
Estudio de la concentración del material particulado inferior a 2.5 micrómetros en Bogotá usando modelos dinámicos

Daniela Giraldo Arcila^a
Daniela.giraldo@usantotomas.edu

Dagoberto Bermudez Rubio^b
dagobertobermudez@usantotomas.edu.co

1. Resumen

Se propone un proyecto en el cual se realizará una aplicación de modelos dinámicos y múltiples herramientas estadísticas en el análisis y evaluación de la calidad del aire en Bogotá, enfocándose principalmente en la concentración de material particulado inferior a 2.5 micrómetros (PM 2.5) al ser este uno de los contaminantes más dañinos existentes en la actualidad. El estudio se realizará con datos provenientes de la Red de Monitoreo de Calidad del aire en Bogotá proporcionada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en donde se tomará con una periodicidad mensual desde el año 2019 hasta el año 2021 los datos diarios de la concentración de PM 2.5 en las diferentes redes de monitoreo de calidad del aire que cuenta la ciudad de Bogotá, entre las cuales se encuentran Kennedy, Carvajal, Usaquén, Puente Aranda, Las Ferias, Ministerio de Ambiente y Suba. Esto con el fin de poder estudiar de forma más exhaustiva la calidad del aire que presenta Bogotá, siendo esta la ciudad con mayor proporción de habitantes en Colombia y plantenado un modelo que sea óptimo según la naturaleza de los datos. Para la realización de este proyecto se apoyará en la herramienta estadística R-Studio, realizando de igual manera, un análisis exploratorio de los datos a estudiar.

Palabras Clave Calidad del Aire, Estación, Monitoreo, PM 2.5

2. Abstract

A project is proposed in which an application of dynamic models and multiple statistical tools will be carried out in the analysis and evaluation of air quality in Bogota, focusing mainly on the concentration of lower particulate matter. to 2.5 Micrometers (PM 2.5) as this is one of the most harmful pollutants existing today. The study will be carried out with data from the Bogot'a Open Data Portal, where the daily data on the concentration of PM 2.5 in the different quality monitoring networks will be taken monthly from 2019 to 2021. of the air that the city of Bogot'a has, among which are Kennedy, Carvajal, Usaqu'en, Puente Aranda, Las Ferias, Ministry of the Environment and Suba. This in order to be able to study in a more exhaustive way the air quality that Bogot'Ã; presents, being this one of the cities with the highest proportion of inhabitants in Colombia and to be able to predict how the behavior of this pollutant will be in the near future. To carry out this project, it will be supported by the statistical tool R-Studio, performing in the same way, an exploratory analysis of the data to be studied.

Keywords Air Quality, Station, Monitoring, PM 2.5

^aEstudiante Universidad Santo Tomás

^bTutor de Tesis. Docente Universidad Santo Tomás

3. Introducción

A lo largo de la historia se han buscado múltiples alternativas para tener bienestar y comodidad en el ambiente en el que se habita. Sin embargo, debido a la implementación de nuevas industrias y a su vez la creación de una dependencia significativa por la evolución tecnológica, acompañado de consumos desmesurados de los recursos naturales y energéticos, los cuales al ser usados de forma incorrecta generan una gran cantidad de residuos y emisiones a la atmósfera y que se ven reflejados en una degradación de la calidad de vida de los seres humanos, desviándonos del objetivo principal que siempre ha sido conservar la misma. Por esta razón, una de las problemáticas más alarmantes en la actualidad es la contaminación del aire, siendo foco de múltiples estudios alrededor del mundo.

En primer lugar, es importante resaltar que según la definición del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la contaminación atmosférica hace referencia a la presencia de micro-partículas o productos gaseosos presentes en el aire y que pueden ser causantes de algún tipo de daño para todo ser vivo presente en este ambiente. Ahora bien, tomando como referencia la información que provee el IDEAM, actualmente en Colombia se realiza un monitoreo de la calidad del aire y cada día toma un papel más importante, ya que según la Organización Mundial de la Salud (OMS) una de cada ocho muertes que se presentan en el mundo, son ocasionadas por factores presentes en la contaminación del aire. Ahora bien, según los últimos informes sobre el índice de calidad del aire, se evidenció que el Material Particulado Menor a 2,5 micrómetros (PM 2.5) se considera el contaminante con una mayor afectación a nivel nacional, esto debido a que al estar compuesto por partículas muy pequeñas y producidas en su mayoría por vehículos que utilizan Diesel o que transportan materiales como compuestos orgánicos o virus, son más propensas a entrar en las vías respiratorias. En el caso de la ciudad de Bogotá y según estudios realizados, las zonas con mayor concentración de PM 2.5 son las localidades Puente Aranda, Carvajal y Kennedy, al ser estas foco de vehículos de carga y diferentes industrias.

Según estudios epidemiológicos se ha evidenciado que la contaminación producida por partículas más pequeñas se ha convertido en un grave problema, ya que al ser tan finas tienen mayores factores adversos a la salud (Stieb MD, 2002). Ahora bien, ya que el PM 2.5 es proveniente del Diesel, convirtiéndose en un contaminante tóxico del aire ya que se ha demostrado que es el causante de problemas respiratorios, cardiovasculares y a sus propiedades carcinogénicas (Mills NL, 2005). En el mes de febrero de 2021 el IDEAM emitió un Boletín sobre la calidad del aire, el cual se presenta periódicamente con el fin de evidenciar la evolución o mejoras que se ha presentado en la medición de la contaminación del aire, indicando que otros de los compuestos presentados en el PM 2.5 tienden a ser metales pesados, provenientes de incendios forestales, combustiones y procesos industriales, indicando que además de generar graves problemas de salud, produce múltiples cambios en la acidez de lagos y arroyos, generando cambios en el balance nutricional de las aguas costeras y grandes cuencas fluviales, reduce los nutrientes del suelo y genera daño en bosques sensibles o cultivos agrícolas, disminuyendo la fauna y flora que presenta estos ecosistemas. Ahora bien, durante la época del año estudiada (Febrero 2021) se vuelve más propenso a generarse mayor cantidad de incendios forestales debido a la baja cantidad de lluvias previstas en la mayor parte del territorio nacional, afectando múltiples ciudades, entre ellas Bogotá D.C.

4. Planteamiento del Problema

Siendo Bogotá una de las ciudades más concurridas tanto por turistas como por sus propios habitantes y la cual cuenta con una gran afluencia de medios de transporte, será de común conocimiento que durante los últimos años se ha disminuido la calidad del aire en la ciudad, siendo este un factor inevitable para ciudades en condiciones similares a esta, ahora bien, si no se tomaran acciones para evitar que el nivel de contaminación aumente cada vez más, se podría llegar a un punto irreversible para la salud de todos sus ciudadanos, razón por la cual se realizará un estudio de la concentración del material particulado inferior a 2,5 micrómetros presentados en el aire de la ciudad, ya que al ser este el componente con mayor porcentaje de contaminación que existe y el cual, según estudios científicos, tienen efectos más graves

para la salud en comparación a partículas más grandes, como PM 10, ahora bien, debido a su tamaño estas tenderán a ser más ligeras, razón por la cuál permanecen en el aire por tiempo más prolongado, aumentando sus efectos y facilitando su esparcimiento por medio del viento a grandes distancias. Debido a lo anteriormente explicado, estas partículas generan múltiples enfermedades respiratorias y disminución del funcionamiento pulmonar, esto por la facilidad de acumularse en el sistema respiratorio, factor que afecta en su mayoría a la población con problemas respiratorios, cardiacos, niños y adultos mayores, quienes tendrán un mayor riesgo de ser afectados por aquellos efectos negativos de este contaminante.

