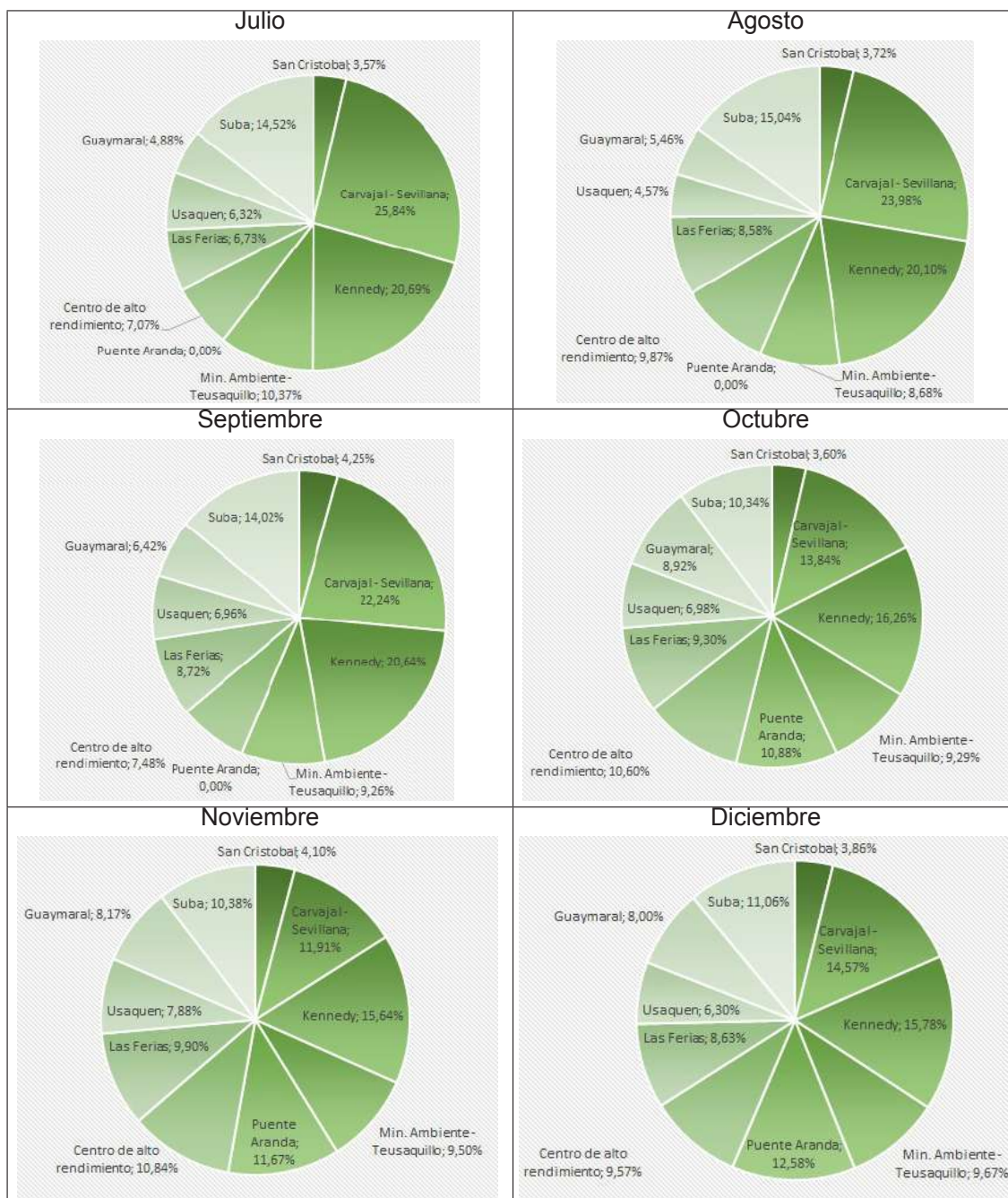
Tabla 2. Comparación mensual del porcentaje de concentración de PM2.5 en cada estación



Continúa >>



<< Continuación



Fuente: elaboración propia.



Ahora se puede ver cómo fue el comportamiento de cada una de las estaciones independientemente de las otras (figura 2): la estación de Puente Aranda tiene, los dos primeros años, valores mínimos porque durante ese periodo las mediciones fueron muy pocas o ninguna. También se concluye que las estaciones ubicadas en la localidad de Kennedy presentan las

mediciones más altas de toda la ciudad, sobrepasando la normatividad vigente (Resolución 610 de 2010). Vale la pena destacar que el valor medido año a año ha venido disminuyendo. Por el contrario, los valores registrados por las demás estaciones han aumentado con el paso de los años, lo cual es sumamente preocupante para la ciudad.

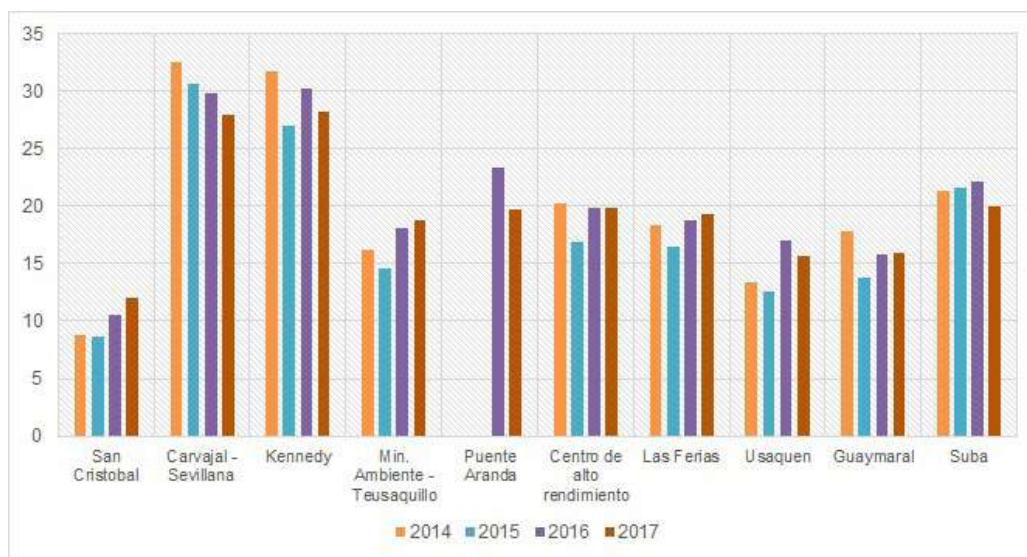


Figura 2. Comportamiento del PM2.5 en cada estación desde el 2014 al 2017
Fuente: elaboración propia.

Las gráficas anteriores se hicieron con base en el valor medio obtenido gracias al tratamiento estadístico realizado.

Desarrollo del sistema de información geográfica

Para elaborar el sistema de información geográfica (SIG) se tuvo en cuenta información clasificada y ordenada anteriormente, además de las bases cartográficas provenientes de la Infraestructura Integrada de Datos Espaciales para el Distrito Capital (IDECA) (2004). Dentro de la base de datos creada se integró la información por año y por mes de todas las estaciones de interés.

