



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Segundo informe: Aplicación de la teoría geoestadística en el análisis de concentración de material particulado (PM10) y (PM2.5) el día 2 de septiembre a la 1:00pm en la ciudad de Bogotá

Nicolás Benhur Cardona Giraldo
Deivid Alejandro Coronado Sarmiento
Luisa Fernanda Guantiva Vargas
John Dagoberto Moyano Duarte

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias
Departamento de Estadística
2022

1. Introducción	2
2. Planteamiento del problema	3
3. Objetivos	4
4. Metodología	5
4.1. Descripción de la base de datos	5
4.2. Estacionariedad en media para (PM10)	7
4.3. Semivariograma empírico para (PM10)	7
4.4. Semivariograma teórico para (PM10)	8
4.4.1. Estimación mediante mínimos cuadrados ordinarios (MCO)	8
4.4.2. Estimación mediante mínimos cuadrados ponderados(MCP)	9
4.4.3. Estimación mediante máxima verosimilitud (MV)	9
4.4.4. Selección del modelo	10
4.5. Kriging	11
4.6. Cokriging	12
5. Comentarios y observaciones	16
6. Bibliografía	17

La degradación del medio ambiente es un tema estudiado por su impacto en la tierra y, por ende, en los seres vivos. El crecimiento económico y poblacional trae ciertos beneficios (capacidad adquisitiva, aumento en la esperanza de vida, mejor salud, entre otros); lamentablemente, todo esto se ve amenazado por una extensa variedad de peligros ambientales, por ejemplo, el deterioro del suelo, del agua, de los recursos marinos; la contaminación, el agotamiento del ozono estratosférico, el cambio climático mundial y la pérdida de biodiversidad acarrea enormes problemas humanos (Segura y Arriaga, 2003). Esto, a veces, no es evidente para los ciudadanos, pues, en muy pocas ocasiones, son conscientes de lo que está sucediendo, pero, con el crecimiento desbordado de las ciudades, las personas se están viendo diariamente expuestas a varios de estos fenómenos, en especial, al material particulado que contamina el aire que todos respiramos.

En la ciudad de Bogotá, durante los últimos años, la alcaldía mayor ha implementado jornadas pedagógicas con el fin de amortiguar de cierta manera el efecto del cambio climático y bajar los niveles de contaminación del aire. Para esto se realizan jornadas especiales de ciclovía como son, por ejemplo, los días domingo de cada semana o las nocturnas que son de vez en cuando los días jueves. Éstas se llevan a cabo en algunas de las principales vías vehiculares de la ciudad, con el fin de que las personas participen de estas actividades y eviten el uso de automóviles o algún otro medio de transporte particular. Cabe mencionar que el análisis del efecto de estas jornadas permite determinar qué nuevas estrategias se pueden adoptar para aportar al cuidado del medio ambiente.

Por eso el presente informe se centrará en el material particulado (PM10) material particulado menor a 10 micras por metro cúbico [$\mu m/m^3$] y (PM2.5) material particulado menor a 2.5 micras por metro cúbico [$\mu m/m^3$], en la ciudad de Bogotá, el cual es producido por carros, motos, transporte público, fábricas, entre otros, pues aunque el (PM10) al ser respiradas por los humanos, en su mayoría, son retenidas por los vellos de las fosas nasales las partículas inhalables finas menores o iguales a 2.5 [μm], no son retenidas por los vellos nasales, lo cual conlleva a que interactúen directamente con los pulmones y otros órganos del cuerpo, representando un mayor peligro al ser humano (EPA, 2004). Esto ha llevado a que la OMS (Organización Mundial de la Salud), a partir de su órgano consultivo —la IARC (Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer)—, ha clasificado el material particulado en el aire como un potencial cancerígeno humano dentro del grupo más alto de sus mediciones (IARC, 2013).

Planteamiento del problema

Para conocer de manera concreta la eficacia semanal de la ejecución de estas jornadas lideradas por la alcaldía mayor en términos ambientales, resulta relevante identificar aquellos factores que puedan ser determinantes y, seguido a esto, cuantificar su influencia para darle un análisis estadístico espacial. Para la ciclovía de los domingos, en particular, se quiere comprobar su efectividad en una hora fija con el fin de saber qué tipo de acciones se deben promover para que los ciudadanos sean conscientes de los beneficios que puede brindar esta actividad a la calidad del aire a las zonas en que se aplica.

Cabe mencionar que la ubicación de la cicloruta se plantea originalmente en lugares que son muy transitados en la ciudad, lo cual acondiciona a una situación óptima para usar las herramientas de la estadística espacial.

La secretaría distrital de ambiente, entre tantos enfoques de estudio, evalúa y propone proyectos en pro de adoptar nuevas aplicaciones, con el fin de aportar soluciones a mejorar la calidad de vida de los capitalinos, dada la abrumadora evidencia científica de los efectos negativos que la contaminación produce al cuerpo humano, por eso este tipo de estudios, permite estar al tanto de como se están comportando los gases contaminantes en diferentes partes de la ciudad, lo que permitiría activar alertas tempranas para proteger la integridad de los ciudadanos.

Objetivos

Modelar el comportamiento del material particulado de menos de 10 micras (PM10), en una hora puntual (1:00pm) un día de ciclorruta (domingo 2 de septiembre de 2018).

Identificar el comportamiento del material particulado de menos de 10 micras y 2.5 micras, en la ciudad de Bogotá, en la fecha mencionada anteriormente; cuando se realizan eventos que pueden ayudar a disminuir su concentración en la atmósfera.

Evaluar la información del material particulado para determinar la eficacia del uso de estas jornadas en la calidad del aire y su influencia en el cambio climático de la ciudad durante la misma.