5. Pregunta Problema

¿Qué comportamiento ha tenido el material particulado inferior a 2.5 micrómetros presentes en el aire de Bogotá?

6. Objetivos

6.1. Objetivo General

Analizar la concentración del material particulado inferior a 2.5 micrómetros presentes en el aire de la ciudad de Bogotá

6.2. Objetivos Específicos

- Distinguir cuál ha sido el cambio de la calidad del aire en la ciudad de Bogotá durante los años estudiados (2019-2021) presentando las posibles causas de este.
- Analizar el comportamiento de la concentración del material particulado inferior a 2,5 micrómetros en las zonas de la ciudad y especificando en las cuales existe una mayor concentración de este.
- Identificar las afectaciones que podría tener un aumento de este contaminante en la calidad del aire de la ciudad.

7. Justificación

La realización de este proyecto será con el fin de evaluar el comportamiento que tiene la concentración del material particulado inferior a 2.5 micrómetros en la ciudad de Bogotá, ya que al ser esta la ciudad principal del país y a la cual pueden llegar múltiples turistas o migrantes de otros países, esto contando con sus propios habitantes, factor que inevitablemente aumentará el nivel de contaminación que tiene la ciudad, al igual que aquellos procesos que conllevan una gran afectación en el aire tales como buses chimenea, los cuales a pesar de tener un control más amplio, actualmente siguen segregando contaminantes que afectan la calidad del aire de esta ciudad, otro ejemplo claro son aquellas empresas que no tienen una debida regularización de la cantidad y forma de contaminación de la ciudad metropolitana, todos estos factores sumados a la cantidad de población que tiene, tenderá a generar una disminución evidente en la calidad del aire, razón por la cual es importante estudiar este comportamiento de forma diaria desde el año 2019 hasta septiembre del 2021, para así lograr presentar como será Bogotá con respecto a la calidad del aire si no se tomarán las respectivas regulaciones por parte del gobierno y así mismo crear conciencia en la forma en la que como ciudadanos podemos llegar a genera afectaciones iguales o mayores que las de las industrias y cómo se podría evitar llegar a un nivel deplorable en la calidad del aire, disminuyendo aquellas enfermedades respiratorias causadas por este contaminante.

8. Hipótesis

El comportamiento de la concentración de PM 2.5 durante el periodo 2019-2021 en la ciudad de Bogotá se encuentra influenciado por factores meteorológicos y antropogénicos, por ende la temperatura influye en los niveles de concentración de las partículas al igual que la concentración de Material Particulado inferior a 10 micrómetros (PM 10), Dióxido de Azufre (SO₂) y Dióxido de Carbono (CO₂). Por lo tanto, las estaciones con mayor concentración de PM 2.5 serán Kennedy, Chapinero y Fontibón. De igual manera, se espera que el comportamiento que se tuvo para el año 2020, sea menor a los años estudiados, esto debido a la emergencia sanitaria producida por el Covid-19.

9. Metodología

En primer lugar, se tomará la información proporcionada por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), teniendo una periodicidad diaria del contaminante PM_{2.5} y la temperatura para cada una de las estaciones presentes por localidad en Bogotá. Seguido de esto se realizará un análisis exploratorio y espacio temporal en el cual se pueda evidenciar cuál ha sido la concentración del contaminante PM 2.5 en las diferentes zonas de la ciudad, teniendo en cuenta la ubicación de las redes de monitoreo, las cuales representarán la calidad del aire de la localidad a la cuál pertenecen.

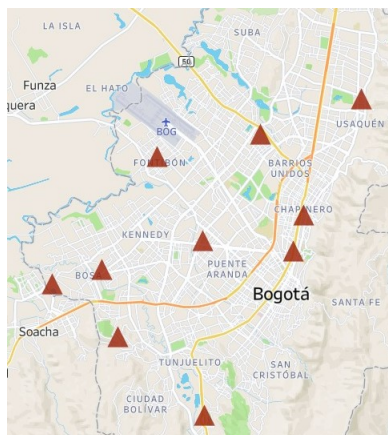


Figura 1: Ubicación de Estaciones de RMCAB

Finalmente se procede a aplicar métodos estadísticos como modelos dinámicos los cuales nos ayudarán a realizar el debido ajuste de los datos de la concentración del material particulado inferior a 2.5 micrómetros (PM 2.5) en el aire de la ciudad, evidenciando si presenta relación con la temperatura dada para este periodo.

10. Antecedentes

10.1. Contaminación atmosférica a nivel mundial

Al ser la contaminación atmosférica uno de los focos en cuestión de problemáticas ambientales alrededor del mundo, esto debido a que es una de las más complejas de evaluar y controlar, ya que existe una gran variedad de fuentes emisoras y diluyentes de los contaminantes atmosféricos y debido a las afectaciones que se presentan en la salud humana y el desarrollo de los ecosistemas. Siendo esta una de las razones

de mayor peso al momento de evaluar el comportamiento y estudio que ha tenido este fenómeno a nivel mundial, para así poder aplicar nuevas metodologías que han sido útiles en otros países.

Según un artículo presentado por la Organización mundial de la salud la contaminación del aire representa uno de los mayores riesgos medioambientales para la salud, ahora bien, si se generara la disminución de los niveles de contaminantes del aire, los países podrían detener la tasa de mortalidad derivada de múltiples accidentes cardiovasculares, cáncer de pulmón o el asma, causados por este fenómeno.¹

Este mismo artículo presenta que la causa de aproximadamente 4.2 millones de muertes prematuras en el mundo por cada año, es debido a la contaminación atmosférica que se presenta tanto en zonas rurales como urbanas. Ahora bien, uno de los contaminantes que explica esta tasa de mortalidad, es la exposición a partículas inferiores a 2.5 micrómetros ya que es esta la causante de enfermedades cardiovasculares, respiratorias y en muchas ocasiones cancer. De igual manera se expone que aquellos países con menores ingresos son más propensos a sufrir afectaciones por la contaminación del aire en exteriores, ya que se evidenció que el 91 % de las muertes presentadas en el mundo se producen en su mayoría en regiones como Asia Sudoriental y el Pacífico Occidental, al ser estas las regiones con ingresos más bajos.

