

ANEXO 4

TENDENCIA DE LAS CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO EN EL VALLE DE ABURRÁ

2008-2016

CONTRATO NO. CCT 1088 DE 2016



EJECUTA



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Facultad Nacional de Salud Pública
Héctor Abad Gómez

UN PROYECTO DE





Un Proyecto de

Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Eugenio Prieto Soto

Director

María del Pilar Restrepo Mesa

Subdirectora Ambiental





EQUIPO DE TRABAJO

Sara Catalina Grisales Vargas, IA
Heisling Alexander Cubaque López, GSA. Mg
Ruth Marina Agudelo Cadavid IS, PhD
Jhon Jaime Cárdenas Monsalve, I.Q. Esp
Ana María Ramírez Vélez, GSA Esp
Fernán Alonso Villa Garzón, IS. Mg
Hugo Grisales Romero, Mt. PhD
Dania Lizeth Rojas Hernández, GSA
Dorian Ignacio Ospina Galeano, GESIS
Juan Gabriel Piñeros Jiménez, MD. PhD

Supervisión Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Ana Zuleima Orrego Guarín
Ángela Lucía Molina Chica
Zoraida Piedrahita Calle





Contenido

1	INTRODUCCIÓN	17
2	OBJETIVO	19
3	METODOLOGÍA.....	20
3.1	ESTACIONES DE MONITOREO- REDAIRE.....	20
3.2	ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LOS DATOS	25
3.2.1	Exploración de las series y datos no disponibles	25
3.2.2	Interpolación de datos	26
3.2.3	Transformación de ozono.....	27
3.3	IMPUTACIÓN DE VALORES NO DISPONIBLES	27
3.3.1	Clasificación de los valores no disponibles	27
3.3.2	Métodos de imputación aplicados a bases de datos de calidad del aire	28
3.3.3	Métodos de imputación aplicados en el estudio.....	33
3.4	SERIES ENSAMBLADAS.....	34
3.4.1	Correlación por ventanas móviles.....	34
3.4.2	Entropía para la correlación de series de tiempo.....	36
3.4.3	Combinación de series de tiempo.....	37
3.5	ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LAS SERIES ENSAMBLADAS.....	38
3.5.1	Exploración de las series.....	38
3.5.2	Concentraciones promedio	38
3.5.3	Excedencias a las normas de contaminantes atmosféricos.....	38
3.6	ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO.....	40
3.6.1	Componentes de una serie de tiempo.....	42
3.6.2	Modelos de una serie de tiempo	42
3.6.3	Pasos en el análisis de una serie de tiempo.....	43
3.6.4	Determinación de la estacionalidad de la serie:	44
3.6.5	Modelos ARIMA.....	45
4	RESULTADOS	46
4.1	IMPUTACIÓN DE DATOS.....	46
4.1.1	Gráficas de valoración de los valores perdidos.....	46
4.1.2	Imputación múltiple y ARIMA.....	50
4.1.3	Imputación por el método de Plaia & Blondi (2006) (17).....	57
4.1.4	Redes neuronales	57
4.2	ANÁLISIS DE SERIES ENSAMBLADAS.....	59





4.2.1	Correlación por ventanas móviles.....	59
4.2.2	Entropía.....	61
4.2.3	Combinaciones de las series.....	65
4.3	ANÁLISIS EXPLORATORIOS DE LAS SERIES ENSAMBLADAS.....	78
4.3.1	Barbosa78	
4.3.2	Bello	82
4.3.3	Caldas	88
4.3.4	Copacabana.....	94
4.3.5	Envigado.....	98
4.3.6	Girardota.....	102
4.3.7	Itagüí	107
4.3.8	La Estrella.....	112
4.3.9	Medellín.....	117
4.3.10	Sabaneta.....	123
4.4	ANÁLISIS DE LAS SERIES: ARIMAS POR MUNICIPIO.....	127
4.4.1	Barbosa127	
4.4.2	Bello	130
4.4.3	Caldas 138	
4.4.4	Copacabana.....	142
4.4.5	Envigado.....	145
4.4.6	Girardota.....	153
4.4.7	Itagüí 159	
4.4.8	La Estrella.....	167
4.4.9	Medellín.....	174
4.4.10	Sabaneta.....	181
5	ARIMA.....	184
6	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN.....	186
7	REFERENCIAS.....	189





Lista de figuras

Figura 1.	Series de PM _{2.5} para las estaciones ITA-CONC (línea azul) y MOV-EST-METR (línea roja).....	24
Figura 2.	Estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire seleccionadas para el estudio.	24
Figura 3.	Procedimiento para el planteamiento de un modelo ARIMA (p,d,q) (15).....	31
Figura 4.	Diagrama del algoritmo implementado para calcular la serie resultante de correlaciones con ventanas mensuales significativas.....	35
Figura 5.	Flujograma del procedimiento del análisis de series de tiempo.....	41
Figura 6.	Registros de PM _{2.5} medidos en las estaciones fijas en el municipio de Medellín.	47
Figura 7.	Registros de CO medidos en las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá.....	47
Figura 8.	Registros de SO ₂ medidos en las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá.....	48
Figura 9.	Registros de PM _{2.5} , PM ₁₀ y O ₃ medidos en la estación MED-MANT.....	49
Figura 10.	Comparación de la serie original de PM _{2.5} en la estación CAL-LASA en Caldas, con la serie imputada con todas las variables y la serie imputada con variables seleccionadas.....	51
Figura 11.	Serie original de PM ₁₀ en la estación MED-PJIC en Medellín y serie imputada por medio de la imputación múltiple. Elaboración propia.....	52
Figura 12.	Serie original de PM _{2.5} en la estación CAL-LASA y serie imputada por medio del algoritmo EM.....	53
Figura 13.	Serie de PM ₁₀ en la estación BEL-USBV, en el municipio de Bello. Serie original, serie con imputación múltiple, serie con imputación con ARIMA. Elaboración propia.....	55
Figura 14.	Serie de PM _{2.5} en la estación ITA-CONC, en el municipio de Itagüí. Serie original, serie con imputación múltiple, serie con imputación con ARIMA con filtro de Kalman.....	56
Figura 15.	Serie final de PM _{2.5} en la estación ITA-CONC, en el municipio de Itagüí, imputada por medio de una ARIMA(3,1,0)(1,1,1)[30].	56
Figura 16.	Serie de PM ₁₀ registrado en la estación EST-MAGO imputada por redes neuronales.....	58
Figura 17.	Serie de PM _{2.5} registrado en la estación MED-PJIC imputada por redes neuronales.....	58
Figura 18.	Correlación de Spearman aplicada a ventanas móviles de un mes para las series de O ₃ de Medellín. En la gráfica de la izquierda se observa un periodo de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá, mientras que, en la figura derecha, se observa la serie en un periodo de heterogeneidad. La serie de O ₃ color rosado, es la resultante.....	59
Figura 19.	Correlación de Spearman aplicada a ventanas móviles de un mes para las series de NO ₂ de Medellín. En la gráfica de la izquierda se observa un periodo de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá, mientras que, en la figura derecha, se observa la serie en un periodo de heterogeneidad. La serie de NO ₂ color rosado, es la resultante.	60
Figura 20.	Correlación de Spearman aplicada a ventanas móviles de un mes para las series de NO de Medellín. En la gráfica de la izquierda se observa un periodo de estabilidad atmosférica en el	





	Valle de Aburrá, mientras que, en la figura derecha, se observa la serie en un periodo de heterogeneidad. La serie de NO color rosado, es la resultante.....	60
Figura 21.	Correlación de Spearman aplicada a ventanas móviles de un mes para las series de NOX de Medellín. En la gráfica de la izquierda se observa un periodo de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá, mientras que, en la figuraderecha, se observa la serie en un periodo de heterogeneidad. La serie de NOX color rosado, es la resultante	60
Figura 22.	Medida de entropía cruzada entre dos conjuntos de datos no correlacionados.....	61
Figura 23.	Medida de entropía de PM ₁₀ mes a mes, mayo 2008 a diciembre 2016, entre los datos de las estaciones MED-UNFM y MED-PJIC.....	62
Figura 24.	Serie de PM ₁₀ semiautomática de la estación MED-UNFM ubicada en el municipio de Medellín ...	66
Figura 25.	Series de tiempo a combinar de concentraciones de PM _{2.5} en Medellín entre 2008 y 2016.	69
Figura 26.	Serie de tiempo combinada de PM _{2.5} en Medellín entre 2008 y 2016.	69
Figura 27.	Series de tiempo a combinar de concentraciones de PM ₁₀ en Medellín entre 2008 y 2016.....	69
Figura 28.	Serie de tiempo combinada de PM ₁₀ en Medellín entre 2008 y 2016.....	70
Figura 29.	Series de contaminantes a analizar en el municipio de Barbosa.....	70
Figura 30.	Series de contaminantes a analizar en el municipio de Bello.....	71
Figura 31.	Series de contaminantes a analizar en el municipio de Caldas.....	72
Figura 32.	Series de contaminantes a analizar en el municipio de Copacabana	72
Figura 33.	Series de contaminantes a analizar en el municipio de Envigado	73
Figura 34.	Series de contaminantes a analizar en el municipio de Girardota.....	74
Figura 35.	Series de contaminantes a analizar en el municipio de Itagüí.....	75
Figura 36.	Series de contaminantes a analizar en el municipio de La Estrella.....	76
Figura 37.	Series de contaminantes a analizar en el municipio de Medellín.....	77
Figura 38.	Series de contaminantes a analizar en el municipio de Sabaneta	77
Figura 39.	Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM ₁₀ y O ₃ del municipio de Barbosa.....	79
Figura 40.	Promedios anuales para las series de PM ₁₀ y O ₃ del municipio de Barbosa.....	80
Figura 41.	Promedios mensuales para cada año en las series de PM ₁₀ y O ₃ del municipio de Barbosa.....	80
Figura 42.	Promedios día de la semana para cada año en las series de PM ₁₀ y O ₃ del municipio de Barbosa .	81
Figura 43.	Excedencias de la norma para el contaminante PM ₁₀ , municipio de Barbosa, en el periodo 2008-2016	81
Figura 44.	Excedencias de la norma para el contaminante O ₃ , municipio de Barbosa, en el periodo 2008-2016.	82
Figura 45.	Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ y NO ₂ del municipio de Bello.....	84
Figura 46.	Promedios anuales para las series de PM ₁₀ y O ₃ del municipio de Bello.....	85
Figura 47.	Promedios mensuales para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃ del municipio de Bello	85