4.1. Descripción de la base de datos

Para poder realizar el análisis geoestadístico básico, se procedió a buscar los datos correspondientes de material particulado de la ciudad de Bogotá. Los datos fueron tomados de las 11 estaciones ubicadas en varias localidades de Bogotá, estos son proporcionados por la red de monitoreo de calidad de aire de Bogotá (RMCAB). La medición se realizó en unidades de micras por m^3 , el cual denotaremos por $[\mu m]$, que hace alusión a la cantidad de material particulado que se encuentra por m^3 (EPA, 2004).

Como ya se mencionó, uno de los objetivos y motivaciones principales de este estudio es evaluar el comportamiento del material particulado cuando se implementan medidas que priorizan el uso de transporte público y la bicicleta en una hora específica. Se optó por tomar los datos del día 2 de septiembre de 2018 a la 1:00pm, fecha en las cuales se realiza la jornada de ciclovía dominical en la ciudad. A continuación se presentan los datos encontrados.

Nombre de la estación	Longitud	Latitud	PM10
Guaymaral	-74,04378333	4,7837333	16
Usaquén	-74,03041667	4,71035	35.5
Chapinero	-74,09346111	4,7612472	61
Las Ferias	-74,08248333	4,6907	3
Centro de alto rendimiento	-74,08396667	4,6584667	4
MinAmbiente	-74,06698056	4,6254861	13.8
Puente Aranda	-74,11748333	4,6317667	22
Kennedy	-74,16133333	4,62505	48.1
Carvajal	-74,14858333	4,5956167	45.2
Tunal	-74,13095556	4,576225	28
San Cristobal	-74,08381389	4,5725528	10.8

Tabla 4.1: Relación de estaciones con su respectiva medición de material particulado de diez micras $10[\mu m]$. Aquí (PM10) hace referencia al material particulado del día 2 de septiembre del año 2018. Datos tomados de <http://201.245.192.252:81>

Las distribuciones de estas estaciones se pueden ver en el siguiente gráfico.

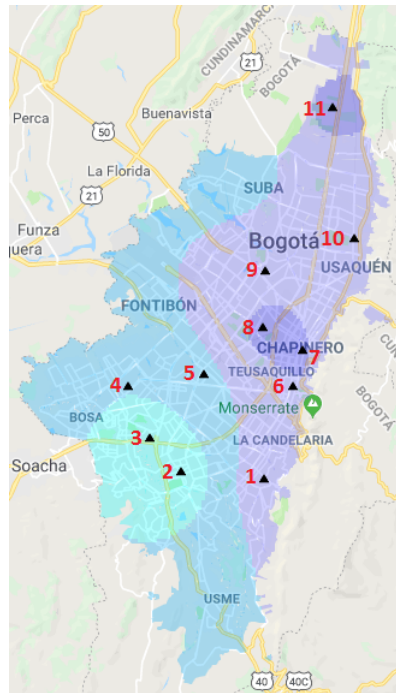


Figura 4.1: Ubicación de las estaciones en la ciudad de Bogotá. 1.San Cristobal, 2. Tunal, 3. Carvajal - Sevillana, 4. Kennedy, 5. Puente Aranda, 6. MinAmbiente, 7. Chapinero, 8. Centro de alto rendimiento, 9. Las Ferias, 10. Usaquén y 11. Guaymaral. Ubicaciones tomadas de <http://:201.245.192.252:81>

Las correspondientes rutas de la ciclovía dominical son.



Figura 4.2: Imágen obtenida y distribuida por el instituto distrital de recreación y deporte (IDRD)