Ahora bien, es importante devolverse al momento en el que la contaminación atmosférica tuvo su mayor auge, La industrialización, una de las etapas que han marcado la calidad de vida de la humanidad, así como se evidencia la mayor perturbación hacia los ecosistemas. Durante esta época las industrias empiezan a liberar múltiples gases, sin ningún tipo de regulación, ocasionando así múltiples afectaciones para la salud de los habitantes, enfermedades respiratorias como bronquitis y neumonía fueron las primeras en darse a conocer, presentándose el primer caso grave en Londres, alrededor del año 1303, tanto así que se generaban disgustos por el mal olor procedente de la atmósfera, esto causado por el uso del carbono mineral proveniente de embarcaciones, sustituto del combustible de leña, siendo este el impulsador para la revolución industrial. (Rico, 2001)

10.2. Contaminación atmosférica por PM 2.5 en Bogotá

Durante el año 2019 se declara Alerta Amarilla en la Ciudad de Bogotá D.C, y alerta Naranja en el Sur Occidente de la Ciudad por contaminación atmosférica, según la Secretaría Distrital de Ambiente, en Bogotá se presentaron altos niveles de contaminación atmosférica para la mitad del mes de febrero de ese mismo año, teniendo una mayor concentración en el suroccidente bogotano, evidenciando que una de las principales razones fué la variación presentada en la temperatura y la humedad del aire. Razón por la cual se expide la Resolución No 00298 “ Por el cual se Declara la Alerta Amarilla por contaminación atmosférica en las localidades de Kennedy, Bosa y Tunjuelito de la ciudad de Bogotá D.C”, y el Decreto 057 de 15 de febrero de 2019 “Por medio del cual se toman medidas transitorias y preventivas en materia de tránsito en las vías públicas en el Distrito Capital”, declarando así una alerta amarilla alrededor de toda la ciudad y alerta naranja a las localidades más afectadas como Kennedy, Bosa y Ciudad Bolívar, llevando a cabo medidas extraordinarias para controlar esta situación²

En principios del año del 2020, al momento de empezar a implementar medidas de aislamiento a causa de la propagación del virus de Covid-19, Bogotá venía presentando una preocupante calidad del aire, la alcaldía de Bogotá decreta alerta amarilla a causa de los elevados niveles de contaminación a causa del material particulado disperso en el aire. Por otro lado, debido a que el tráfico vehicular disminuía poco a poco, al igual que la actividad de múltiples industrias se detenía, se realiza una investigación para revelar la verdadera causa por la cual se estaba reportando una mala calidad del aire, concluyendo que una de las principales razones habladas por expertos, era la propagación de incendios forestales en diferentes zonas del país, demostrando que durante el primer periodo del 2020 este fenómeno dejó aproximadamente 185.673 toneladas de material particulado inferior a 2.5 micrómetros en la atmósfera del país.³

¹Organización Mundial de la Salud. Calidad del aire y salud [citado 20 de octubre de 2021] [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

²Boletín por alerta de calidad del aire. [Citado el 25 de octubre de 2021] <https://saludata.saludcapital.gov.co/osb/index.php/2019/03/07/boletin-por-alerta-de-calidad-del-aire/>

³COADS. Calidad del aire en cuarentena: Un balance de expertos [citado 25 de octubre de 2021]

Ahora bien, la Secretaría de Ambiente incluye los incendios forestales y la falta de lluvias durante el primer trimestre del año 2020, haciendo énfasis en que incendios provenientes de Venezuela y los Llanos Orientales había sido arrastrado a la Cordillera Central, generando un deterioro en la calidad del aire en múltiples ciudades del país, entre ellas Bogotá. Este fenómeno usualmente se presenta en épocas del año en las que no son frecuentes las lluvias, quiere decir en meses del año como marzo o abril.⁴

10.3. Acciones útiles para mitigar la contaminación atmosférica en Bogotá

Durante la alerta naranja presentada en febrero de 2019 en la ciudad de Bogotá, la alcaldía de Bogotá presenta que para aquellos municipios o áreas metropolitanas que cuenten con más de un millón de habitantes se incluirán medidas ambientales con el fin de mitigar los sucesos de contaminación, entre estas las autoridades serán responsables del control de las emisiones de contaminantes y dictar medidas de corrección para el daño medioambiental que pueda causar. De igual manera, se presentan restricciones de medios móviles, con el fin de mejorar la calidad del aire, en donde la Secretaría de Movilidad será la encargada de medidas que disminuyan la circulación de vehículos, teniendo como principal objetivo a los vehículos de carga que transiten por zonas con alerta naranja, esto debido a que según los estudios de las emisiones, este tipo de vehículos son los causantes de aproximadamente el 43% de las emisiones de material particulado pequeño. De igual manera, se crean campañas para incentivar el uso de transporte público, carro compartido y vehículos amigables con el medio ambiente. Finalmente la Secretaría de Ambiente será la encargada de cesar operaciones de fuentes industriales que hagan uso de combustibles como carbón, madera o biomas y en el caso de zonas que presenten Alerta Naranja, controlar el uso de combustibles líquidos.⁵

Por otro lado, durante la alerta amarilla presentada a principios del año 2020, la alcaldía de Bogotá presenta múltiples medidas para controlarla y llevarla a su fin, las cuales consistían en:

- Utilizar transporte público en lugar de carro particular, en el caso del uso de este se recomendó realizarlo de forma racional y únicamente si era necesario,
- Durante la duración de la alerta, se propuso apagar aquellos vehículos de carga que operara con Diesel.
- Tener en cuenta las recomendaciones para tener una conducción ecológica (evitar cambios de velocidad brusca, viajar a velocidades constantes)
- Postergar actividades que requieran salir de casa
- Disminuir circulación de vehículos de carga en horarios que presentan índices críticos de contaminación, ya que son este tipo de vehículos los responsables del 38.5% de las emisiones del material particulado
- Disminuir la circulación de vehículos particulares o motocicletas, siendo estos los responsables del 20% de las emisiones de material particulado según informe del 2018
- Cese de operaciones de industrias que operen con combustibles sólidos o líquidos entre las 00:01 am hasta las 11:59 am

Todo esto tomando como referencia la resolución No. 00678 emitida en marzo del 2020.

<https://cods.uniandes.edu.co/calidad-aire-cuarentena-covid19-colombia/>

⁴Secretaría de Ambiente. RESOLUCIÓN No. 00678 Por el cual se Declara la Alerta Amarilla por contaminación atmosférica en la ciudad de Bogotá D.C, y se toman otras determinaciones [citado 25 de octubre de 2021] <http://www.andi.com.co/>

⁵Alcalía de Bogotá. RESOLUCIÓN 383 DE 2019 La cual se Declara Alerta Amarilla en la Ciudad de Bogotá D.C, y Alerta Naranja en el Sur Occidente de la Ciudad por contaminación atmosférica, y se toman otras determinaciones [citado 25 de octubre de 2021] <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=83050>

11. Marco Conceptual

11.1. Clasificación de contaminantes y fuentes de emisión

Las partículas inferiores a 2.5 micrómetros (PM 2.5) se encuentran clasificadas como contaminantes criterio, son aquellos a los que se les establece un límite máximo permitido de concentración en el ambiente, esto debido a que son sustancias liberadas diariamente por la gran variedad de fuentes existentes, esto con la finalidad de proteger la salud de los ciudadanos que pueden frecuentar zonas de alto riesgo (COFEPRIS, 2017). En adición al PM 2.5 también se encuentran contaminantes como Ozono (O3), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO2), el dióxido de nitrógeno (NO2), el plomo (Pb), las partículas suspendidas totales (PST), y las partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM 10). Ahora bien, con respecto a lo mencionado anteriormente existe una forma universal de clasificar la concentración de estos contaminantes, en el caso del PM 2.5 se clasifica de la siguiente manera.