Para el procesamiento de la información se integraron los datos de velocidad y dirección del viento para determinar cómo se comportaron las corrientes de aire en cada periodo de interés, por lo cual se crearon dos capas tipo ráster en donde se interpoló la información de velocidad y dirección. En ambos casos se utilizó el método de interpolación kriging ordinario.

A continuación se muestran las imágenes ráster generadas a través del método de interpolación kriging para el año 2015. Este proceso se hizo para cada año, desde el 2014 hasta el 2016 y para el intervalo de enero a julio del 2017, y posteriormente para cada mes.

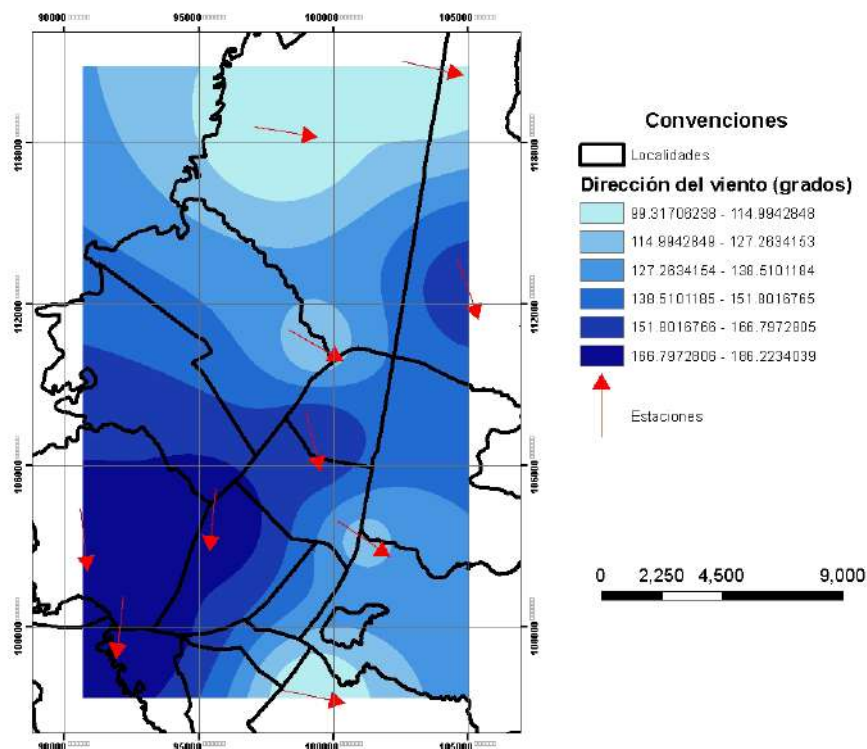


Figura 3.
Interpolación de la
dirección del viento
para el año 2015

*Fuente: elaboración
propia.*

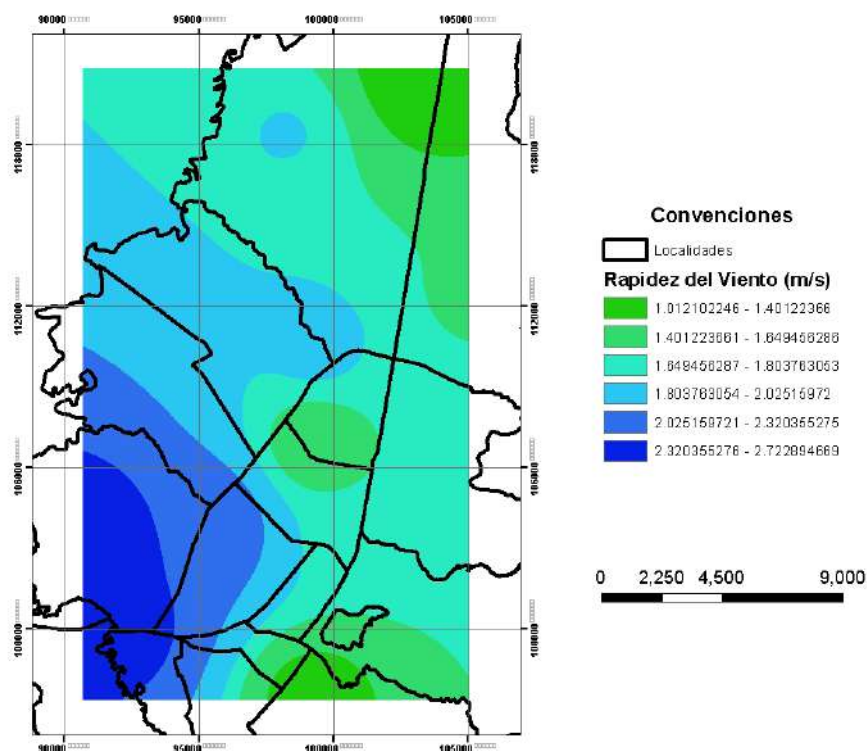


Figura 4.
Interpolación de la
rapidez del viento
para el año 2015

*Fuente: elaboración
propia.*

Con las interpolaciones anteriores se unió dicha información en formato vector, dando como resultado una capa o *feature class*

de fácil lectura que permitió identificar el comportamiento del viento más cómodamente.

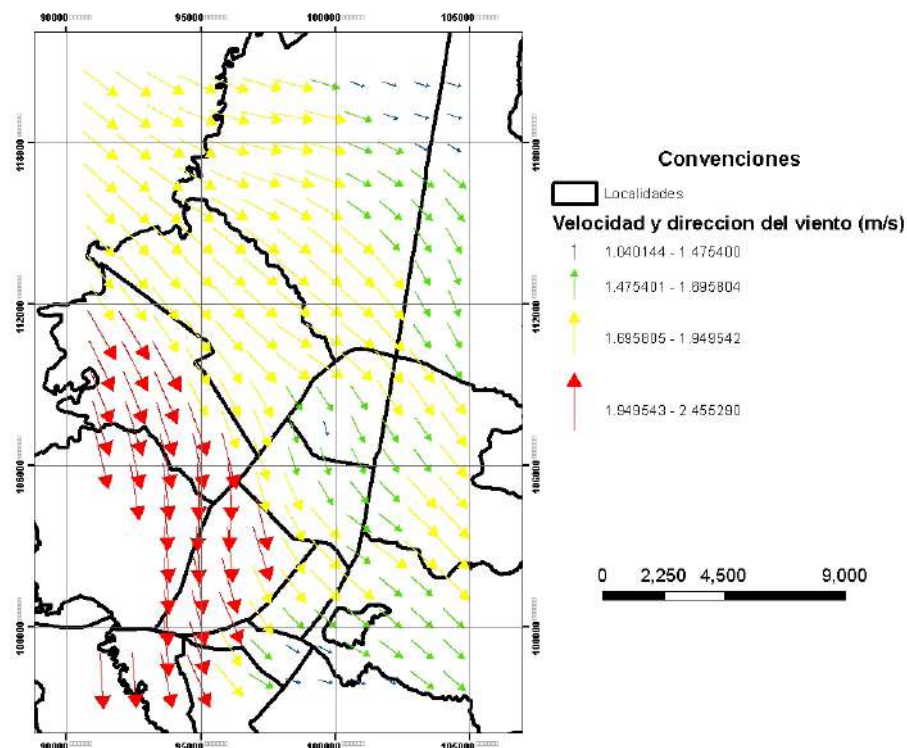


Figura 5.
 Velocidad y dirección del viento para el año 2015

Fuente: elaboración propia.