Figura 48.	Promedios día de la semana para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃ del municipio de Bello.....	86
Figura 49.	Excedencias de la norma para el contaminante PM ₁₀ , municipio de Bello, en el periodo 2008-2016.....	87
Figura 50.	Excedencias de la norma para el contaminante O ₃ , municipio de Bello, en el periodo 2008-2016..	87
Figura 51.	Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃ del municipio de Caldas.....	89
Figura 52.	Promedios anuales para las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃ del municipio de Caldas.....	89
Figura 53.	Promedios mensuales para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃ del municipio de Caldas....	90
Figura 54.	Promedios día de la semana para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃ del municipio de Caldas.....	91
Figura 55.	Excedencias de la norma para el contaminante PM ₁₀ , municipio de Caldas, en el periodo 2008-2016.....	92
Figura 56.	Excedencias de la norma para el contaminante PM _{2.5} , municipio de Caldas, en el periodo 2008-2016.....	92
Figura 57.	Excedencias de la norma para el contaminante O ₃ , municipio de Caldas, en el periodo 2008-2016.....	93
Figura 58.	Diagrama de cajas y bigotes para la serie de PM ₁₀ del municipio de Copacabana.....	94
Figura 59.	Promedios anuales para la serie de PM ₁₀ del municipio de Copacabana.....	95
Figura 60.	Promedios mensuales para cada año en la serie de PM ₁₀ del municipio de Copacabana.....	96
Figura 61.	Promedios día de la semana para cada año en la serie de PM ₁₀ del municipio de Copacabana.....	96
Figura 62.	Excedencias de la norma para el contaminante PM ₁₀ , municipio de Copacabana, en el periodo 2008-2016.....	97
Figura 63.	Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ y NO ₂ del municipio de Envigado..	99
Figura 64.	Promedios anuales para las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃ del municipio de Envigado.....	99
Figura 65.	Promedios mensuales para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃ del municipio de Envigado.....	100
Figura 66.	Promedios día de la semana para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃ del municipio de Envigado.....	100
Figura 67.	Excedencias de la norma para el contaminante PM ₁₀ , municipio de Envigado, en el periodo 2008-2016.....	101
Figura 68.	Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ y NO ₂ del municipio de Girardota	103
Figura 69.	Promedios anuales para las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃ del municipio de Girardota.....	104
Figura 70.	Promedios mensuales para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃ del municipio de Girardota.....	104
Figura 71.	Promedios día de la semana para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃ del municipio de Girardota.....	105





Figura 72.	Excedencias de la norma para el contaminante PM ₁₀ , municipio de Girardota, en el periodo 2008-2016.....	105
Figura 73.	Excedencias de la norma para el contaminante PM _{2,5} , municipio de Girardota, en el periodo 2008-2016.....	106
Figura 74.	Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM ₁₀ , PM _{2,5} , O ₃ y NO ₂ del municipio de Itagüí.....	108
Figura 75.	Promedios anuales para las series de PM ₁₀ , PM _{2,5} y O ₃ del municipio de Itagüí.....	109
Figura 76.	Promedios mensuales para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2,5} y O ₃ del municipio de Itagüí....	109
Figura 77.	Promedios día de la semana para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2,5} y O ₃ del municipio de Itagüí.....	110
Figura 78.	Excedencias de la norma para el contaminante PM ₁₀ , municipio de Itagüí, en el periodo 2008-2016.....	111
Figura 79.	Excedencias de la norma para el contaminante PM _{2,5} , municipio de Itagüí, en el periodo 2008-2016.....	111
Figura 80.	Excedencias de la norma para el contaminante O ₃ , municipio de Itagüí, en el periodo 2008-2016.....	112
Figura 81.	Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM ₁₀ , PM _{2,5} , O ₃ y NO ₂ del municipio de La Estrella.....	113
Figura 82.	Promedios anuales para las series de PM ₁₀ , PM _{2,5} y O ₃ del municipio de La Estrella.....	114
Figura 83.	Promedios mensuales para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2,5} y O ₃ del municipio de La Estrella.....	115
Figura 84.	Promedios día de la semana para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2,5} y O ₃ del municipio de La Estrella.....	115
Figura 85.	Excedencias de la norma para el contaminante PM ₁₀ , municipio de La Estrella, en el periodo 2008-2016.....	116
Figura 86.	Excedencias de la norma para el contaminante PM _{2,5} , municipio de La Estrella, en el periodo 2008-2016.....	117
Figura 87.	Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM ₁₀ , PM _{2,5} , O ₃ y NO ₂ del municipio de Medellín	118
Figura 88.	Promedios anuales para las series de PM ₁₀ , PM _{2,5} y O ₃ del municipio de Medellín.....	119
Figura 89.	Promedios mensuales para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2,5} y O ₃ del municipio de Medellín.....	120
Figura 90.	Promedios día de la semana para cada año en las series de PM ₁₀ , PM _{2,5} y O ₃ del municipio de Medellín.....	120
Figura 91.	Excedencias de la norma para el contaminante PM ₁₀ , municipio de Medellín, en el periodo 2008-2016.....	121
Figura 92.	Excedencias de la norma para el contaminante PM _{2,5} , municipio de Medellín, en el periodo 2008-2016.....	122
Figura 93.	Excedencias de la norma para el contaminante O ₃ , municipio de Medellín, en el periodo 2008-2016.....	122





Figura 94.	Diagrama de cajas y bigotes para la serie de PM ₁₀ del municipio de Sabaneta.....	123
Figura 95.	Promedios anuales para la serie de PM ₁₀ del municipio de Sabaneta.....	124
Figura 96.	Promedios mensuales para cada año en la serie de PM ₁₀ del municipio de Sabaneta.....	125
Figura 97.	Promedios día de la semana para cada año en la serie de PM ₁₀ del municipio de Sabaneta.....	125
Figura 98.	Excedencias de la norma para el contaminante PM ₁₀ , municipio de Sabaneta, en el periodo 2008-2016.....	126
Figura 99.	Modelo de tendencia exponencial ajustado para la serie diaria de PM ₁₀ del municipio de Barbosa.....	127
Figura 100.	Estacionalidad de la serie de PM ₁₀ del municipio de Barbosa.....	129
Figura 101.	Estacionalidad de la serie de O ₃ del municipio de Barbosa.....	129
Figura 102.	Modelo de tendencia cuadrático ajustado para la serie diaria de PM ₁₀ del municipio de Bello.....	131
Figura 103.	Modelo de tendencia lineal ajustado para la serie diaria de O ₃ del municipio de Bello.....	131
Figura 104.	Modelo de tendencia cúbico ajustado para la serie diaria de NO ₂ del municipio de Bello.....	133
Figura 105.	Modelo de tendencia logarítmico ajustado para la serie diaria de NOX del municipio de Bello.....	133
Figura 106.	Estacionalidad de la serie de PM ₁₀ del municipio de Bello.....	135
Figura 107.	Estacionalidad de la serie de O ₃ del municipio de Bello.....	135
Figura 108.	Estacionalidad de la serie de NO ₂ del municipio de Bello.....	136
Figura 109.	Estacionalidad de la serie de NO del municipio de Bello.....	136
Figura 110.	Estacionalidad de la serie de NOX del municipio de Bello.....	137
Figura 111.	Modelo de tendencia cuadrático ajustado para la serie diaria de PM ₁₀ del municipio de Caldas.....	139
Figura 112.	Modelo de tendencia lineal ajustado para la serie diaria de PM _{2,5} del municipio de Caldas.....	139
Figura 113.	Estacionalidad de la serie de PM ₁₀ del municipio de Caldas.....	141
Figura 114.	Estacionalidad de la serie de O ₃ del municipio de Caldas.....	141
Figura 115.	Estacionalidad de la serie de PM _{2,5} del municipio de Caldas.....	142
Figura 116.	Modelo de tendencia logarítmico ajustado para la serie diaria de PM ₁₀ del municipio de Copacabana.....	143
Figura 117.	Estacionalidad de la serie de PM ₁₀ del municipio de Copacabana.....	145
Figura 118.	Modelo de tendencia cúbico ajustado para la serie diaria de PM ₁₀ del municipio de Envigado.....	146
Figura 119.	Modelo de tendencia lineal ajustado para la serie diaria de NOX del municipio de Envigado.....	147
Figura 120.	Estacionalidad de la serie de PM ₁₀ del municipio de Envigado.....	149
Figura 121.	Estacionalidad de la serie de O ₃ del municipio de Envigado.....	150
Figura 122.	Estacionalidad de la serie de NO del municipio de Envigado.....	150
Figura 123.	Estacionalidad de la serie de NOX del municipio de Envigado.....	151





Figura 124.	Estacionalidad de la serie de $PM_{2.5}$ del municipio de Envigado	151
Figura 125.	Estacionalidad de la serie de NO_2 del municipio de Envigado	152
Figura 126.	Estacionalidad de la serie de PM_{10} del municipio de Girardota.....	156
Figura 127.	Estacionalidad de la serie de $PM_{2.5}$ del municipio de Girardota.....	156
Figura 128.	Estacionalidad de la serie de O_3 del municipio de Girardota	157
Figura 129.	Estacionalidad de la serie de NO del municipio de Girardota.....	157
Figura 130.	Estacionalidad de la serie de NO_2 del municipio de Girardota.....	158
Figura 131.	Estacionalidad de la serie de NOX del municipio de Girardota.....	158
Figura 132.	Modelo de tendencia logarítmico ajustado para la serie diaria de PM_{10} del municipio de Itagüí..	160
Figura 133.	Modelo de tendencia lineal ajustado para la serie diaria de NO_2 del municipio de Itagüí.....	160
Figura 134.	Modelo de tendencia cúbico ajustado para la serie diaria de $PM_{2.5}$ del municipio de Itagüí.....	161
Figura 135.	Estacionalidad de la serie de PM_{10} del municipio de Itagüí.....	164
Figura 136.	Estacionalidad de la serie de $PM_{2.5}$ del municipio de Itagüí	164
Figura 137.	Estacionalidad de la serie de O_3 del municipio de Itagüí.....	165
Figura 138.	Estacionalidad de la serie de NO del municipio de Itagüí.....	165
Figura 139.	Estacionalidad de la serie de NO_2 del municipio de Itagüí.....	166
Figura 140.	Estacionalidad de la serie de NOX del municipio de Itagüí	166
Figura 141.	Modelo de tendencia logarítmico ajustado para la serie diaria de NO_2 del municipio de La Estrella.....	168
Figura 142.	Modelo de tendencia cuadrático ajustado para la serie diaria de PM_{10} del municipio de La Estrella.....	168
Figura 143.	Estacionalidad de la serie de PM_{10} del municipio de La Estrella.....	171
Figura 144.	Estacionalidad de la serie de $PM_{2.5}$ del municipio de La Estrella.....	171
Figura 145.	Estacionalidad de la serie de NO del municipio de La Estrella.....	172
Figura 146.	Estacionalidad de la serie de NO_2 del municipio de La Estrella.....	172
Figura 147.	Estacionalidad de la serie de NOX del municipio de La Estrella.....	173
Figura 148.	Modelo de tendencia cuadrático ajustado para la serie diaria de PM_{10} del municipio de Medellín.....	174
Figura 149.	Modelo de tendencia cúbico ajustado para la serie diaria de $PM_{2.5}$ del municipio de Medellín.....	175
Figura 150.	Modelo de tendencia cúbico ajustado para la serie diaria de O_3 del municipio de Medellín	175
Figura 151.	Modelo de tendencia cúbico ajustado para la serie diaria de NO_2 del municipio de Medellín.....	176
Figura 152.	Estacionalidad de la serie de PM_{10} del municipio de Medellín.....	178
Figura 153.	Estacionalidad de la serie de $PM_{2.5}$ del municipio de Medellín	178