PM 2.5	Índice de Calidad de Aire (AQI)	Efectos para la Salud	Acciones Preventivas
0 a 12.0	Bueno 0 a 50	Poco o cero riesgo	Ninguno
12.1 a 35.4	Moderado 51 a 100	De forma inusual, personas sensibles pueden experimentar síntomas respiratorios	Personas sensibles deben considerar reducir esfuerzos o exposiciones prolongadas.
35.5 a 55.4	No saludable para grupos vulnerables 101 a 150	Se incrementa la probabilidad de enfermedades respiratorias en personas sensibles, agravamiento de enfermedades cardíacas o pulmonares y muerte prematura en personas con problemas cardiopulmonares y adultos mayores.	Personas con enfermedades cardíacas o respiratorias, así como adultos mayores, niños/as, deberán limitar exposiciones prolongadas.
55.5 a 150.4	No saludable 151 a 200	Mayor agravamiento de enfermedades cardíacas o pulmonares y muerte prematura en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores; incremento de problemas respiratorios en la población en general.	Personas con enfermedades cardíacas o respiratorias, así como adultos mayores, niños/as, deberán evitar exposiciones prolongadas; el resto de la población deberá limitar exposiciones prolongadas.
150.5 a 250.4	Muy insalubre 201 a 300	Detrimiento significativo de enfermedades cardíacas o pulmonares y muerte prematura en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores; incremento significativo de problemas respiratorios en la población en general.	Personas con enfermedades cardíacas o respiratorias, así como adultos mayores, niños/as, deberán evitar exposiciones al aire libre; el resto de la población deberá evitar exposiciones prolongadas.
250.5 a 500.4	Peligroso 301 a 500	Detrimiento serio de enfermedades cardíacas o pulmonares y muerte prematura en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores; riesgo serio de problemas respiratorios en la población en general.	Todos deben evitar cualquier exposición al aire libre; las personas con enfermedades respiratorias o cardíacas, los adultos mayores y los niños deben permanecer en casa o lugares ventilados con aire limpio.

Figura 2: Medición PM 2.5

6

En dónde al momento de presentarse niveles entre 35.5 y 55.5 se declara a la ciudad en alerta naranja, momento en el que la alcaldía se encarga de crear planes de acción para mitigar los efectos de la alta contaminación presente en el aire. Estas partículas provienen, en su mayoría, de procesos de combustión o actividades industriales. De igual manera puede producirse como el resultado de la oxidación de contaminantes gaseosos presentes en la atmósfera y la reacción que presentan al contacto con el vapor del agua. Estas partículas pueden ser emitidas tanto por fuentes naturales como industriales, ya que estas incluyen polvo, emisiones volcánicas y emisiones presentes en la flora o incendios forestales, en el caso de las emisiones naturales, por otro lado emisiones industriales pueden deberse a fuentes estacionarias (industrias), fuentes fugitivas (Polvos presentes en las carreteras) o fuentes móviles (Vehículos de carga, particulares, motos, etc.)

⁶Tomado de <https://smability.io/es/que-es-el- PM2-5/>

11.2. Efectos en la salud

Ahora bien, algunos de los efectos presentes en la salud debido a la contaminación de este tipo pueden llegar a estar relacionados con síntomas en las vías respiratorias, alergias, sinusitis, tos, irritación en los ojos o congestión nasal, siendo estos los casos más sencillos que pueden aparecer, sin embargo, existen casos graves y severos relacionados con el cáncer de pulmón o anomalías reproductivas. (Maritnez E, 2010)

Múltiples estudios han evidenciado que el riesgo de padecer problemas respiratorios o cardiovasculares pueden aumentar si se presenta una gran exposición a contaminantes como el PM 2.5 y que bajo un valor máximo pueden no existir efectos adversos. Sin embargo, en Estados Unidos y algunos países de Europa se han presentado casos graves con un índice entre 3 y 5 $\mu g/m^3$ (PM 2.5) (O'Neill MS, 2003)

En términos generales, a lo largo de los años ha existido un duro debate acerca de cuál es el nivel seguro de exposición a contaminantes del aire, ya que como se evidencia anteriormente, existen investigaciones que presentan que con un bajo nivel de concentración no deberían presentarse problemas graves en la salud y aquellos quienes afirman que sin importar este nivel, de igual manera se podrían presentar afectaciones severas.

12. Marco Teórico

12.1. Modelos Lineales Dinámicos

En el campo de la estadística es bien sabido que uno de los métodos más importantes para el modelamiento y estimación de datos es el modelamiento dinámico bayesiano y la predicción de series de tiempo. Teniendo esto en cuenta y partiendo de esta premisa, se define a un modelo lineal dinámico como una amplia variedad de modelos que poseen parámetros variables en el tiempo, siendo aplicado al momento de modelar datos con una estructura temporal y de regresión. Se presenta por Harrison y Stevens en el año de 1976, documentándolo en el libro de West y Harrison (1997). Ahora bien, con el fin de tener una clara noción de este tema, se presentarán algunos aspectos fundamentales de los modelos dinámicos. (Helio S, 2005)

Los modelos lineales dinámicos se definen como modelos paramétricos en donde se genera una variación de los parámetros estudiados, caracterizándose en primer lugar, por ecuaciones de observación y evolución de los parámetros. Este puede ser reconocido como una generalización de los modelos de regresión ya que permiten cambios en los valores de los parámetros a lo largo del tiempo. Las ecuaciones mencionadas anteriormente, están dadas por:

$$y_t = F_t' \theta_t + \epsilon_t, \epsilon_t \sim N(0, V_t) \quad (1)$$

$$\theta_t = G_t \theta_{t-1} + \omega_t, \omega_t \sim N(0, W_t) \quad (2)$$

En donde se define a y_t como una serie de tiempo con observaciones escalares y condicionalmente independientes dada la secuencia de θ_t , por otro lado F_t representa un vector con dimensiones de $p \times 1$ que contiene variables explicativas, θ_t es definido como un vector de parámetros con dimensiones $p \times 1$, G_t es una matriz de $p \times p$ la cual describe la evolución del parámetro, finalmente V_t y W_t hacen referencia a la varianza de los errores que están asociados a la observación unidimensional y con un vector de parámetros p -dimensional. Lo anteriormente mencionado es aplicado a muchos de los modelos vistos en la literatura estadística. Un claro ejemplo es, si $G = I_p$ una matriz de identidad de orden p y $\omega_t = 0$ quedarían representados todos los modelos de regresión lineal. Por otro lado, si F_t, V_t y W_t son constantes $\forall t$, entonces este representaría un modelo lineal de series de tiempo, como los procesos ARIMA (Box y Jenkins, 1976). Teniendo en cuenta lo anteriormente explicado, un modelo lineal dinámico está especificado por (F_t, G_t, V_t, W_t) En donde existen dos casos especiales, en primer lugar, los modelos de series de tiempo caracterizados por $F_t = F$ y $G_t = g \forall t$ y los modelos de regresión dinámica, definidos por $G_t = I_p$.