Los datos procesados de viento y la información del volumen de PM_{2.5} se incorporaron en la base de datos geográfica para completar el SIG y permitir la interpretación de la información procesada.

Interpretación y presentación de la información geográfica

Finalmente, luego de tener el procesamiento, se presentó la información a través de mapas que ilustran el comportamiento del viento y la concentración del contaminante para observar fácilmente el comportamiento en cada uno de los periodos analizados.

Análisis anual

En este estudio se evaluó el valor de la media en cada estación y cada año para

2014, 2015 y 2016. Se puede ver fácilmente que los vientos tienden a ser más fuertes al occidente de la ciudad y que gran parte de estos se depositan en la localidad de Kennedy; a su vez, en este sector se encuentran más partículas contaminantes en suspensión. Para lo que ha transcurrido del año 2017 los vientos conservan la dirección, pero la velocidad se ha reducido y el volumen contaminante medido en la zona es menor. En cambio en la estación de Puente Aranda y en la estación del Centro de Alto Rendimiento, en las localidades de Puente Aranda y Barrios Unidos respectivamente, aumentó en volumen de PM_{2.5}. Guaymaral y Usaquén, las estaciones más cercanas a los cerros, mantienen las mediciones del contaminante bajas.

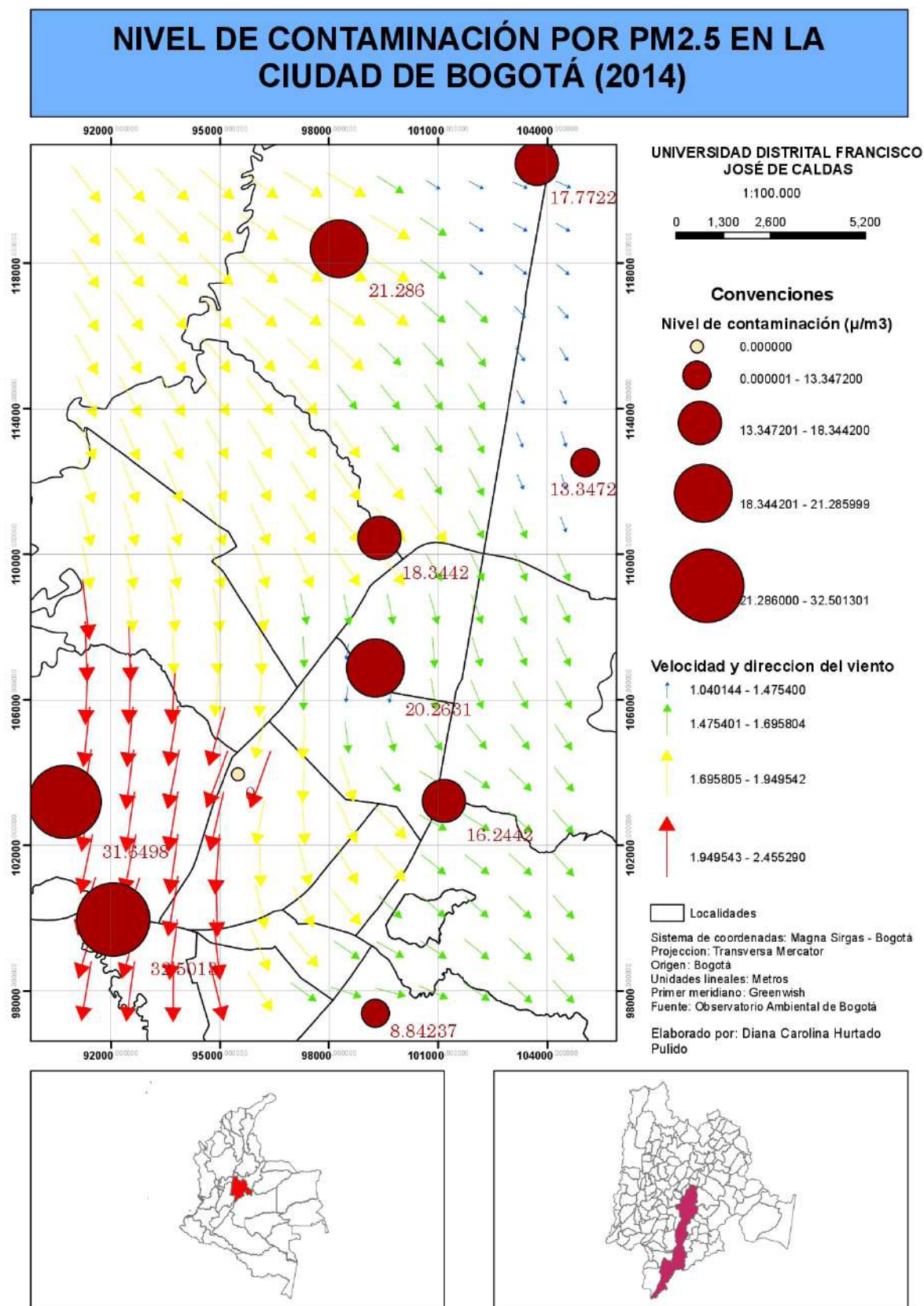


Figura 6. Contaminación por PM2.5 en 2014

Fuente: elaboración propia.