Figura 154.	Estacionalidad de la serie de O_3 del municipio de Medellín.....	179
Figura 155.	Estacionalidad de la serie de NO del municipio de Medellín.....	179
Figura 156.	Estacionalidad de la serie de NO_2 del municipio de Medellín.....	180
Figura 157.	Estacionalidad de la serie de NOX del municipio de Medellín.....	180
Figura 158.	Modelo de tendencia cuadrático ajustado para la serie diaria de PM_{10} del municipio de Sabaneta.....	182
Figura 159.	Estacionalidad de la serie de PM_{10} del municipio de Sabaneta.....	183
Figura 160.	Autocorrelograma simple de los residuales del modelo ARIMA(0,1,1) para la serie de O_3 del municipio de La Estrella.....	185





Lista de Tablas

Tabla 1.	Clasificación de estaciones de monitoreo de acuerdo al tipo de zona, para el Valle de Aburrá.	21
Tabla 2.	Clasificación de estaciones de monitoreo de acuerdo al tipo de fuentes predominantes, para el Valle de Aburrá.	21
Tabla 3.	Estaciones de monitoreo y contaminantes medidos, ubicadas en los municipios del Valle de Aburrá entre los años 2008- 2016.	22
Tabla 4.	Clasificación y datos no disponibles de las estaciones fijas de monitoreo de la Red de Calidad de Aire en el Valle de Aburrá, Junio de 2017.	25
Tabla 5.	Número de series de tiempo disponibles para cada contaminante evaluado y número de series con valores no disponibles superiores al 10% y 25% de los datos disponibles.	26
Tabla 6.	Ventajas e inconvenientes generales de algunos métodos de imputación	28
Tabla 7.	Métodos propuestos para la imputación de los valores no disponibles en las series de contaminantes.	34
Tabla 8.	Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio, Resolución 610 de 2010.	39
Tabla 9.	Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, ozono, dióxido de nitrógeno y dióxidos de azufre	40
Tabla 10.	Estaciones con periodos de medición entre 2008 y 2016, para el Valle de Aburrá.	48
Tabla 11.	Series de PM ₁₀ y PM _{2.5} imputadas por medio del algoritmo EM (imputación múltiple)	50
Tabla 12.	Estaciones con series tratadas con imputación múltiple con sus respectivas variables predictoras	52
Tabla 13.	Estadísticos descriptivos de la serie de PM _{2.5} en la estación CAL-LASA, en el municipio de Caldas.	54
Tabla 14.	Series de PM ₁₀ y PM _{2.5} imputadas por medio de la metodología planteada por Plaia & Blondi (2006).	57
Tabla 15.	Medida de Entropía para medir la Correlación Cruzada de PM ₁₀ Medellín, mes a mes, entre las Estaciones con información disponible.	63
Tabla 16.	Medida de Entropía para medir la Correlación Cruzada de PM _{2.5} Medellín, mes a mes, entre las Estaciones con información disponible.	64
Tabla 17.	Medida de Entropía para medir la Correlación Cruzada de O ₃ Medellín, mes a mes, entre las Estaciones con información disponible.	65
Tabla 18.	Listado de series utilizadas para la construcción de series ensambladas	67
Tabla 19.	Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Barbosa.	78
Tabla 20.	Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Bello	83
Tabla 21.	Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Caldas.	88
Tabla 22.	Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Copacabana	94
Tabla 23.	Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Envigado.	98
Tabla 24.	Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Girardota	102





Tabla 25.	Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Itagüí	107
Tabla 26.	Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de La Estrella	113
Tabla 27.	Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Medellín.....	118
Tabla 28.	Estadísticos descriptivos de las serie de contaminantes del municipio de Sabaneta	123
Tabla 29.	Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Barbosa.....	127
Tabla 30.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, en PM ₁₀ y O ₃ del municipio de Barbosa.....	128
Tabla 31.	Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Barbosa.....	130
Tabla 32.	Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Bello	130
Tabla 33.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, en PM ₁₀ y O ₃ del municipio de Bello.....	132
Tabla 34.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, en NO ₂ y NO _x del municipio de Bello.....	134
Tabla 35.	Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Bello	137
Tabla 36.	Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Caldas.....	138
Tabla 37.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, en PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃ del municipio de Caldas.....	140
Tabla 38.	Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Caldas.....	142
Tabla 39.	Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Caldas.....	143
Tabla 40.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada a PM ₁₀ para cada año, del municipio de Copacabana	144
Tabla 41.	Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Copacabana	145
Tabla 42.	Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Envigado....	146
Tabla 43.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para los contaminantes del municipio de Envigado.....	147
Tabla 44.	Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Envigado.....	152
Tabla 45.	Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Girardota ...	153
Tabla 46.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para PM ₁₀ del municipio de Girardota.....	154
Tabla 47.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para PM _{2.5} , O ₃ , NO, NO ₂ y NO _x del municipio de Girardota	155





Tabla 48.	Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Girardota	159
Tabla 49.	Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Itagüí.....	159
Tabla 50.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para PM ₁₀ y PM _{2,5} del municipio de Itagüí	162
Tabla 51.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para O ₃ , NO, NO ₂ y NO _x del municipio de Itagüí.....	163
Tabla 52.	Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Itagüí.....	167
Tabla 53.	Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de La Estrella ..	167
Tabla 54.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para PM ₁₀ del municipio de La Estrella.....	169
Tabla 55.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para PM _{2,5} , O ₃ , NO, NO ₂ y NO _x del municipio de La Estrella.....	170
Tabla 56.	Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de La Estrella	173
Tabla 57.	Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Medellín.....	174
Tabla 58.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para los contaminantes de municipio de Medellín.....	177
Tabla 59.	Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Medellín.....	181
Tabla 60.	Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Sabaneta....	181
Tabla 61.	Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para PM ₁₀ del municipio de Sabaneta.....	182
Tabla 62.	Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Sabaneta.....	184
Tabla 63.	Modelo ARIMA para O ₃ de los municipios Itagüí y La Estrella, y resultados del análisis de residuales	184





1 INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha considerado la contaminación atmosférica como una de las más apremiantes prioridades para la sociedad, producto de los procesos de industrialización, la urbanización acelerada y no planificada y el incremento del uso de vehículos automotores (1). La contaminación en los territorios urbanos se caracteriza por la presencia de partículas, monóxido de carbono, oxidantes fotoquímicos, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre (2).

De acuerdo al estudio “Evaluación de los Efectos de la Contaminación del Aire en la Salud de América Latina y el Caribe” desarrollado por Organización Panamericana de la Salud y la OMS; la contaminación del aire se ha convertido en una de las principales preocupaciones de salud pública para muchas ciudades de América Latina y el Caribe, donde la exposición a los diferentes tipos de contaminantes del aire se ha relacionado con un aumento de riesgo de mortalidad y morbilidad, por enfermedades respiratorias y cardiovasculares (3).

En Colombia, la contaminación del aire es causada principalmente por el uso de combustibles fósiles, por fuentes móviles, fijas o aéreas. De acuerdo a una investigación realizada en 2013 por University College London y la Universidad de los Andes, el 41% del total de las emisiones del país eran generadas en las 3 principales ciudades (Bogotá, Medellín y Cali), y estaban compuestas por material particulado menor a 10 micras (PM_{10}), óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO), partículas suspendidas totales (PST) y óxidos de azufre (SO_x). Este estudio reveló que, en cuanto a las fuentes de emisión, el 86% de esta contaminación era debido a la puesta en marcha del parque automotor, 8% era producida por el sector industrial, 3% por termoeléctricas, 2% por los sectores residencial y comercial, y 1% por el transporte aéreo (4).

Los habitantes de los municipios que conforman la región del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), han sufrido permanentemente los impactos en la salud asociados a la mala calidad del aire. La rápida urbanización del territorio y la conurbación, la industrialización poco planificada y el crecimiento del parque automotor en casi un 300% durante la última década; todo esto sumado a la topografía estrecha del Valle y el cambio climático han contribuido al deterioro del aire urbano que se evidencia en el aumento de la frecuencia, intensidad y duración de los picos semestrales de contaminación.

En 1993, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá junto con la Universidad de Antioquia, la Universidad Pontificia Bolivariana y el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid elaboraron el primer Programa de Protección y Control de la Calidad del Aire, el cual tenía como objetivos de desarrollo el “Conocer”, “Proponer” y “Actuar” para la mejora del calidad del aire de los municipios que conforman el AMVA. Este programa se convirtió en la carta de navegación que ha direccionado la gestión del recurso aire y en el que se basó la red de monitoreo de la calidad del aire que actualmente es operada por el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá- SIATA (Red Aire). Aunque la lógica que ha direccionado la red es el monitoreo ambiental. Esta información contribuye a la comprensión de las dinámicas en el territorio y para





el proyecto: Contaminación atmosférica y sus efectos sobre la salud de los habitantes del Valle de Aburrá 2008-2016 (Contrato No. CCT 1088 de 2016), que actualmente realiza la Facultad Nacional de Salud Pública con el auspicio del AMVA, es un insumo fundamental para comprender epidemiológicamente la relación entre algunos contaminantes críticos y eventos centinela de salud para permitir la oportuna toma de decisiones en salud pública.

Este documento presenta y organiza los hallazgos encontrados del análisis del comportamiento de las concentraciones de PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 y NO_x , basado en los datos históricos recopilados por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire del Valle de Aburrá entre 2008 y 2016 en los 10 municipios que conforman el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, permitiendo evidenciar la complejidad que implica la investigación de la calidad del aire a la hora de indagar su relación con la salud.





2 OBJETIVO

El presente informe tiene por objetivo analizar la tendencia de la contaminación del Valle de Aburrá, contribuyendo a caracterizar el comportamiento de la contaminación atmosférica, según variables de lugar y tiempo, teniendo en cuenta indicadores trazadores y condicionantes meteorológicos como temperatura, humedad y pluviosidad.

Información General

Título del proyecto	Contaminación atmosférica y sus efectos sobre la salud de los habitantes del Valle de Aburrá 2008-2016
Componente	Revisión documental y mapeo de redes de conocimiento
Objetivo	Recopilar las investigaciones relacionadas con los efectos sobre la salud de la contaminación atmosférica e identificar las redes y grupos de investigación con experiencia en el estudio de esta relación en los ámbitos internacional, nacional y territorial.
Tipo de informe:	Parcial Final <u> </u> x <u> </u>
Número de contrato	CCT 1088 de 2016
Dependencia	Subdirección Ambiental
Coordinador	Juan Gabriel Piñeros Jiménez
Entidad ejecutora	Universidad de Antioquia, Facultad Nacional de Salud Pública
Grupos de Investigación (Código COLCIENCIAS)	Salud y Ambiente (COL0016049 Categoría A de Colciencias) Demografía y Salud (COL0003249 Categoría A1 de Colciencias) Salud y Sociedad (COL0027456 Categoría A de Colciencias)
Fecha de inicio del proyecto	20-12-2016
Fecha de entrega del informe	25-09-2017





3 METODOLOGÍA

Para caracterizar el comportamiento de la contaminación atmosférica en Medellín y su área metropolitana, se hace necesario presentar previamente la metodología empleada para dar respuesta a dicho objetivo, por tal razón, en el presente apartado se especificarán elementos del orden teórico sobre las fuentes de información (estaciones de monitoreo REDAIRE), recolección y análisis de calidad de los datos, métodos utilizados para imputación y la exploración de las series.