Por otra parte, los modelos lineales dinámicos, presentan una mayor adaptación al momento de realizar el tratamiento de series de tiempo que no tienen estacionariedad, ya que estas presentan una interpretación más sencilla comparada con los modelos ARIMA y de igual manera una implementación más flexible. (Mayoral 2013), Razón por la cual, consideran la serie de tiempo como un sistema dinámico perturbado por errores aleatorios, integrando componentes de tendencia o estacionalidad, generando una estructura probabilística en donde se calcula la distribución del comportamiento de PM 2.5 con la información encontrada, realizando un enfoque Bayesiano.

12.2. Modelos Lineales Generalizados Dinámicos

Los modelos Lineales Dinámicos generalizados se consideran como generalizaciones de los modelos lineales generalizados, aplicados en aquellos casos en los cuales las observaciones son series de tiempo y los parámetros pueden variar durante el tiempo. Son comúnmente utilizados en áreas como epidemiología, econometría y marketing, esto ya que tienden a presentar datos anormales. En un enfoque general para el análisis de la estática se dieron a conocer los problemas de regresión en la familia exponencial los cuales fueron dados por Nelder y Wedderburn (1972), definiéndolo como la generalización de los modelos lineales, a lo cual la aplicación de esta metodología se ha extendido debido a la facilidad de tales análisis (Baker y Nelder 1978).

Ahora bien, suponiendo que se presenta un modelo de muestreo en el tiempo t perteneciente a la familia exponencial y cuyo parámetro natural n_t tiene una distribución conjugada a priori $CP[\alpha_{t,t}]$. Presentará una extensión dinámica directa de GLM en donde se relaciona n_t por medio de una transformación no lineal $g(n_t)$ llegando a

$$\lambda_t = F_t' \theta_t \quad (3)$$

Donde θ_t hace referencia a un vector que tiene una evolución en el tiempo, similar al comportamiento en un MLD. Sin embargo, hacer esto implicaría algunas restricciones en la forma que tendría la distribución a priori para n_t . Con el fin de evitar este suceso, se reconoce a θ_t como un valor ficticio, siendo una guía para modelar la realidad. En consecuencia de esto, el vínculo que existe entre $g(n_t)$ y t se usará como una guía para formar la distribución a priori para n_t . Teniendo en cuenta esto, las distribuciones a priori y a posteriori del vector ahora no serán normales, los siguientes modelos se asumirán entonces por medio de la analogía de un MLD y momentos de primer y segundo orden del vector θ_t los cuales estarán dados por

$$(\theta_{t-1} | D_{t-1}) \sim [m_{t-1}, C_{t-1}] \quad (4)$$

Y definiendo el tiempo de evolución del modelo suponiendo que

$$(\theta_{t-1} | D_{t-1}) \sim [a_t, R_t] \quad (5)$$

En donde se define que

$$a_t = G_t m_{t-1} + R_t^{-1} y_t \quad (6)$$

En donde la matriz de transición G_t y la matriz de descuento B_t Son conocidas. Además no se especifica la distribución completa del vector de estado, únicamente se asumen la matriz de media y covarianza. Finalmente,

$$f_t = E[t | D_{t-1}] = F_t' a_t \quad (7)$$

$$q_t = V[t | D_{t-1}] = F_t' R_t F_t \quad (8)$$

$$s_t = C[t, \theta_t | D_{t-1}] = R_t F_t \quad (9)$$

En este punto, la distribución a priori de n_t se especifica parcialmente, con la siguiente forma conjugada

$$(n_t | D_{t-1}) \sim CP[\alpha_{t,t}] \quad (10)$$

En donde α_t y t no tienen restricciones en sus valores y se eligen sobre la base de la relación guía entre $g(n_t) \propto \lambda_t$ fijando los dos primeros momentos de $g(n_t)$ determinarán α_t y β_t . La relación guía sugiere que los valores de f_t y q_t para estos momentos [y s_t para la covarianza entre $g(n_t)$ y θ_t]. Cabe destacar que esto no es necesario ya que se pueden elegir otros valores para incorporar más información subjetiva, para permitir la intervención o para evitar dificultades numéricas. (Mike West, 1984)

12.3. Marco Contextual

Con el fin de realizar una exhaustiva evaluación de la concentración de PM 2.5 en las diferentes localidades de la ciudad, se realiza un análisis exploratorio general y específico de los datos proporcionados. En primer lugar, podemos evidenciar la evolución y el comportamiento que ha tenido la concentración de este contaminante durante los últimos tres años.

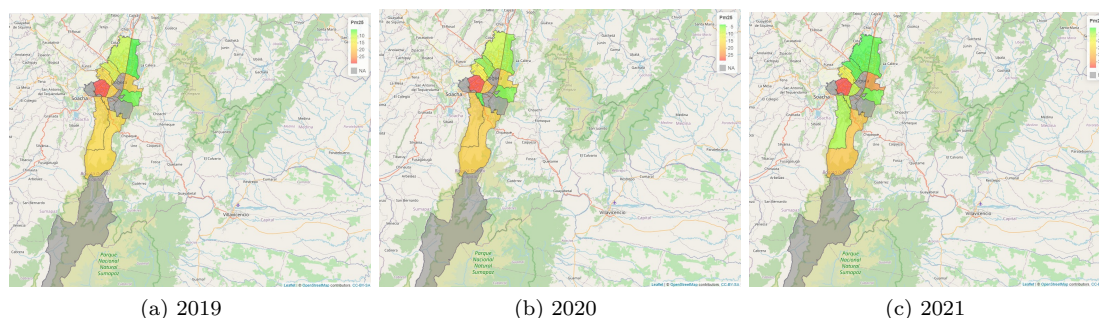


Figura 3: Concentración de PM 2.5

Tal como se puede evidenciar en las imágenes, en primer lugar, se evidencia que existen localidades en las cuales hasta el momento no se ha presentado datos, esto debido a que no se encuentran ubicadas ninguna de las redes de monitoreo de calidad del aire en estas zonas. Ahora bien, se puede evidenciar que la localidad con una mayor concentración, presente en los tres años consecutivos, es Kennedy, la cual al presentar un índice mayor a 35, se ubica en la clasificación de zonas que pueden representar un riesgo para poblaciones sensibles y propensas a adquirir enfermedades respiratorias. Por otro lado se evidencia que durante el 2020 la concentración de este contaminante disminuyó considerablemente, presentando zonas con un índice mucha más bajo que los años consiguientes, este fenómeno puede ser explicado debido a la propagación de Covid-19 y al aislamiento obligatorio que se presentó en todo el país, dando cese a actividades diarias y suspendiendo por un tiempo prolongado el normal funcionamiento de las industrias y transporte de carga, las cuales como se comentaron anteriormente, son las principales causantes de que este fenómeno afecte nuestra calidad del aire. Finalmente evidenciamos como en el 2021, los índices empiezan a elevarse dando una clara evidencia que la disminución de la contingencia y el volver a hacer uso normal de transporte público, vehículos particulares y la apertura de las industrias, generan una gran contaminación atmosférica en nuestra ciudad.