4.2. Estacionariedad en media para (PM10)

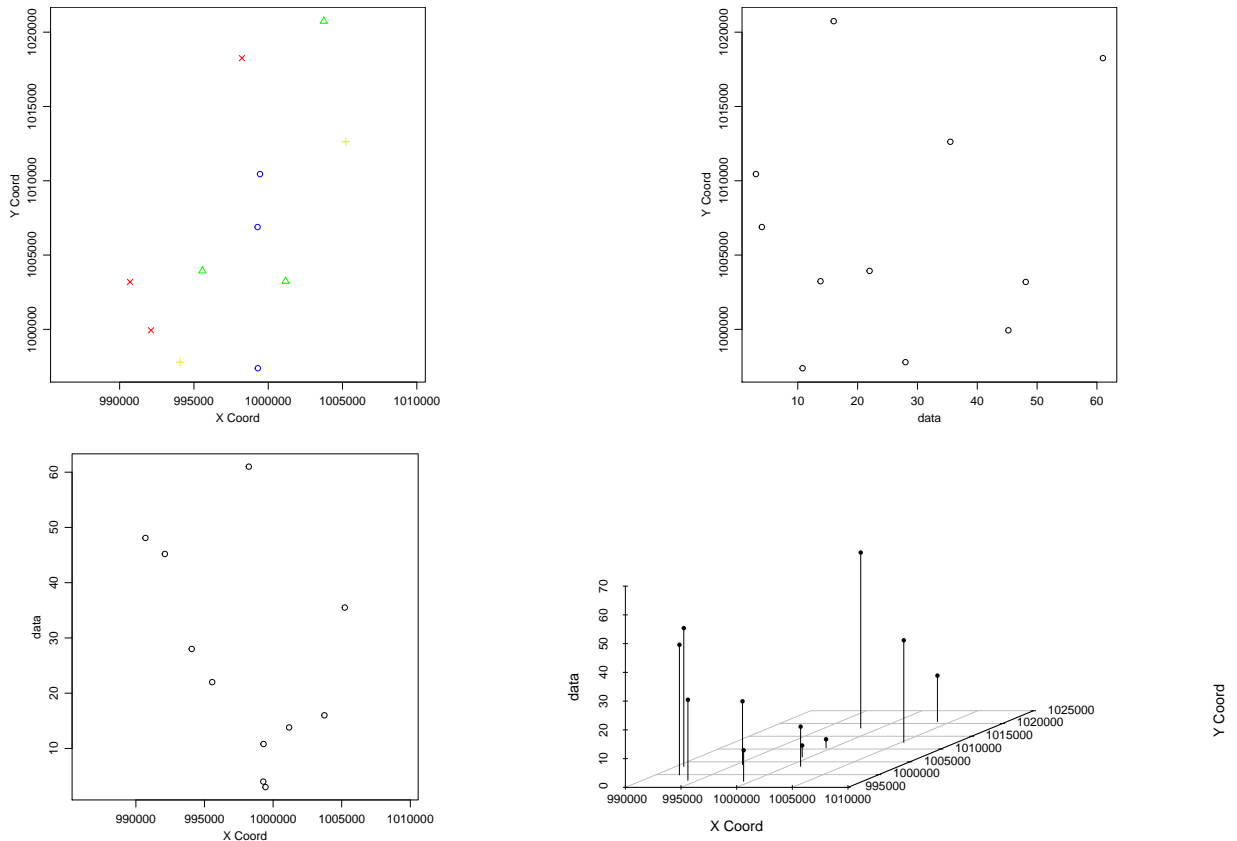


Figura 4.3: Análisis gráfico estacionariedad en media

La gráfica (4.3) no permite evidenciar una tendencia clara, para pensar que la media no es constante. Si se observa la gráfica del recuadro ubicado en la parte superior a la izquierda, no se ve un agrupamiento claro entre los colores distribuidos en el plano, es decir se mezclan y se posicionan en diferentes partes de los ejes coordenados, esto se ve un poco mejor en el gráfico tridimensional. Además no se observa una función que pueda modelar claramente los datos en las gráficas que muestran el comportamiento de los datos respecto a cada uno de los ejes coordenados.

4.3. Semivariograma empírico para (PM10)

Punto número	Número pares de puntos	Semivariograma	Distancia(mts)
1	3	50.8750	0.02597018
2	6	166.8808	0.04328363
3	9	295.3722	0.06059708
4	7	541.3866	0.07791053
5	9	652.7822	0.09522398
6	3	337.3217	0.11253743
7	4	564.7300	0.12985088
8	2	194.1250	0.14716433
9	5	34.9940	0.16447778
10	3	643.1133	0.18179123
11	2	219.9200	0.21641813

Tabla 4.2: Relación del número de pares de puntos con respecto a la semivarianza estimada y la distancia

Para seleccionar el mejor semivariograma, se utilizó el cuadro (4.2). Aquí se puede observar que hay puntos de $\hat{\gamma}(*)$ que se calculan con muy pocos pares, lo cual puede causar problemas en la determinación de un semivariograma teórico, por lo tanto se trabajó con los puntos que tuvieran como mínimo tres pares de puntos. Se proponen los siguientes modelos como semivariogramas empíricos:

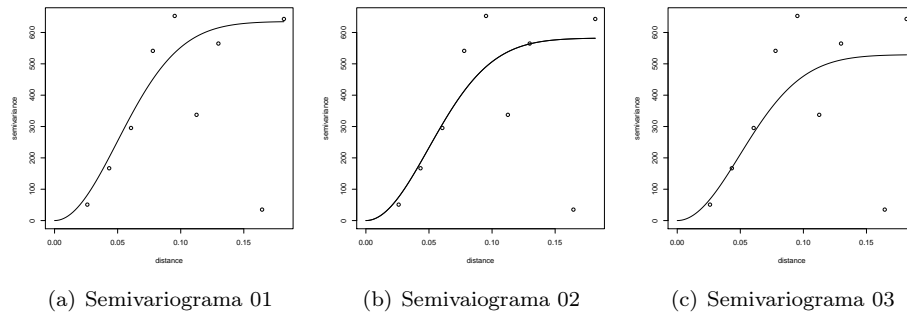


Figura 4.4: Posibles ajustes del semivariograma.

Con el fin de ajustar la mayor cantidad de puntos se procede a probar diferentes variogramas los cuales se exponen en la figura(4.4). Se probaron con los semivariogramas 01 y 02, pero al intentar esto se observa que los modelos no terminan ajustando adecuadamente el punto número 6, por lo tanto se procede a elegir como modelo el semivariograma número 03 que es el que intenta ajustar la mayoría de los puntos. Este es un modelo Gaussiano, con pepita = 0, rango = 0.07 y silla = 529.28.

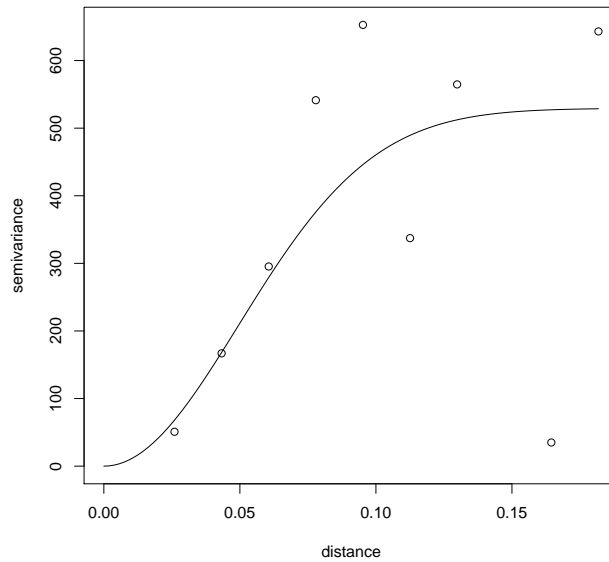


Figura 4.5: Estimación del semivariograma empírico para la variable PM10

4.4. Semivariograma teorico para (PM10)

4.4.1. Estimación mediante mínimos cuadrados ordinarios (MCO)

Para realizar la estimación por mínimos cuadrados ordinarios es necesario minimizar la expresión dada por:

$$\sum_{i=k}^n (\gamma(\hat{h}_i) - \gamma(h_i; \theta))^2$$

A partir de esto se obtuvo que los parámetros fueron:

a	0.0058
σ^2	450.6636
c_0	62.4150

Tabla 4.3: Resumen parámetros mínimos cuadrados ordinarios

4.4.2. Estimación mediante mínimos cuadrados ponderados(MCP)

Para realizar la estimación por máxima verosimilitud es necesario minimizar la expresión dada por:

$$(2\gamma(h) - 2\gamma(\hat{h}_i; \theta))^t W^{-1} (2\gamma(\hat{h}) - 2\gamma(h_i, \theta))$$

en donde

$$w_{ii} = \frac{\text{diag}(8(\gamma(\hat{h}_i; \theta)^2))}{n(h_i)}$$

Aquí W se le conoce como la matriz de ponderaciones. Cressie (1985) propuso esta forma para la matriz W.

A partir de esto se obtuvo que los parámetros fueron:

	PM10
a	0.07988117
σ^2	730.22587552
c_0	0

Tabla 4.4: Resumen parámetros mínimos cuadrados ponderados

4.4.3. Estimación mediante máxima verosimilitud (MV)

Para realizar la estimación por mínimos cuadrados ponderados es necesario minimizarla expresión dada por:

$$L(\beta, \theta) = \frac{n}{2} \log(2\pi) + \frac{1}{2} \log|\Sigma(\theta)| - \frac{1}{2} (\mathbf{Z} - \mathbf{X}\beta)^t \Sigma(\theta)^{-1} (\mathbf{Z} - \mathbf{X}\beta)$$

Los parámetros obtenidos para el modelo se presentan a continuación:

	PM10
a	66616
σ^2	1e-08
c_0	0

Tabla 4.5: Resumen parámetros máxima verosimilitud

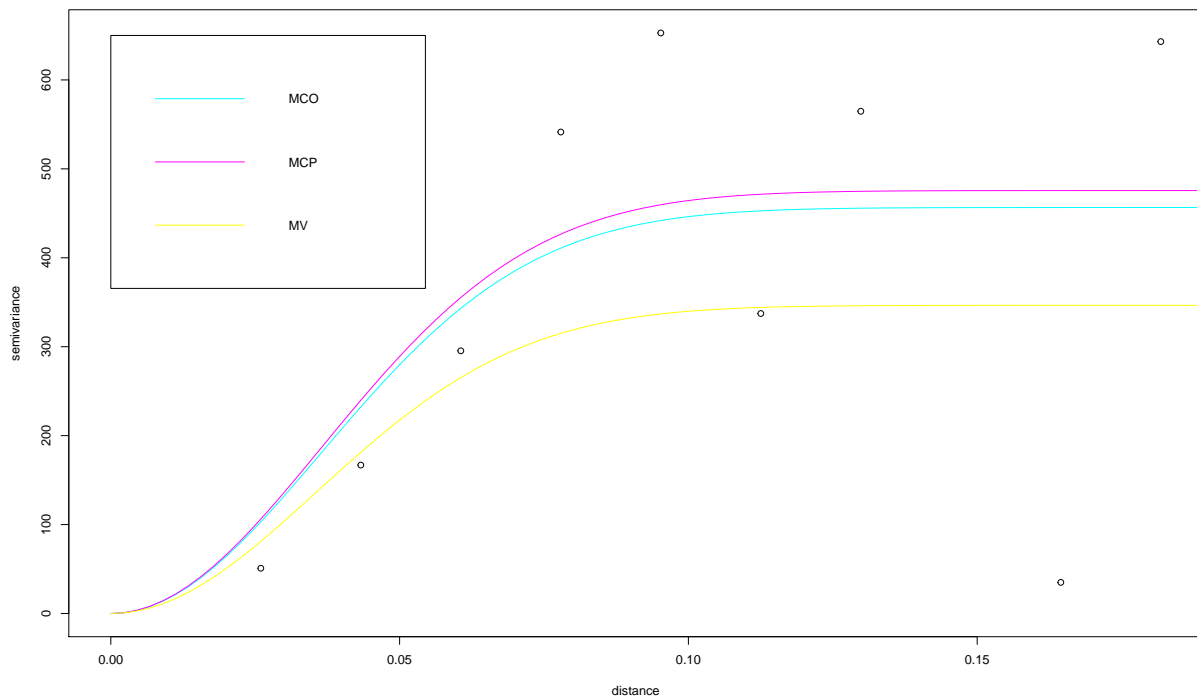


Figura 4.6: Posibles modelos para el semivariograma teórico.

4.4.4. Selección del modelo

Para elegir el modelo adecuado, se procedió a tomar los resultados expuestos por las estimaciones expuestas anteriormente más sus correspondientes gráficos (4.6). Lo cual permite concluir que el mejor modelo es un Gaussiano con parámetros estimados por el método de los mínimos cuadrados ponderados(MCP).