3.1 ESTACIONES DE MONITOREO- REDAIRE

Como estrategia para el seguimiento y monitoreo de la calidad del aire en el Valle de Aburrá, desde el año 1993 se encuentra operando la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire (REDAIRE). La red de monitoreo, está dirigida a realizar el seguimiento de las concentraciones de contaminantes en puntos representativos de los diferentes entornos que conforman el Área Metropolitana, información que es analizada conjuntamente con los fenómenos de dispersión, transporte de contaminantes y la distribución de emisiones (5). Se cuenta con estaciones automáticas y semiautomáticas a lo largo del Valle de Aburrá, las primeras reportan las mediciones cada hora, las otras requieren que el equipo de monitoreo de calidad del aire recoja las muestras y estas sean llevadas a laboratorios certificados para el análisis de datos. Se monitorea indistintamente los contaminantes criterio definidos por la Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (6).

Las estaciones de monitoreo de acuerdo a su representatividad temporal fijas y/o móviles¹, se ubican en los 10 municipios que conforman el Área Metropolitana (Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Envigado, Itagüí, La Estrella, Sabaneta y Caldas), las cuales miden uno o varios de los siguientes contaminantes: PST, PM₁₀, PM_{1.0}, PM_{2.5}, O₃, SO₂, NO, NO₂, NOX, CO, de manera automática y semiautomática. Y son clasificadas según la zona donde se encuentran ubicadas

¹Estación fija: Que pertenece un periodo de tiempo superior a un año en un punto fijo.

Estación móvil o indicativa: Permanece en un punto en periodos de tiempo inferiores a un año.





Tabla 1) y el tipo de fuentes emisoras predominantes en su área de influencia (.

Tabla 2), permitiendo entonces, hacer una mayor identificación de las estaciones, su representatividad en la producción de información y la relación con la exposición de la población.





Tabla 1. Clasificación de estaciones de monitoreo de acuerdo al tipo de zona, para el Valle de Aburrá.

Tipo de zona	Descripción
Urbana	Área totalmente urbanizada. Un área edificada no estará mezclada con áreas no urbanizadas, con la excepción de los parques urbanos.
Suburbana	Área en gran parte urbana edificada, pero las áreas edificadas estarán mezcladas con áreas no urbanizadas.
Rural	Se define como áreas rurales todas aquellas que no satisfacen los criterios para áreas urbanas y suburbanas.

Fuente: Informe técnico Clasificación estaciones de monitoreo de Calidad del Aire. Mayo 2014.

Tabla 2. Clasificación de estaciones de monitoreo de acuerdo al tipo de fuentes predominantes, para el Valle de Aburrá.

Tipo de zona	Descripción
De tráfico	Estaciones ubicadas de manera que el nivel de contaminante medido está determinado principalmente por emisiones del tráfico cercano.
Punto crítico	Estaciones ubicadas a nivel de suelo de apoyo a estudios epidemiológicos.
Industrial	Estaciones ubicadas de manera que el nivel de contaminación medido esté influenciado significativamente por las emisiones cercanas de fuentes industriales.
Entorno de fondo	Estaciones ubicadas de manera que el nivel de contaminante medido no está significativamente influenciado por fuente o calle alguna, pero si por la contribución de las fuentes que influyen en estas estaciones debido al régimen de vientos. También serán consideradas de fondo, estaciones que se encuentran vientos arriba de la fuente evaluada.

Fuente: Informe técnico Clasificación estaciones de monitoreo de Calidad del Aire. Mayo 2014

Se hizo la búsqueda y compilación de las estaciones de monitoreo que funcionaron durante ese período entre 2008 y 2016, tomando como fuente de información las bases de datos del AMVA y el micrositio de Calidad del Aire de la página web de esta entidad². En la Tabla 3, se muestran las estaciones por municipios y los contaminantes medidos, que funcionaron entre el 1° de enero de 2008 y el 31 de diciembre de 2016. En total se obtuvo información de las 46 estaciones fijas y/o móviles, estuvieron en funcionamiento. Sin embargo, para el análisis del comportamiento de la concentración de los contaminantes se utilizó todas las mediciones reportadas por las diferentes estaciones fijas.

²<http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/Paginas/gestioncalidadaire.aspx>





Tabla 3. Estaciones de monitoreo y contaminantes medidos, ubicadas en los municipios del Valle de Aburra entre los años 2008- 2016.

M/pio	Identificación de la Estación	Nombre Completo	CITE Medidos	Georeferenciación		Altura desde el piso
				Norte (°)	Oeste (°)	
Estaciones Fijas						
Barbosa	Bar-Hsvp	Hospital San Vicente De Paúl	Pst, PM ₁₀ **	6.436277	-75.333056	9.05
	BAR-PAGU	Parque De Las Aguas	O ₃	6.406714	-75.419487	3.00
Girardota	Gir-leco	Institución Educativa Colombia	Pst, PM ₁₀ *	6.378411	-75.451019	15.18
	GIR-SOSN	Sos-Girardota	PM _{2.5} *, SO ₂ , NO _X , NO ₂ , NO, O ₃	6.378426	-75.443957	5.20
Copacabana	Cop-Hsma	Hospital Santa Margarita	PM ₁₀ **	6.349830	-75.504854	5.52
BELLO	BEL-SEPM	Sub-Estación De Energía De Bello Epm	PM ₁₀ *	6.338668	-75.537812	3.00
	BEL-USBV	Universidad De San Buenaventura	PM ₁₀ *, NO _X , NO ₂ , NO	6.330714	-75.568639	5.20
	BEL-SESB	Secretaria De Salud De Bello	PM _{2.5} **	6.330800	-75.556710	0.00
	MED-UDEA	Universidad De Antioquia	PM ₁₀ **	6.270354	-75.569914	14.00
	MED-UCES	Poblado Universidad Ces	PM _{2.5} *, O ₃	6.208142	-75.553546	0.00
	MED-POBL	Poblado Une -Loma De Los Balsos	O ₃ , CO	6.18597	-75.556676	0.00
	MED-LAYE	Tanques De La Y	O ₃	6.182542	-75.550636	-
	MED-JABO	Jardín Botánico	NO ₂ , O ₃	6.272529	-75.564219	-
	MED-UPB	Universidad Pontificia Bolivariana	PM ₁₀ *	6.243321	-75.591445	-
	MED-MANT	Museo De Antioquia	PM ₁₀ *, PM _{2.5} *, SO ₂ , NO _X , NO ₂ , NO, O ₃ , CO	6.252561	-75.56958	4.00
MEDELLÍN	MED-EXSA	Exito De San Antonio	PM ₁₀ *	6.249333	-75.570251	25.00
	MED-UNNV	Universidad Nacional Núcleo El Volador	NO _X , NO ₂ , NO, O ₃	6.263395	-75.576991	4.83
	MED-UNFM	Universidad De Nacional Facultad De Minas	PM ₁₀ **, PM ₁₀ *, PM _{2.5} **, SO ₂ , NO _X , NO ₂ , NO, CO	6.274003	-75.592575	3.00
	MED-AGUI	Edificio Aguinaga	PM ₁₀ **	6.253142	-75.568776	-
	MED-CORA	Corantioquia La 65		6.249578	-75.582683	-
	MED-MIRA	Tanques De Miraflores	PM ₁₀ **, O ₃	6.253273	-75.555446	-
MED-VIHE	Villa Hermosa	PM ₁₀ **, O ₃	6.229972	-75.549194	0.00	





M/pio	Identificación de la Estación	Nombre Completo	CITE Medidos	Georeferenciación		Altura desde el piso
	MED-PJIC	Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid	PM ₁₀ **, PM ₁₀ *, PM _{2.5} *, PM _{2.5} **, PM1.0, NOX, NO ₂ , NO, CO	6.208911	-75.577772	6.56
	MED-UDEM	Universidad De Medellín	PM ₁₀ **, O ₃	6.230184	-75.609962	-
	Ita-Ptar	Planta De Tratamiento De Aguas Residuales	PM ₁₀ **, O ₃	6.190899	-75.587858	10.78
Itagüí	ITA-CONC	Concejo De Itagui	PM ₁₀ *, PM _{2.5} *, CO, O ₃	6.168497	-75.644356	3.00
	ITA-CJUS	Casa De Justicia	PM _{2.5} *, NOX, NO ₂ , NO	6.185667	-75.597206	-
	ITA-DITA	Ditaires	PM ₁₀ **, PM ₁₀ *, O ₃	6.169443	-75.62788	-
	ITA-CRSV	Colegio Del Rosario	PST, PM ₁₀ **, PM ₁₀ *, CO	6.171592	-75.606889	14.02
Sabaneta	Sab-Cam	Alcaldía Municipal De Sabaneta	PM ₁₀ **	6.150749	-75.616274	18.80
ESTRELLA	EST-CAM	Alcaldía Municipal De La Estrella	PM ₁₀ **	6.157947	-75.641600	-
	EST-MAGO	Colegio Maria Goretti	PM ₁₀ **	6.152191	-75.635906	7.44
Caldas	Cal-Lasa	Corporación Universitaria Lasallista	PM _{2.5} *, O ₃	6.099081	-75.638626	3.00
Caldas	Cal-Pmer	Plaza De Mercado	PM ₁₀ **, PM ₁₀ *	6.099081	-75.638626	3.00
Envigado	Env-Fund	Fundadores	PM _{2.5} *, SO ₂ , NOX, NO ₂ , No, O ₃			
	ENV-UENV	Universidad De Envigado	PM ₁₀ *, PM _{2.5} *, SO ₂ , NOX, NO ₂ , NO, O ₃			
Estaciones Móviles						
Girardota	Gir-Inder	Unidad Móvilinder	PM _{2.5} *, SO ₂ , NOX, NO ₂ , No, O ₃			
La Estrella	Mov-Est-Metr	Estación Móvil- Estación Metro La Estrella	PM _{2.5} *, SO ₂ , NO ₂ , No, O ₃ , Co	6.152313	-75.627487	2.50
	Movil	Móvil	SO ₂ , NO ₂			
Medellín	MOV-BEL	Estación Móvil Belen	PM ₁₀ *, NO ₂ , O ₃			
	MOV-SMA	Estación Móvil Plaza Mayor	PM ₁₀ *, PM _{2.5} *, NOX, NO ₂ , NO, O ₃			
	MOV-COLR	Estación Móvil Los Colores	PM ₁₀ *, PM _{2.5} *, NO ₂ , O ₃			
	MOVIL-UPB	Estación Móvil Amva 60 Min -Upb	PM _{2.5} *, SO ₂ , NO ₂ , , NO, O ₃			
	MOV-CENTROMED	Estación Móvil Centro De Medellín	PM ₁₀ *			
Sabaneta	Mov-Sab	Estación Móvil Sabaneta	PM ₁₀ *, O ₃			
Sabaneta	Movil-Inde	Estación Móvil Sabaneta Indesa	PM _{2.5} *, SO ₂ , NO ₂ , No, O ₃			





Para el caso de la estación de tráfico MOV-EST-METR, ubicada en el municipio de La Estrella, se evaluó la pertinencia de la inclusión de estos datos, dado que esta estación reporta niveles sesgado de los contaminantes debido a su cercanía a fuentes de emisión móviles y fijas. Un análisis visual mostró que a pesar de ser una estación de tráfico las concentraciones reportadas también se vieron influidas por las variaciones en las condiciones meteorológicas que experimenta el Valle de Aburrá, y a pesar de que los valores reportados por ésta fueron superiores a los esperados, se conservó el comportamiento estacional de la serie. Por esta razón se decidió incluir esta serie de datos en el análisis del comportamiento de los contaminantes. En la **Figura 1** se puede observar la variabilidad de la estación MOV-EST-METR en comparación a la estación de fondo ITA-CONC. En el mapa (Figura 2) se ubican las estaciones seleccionadas para el estudio, en el Valle de Aburrá.