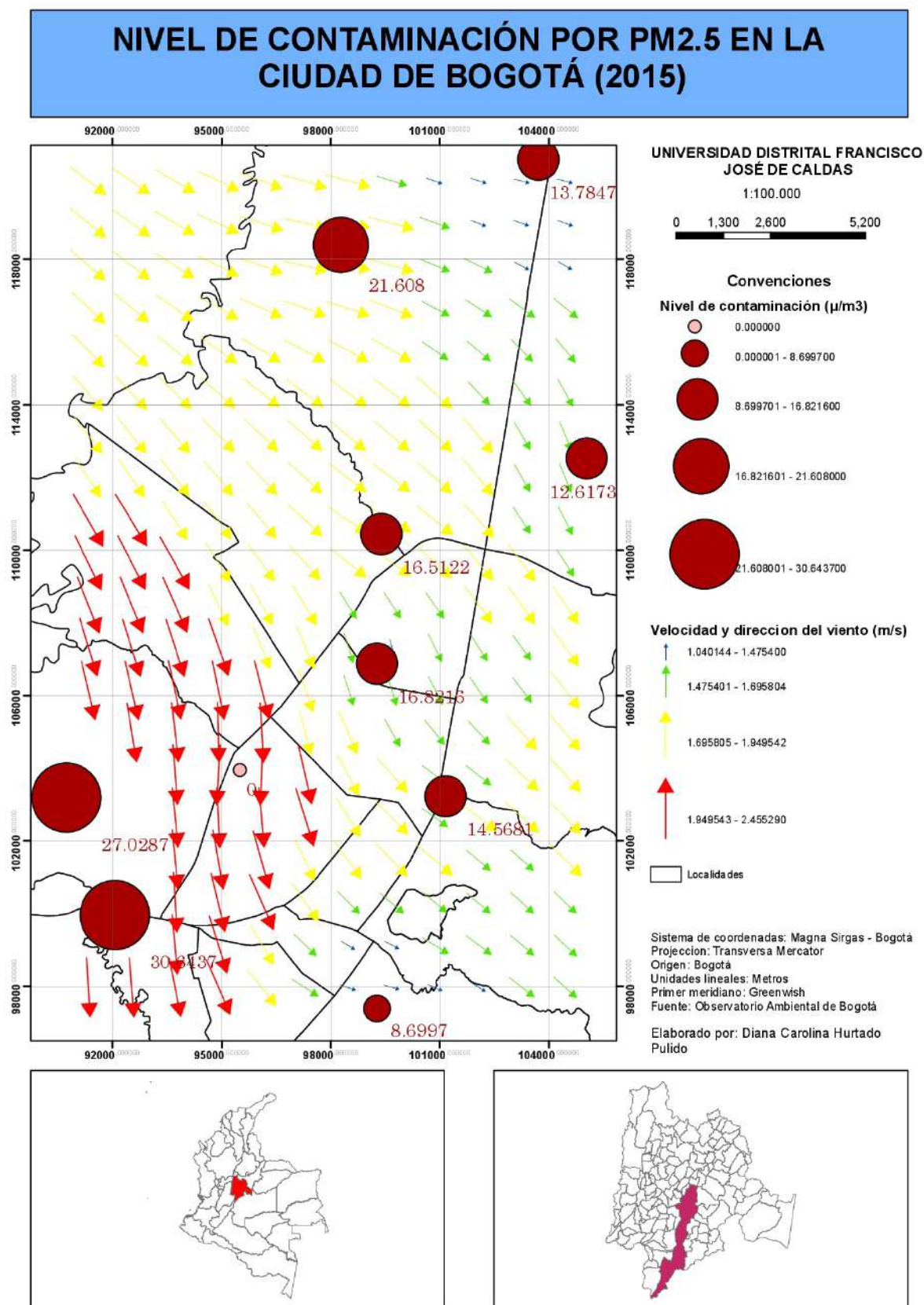


Figura 7. Contaminación por PM2.5 en 2015

Fuente: elaboración propia.

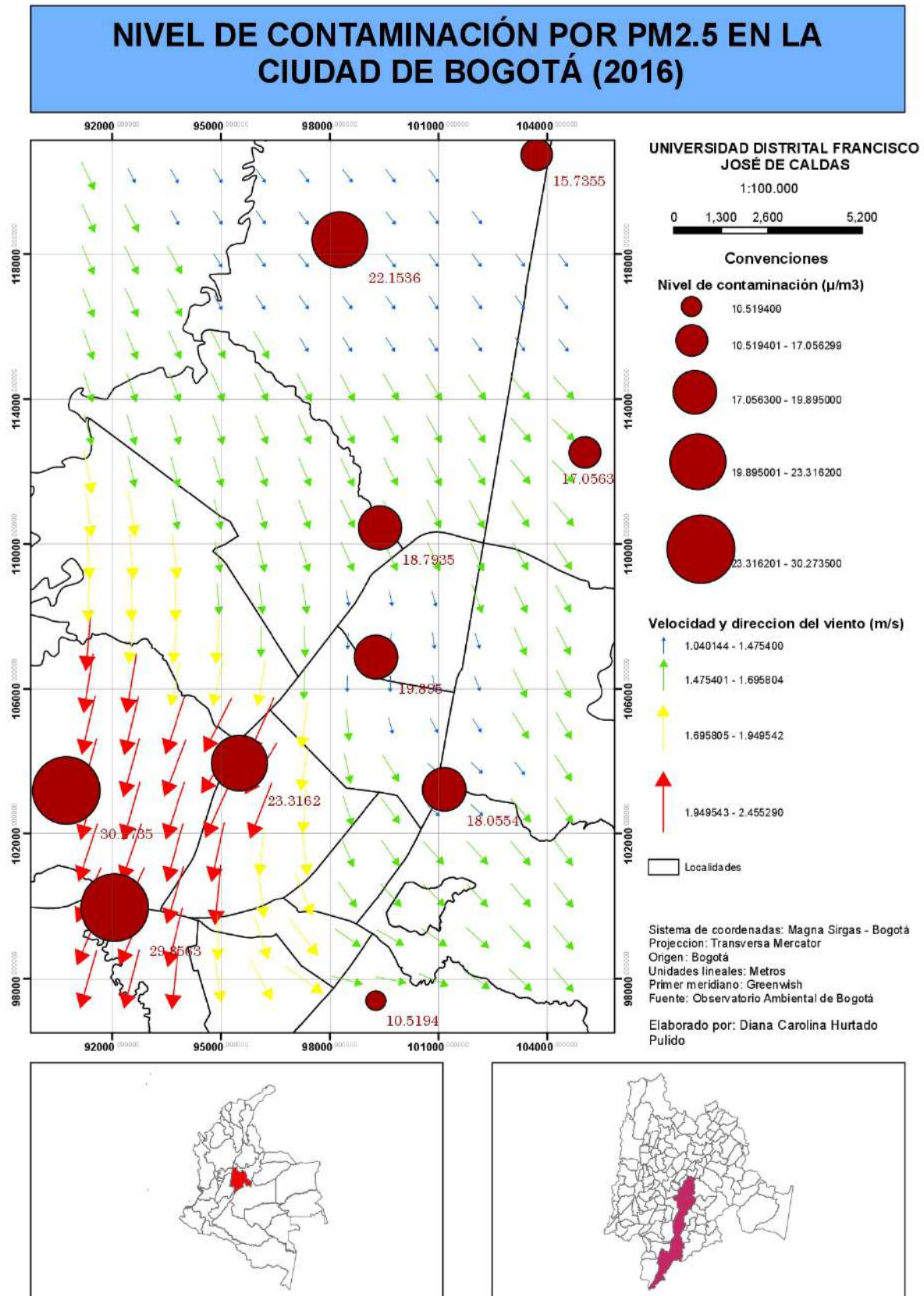


Figura 8. Contaminación por PM2.5 en 2016

Fuente: elaboración propia.