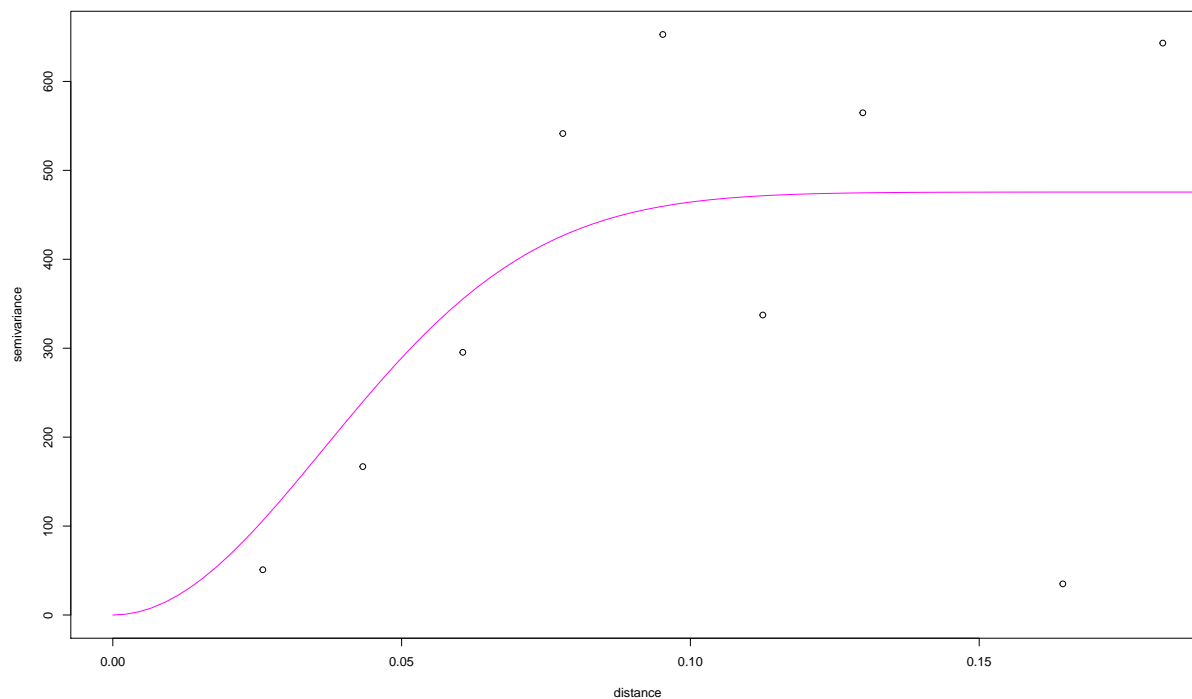


Figura 4.7: Representación gráfica del modelo de semivariograma elegido.

4.5. Kriging

Para poder comprender el comportamiento del material particulado en la ciudad de Bogotá a partir de las medidas registradas, se procede a hacer *kriging*, es decir, se hará inferencia sobre valores no observados o medidos en el proceso aleatorio.

A partir de los procedimientos anteriormente desarrollados se sabe que la media no es conocida y que la variable es estacionaria, por lo tanto se desarrollara para los datos kriging ordinario; de lo cual se obtuvieron los resultados siguientes.

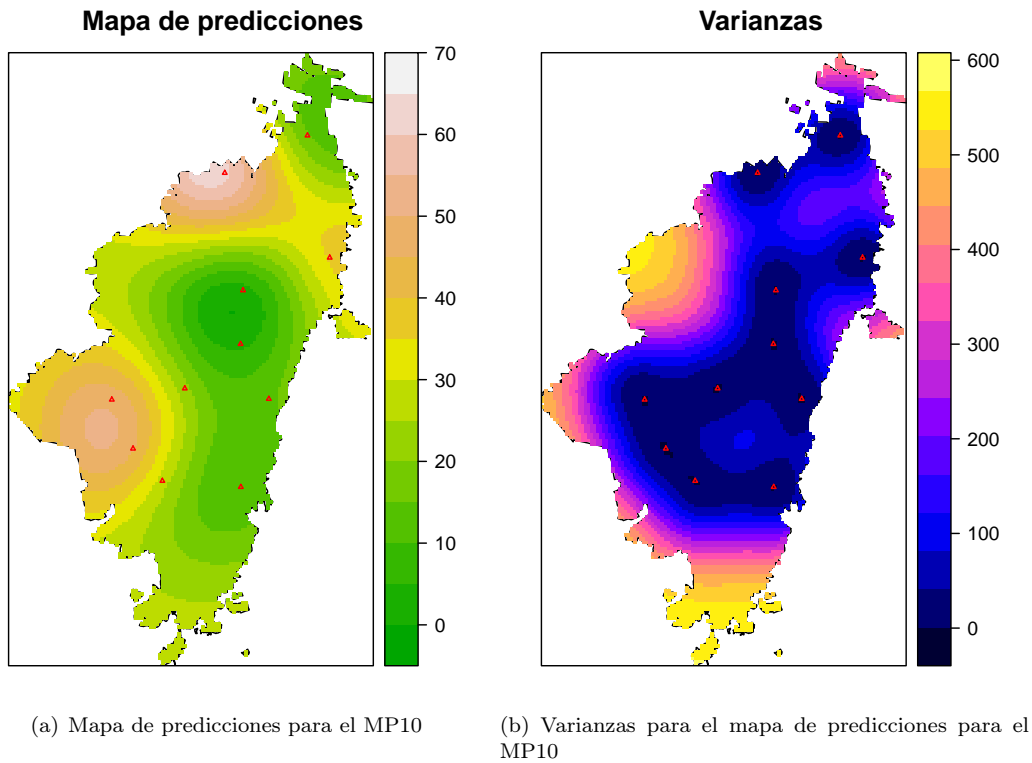


Figura 4.8: Mapa de predicción y varianza, resultado de aplicar kriging ordinario.