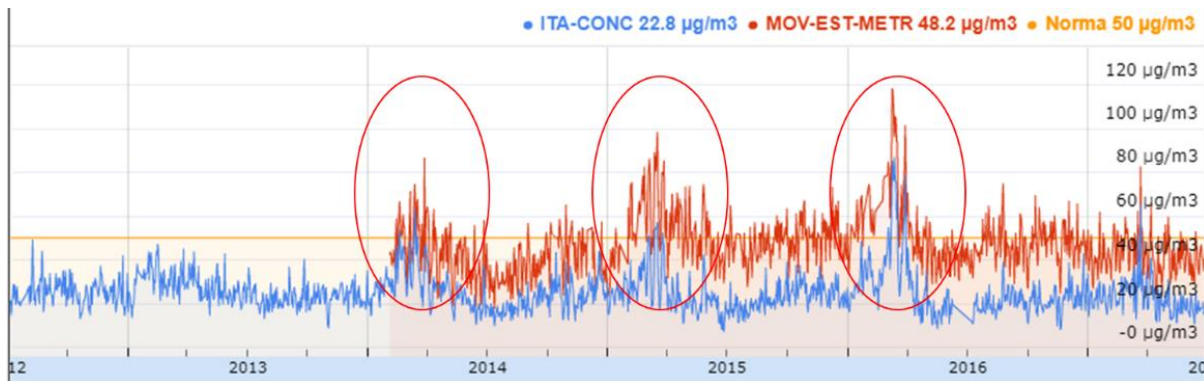


Figura 1. Series de PM_{2.5} para las estaciones ITA-CONC (línea azul) y MOV-EST-METR (línea roja)

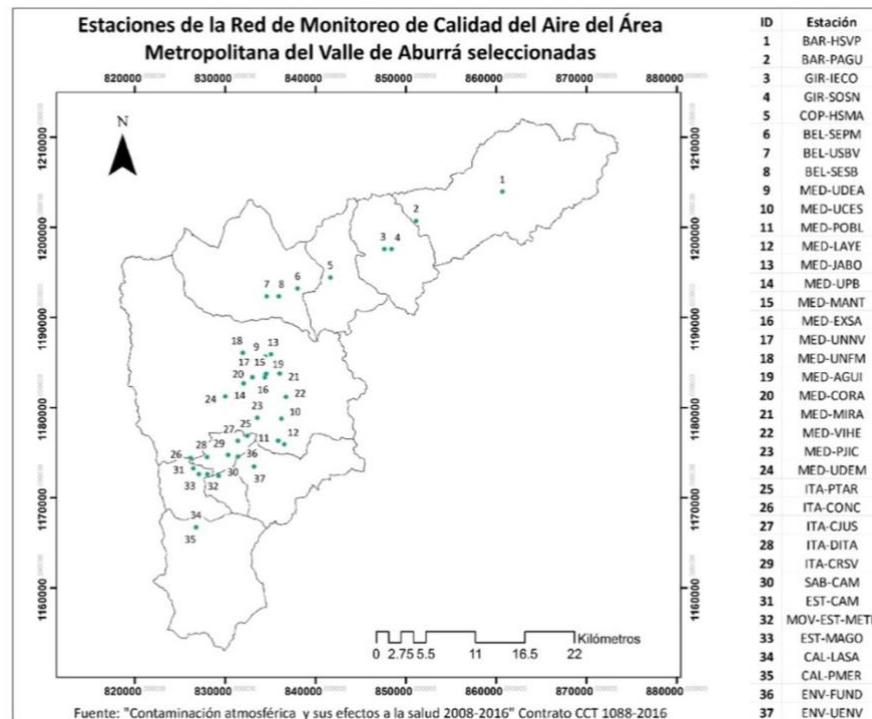


Figura 2. Estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire seleccionadas para el estudio.





3.2 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LOS DATOS

Los datos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá fueron descargados del Sistema de Información y Gestión para la Calidad del Aire en el Valle de Aburrá “**SCALAR**”, para todas las estaciones que operaron entre 2008 y 2016 de los 10 municipios de estudio. Se descargó la información de concentraciones para los contaminantes PST, PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, NO_x, NO, SO₂, O₃ y CO, empleando como unidad de medida ppb para NO₂, NO_x y NO, y $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los demás. Se descargaron datos cada 24 horas para los contaminantes PM₁₀, PM_{2.5} y SO₂; para los equipos automáticos, y datos horarios para los contaminantes NO₂, NO_x, NO, O₃ y CO; en el caso de los equipos semiautomáticos (PST, PM₁₀, PM_{2.5}) se descargaron datos con intervalos de 72 horas. Para el presente estudio, el análisis se centró en los contaminantes PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, NO, NO₂ y NO_x debido a que la información disponible en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá es limitada para los contaminantes PST, CO y SO₂.

En la **Tabla 5** se resume la consolidación de los datos registrados para los contaminantes estudiados para cada uno de los municipios del Valle de Aburrá, donde se determinaron los correspondientes periodos de observación. A partir de esta información se evidenció que la mayoría de las estaciones no disponían de datos de medición para todos los contaminantes durante el periodo 2008 a 2016, por lo cual se calculó el porcentaje de valores faltantes para cada estación fija, y se procedió a explorar las series y los datos no disponibles.

Tabla 4. Clasificación y datos no disponibles de las estaciones fijas de monitoreo de la Red de Calidad de Aire en el Valle de Aburrá, Junio de 2017.

Tabla 5. Clasificación y datos no disponibles de las estaciones fijas de monitoreo de la Red de Calidad de Aire en el Valle de Aburrá, Junio de 2017.

3.2.1 Exploración de las series y datos no disponibles

Previamente al expresar en qué consiste la exploración de las series, es importante definirla, por tanto, una serie de tiempo se define como una secuencia de observaciones de un fenómeno determinado, ordenadas temporalmente y adquiridas en igual intervalo de tiempo.

En este estudio el fenómeno a considerar son las concentraciones promedio diarias de contaminantes PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, NO, NO₂ y NO_x medidos en las estaciones fijas, entre el 1° de Enero de 2008 y el 31 de Diciembre de 2016, para los diferentes municipios del Valle de Aburrá.

En la Tabla 6 se muestra para cada contaminante el número de series disponibles y la cantidad cuyos valores perdidos no sobrepasan el 10% y 25% en el periodo de medición. Se realizó el cálculo de los valores no disponibles para cada una de las estaciones y variables ambientales, con el fin de valorar la cobertura de las series. El cálculo de dicho indicador consideró como numerador el número de datos no disponibles en la serie y como denominador el total de datos válidos para la misma serie, a cuatro años para las series con frecuencia diaria y superior a un año para las horarias. La condición en el tiempo se realizó con el fin de excluir las estaciones móviles del análisis, las cuales presentaron un rango de tiempo





de actividad inferior a un año, excluyendo la estación MOV-EST-METR (Estación Móvil - Metro La Estrella) que presentó un periodo de medición superior.

Tabla 6. Número de series de tiempo disponibles para cada contaminante evaluado y número de series con valores no disponibles superiores al 10% y 25% de los datos disponibles.

VARIABLE	NÚMERO DE SERIES	SERIES CON VALORES NO DISPONIBLES MENOR A 10%	SERIES CON VALORES NO DISPONIBLES MENOR A 25%
PM ₁₀	30	6	28
PM _{2.5}	19	10	9
O ₃	27	15	9
NO ₂	34	15	16
NOX	26	7	14
NO	26	7	14
Total	162	60	90

En la revisión de los datos de las series de tiempo disponibles para el análisis se observó que para todos los contaminantes evaluados, existía un gran número de series cuyos valores no disponibles excedían el 10%, lo que indicó la necesidad de implementar métodos de imputación para tratar dichos valores en las variables ambientales (7).

3.2.2 Interpolación de datos

Como se ha mencionado previamente, entre la información disponible en el estudio se encuentran series de contaminantes medidos en estaciones semiautomáticas, las cuales reportan registros cada tres (3) días. Para este estudio, se estableció la escala diaria como el paso temporal de interés en los análisis de contaminación atmosférica y salud, por esta razón, fue necesario aplicar un pre-tratamiento a la información ambiental cuya escala temporal fuera diferente a la diaria y de esta manera obtener una serie con el paso de tiempo elegido. El método utilizado para disminuir esta escala temporal, de tres a un día, fue la interpolación lineal.

El procedimiento de interpolación es necesario para la reconstrucción de datos faltantes en variables específicas. Existen diferentes métodos para interpolar datos, el más simple es la interpolación lineal; ésta se entiende con el siguiente esquema: conocemos los datos de (x₁, y₁) y de (x₂, y₂) y queremos conocer el valor desconocido de y cuando se proporciona la abscisa x₁ < x < x₂. Si suponemos que los puntos 1 y 2 están unidos por una recta, calculamos fácilmente el valor de y mediante la siguiente relación (8):

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1)$$





Para el presente estudio, se aplicó el restablecimiento de datos faltantes de las variables PM_{10} y $PM_{2.5}$ medidos en las estaciones semiautomáticas, con el fin de dar continuidad temporal a las series que se registraban cada tres días. Para tal fin, se evaluaron dos métodos de interpolación: el lineal y por Spline; ésta última presentó algunos inconvenientes debido a que para algunas secuencias de datos se presentaban cambios muy bruscos cuando se aplicaba dicha técnica, lo que generaba la presencia de valores extremos, ya fuesen picos o valores negativos. Por lo anterior sólo se aplicó la interpolación lineal, por medio de un algoritmo desarrollado en el software MATLAB R2017a.

3.2.3 Transformación de ozono

Inicialmente los datos obtenidos de ozono eran horarios, y para el estudio se decidió la escala temporal diaria para los análisis, por ende, se calculó un promedio móvil de 8 horas, teniendo en cuenta lo siguiente:

Primero se verificó que para el día se hayan registrado mínimo 17 datos de los 24 datos posibles. Posteriormente, se calcularon los promedios móviles octohorarios entre las 7 am y las 9 pm, para lo cual se requirió que al menos se tuvieran 6 de los 8 datos posibles, para sacar el promedio. Después de tener los promedios, se calculaba el máximo que corresponde al valor diario.

3.3 IMPUTACIÓN DE VALORES NO DISPONIBLES

3.3.1 Clasificación de los valores no disponibles

Un punto de vital importancia en el análisis de los valores no disponibles de una serie corresponde a los posibles patrones que dichos valores pueden seguir a lo largo del periodo de registro, ya que esto puede incidir en la selección del método de imputación a aplicar. Los valores faltantes se pueden clasificar en (7,9–12):

- MAR – Missing at random: Los datos pueden faltar al azar, es decir que la probabilidad de desaparecer puede depender de los valores de los datos que se observan, pero no de los que faltan.
- MCAR – Missing completely at random: Cuando la ausencia ocurre verdaderamente al azar.
- MNAR – Missing not at random: los valores perdidos no faltan al azar, es decir, la probabilidad de tener un valor perdido depende de los valores de la variable analizada.