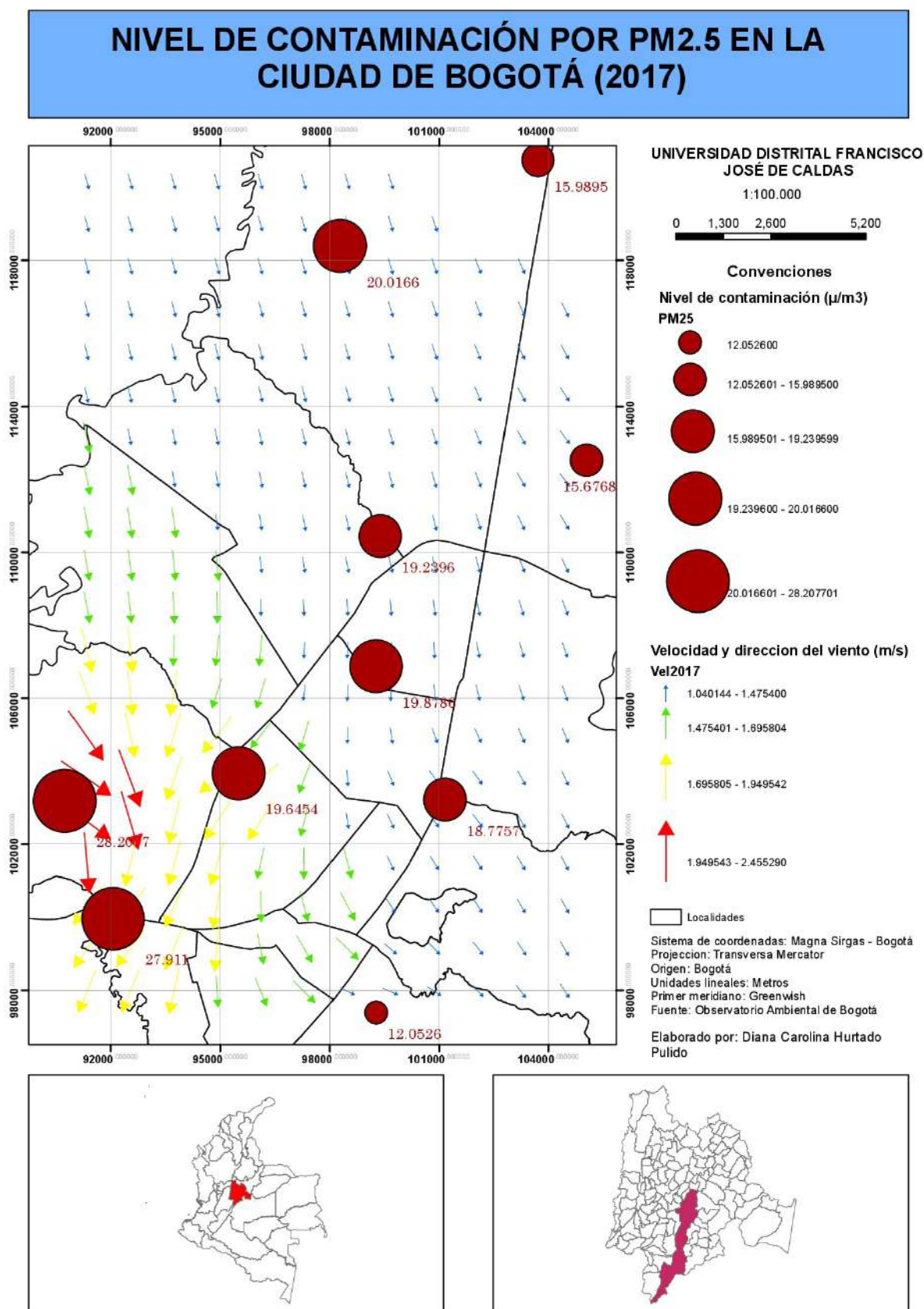


Figura 9. Contaminación por PM2.5 en 2017

Fuente: elaboración propia.



Análisis mensual

Para este caso se consideró el comportamiento que han tenido las partículas contaminantes de PM2.5 en cada mes desde el 2014, lo cual se podría relacionar con los ámbitos social, industrial y económico de la ciudad.

Se puede observar que en los tres primeros meses el viento tiene un comportamiento predominante suroccidental, a partir de abril hasta septiembre empieza a aumentar

la velocidad (alcanzando su máxima velocidad en julio y agosto) y su dirección cambia, pues va en dirección suroriental. En los últimos tres meses, es decir, en octubre, noviembre y diciembre recupera su dirección al occidente.

Los meses de febrero y marzo presentan mayor concentración del contaminante, mientras que a mitad de año disminuye el valor de las mediciones en casi todas las estaciones estudiadas.

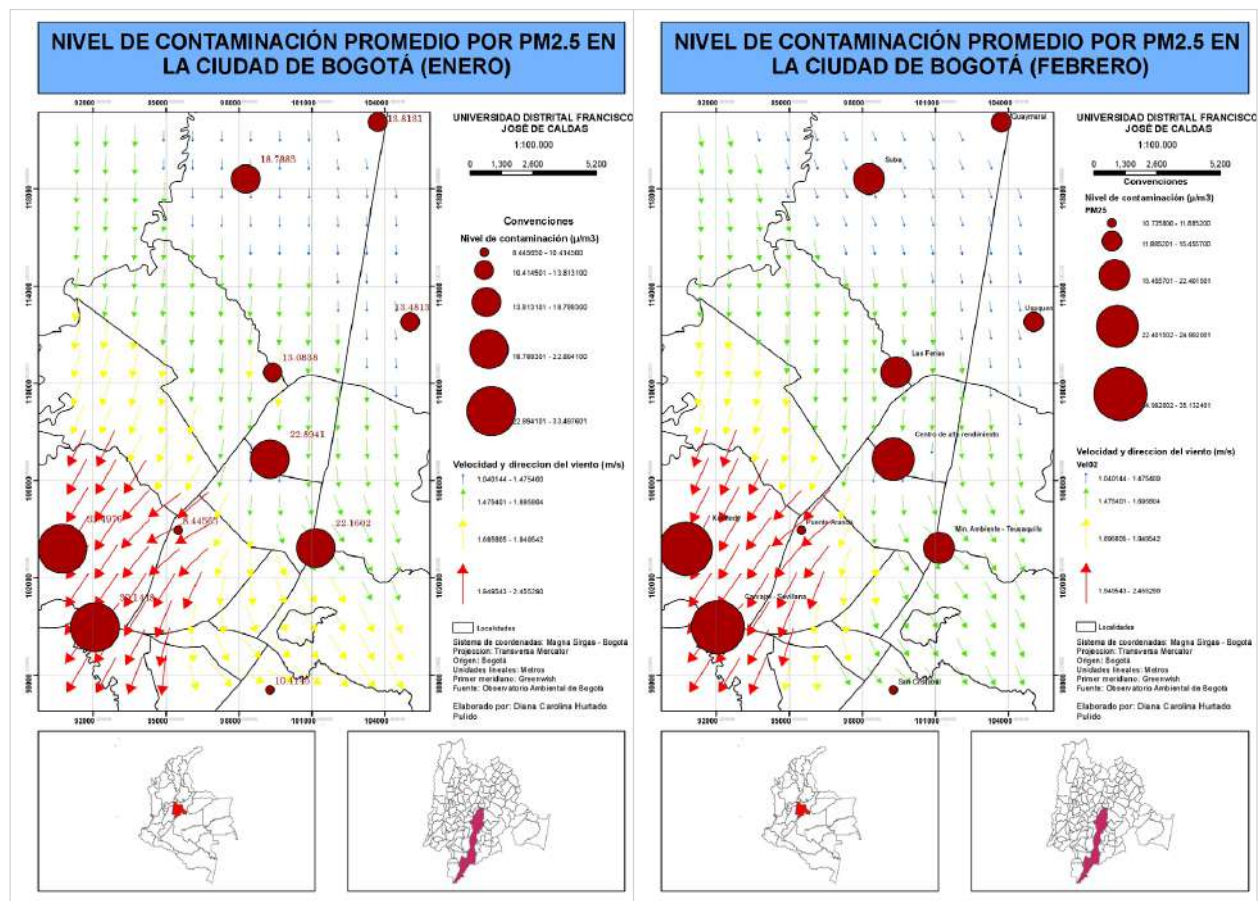


Figura 10. Contaminación promedio por PM2.5 en enero y febrero

Fuente: elaboración propia.