En la figura (4.8) se ven los mapas de las predicciones y las varianzas para la variable PM10 usando kriging ordinario. En el mapa de predicciones se puede ver una mayor concentración de este material particulado en las zonas sur occidental (Bosa), nor-occidental (Suba) y una pequeña parte en la zona nor-oriental, esto probablemente casuado por una mayor presencia de zonas industriales o una mayor densidad de automóviles en estas zonas. Para el resto de zonas de la ciudad se ven predicciones que van desde valores cercanos a cero, hasta valores de alrededor de 30, siendo la zona central de la ciudad la predicción más baja en cuanto a cantidad de este material particulado.

Ahora, al observarse la varianza, se nota una mayor variabilidad en los valores de este material particulado en los extremos de la ciudad, oscilando entre valores de 300 y 600 μm , y siendo más estable hacia las zonas centrales, oscilando sus valores de entre 0 y 200 aproximadamente. Estos fenómenos pueden estar dados, ya sea por una verdadera interpretación de la realidad o por un problema de subregistro, causado por la falta de estaciones de monitoreo en estas zonas extremas.

Retomando las figuras expuestas anteriormente referentes a las ubicaciones de las estaciones figura(4.1) y la de las rutas de la ciclovía por localidades figura(4.2), se observa que las estaciones 02. Tunal, 03. Carvajal y 04. Kennedy están modelando valores elevados de PM10 en las localidades correspondientes de Tunjuelito, Bosa y Kenedy (véase figura(4.9)), lo cual permite ver que aunque existen ciclovías en las localidades descritas no se ve un impacto significativo en la reducción del PM10 de estos lugares, lo que puede ser explicado por factores meteorológicos o antropogénicos que no permite una mejor calidad del aire. Este mismo análisis se puede aplicar para las estaciones 9. Las Ferias y 10. Usaquén.

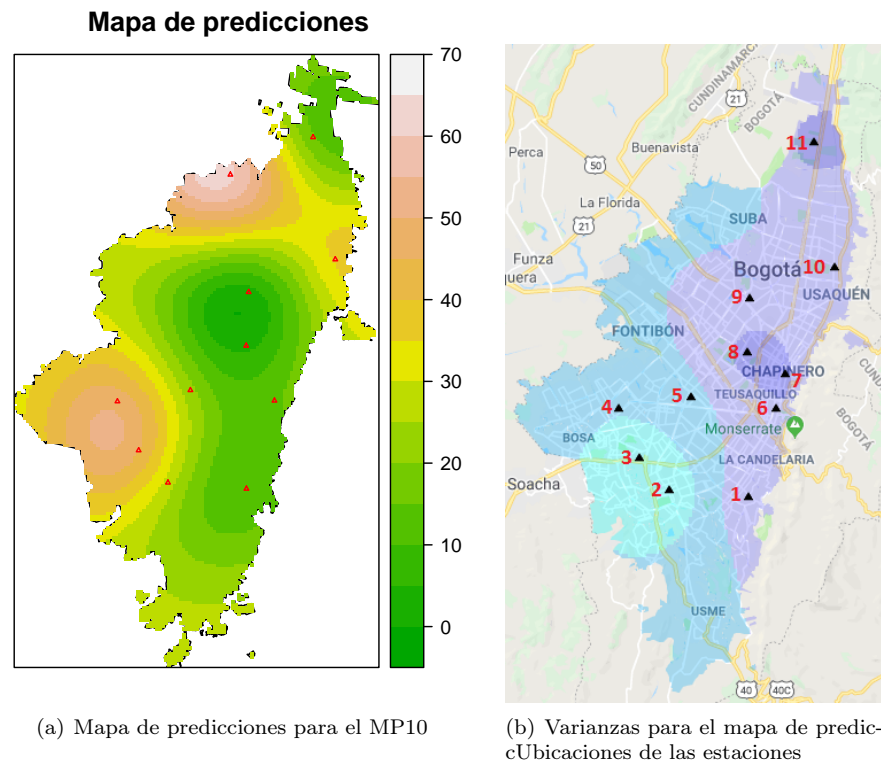


Figura 4.9: Mapa de predicciones y ubicación de las estaciones en la ciudad de Bogotá. 1.San Cristobal, 2. Tunal, 3. Carvajal - Sevillana, 4. Kennedy, 5. Puente Aranda, 6. MinAmbiente, 7. Chapinero, 8. Centro de alto rendimiento, 9. Las Ferias, 10. Usaquén y 11. Guaymaral.

4.6. Cokriging

Para realizar la predicción por cokriging, la cual consiste en realizar una predicción en un punto del mapa para material particulado (con ayuda de una variable auxiliar que nos aporte alguna información adicional), se tuvo en cuenta la variable auxiliar PM2.5 la cual corresponde al material particulado menor o igual a 2.5μ el cual, al ser más pequeño es más peligroso para el ser humano porque puede generar enfermedades respiratorias peligrosas, o incluso hasta cáncer de pulmón. Los datos presentados a continuación corresponden al día 2 de septiembre a la 1:00pm.

Nombre de la estación	Longitud	Latitud	PM10	PM2.5
Guaymaral	-74,04378333	4,7837333	16	5
Usaquén	-74,03041667	4,71035	35.5	1
Chapinero	-74,09346111	4,7612472	31	4
Las Ferias	-74,08248333	4,6907	24	2
Centro de alto rendimiento	-74,08396667	4,6584667	73	6,45
MinAmbiente	-74,06698056	4,6254861	59,9	5
Puente Aranda	-74,11748333	4,6317667	78	18,6
Kennedy	-74,16133333	4,62505	91,2	14
Carvajal	-74,14858333	4,5956167	99,2	34,9
Tunal	-74,13095556	4,576225	18	0
San Cristobal	-74,08381389	4,5725528	38,4	3,4

Tabla 4.6: Relación de estaciones con su respectiva medición de material particulado de diez micras $10[\mu m]$ (PM10) y de material particulado menor a $2,5[\mu m]$ micras (PM2.5) al del día 2 de septiembre a la 1:00pm. Datos tomados de <http://201.245.192.252:81>