3.3.2 Métodos de imputación aplicados a bases de datos de calidad del aire

La imputación es un proceso donde se requiere usar algún tipo de técnica o método estadístico para reemplazar los datos perdidos (no encontrados, nulos, no disponibles) con valores sustitutos. Este proceso no es sencillo dado que cada dato que se incluya no puede agregar sesgo sobre el conjunto de datos observado. Una de las soluciones propuesta en la literatura es eliminar las posiciones vacías, es decir, si el conjunto de datos es de 100 y hay 7 perdidos, eliminando las posiciones vacías se tienen un total de 63 datos completos; sin embargo, en series de tiempo no es posible realizar dicha eliminación dado que se considera que las observaciones deben ser secuenciales en igual intervalo de tiempo. Por lo anterior, existen diversos métodos tradicionales reportados en la literatura para la realización de imputaciones cuando la pérdida de datos es inferior al 25%, entre estos se destacan: hot-deck, cold-deck, sustitución de medias, regresión e imputación múltiple (13,14).

En el estudio realizado por Gómez-Carracedo, et al. , se comparan distintos métodos de imputación simple y múltiple para manejar valores perdidos complejos en bases de datos de calidad del aire con porcentajes desde 3.9% a 23.5% de datos faltantes. Los métodos comparados fueron: supresión por línea (Listwise), media incondicional (Unconditional mean), media modificada (Modified mean), análisis de componentes principales (Principal Component Based), maximización esperada (EM) (Regularized-EM), imputación múltiple (Multiple imputation), en donde se evidenció que la imputación múltiple busca una distribución estable basada en los datos observados e imputados (lo que no significa que los datos imputados sean estables) -contrariamente a los otros métodos de imputación en los que se pretende que los valores imputados sean estables(9).

Por otro lado, se ha evidenciado que los métodos Listwise y Modified Mean homogeneizan la varianza de los conjuntos de datos imputados (9), es decir que al agregar los datos faltantes se modifica esta medida en la serie de datos, resultado poco deseado en un proceso de imputación. En la Tabla 7 se observan las ventajas y desventajas de los métodos comarados en este estudio.

Tabla 7. Ventajas e inconvenientes generales de algunos métodos de imputación

MÉTODO DE IMPUTACIÓN	TIPO DE DATOS PERDIDOS	IDEA CONCEPTUAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Supresión por línea (Listwise)	MCAR MAR MCAR MAR	Imputación única	Simple de entender y aplicar	Disminución sustancial del tamaño de la muestra.
		Deja las muestras con registros incompletos	Rápido	Reduce la potencia estadística (debido al bajo valor de 'n').
			Cualquier tipo de análisis estadístico.	No usa toda la información.
			No requiere métodos computacionales especiales	Cuando los datos son MCAR hay una pérdida de potencia.
			Aplicado por defecto por muchos softwares estadísticos	Resultados sesgados cuando los datos no son MCAR.
			Estimaciones no sesgadas de parámetros bajo la suposición de MCAR	La correlación entre las variables puede verse afectada.





Media incondicional (Unconditional mean)	MCAR	Imputación única	Simple de entender y aplicar	La correlación entre las variables puede verse afectada.
		Los datos que faltan se sustituyen por la media incondicional	Rápido	Estadísticas e intervalos de confianza sesgados. Incertidumbre sistemática subestimada La distribución de probabilidad de la variable imputada puede verse afectada
Media modificada (Modified mean)	MCAR	Imputación única	Simple de entender y aplicar	La imputación única estima los parámetros pero no la variabilidad
		Los datos que faltan se sustituyen por la mediana modificada por una cantidad aleatoria.	Rápido No requiere suposiciones de normalidad.	
Análisis de componentes principales (Principal component based)	MCAR	Imputación única	Simple de entender y aplicar	Si el número de valores faltantes es grande, el algoritmo puede volverse inestable
		Valores estimados iterativamente.	Rápido	La imputación única estima los parámetros, pero no la variabilidad. Incertidumbre sistemática subestimada.
	MAR		Varios algoritmos disponibles	
		MAR	Imputación única	Estimaciones robustas derivadas de los datos disponibles.
No implica ninguna simulación.	Subestima la varianza de los estimadores.			
Complejidad media-alta	Sencillo, robusto y relativamente fácil de implementar. Regresión de la cresta en EM regularizado para evitar el mal acondicionamiento de la matriz de covarianza.		La imputación única estima los parámetros, pero no la variabilidad.	
Maximización esperada (EM) (Regularized-EM)	MAR	Alta complejidad.	Enfoque general.	Difícil de programar (software especial requerido).
		Se realizan varias imputaciones.	Sencillo de entender, difícil de programar.	Informática intensiva.
	Se realizan varias imputaciones.		Estimaciones imparciales, que proporcionan más validez que los enfoques Ad-Hoc.	El analista tiene poco control sobre el modelo de imputación.
		Conserva el tamaño de la muestra y el poder estadístico.	La varianza es mayor que para los métodos de imputación única.	

Fuente: Gómez-Carracedo, Andrade, López-Mahía, Muniategui, & Prada, 2014(9).





Por otro lado, en el estudio de Junger & Ponce de León, se presenta un método adecuado para datos de series temporales multivariantes, que utiliza una modificación del algoritmo *EM* (maximización esperada) para estimar el vector medio y la matriz de covarianza de una distribución normal multivariante con datos faltantes. Los niveles de datos faltantes de 5%, 10%, 20%, 30% y 40% fueron considerados en el estudio de simulación donde una mayor proporción de datos faltantes resultó en una mayor subestimación de la asociación. Las simulaciones mostraron que cuando la cantidad de datos faltantes era del 5%, el análisis completo de los datos arrojó resultados satisfactorios independientemente del mecanismo generador de los datos faltantes, mientras que la validez de la metodología empezó a decaer cuando la proporción de valores faltantes superaba el 10% (7).

En el estudio realizado por Junninen, et al, se utilizaron tres patrones de datos faltantes aleatoriamente simulados para evaluar los métodos en diferentes condiciones. El rendimiento de la interpolación de datos faltantes fue limitado y, en general, sólo se pudieron llenar bloques de información perdida muy cortos. Además, se observó que una ligera mejoría en los resultados de los métodos multivariados se puede lograr, utilizando la hibridación.(11)

3.3.2.1 Imputación múltiple

Para aplicar el método de imputación múltiple es necesaria la existencia de variables predictoras asociadas a la serie evaluada. De acuerdo a Gómez Carredo, et al, la imputación múltiple permite una estimación de la varianza asociada a cada imputación y constituye una alternativa a los métodos de algoritmo de maximización esperada. La imputación múltiple tiene una alta complejidad de programación y se basa en tres supuestos principales:

El modelo de probabilidad subyacente es la distribución normal multivariante. Aunque esto rara vez es cierto en datos reales, no es un aspecto crítico. Para acelerar los algoritmos, las variables muy sesgadas se pueden transformar primero usando logaritmos, transformaciones de Box-Cox, inversa de los valores, etc. Este es un trabajo preliminar de prueba y error.

Requiere supuestos previos; sin embargo, son casi imposibles de determinar para el científico y, por lo tanto, los algoritmos automáticamente suponen que no hay supuestos informativos previos sobre los parámetros del modelo. Si el tamaño de la muestra es grande (como es habitual en los estudios de monitoreo de calidad del aire), esto no es un serio inconveniente, ya que cualquier distribución previa subyacente razonable debería generar aproximadamente los mismos resultados.

Los datos faltantes deben ser MAR. Si esto no se puede aceptar, no hay métodos de imputación válidos para aplicar cuando se produce MNAR, por lo tanto hay que ser cautelosos con las conclusiones.

La imputación múltiple realiza una primera imputación del algoritmo de maximización esperada para obtener estimaciones razonables de los parámetros del modelo subyacente. Luego, el "aumento de datos" se realiza de forma iterativa haciendo una imputación aleatoria de los valores perdidos e inferir los parámetros desconocidos. Finalmente, se extraen nuevos parámetros de una distribución posterior bayesiana basada en los datos observados e imputados y el proceso se repite de nuevo. Las iteraciones se detienen cuando los parámetros del modelo no cambian.





Como esto no implica que los valores imputados no cambien (de hecho varían porque se imputan aleatoriamente), se repite el proceso de imputación global. Más comúnmente, solo se requieren de tres a cinco imputaciones.

3.3.2.2 Imputación por método ARIMA

El análisis de series de tiempo ARIMA (p,d,q) (Modelo Autorregresivo Integrado de Media Móvil - *Autorregresive Integrated Moving Average*), reúne los componentes autorregresivos (p), es decir, los que describen la observación como una combinación lineal de observaciones anteriores; el componente de media móvil (q), el cual contiene una parte aleatoria de la serie de tiempo; y el componente de integración (d), que indica el grado de transformación al que se somete la serie para volverla a su estado natural en caso de no ser estacionaria (15). En la Figura 3 se muestra el procedimiento para el planteamiento de un modelo ARIMA.

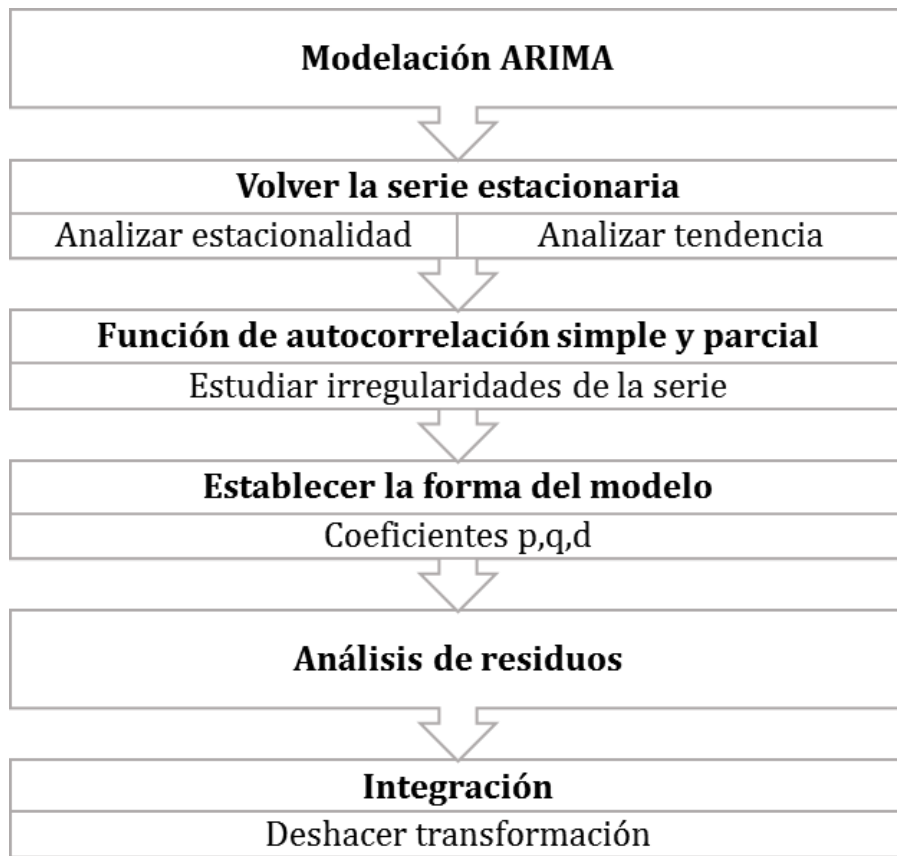


Figura 3.Procedimiento para el planteamiento de un modelo ARIMA (p,d,q) (15)

Este método se aplicó para 12 series de tiempo que presentaron problemas con la imputación múltiple. Se utilizó la función "na.kalman" incluida en el paquete "impute.TS" del software R 3.3.3 para esta finalidad. Dicha función aplica un filtrado de series de tiempo Kalman basado en un modelo ARIMA para imputar los valores perdidos (16).