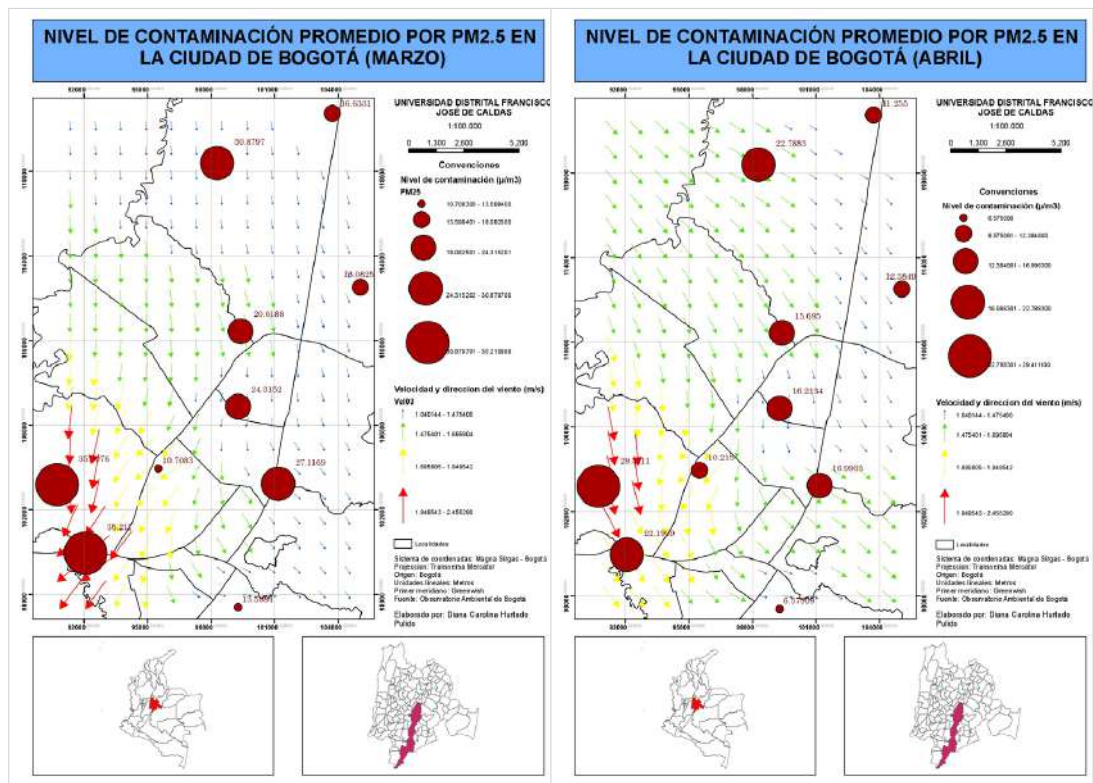


Figura 11. Contaminación promedio por PM2.5 en marzo y abril
 Fuente: elaboración propia.

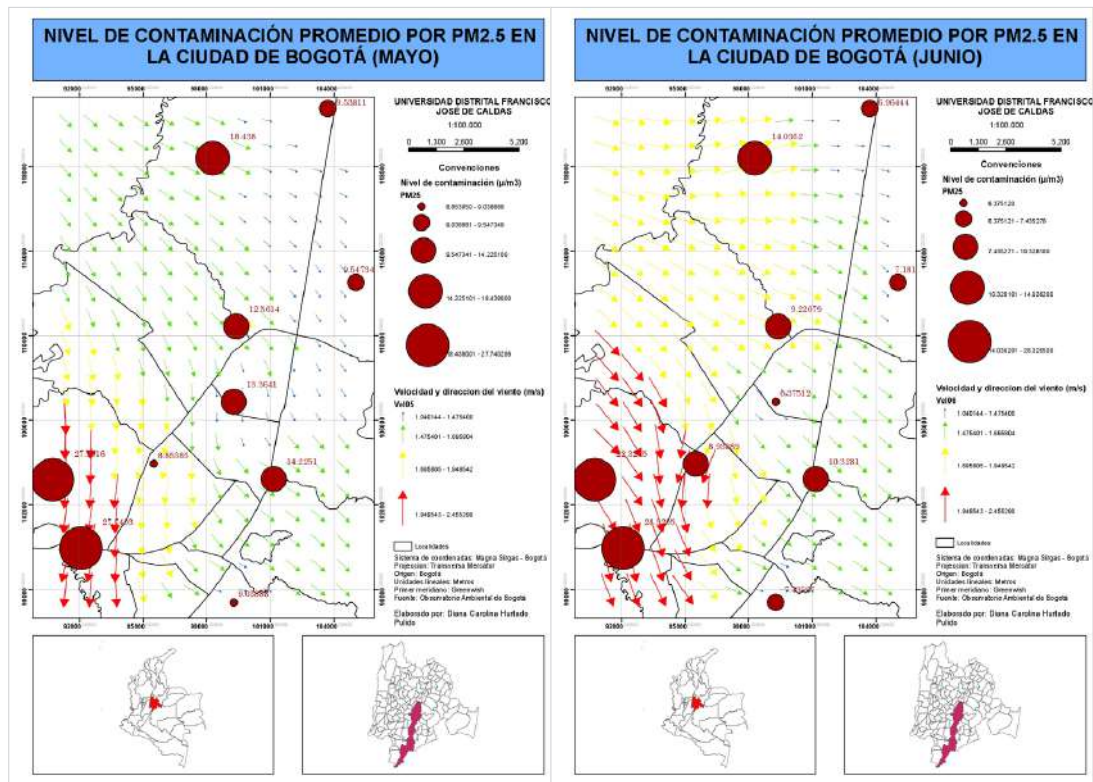


Figura 12. Contaminación promedio por PM2.5 en mayo y junio
 Fuente: elaboración propia.