A continuación se hace la estimación del semivariograma teórico teniendo como modelo un Wave con una silla de 73.74 y un rango de 0.1 y una pepita de 0

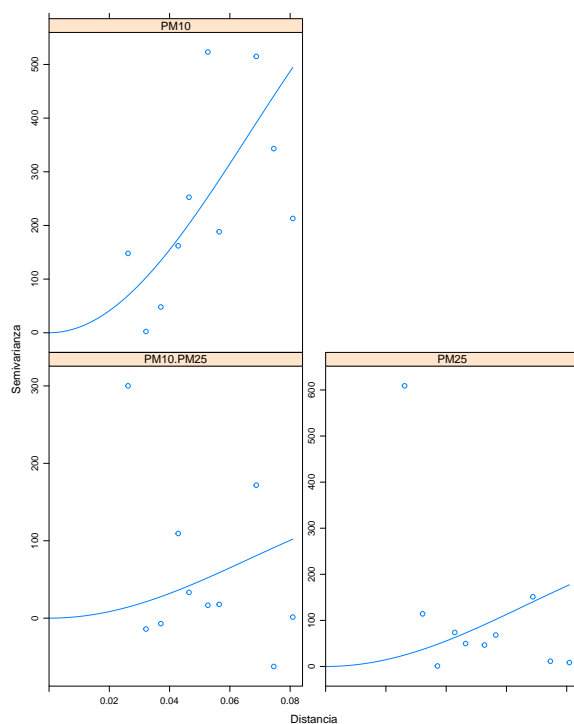


Figura 4.10: Semivariogramas empírico y teórico para cesio- y PM2.5

Para hacer la predicción se realizará cokriging ordinario sobre una muestra regular de 10000 puntos ubicados sobre el mapa de Bogotá.

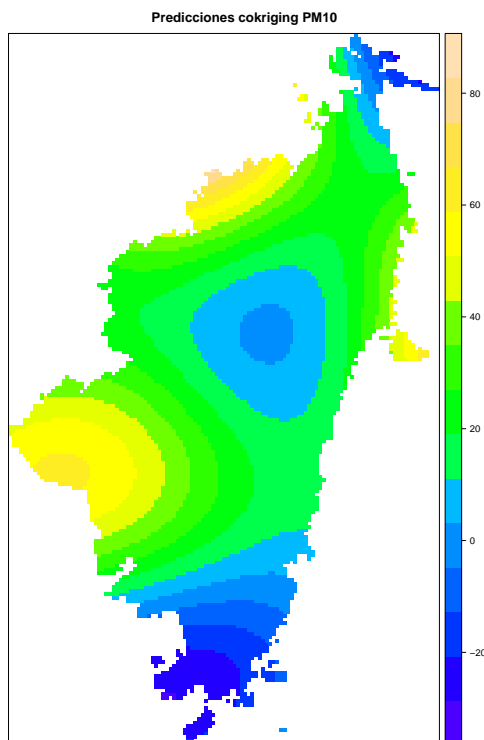


Figura 4.11: Predicción cokriging PM10

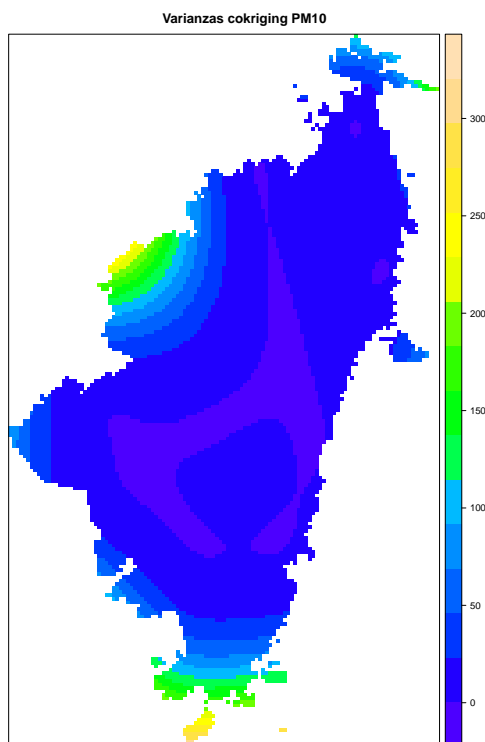


Figura 4.12: Varianza cokriging PM10

En la figura 4.8 y 4.9 se observan las predicciones y varianzas para la variable PM10. Se ve cierta tendencia a que vaya a haber entre 20 y 40 PM10 en la zona central de la ciudad, sacando una parte la cual va a oscilar en valores alrededor de 0 y apenas por encima de ese valor. Se nota que además en las zonas más extremas de la ciudad existen predicciones con valores mas altos y valores menores que cero de este material particulado, debido probablemente a una menor cantidad de zonas de monitoreo. Hay que tener en cuenta que en varios puntos de la ciudad se ve presencia de un gran flujo de vehículos de carga pesada, transporte público, fábricas manufactureras y de materias primeras, y demás. Se que la varianza de los datos varía de 0 a 120, tomando un valor regular cercano a 20 indicando una variabilidad muy baja. aunque, al mirar hacia las zonas extremas de la ciudad se va a apreciar el mayor grado de variabilidad debido probablemente a un menor número de puestos de monitoreo.