12.3.1. Localidad de Kennedy

En primer lugar, es importante evidenciar el comportamiento de la concentración de PM 2.5 en una de las localidades que se ha visto más afectada por este suceso. Ya que, basándose en un estudio realizado por Sergio Leonardo Cortés de la Universidad Nacional, en el cual indica que los ciclistas y peatones que frecuentan esta zona del sur de la ciudad, están siendo expuestos a elevados niveles de contaminación, siendo estos más altos de los que están permitidos para el libre tránsito de los ciudadanos, lo cual a largo plazo podrá generar serios problemas de salud. Esta información concuerda con la presentada en este documento, en donde claramente se evidencia que esta es la localidad con la peor calidad del aire

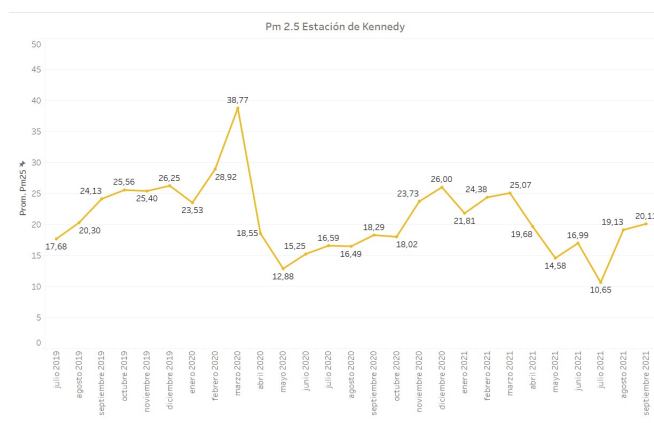


Figura 4: PM 2.5 Kennedy

En el gráfico anteriormente presentado, se puede evidenciar que durante principios del 2020 se genera la mayor concentración de PM 2.5, que como se había explicado con anterioridad, fue la época del año en la que se generó alerta naranja para localidades del sur de la ciudad. Sin embargo, si se deja a un lado la medición durante ese periodo, de igual manera es notable que los índices tienden a estar un poco más altos de lo normal sin llegar a sobrepasar los índices permitidos, a excepción de febrero del 2020, cuando se presentó un índice 38.77, clasificándose como una calidad dañina para grupos poblacionales con enfermedades del corazón o respiratorias, concluyendo que esta es una de las localidades que se ha visto más afectada por la contaminación atmosférica.

12.3.2. Localidad de Usaquén

El caso de la localidad de Usaquén presenta una vista favorable para los habitantes de este sector, ya que según estudios esta es una de las localidades con la mejor calidad del aire en la ciudad, ya que presenta niveles de smog bajos, así que mientras que localidades como Kennedy o Carvajal presentan índices aproximados de 30 y 35, esta localidad presenta índices que oscilan entre los 10 y 15, esto se debe a la poca presencia de industrias en este sector, el estar cerca de los cerros y de humedales contribuyen a que los niveles de contaminación sean muy bajos en este sector de la ciudad.

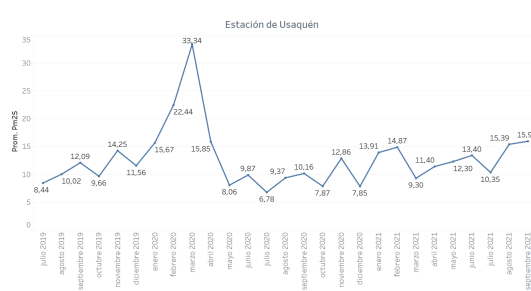


Figura 5: PM 2.5 Usaquén

Comportamiento que se ve claramente reflejado en la gráfica propuesta, en donde presenta el común pico durante el primer periodo del 2020, sin embargo, este no llega a ser perjudicial para la salud, ahora bien, si evidenciamos los índices que se presentan en una época normal del año podemos evidenciar que estos se encuentran clasificados como un índice bueno que no representa mayor riesgo a la población.

12.3.3. Localidad de Chapinero

La zona de Chapinero es comúnmente frecuentada por la mayoría de los Bogotanos, al ser esta la zona central de la ciudad es foco de transporte público, pvehículos particulares y motos, sin embargo, al no tener presencia de industrias grandes esta localidad no presenta un índice deplorable. Es importante aclarar que la estación que captura estos índices es la de Móvil 7ma

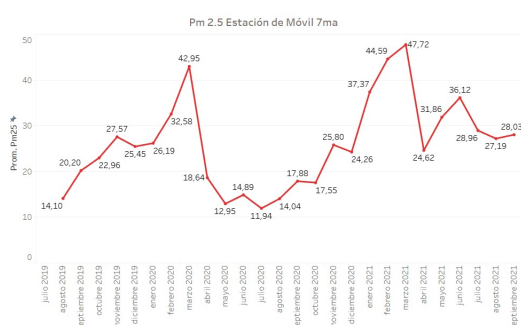


Figura 6: PM 2.5 Chapinero

Así como se puede evidenciar en la gráfica, la concentración del material particulado oscila alrededor de los 15 microgramos por metro cúbico, sin embargo, a inicios del 2020 y 2021 se presentan picos de este contaminante llegando a niveles nocivos para grupos sensibles, se debe tener en cuenta que, como se mencionó anteriormente, durante el primer periodo del año debido a la falta de lluvias y sequía presentada, es común que este fenómeno se vea presente.

12.3.4. Localidad de Engativá

La localidad de Engativá ha presentado niveles de concentración de PM 2.5 moderados, presentando un único pico con niveles altos para febrero del 2020, fenómeno previamente explicado.

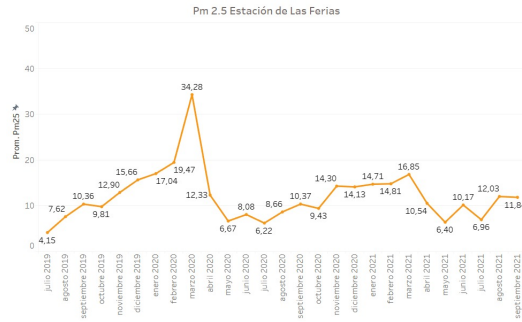


Figura 7: PM 2.5 Engativá

La medición de la concentración de este material particulado para la localidad de engativá se realiza en la estación de las ferias, la cuál representa el comportamiento aproximado de la localidad. Esta zona de Bogotá, aunque no presenta índices totalmente bajos, tampoco presenta un alto riesgo a largo ni corto plazo para sus habitantes.