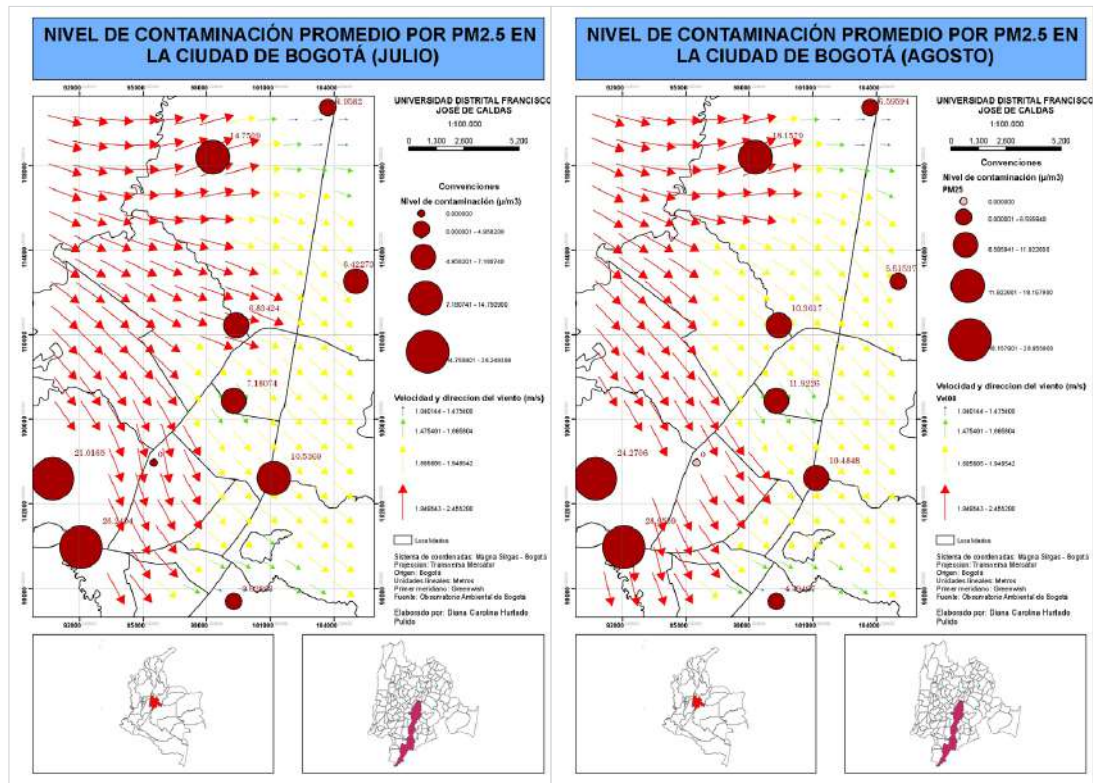


Figura 13. Contaminación promedio por PM2.5 en julio y agosto
Fuente: elaboración propia.

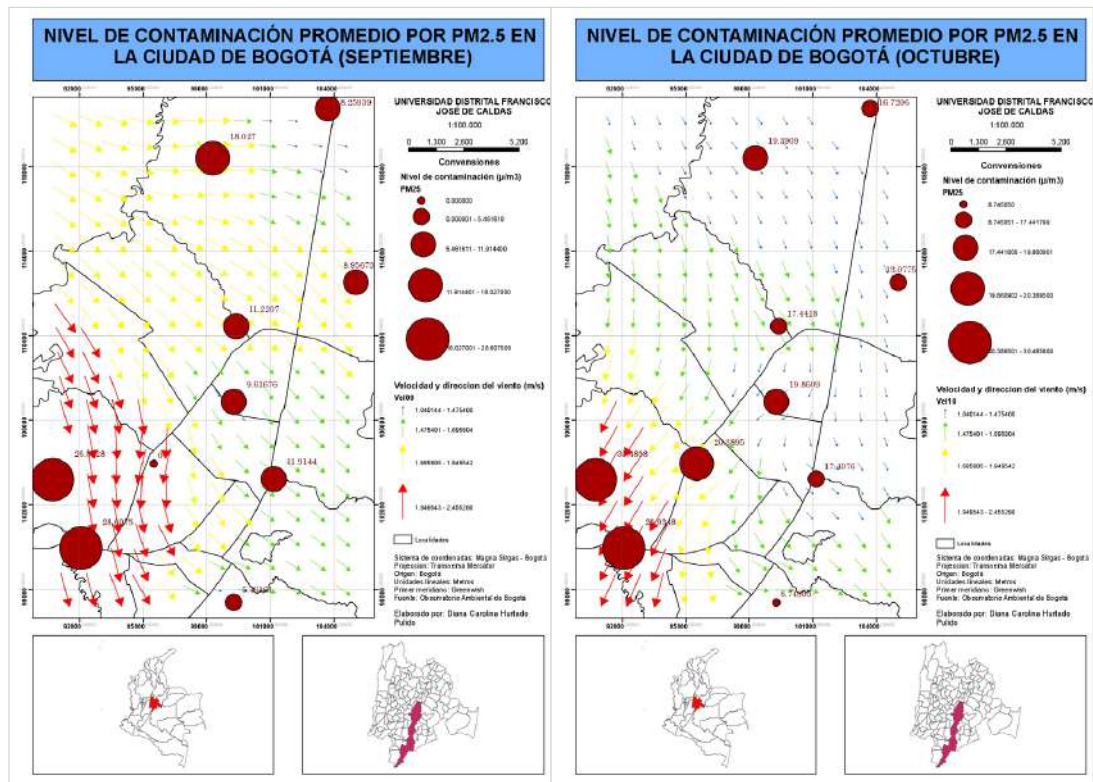


Figura 14. Contaminación promedio por PM2.5 en septiembre y octubre
Fuente: elaboración propia.