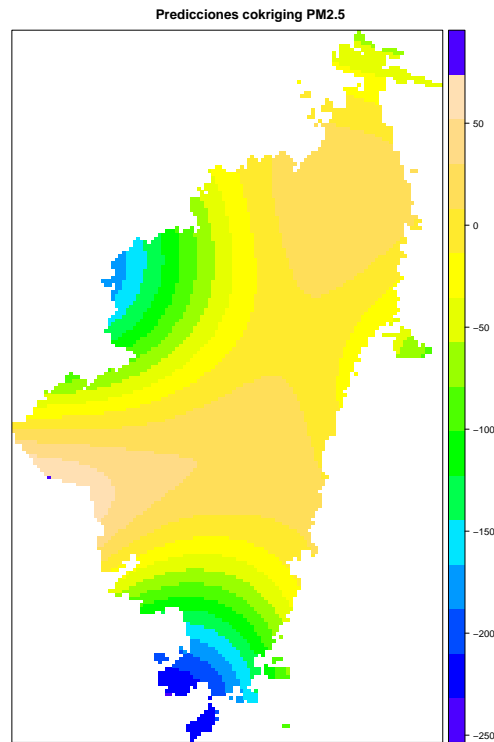


Figura 4.13: Predicción cokriging PM2.5

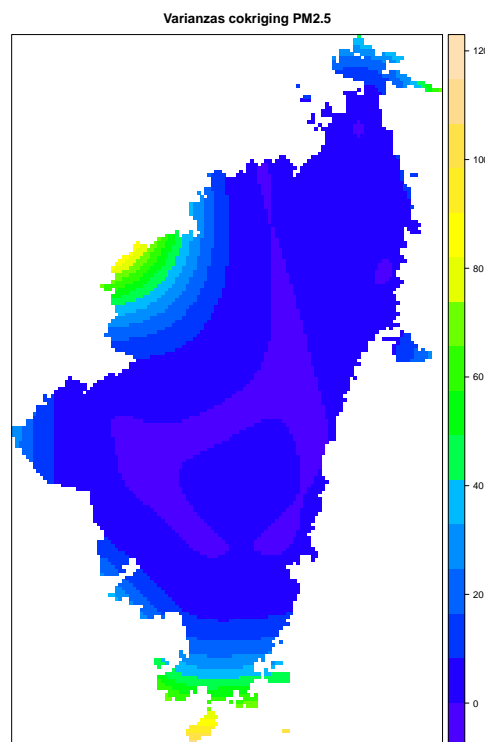


Figura 4.14: Varianza cokriging PM2.5

En la figura 4.10 y 4.11 se observan las predicciones y varianzas para la variable PM2.5. Se ve cierta tendencia a que vaya a haber un valor bajo en la predicción para este material particulado, siendo los valores mayores de alrededor de $50\mu m$. Se nota que además en las zonas más extremas de la ciudad existen predicciones con valores mas altos y valores menores que cero de este material particulado, debido probablemente a una menor cantidad de zonas de monitoreo. Se ve que la varianza de los datos varía de 0 a $300\mu m$ aproximadamente, tomando un valor regular cercano a cinco indicando una variabilidad muy baja. Cabe mencionar que, al mirar hacia las zonas extremas de la ciudad, se va a apreciar el mayor grado de variabilidad debido probablemente a un menor número de puestos de monitoreo.

Comentarios y observaciones

Los resultados de la predicción espacial, no permite afirmar, que para los datos medidos en un tiempo específico, la ciclovía dominical afecte de forma positiva o negativa la calidad del aire en la ciudad, ya que como se observó en los resultados del Kriging en una parte las condiciones del aire eran favorables, mientras que en otras no, y dado que son pocas mediciones y no se tienen en cuenta factores antropogénicos y ambientales es difícil poder tomar una posición ante tantas variables sin estudiar.

Estos resultados invita a reflexionar sobre el análisis de esta clase de sucesos en particular, puesto que da pie a que el gobierno distrital siga buscando nuevas estrategias que pueda implementar para que la incidencia en la contaminación del aire en la ciudad se sienta cada vez menos y también motive a que las personas realicen actividades al aire y participen de los proyectos de la alcaldía mayor.

Como observación adicional se quisiera resaltar la importancia de poder predecir, ya que no siempre se podrán realizar mediciones en todo lugar. Además con la cantidad de datos ya obtenidos se pudieron realizar buenas predicciones que pueden informar a las personas sobre el comportamiento del material particulado y así tomar medidas preventivas para evitar riesgos donde se crea haya alta presencia de PM10 o PM2.5.

Las características computacionales que tienen los software que se usaron para realizar los cálculos y desarrollar las bases teóricas de este informe son muy grandes. Desafortunadamente la teoría diseñada para proponer modelos para la implementación de diferentes estrategias geoestadísticas, como cokriging por ejemplo, no posee tantas limitaciones como sí las tienen ciertos programas, lo cual causa que no se permita apreciar de manera completa la interacción en el espacio y el tiempo del material particulado con otras características del ambiente.

Entre las dificultades más grandes que se tuvieron para la realización de este informe, quisiéramos mencionar la implementación del kriging, por que lamentablemente con la base de datos con que se venía trabajando para realizar el análisis estadístico espacial, y además por algunas capacidades limitadas del software estadístico R, impidieron que se profundizara en la sección de predicción usando técnicas basadas en kriging.

Bibliografía

1. EPA. (2004). Air Quality Criteria for Particulate Matter. Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring and Analysis Division. Volume 1.
2. Hernández, F., Aristizabal, D., Quiroz, L., Medina, K., Rodríguez, M., Sarmiento, R., & Osorio, G. (2013). Contaminación del aire y enfermedad respiratoria en menores de cinco años de Bogotá, 2007. *Revista de Salud Pública*, 15, 552-565.
3. OMS. (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: Resumen de evaluación de los riesgos.
4. IARC. (2013). Air Pollution And Cancer.
5. Segura, L. M. S., & Arriaga, J. A. L. (2003). Principios básicos de contaminación ambiental. Toluca, México:UAEM.