3.3.2.3 Método de Plaia & Blondi (2006) (17)

Éste es denominado como Método de Efecto Dependiente del Sitio (SDEM por sus siglas en inglés), considera explícitamente un efecto de semana, día y de hora (todos dependientes del sitio), del contaminante suponiendo su capacidad adicional, y estima un valor perdido como lo expresa la siguiente fórmula (17):

$$\hat{x}_{swdh} = \bar{x}_{\cdot wdh} + \frac{1}{2} \left(\bar{x}_{sw\cdot\cdot} - \sum_{s=1}^S \frac{\bar{x}_{sw\cdot\cdot}}{S} \right) + \frac{1}{2} \left(\bar{x}_{s\cdot d\cdot} - \sum_{s=1}^S \frac{\bar{x}_{s\cdot d\cdot}}{S} \right) + \frac{1}{2} \left(\bar{x}_{s\cdot\cdot h} - \sum_{s=1}^S \frac{\bar{x}_{s\cdot\cdot h}}{S} \right).$$

Donde S equivale al sitio, W las semanas, d los días y h las horas.

Diferentes indicadores de desempeño acuerdan evaluar el SDEM como el mejor método entre los métodos de imputación simple y múltiple, independientemente de la longitud del espacio y del número de estaciones con datos faltantes. Vale la pena señalar que, incluso si, por lo general, los conjuntos de datos de contaminación atmosférica son multivariados, consistentes en un conjunto de contaminantes registrados a lo largo del tiempo, el método propuesto no utiliza más de una variable a la vez, sin embargo, se puede aplicar a cualquier conjunto de datos con la misma estructura.(17)

3.3.2.4 Técnicas heurísticas: redes neuronales

Cuando la cantidad de datos perdidos es superior al 25% se requiere usar un enfoque heurístico, en el cual se debe encontrar el modo práctico de aprender y descubrir información desde los datos disponibles, tal que los resultados obtenidos sean adecuados para cumplir con el objetivo inmediato. Desde este punto de vista, se requiere encontrar un modelo para cada subconjunto de datos disponible de cada serie, con cada modelo se estima (simular datos nuevos) los datos siguientes no disponibles, tal que, en cada simulación los datos nuevos no aumenten el sesgo, estos datos nuevos se incorporan al subconjunto de datos observados; entonces, el subconjunto de datos unido con los datos nuevos, será un nuevo subconjunto de datos que permitirá obtener otro modelo para simular el siguiente conjunto de datos no disponibles. Esto se repite hasta completar los datos no disponibles.

El modelado de una serie de tiempo o subconjunto de ella consiste en obtener una representación matemática que permita capturar, total o parcialmente, sus características más relevantes. Una vez se ha construido el modelo, este puede ser usado para realizar el pronóstico de los valores futuros o faltantes de la serie en un intervalo de tiempo determinado.

En la literatura se han propuesto diversos modelos para realizar la predicción de series de tiempo; de los disponibles, las redes neuronales artificiales (RNA) han mostrado ser más robustas que otras técnicas tradicionales como ARIMA, especialmente en la representación de relaciones complejas que exhiben comportamientos no lineales. Según Masters (1993), existen varias razones por las cuales se debería utilizar una RNA en vez de alguna técnica tradicional, tales como poseer una amplia capacidad para





aprender relaciones desconocidas a partir de un conjunto de ejemplos y una alta tolerancia a patrones extraños de ruido y componentes caóticos presentes en la serie; ya que son suficientemente robustas para procesar información incompleta, inexacta o contaminada.

La arquitectura de red neuronal más empleada en series de tiempo es del tipo MLP (18), su éxito se debe a que dichos modelos son aproximadores universales de funciones que están definidas en un dominio compacto (19) (20). No obstante, la estimación de sus parámetros se ha caracterizado por ser un problema particularmente difícil debido a la multitud de puntos de mínima que hacen que las técnicas de gradiente sean de poca utilidad, por lo que se han venido desarrollando una cantidad importante de algoritmos que pretenden obviar este problema (21). En general, un MLP está compuesto por varias capas de nodos: la primera es llamada capa de entrada y es por donde la red recibe la información; y la última es la capa de salida y es por donde entrega los resultados. Además, entre la capa de entrada y la de salida pueden existir otras capas, denominadas capas ocultas. En este trabajo, el modelado de las series requirió solo una capa oculta; considerando que se ha demostrado que para la mayoría de problemas es suficiente con una sola capa oculta (22)

Matemáticamente, una serie de tiempo o serie temporal se define como una secuencia de observaciones ordenadas en el tiempo $y_t = \{y_1, y_2, \dots, y_T\}$, para la que se pretende construir una función que permita obtener y_t en función de sus valores pasados, $\{y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}\}$, también llamados rezagos. Dicha función puede ser especificada como un MLP que puede ser representado matemáticamente como:

$$y_t = \beta_* + \sum_{h=1}^H \beta_h \times g\left[\frac{1}{2\sigma_y^{-1}} \times \left(\alpha_h + \sum_{p=1}^P w_{p,h} \times y_{t-p}\right)\right] + \varepsilon_t$$

Donde los parámetros $\Omega = [\beta_*, \beta_h, \alpha_h, w_{p,h}]$, $\{h = 1, 2, \dots, H\}$, $\{p = 1, 2, \dots, P\}$ son estimados usando el principio de máxima verosimilitud de los residuales, el cual equivale a la minimización de una función de costo que es definida usualmente como el error cuadrático medio. La ecuación anterior equivale a un modelo estadístico no paramétrico de regresión no lineal (23); en esta se asume que ε_t sigue una distribución normal con media cero y varianza desconocida σ^2 ; H representa el número de neuronas en la capa oculta; P es el número de rezagos de la variable dependiente; y $g(\cdot)$ es la función de activación de las neuronas de la capa oculta. En el contexto de las series de tiempo, el modelo puede ser entendido como una combinación lineal ponderada de la transformación no lineal de varios modelos autorregresivos. Para la implementación base de la red neuronal se adapta la función validada nnetar del paquete forecast de R. (24)

3.3.3 Métodos de imputación aplicados en el estudio

Para el caso del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el estado de las series de contaminantes se encuentra limitado por la presencia de valores no disponibles, los cuales van desde el 1.5% hasta el 73.5%, sin embargo, para explorar la asociación latente entre la contaminación atmosférica y la salud es necesario contar con series ambientales completas; para esto se propuso realizar la imputación de los valores no disponibles.

Para determinar el método de imputación a aplicar, se deben tener en cuenta previamente el porcentaje de valores perdidos, el periodo de medición, las gráficas de valores perdidos y el número de variables





medidas en la estación asociada a la serie de interés; la cuales se han explicado previamente. La **Tabla 8** a continuación especifica las metodologías de imputación.

Tabla 8. Métodos propuestos para la imputación de los valores no disponibles en las series de contaminantes.

Metodología de imputación para valores no disponibles	Condiciones de la serie para realización de la imputación
Imputación múltiple	Porcentaje de valores perdidos menor a 25%
	Periodo de medición menor a 4 años (series diarias)
	Presencia de otras variables medidas en la misma estación (concentraciones de contaminantes y/o variables meteorológicas)
Análisis de series de tiempo univariadas - ARIMA	No existen otras variables medidas en la misma estación
	Limitaciones con la imputación múltiple
Metodología propuesta por Plaia & Bondí (2006) (Plaia & Bondi, 2006)	No existen otras variables medidas en la misma estación
	Limitaciones con la imputación por el método ARIMA
Técnicas heurísticas	Series con valores perdidos superiores al 25%
	Series con grandes variaciones respecto a la media: O3, NO2, NO y NOX.

3.4 SERIES ENSAMBLADAS

3.4.1 Correlación por ventanas móviles

En un valle urbanizado se presentan procesos de inversión térmica en la atmósfera, principalmente en horas de la mañana; sin embargo, la radiación solar “rompe” la capa de inversión térmica, la cual indica estabilidad atmosférica, propiciando el transporte y la dispersión de los contaminantes. En ciertas épocas del año, la alta nubosidad que puede estar asociada a la precipitación, no permite el paso de la radiación solar incidente, por ende, no se rompe la capa de inversión. Esto se puede presentar en varios días consecutivos, generando una alta estabilidad en los primeros metros de la atmósfera (capa de mezcla), en donde se inhibe la mezcla, disipación y transporte de las partículas, gases y demás compuestos que se encuentren en la atmósfera(25). Además, es importante mencionar que las condiciones de estabilidad, las cuales están asociadas a un cambio en el perfil “normal” de la temperatura en la atmósfera cercana a la





superficie, se debe en gran medida a la topografía de la región, la cual propicia la inversión térmica, que, en conjunto con la estacionalidad climática en el país, genera condiciones ideales para momentos de estabilidad atmosférica. Por esta razón, en el Valle de Aburrá, los picos de contaminación están asociadas a la época lluviosa, asociada a alta pluviosidad y nubosidad. Debido a este comportamiento puntual, fue pertinente evaluar la relación entre las series de un mismo contaminante en ventanas de tiempo mensual, con el fin del evidenciar las posibles variaciones de las relaciones entre series con el tiempo y evaluar la plausibilidad de generar una serie única de cada contaminante, por unidad territorial.

Para este fin, en cada municipio se evaluaron las correlaciones de Spearman entre todas las series de un mismo contaminante, en ventanas móviles de un mes, para la posible relación lineal existente entre las variables. En la Figura 4 se muestra un esquema del algoritmo empleado para la construcción de las series anuales y mensuales, por contaminante y municipio. El algoritmo empieza por seleccionar el tipo de contaminante (j), paso seguido el municipio (i) y dentro de cada municipio el número de estaciones (p) que en algún momento durante la ventana de interés (2008-2016) han monitoreado el contaminante. Luego dependiendo del número de estaciones se toma la decisión correspondiente, en caso de ser mayor a 1 se estiman el número total de correlaciones (nt) y el número de éstas que son superiores a 0.6 (nc) aplicando el criterio de Spearman seguido de una prueba de significancia. En caso de que el criterio de significancia sea positivo para dos o más estaciones los datos se promedian y se continúa con el próximo periodo.