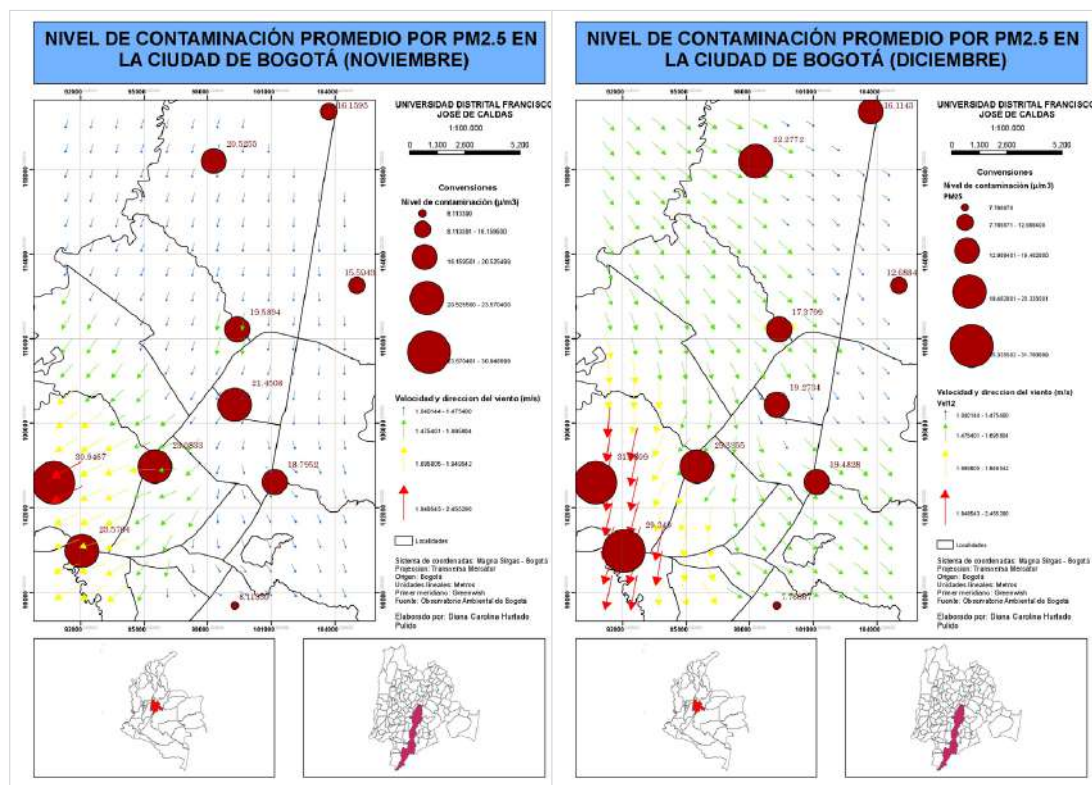


Figura 15. Contaminación promedio por PM2.5 en noviembre y diciembre
 Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Según la Resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, actual Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el nivel máximo permisible anual es de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pero se observa que en los 4 años de análisis las estaciones ubicadas en la localidad de Kennedy, es decir, las estaciones Carvajal-Sevillana y Kennedy, han reportado valores de concentración por encima del máximo permitido, aunque vale la pena destacar que los valores de concentración han disminuido un poco desde el año base, es decir, el 2014. La estación de Suba se encuentra muy cerca al límite, ya que el valor de concentración está por encima de los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en los 4 años seguidos. Las estaciones de San Cristóbal, Puente Aranda y Guaymaral permanecen con valores bajos desde el 2014, pero van en aumento.

Se puede concluir que la velocidad del viento es mayor en las estaciones al occidente de Bogotá, es decir, en las localidades de Kennedy, Fontibón y Engativá, mientras que al oriente, especialmente en Usaquén, Chapinero y Santa Fe, las velocidades son menores, e incluso en algunos casos solamente alcanzan la mitad de la velocidad que se presenta al occidente. Lo anterior provoca que los vientos se aglomeren en Kennedy, Bosa, Ciudad Bolívar y Tunjuelito; además los contaminantes por PM2.5 registrados en las estaciones Carvajal-Sevillana y Kennedy también se originan por la contaminación que produce la misma la zona debido a los usos que están allí (comercio, industria y construcción de vivienda a diferentes escalas) y por el traslado de partículas de otras localidades.

Observando el contraste de los meses se puede concluir que el que presenta mayor



nivel de concentración de partículas en suspensión inferiores a 2,5 micras es marzo, ya que 5 de las 10 estaciones analizadas presentan sus mediciones máximas en este mes, seguido por febrero, en donde hay 3 estaciones con mediciones máximas. Del lado opuesto está el mes de julio, que presenta menor concentración de este contaminante ya que 5 de las estaciones presentan sus mediciones mínimas en esta época; en el mes de junio también hay 2 estaciones con mediciones mínimas. Las mediciones máximas en todos los meses se presentan en las estaciones ubicadas en la localidad de Kennedy.

De aquí se puede deducir que aunque la mayor acumulación de material particulado se da en la localidad de Kennedy, debido a los vientos veloces de mitad de año, a la

suave topografía y al cambio de dirección de los vientos los contaminantes se dispersan más rápidamente en este periodo que en los otros meses. Además también se debe considerar que en los meses de junio y julio parte de la población se encuentra en vacaciones, por lo cual es posible que disminuya el tráfico de vehículos automotores.

Si bien en parte de la ciudad ha disminuido un poco la contaminación por material particulado menor a 2.5 μ , va en aumento en otros sectores, por lo cual el gobierno distrital debe ser más estricto y precavido con respecto a los usos del suelo, el mantenimiento de las vías y la exigencia del mantenimiento técnico y mecánico de los vehículos que transitan por la ciudad.



Bibliografía



Arango, J., Bustos, M. & Narvaez, E. (2007). *Estudio exploratorio de metales pesados en material particulado de emisiones de exhosto de motores a diesel*. Ponencia presentada en el 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, Perú, 23-25 de octubre. Recuperado de <http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/01/01-08.pdf>.

Corporación Autónoma regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (2016). *Estudio de la dispersión de contaminantes atmosféricos en la jurisdicción de Cornare: informe general*. Recuperado de: https://www.cornare.gov.co/SIAR/aire/CALIDAD_DE_AIRE/CONTENIDO/INFORME-GENERAL_I.pdf.

Franco, A. (2015). *Análisis de la correlación entre las emisiones de PM10 y PM2.5 generadas por fuentes fijas, móviles y fugitivas y el ausentismo escolar de la población infantil en los jardines de la SDIS debido a enfermedades respiratorias dentro de la localidad de Kennedy para el año 2013* (tesis de pregrado). Facultad de ingeniería ambiental, Universidad Santo Tomás. <http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/633/Analisis%20correlacion%20espacial%20PM%20y%20enfermedades%20respiratoria.pdf?sequence=1>.

Infraestructura Integrada de Datos Espaciales para el Distrito Capital (IDECA) (2004). *Mapa de Referencia*. Recuperado de: <https://www.ideca.gov.co/es/servicios/mapa-de-referencia/tabla-mapa-referencia>.

Linares, C. & Díaz, J. (2009). Efecto de las partículas de diámetro inferior a 2,5 micras (PM2,5) sobre los ingresos hospitalarios en niños menores de 10 años en Madrid. *Gaceta Sanitaria*, 23(3), 192-197. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2008.04.006>.

Observatorio Ambiental de Bogotá (2011). *Concentración de Material Particulado Inferior a 2.5 Micrómetros {PM2.5} Promedio Mensual Por Estación-PM25PME*. Recuperado de: <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?id=753&v=I#>

Quijano, A., Quijano, M. & Henao, J. (Enero-junio de 2010). Caracterización físicoquímica del material particulado fracción respirable PM2.5 en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 8(1), 1-20. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/903/90315226007.pdf>.

Resolución 601 de 2006 (4 de abril), por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia. *Diario Oficial* N° 46.232.

Resolución 610 de 2010 (2 de noviembre), por la cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010 y se adoptan otras disposiciones. *Diario Oficial* N° 47.887.



Bibliografía



Sbarato, V., Sbarato, D., Basan, R., Manzo, P., Ortega, J., Campos, M. & Salort, M. (2000). *Análisis y caracterización del material particulado atmosférico* (tesis de maestría). Maestría en Gestión para la Integración Regional y Centro de Información y Documentación Regional. Universidad de Córdoba. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/unc/paper24.pdf>.

Zamorano, A., Márquez, S., Aránguiz, J., Bedregal, P. & Sanchez, I. (2003). Relación entre bronquiolitis aguda con factores climáticos y contaminación ambiental. *Revista Médica de Chile*, 131, 1117-1122. Recuperado de <http://www.scielo.cl/pdf/rmc/v131n10/art03.pdf>.