12.3.5. Localidad de Fontibón

La calidad medioambiental de esta localidad no se considera como la mejor, catalogándola como una de las localidades que presentan los índices más altos de contaminación, de igual manera es la más afectada por la falta de orden en espacios públicos y la que presenta la menor inversión en soluciones para problemas ambientales. Sin embargo, la alcaldía local de Fontibón creó un plan Ambiental local para el periodo de 2021-2024, esto con el fin de mitigar lo efectos de la contaminación.

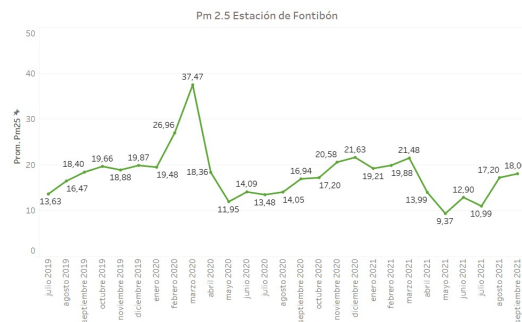


Figura 8: PM 2.5 Fontibón

Todo esto debido a que como se puede evidenciar en la gráfica, esta localidad presenta índices superiores a 12, lo que la clasifica como una localidad con un índice de calidad de aire moderado, lo que quiere decir que aquellas personas sensibles podrían presentar afectaciones respiratorias a largo plazo.

12.3.6. Localidad de Santa Fe

La medición de la concentración de PM 2.5 en la localidad de Santa Fe, se realiza en la estación del Ministerio de Ambiente, en la cual se puede evidenciar que, a lo largo del periodo estudiado, el comportamiento de este material particulado se ha clasificado en su mayoría como bueno, siendo esta una de las localidades con la mejor calidad del aire en Bogotá.

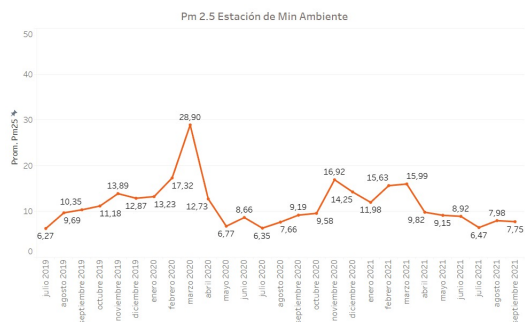


Figura 9: PM 2.5 Santa Fe

Se evidencia claramente que a pesar del fenómeno presentado en el primer periodo del 2021, esta localidad obtuvo un nivel de concentración de PM 2.5 moderado, por lo cual no llegó a ser perjudicial para la salud de sus habitantes, siendo un claro ejemplo más que los índices de mayor contaminación se deben a las industrias y el tipo de materiales químicos que usen.

12.3.7. Localidad de Suba

Al igual que la localidad de Usaquén, Suba es una de las localidades en la cuál sus habitantes tienen una mejor calidad de aire, a pesar de ser una de las localidades más grandes de la ciudad, esta no cuenta con la común presencia de industrias quienes son fuente de contaminantes pequeños que más afectan a la salud de los ciudadanos.

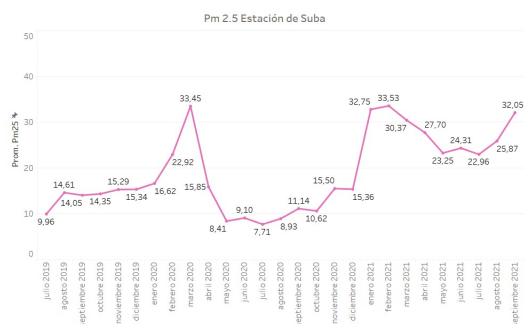


Figura 10: PM 2.5 Suba

Como podemos evidenciar, durante el 2021 se presentaron un alza en los índices de concentración de PM 2.5, en donde se presenta una mayor concentración durante los primeros periodos del año, sin embargo, debemos tener en cuenta el sitio en donde se toma esta concentración.

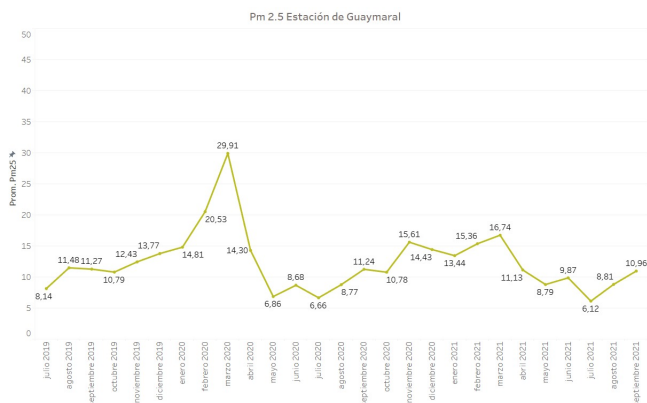


Figura 11: PM 2.5 Suba

Ya que al evidenciar el comportamiento en la estación de Guaymaral, esta presenta un índice más bajo que en la estación de Suba la cuál está ubicada a las afueras de Suba, en el barrio Corpas.

13. Resultados

Con el fin de evidenciar el tipo de modelo que se puede ajustar al comportamiento de la concentración de PM 2.5 en la ciudad de Bogotá se proponen tres modelos dinámicos para cada una de las estaciones estudiadas, teniendo en cuenta que se tomará como variable explicativa a la medición de la temperatura para el respectivo periodo de estudio. Los modelos propuestos se presentan en la siguiente tabla.

		Modelo Dinámico Simple	Modelo Dinámico sin intercepto	Modelo Dinámico con un Rezago	Poisson
Kennedy	MAD	8,0	8,3	11,3	6,4
	MAPE	0,3	0,3	0,4	0,2
	MSE	102,9	112,3	198,6	100,5
Suba	MAD	5,9	8,4	10,3	4,8
	MSE	61,7	65,7	76,6	48,2
	MAPE	0,4	0,5	0,7	0,3
Chapinero	MAD	7,8	8,0	11,2	5,6
	MAPE	0,4	0,4	0,6	0,3
	MSE	105,9	109,4	207,1	80,9
Usaquén	MAD	4,7	4,9	7,4	3,5
	MAPE	0,5	0,5	0,8	0,3
	MSE	45,4	46,5	103,2	27,6
Fontibón	MAD	7,6	7,8	10,6	5,4
	MAPE	0,4	0,4	0,5	0,2
	MSE	50,4	51,3	65,7	45,6
Las Ferias	MAD	6,4	6,6	9,8	4,3
	MAPE	0,3	0,4	0,6	0,2
	MSE	55,6	57,8	63,4	42,5
Min Ambiente	MAD	5,9	8,4	9,7	4,3
	MAPE	62,3	64,5	74,5	45,2
	MSE	0,4	0,5	0,7	0,3

Figura 12: Criterios de comparación de modelos por localidad

En la cuál se presentan la desviación absoluta media (MAD), el error cuadrático medio (MSE) y el error medio absoluto de porcentaje (MAPE), presentado por cada modelo, teniendo claro que uno de estos que menos se ajustó a los datos para todas las estaciones fué el Modelo Dinámico con un rezago, por otro lado el Modelo Dinámico Generalizado Poisson fue el que mejor se ajustó al tipo de datos proporcionados, siendo este el que presento el menor valor en los criterios estudiados, en este caso basandose

específicamente en el MAPE, para todas las localidades. En este caso se tomará como estación base a Suba, esto ya que a pesar de que la concentración de este contaminante presenta un comportamiento diferente en cada estación, todas pueden ser explicadas de forma general ya que son representadas por el mismo modelo, específicamente un Modelo Dinámico Generalizado Poisson.

Intervalos de credibilidad al 95% para beta0

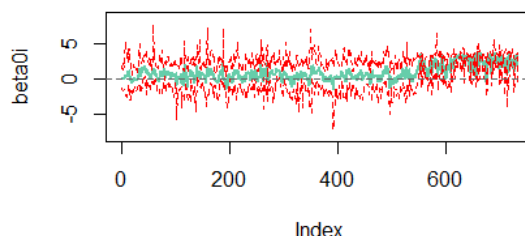


Figura 13: Modelo Poisson Beta1

Ahora bien, como se puede evidenciar en el gráfico donde se presentan los intervalos de credibilidad para Beta 0 del Modelo propuesto en la localidad de Suba, la variable es significativa ya que se encuentra por encima del cero y presenta un comportamiento variable, de igual manera presenta un buen ajuste con respecto a los intervalos de credibilidad y siendo significativo el parámetro propuesto. Ahora bien, se genera el gráfico en el cual se compara el valor real de PM 2.5 con respecto a la estimación realizada.

Intervalos de credibilidad al 95% para M1

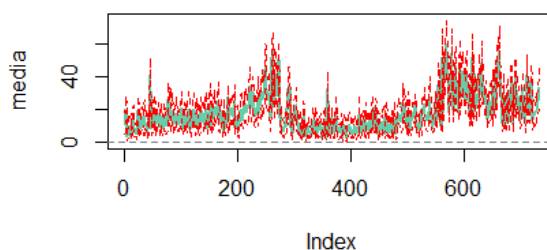


Figura 14: Intervalos de credibilidad para la media

A lo que se puede evidenciar que presenta un buen ajuste de los datos que estima el modelo en comparación a los datos reales, a lo cual se puede concluir que para cada estación en la que se realizó el estudio sobre la concentración de PM 2.5 se podría predecir el comportamiento de este con respecto a la Temperatura y haciendo uso de un Modelo Dinámico Generalizado Poisson.

14. Conclusiones

A lo largo del documento, se explicaron las múltiples afectaciones que puede tener un alto grado de contaminación atmosférica y las múltiples enfermedades que se pueden dar a partir de esto, identificando que uno de los contaminantes que presentan un mayor riesgo es el PM 2.5 el cual dependiendo del tipo de ambiente o la cantidad de contaminación de industrias o vehículos presentes puede tener mayores niveles de concentración. Ahora bien, para el caso de Bogotá, según el estudio realizado, Kennedy, Puente Aranda y Fontibón son aquellas localidades que presentan un mayor riesgo con respecto a la exposición de sus habitantes y de personas que frecuenten estas áreas.

Por otro lado, localidades como Suba y Usaquén resaltan por su buen índice de calidad del aire, siendo estas las zonas de Bogotá que han tenido una concentración de PM 2.5 baja, esto gracias a la poca presencia de industrias alrededor de esta zona y la baja afluencia de automotores de carga.

Finalmente, teniendo una vista estadística del comportamiento de este contaminante fue de utilidad evidenciar que uno de los modelos que mejor se puede ajustar a este tipo de mediciones llega a ser un Modelo Dinámico Generalizado Poisson, esto debido a la naturalidad de los datos ya que sin importar que las localidades tengan comportamientos diferentes y algunas presenten no estacionariedad, se ajustan fácilmente al mismo modelo, teniendo así una forma más sencilla y exacta al momento de querer realizar la estimación del comportamiento de este.

Referencias

- Martínez E (2010), '<http://www.medellincomovamos.org/presentacion-contaminacion-atmosferica-los-efectos-sobre-la-saluden-medellin>'.
- Baker, R. J. & Nelder, J. A. (1978), 'Glim release 3', *Oxford University, Numerical Algorithms Group* .
- Ballester, F. (2005), 'Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. revista española de salud pública'.
- Dockery DW., Pope CA., Xu X. S. J. (2002), 'Meta-analysis of time series studies of air pollution and mortality: effects of gases and particles and the influence of cause of death, age and season', *J Air Waste Manag Assoc* .
- E, M. (1999), 'Fundamentals of atmospheric aerosol chemistry', *Akademiai Kiado* .
- Helio S. Migon, Dani Gamerman, H. F. L. M. A. F. (2005), 'Handbook of statistics, dynamic models', *Elsevier B.V* .
- IDEAM (2021a), '<http://documentacion.ideam.gov.co/>'.
- IDEAM (2021b), '<http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/contaminacion-atmosferica>'.
- Mike West, J. H. (1984), 'Bayesian forecasting and dynamic models', *Springer* .
- Mills NL., Tornqvist H., R. S. D. K. G. M. B. N. M. W. D. K. B. A. S. T. N. D. (2005), 'Diesel exhaust inhalation causes vascular dysfunction and impaired endogenous fibrinolysis: An explanation for the increased cardiovascular mortality associated with air pollution', *J Am Coll Cardiol* .
- O'Neill MS, Jerrett M, K. I. L. J. C. A. G. N. W. P. F. T. C. L. S. J. (2003), 'Health, wealth, and air pollution: Advancing theory and methods.', *Environmental Health Perspectives* .
- Organización Mundial de la Salud (2004), '<http://www.who.int/whr/2002/chapter4/en/index7.html>'.
- para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepri), F. (2017), 'Programa para contingencias ambientales atmosféricas', <https://www.gob.mx/cofepri/acciones-y-programas/9-programa-para-contingencias-ambientales-atmosfericas> .
- Reporte de Estaciones (2021), 'Reporte de Estaciones de Pm 2.5 y Temperatura, base de datos recuperada de <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Report/stationreport> '.
- Rico, F. e. (2001), 'Daños a la salud por contaminación atmosférica. toluca, estado de méxico', *CIGOME* .
- Stieb, D. (2002), 'Identifying and managing adverse environmental health effects: 2. outdoor air pollution', *Cmaj* .