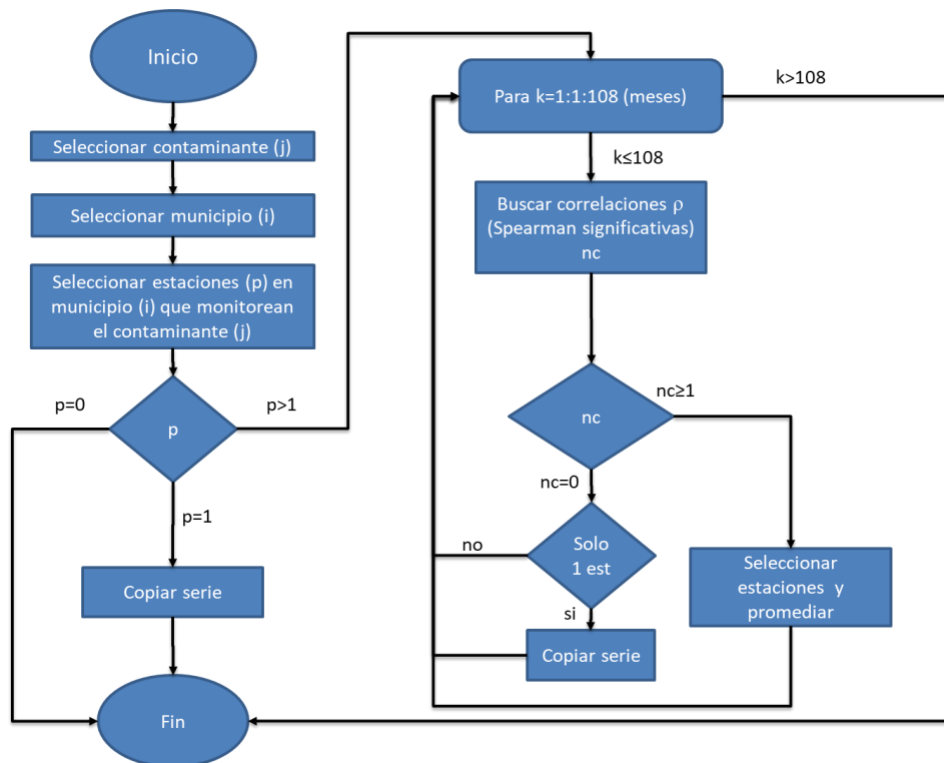


Figura 4. Diagrama del algoritmo implementado para calcular la serie resultante de correlaciones con ventanas mensuales significativas.

La metodología descrita anteriormente, permite evaluar la relación existente entre las distintas estaciones de medición de un contaminante determinado para un municipio en específico, es decir, si las





concentraciones del compuesto de interés aumentan en una estación, en la ventana mensual que se está evaluando, los niveles en las otras estaciones a su vez incrementan, disminuyen o no varían.

3.4.2 Entropía para la correlación de series de tiempo.

Desde el punto de vista de la teoría de la información, la entropía es conocida como entropía de la información o entropía de Shannon(26). La entropía mide la incertidumbre de una fuente de información; específicamente, permite medir la cantidad de información promedio que contienen los símbolos usados, esperando que los símbolos con menor probabilidad son los que aportan más información.

Está demostrado que la entropía de un fenómeno estadístico y de teoría de la información está dado por $S(p) = -\sum p_i \log p_i$, la cual puede ser usada como una medida de correlación. Considerando que la distribución de probabilidad de dos variables está dada por p_{ij} , se define la transformación $C: p_{ij} \rightarrow \pi_{ij}$, la cual crea una nueva distribución sobre estas mismas variables en la cual no exista correlación entre las mismas, es decir, $\pi_{ij} = P_i Q_j$. Esto muestra que la entropía obedece a la expresión $S(p) \leq S(\pi) = S(P) \leq S(Q)$, entonces, la entropía no es decreciente bajo estas transformaciones que destruyen la correlación. Desde este punto de vista la entropía conocida como Boltzmann/Shannon es una medida de correlación(26).

Para ilustrar el concepto, considere que las palabras son símbolos, la frase "El caimán esperó sigilosamente a su presa debajo del río y después la cazó", contienen símbolos cuya probabilidad es muy alta que aparezcan en una frase al azar, tal es el caso de: "El", "a", "su", "del", "la",...; mientras que la probabilidad de que aparezcan las palabras o símbolos "caimán", "río" es baja. Si quita los símbolos de más probabilidad, se obtiene "caimán esperó sigilosamente presa debajo río cazó" es posible inferir lo que sucede sin estos símbolos; en cambio, si se quitan las de menor probabilidad, será prácticamente imposible inferir la idea principal de la frase, entonces, la frase resultante será "El a su del la y", la cual está compuesta por los símbolos de mayor probabilidad, en este caso la entropía es máxima y el conjunto está en su máximo desorden.

Ahora bien, la correlación entre dos vectores aleatorios x, y implica que las propiedades de un vector se pueden obtener aplicando alguna transformación del otro vector. Por ejemplo, si $x = [2,4,6,8,10]$ es evidente que el vector está linealmente correlacionado considerando que $y = x + 2$, siendo $x + 2$ la transformación que los correlaciona. Además, existen correlaciones no lineales; por ejemplo, $x = [0,1,4,9,16]$ y $y = x^2$, evidentemente la correlación entre estos vectores será no lineal. Entonces, la entropía mide la diversidad en los vectores aleatorios, que es en sí aplicar la entropía de Shannon desde el punto de vista de teoría de la información.

La entropía es un concepto que se refiere a la concepción de una medida de desorden, lo que implica medir la singularidad de diversas combinaciones. Entonces, es considerada como una medida de la incertidumbre, que permite valorar si la información disponible de un fenómeno puede aportar para reducir o eliminar la incertidumbre sobre su comprensión.

En la literatura relevante, se han reportado múltiples implementaciones de la entropía, por ejemplo, el paquete entropy de R. Este implementa varios estimadores de entropía, como el estimador de contracción por Hausser y Strimmer, la máxima verosimilitud y el estimador de Millow-Madow, varios estimadores bayesianos y el estimador de Chao-Shen. También ofrece una interfaz R para el estimador de NSB.





Además, proporciona funciones para estimar la divergencia de Kullback-Leibler, chi cuadrado, información mutua y estadístico de independencia chi-cuadrado. Además, hay funciones para discretizar variables aleatorias continuas(27). Sin embargo, estos paquetes no fueron diseñados para el uso con series de tiempo.

Entonces, para este trabajo se usó en el paquete `tseriesEntropy` de R, el cual fue diseñado para usar series de tiempo; en éste se encuentra la medida de entropía de la dependencia basada en la distancia Bhattacharya-Hellinger-Matusita (Bhattacharyya, 1943). La cual puede usarse como una técnica para medir la autocorrelación o correlación cruzada no lineal para series de tiempo continuas; permitiendo caracterizar la información producto de procesos no-lineales y determinar la cercanía relativa entre dos conjuntos de datos.

En el paquete de R `tseriesEntropy` se implementa esta medida, conocida también como S_p . Se debe seleccionar la medida de entropía más baja dentro del intervalo de confianza. La medida se estima realizando `moving block Bootstrap`, es un método de remuestreo propuesto por Bradley Efron en 1979 (28). La cual es computacionalmente robusta y exigente en recursos (29).

3.4.3 Combinación de series de tiempo

Con el fin de aprovechar la información disponible de cada serie por contaminante, se requiere combinarlas o ensamblarlas con el fin de construir una serie de tiempo que represente de manera única el comportamiento de cada contaminante por municipio. Una de las técnicas comúnmente aceptadas en la literatura son los modelos no lineales de efectos mixtos también conocidos como modelos jerárquicos no lineales, estos modelos proveen un marco formal para cuando se requieren combinar efectos de diferentes conjuntos de datos, son ampliamente aceptados como un enfoque adecuado para la inferencia con aplicaciones constantemente reportadas y software disponible. Estos modelos realizan la combinación no lineal de los conjuntos de datos disponibles, para así obtener un conjunto de datos que puede representar el fenómeno en cuestión(30).

Mediante el paquete `nlme` del software R se realizó la implementación que permite tomar como entradas las series que por criterio experto (en este caso que se correlacionan como se indicó en la sección anterior) se deben combinar para obtener una serie que represente el fenómeno(31). Entonces, con el fin de aprovechar la información disponible de cada serie por contaminante, se requiere combinarlas o ensamblarlas con el fin de construir una serie de tiempo que represente el comportamiento de cada contaminante por municipio.





3.5 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LAS SERIES ENSAMBLADAS

3.5.1 Exploración de las series

Para el análisis exploratorio de las series ambientales, se calcularon los estadísticos descriptivos: media, mediana, mínimo, máximo, primer y tercer cuartil para cada contaminante. Además, se realizaron los diagramas de cajas y bigotes con el fin de visualizar la distribución del conjunto de datos.

3.5.2 Concentraciones promedio

Se calcularon los promedios anuales, mensuales y de día de la semana para evaluar la estacionalidad de las series para contaminante de cada municipio. Se desarrolló un código en MATLAB 2017 A.

El diagrama de cajas y bigotes da una impresión general de los datos, ya que describe varias características de la muestra como: la dispersión, la asimetría, los valores atípicos, entre otros; mientras que las medidas estadísticas brindan información de una sola característica de los datos.

3.5.3 Excedencias a las normas de contaminantes atmosféricos

“Una excedencia se define como el evento en el cual los valores de concentración de un contaminante sobrepasan lo estipulado en la norma de calidad del aire” (32). Para el cálculo de las excedencias, se tomaron como referencia los denominados contaminantes criterio: PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 y NO_2 , evaluados en el estudio, dado que autoridades como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (33) y la OMS (34) han establecido para cada uno de ellos, niveles permisibles basados en su comprobada afectación para la salud de la población.

3.5.3.1 Norma nacional de calidad del aire

En Colombia los estándares de la calidad del aire se encuentran establecidos en la Resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, la cual modificó la Resolución 601 de 2006. En la Tabla 9 se presentan los niveles máximos permitidos para los contaminantes criterio y sus respectivos tiempos de exposición:





Tabla 9. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio, Resolución 610 de 2010.

Contaminante	Límite máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM10	50	Anual
	100	24 horas
PM2.5	25	Anual
	50	24 horas
O3	80	8 horas
	120	1 hora
NO2	100	Anual
	150	24 horas
	200	1 hora

Fuente: Resolución 610 del 24 de marzo de 2010, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

3.5.3.2 Guías de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define las Guías de Calidad del Aire (GCA) tomando como base diferentes pruebas científicas que relacionan las consecuencias para la salud con los niveles de concentración de contaminantes (material particulado, ozono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre según la actualización de 2005); éstas tienen como objetivo contribuir al establecimiento de estándares nacionales y/o locales de calidad del aire y por tanto proporcionar herramientas a los Estados para la toma de decisiones que les permitan generar acciones de política pública para alcanzar una calidad del aire adecuada que proteja la salud de las poblaciones (34). La Tabla **10** presenta valores máximos permitidos y tiempos de exposición para los contaminantes relacionados.





Tabla 10. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, ozono, dióxido de nitrógeno y dióxidos de azufre

Contaminante	Límite máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM ₁₀	20	Anual
	50	24 horas
PM _{2.5}	10	Anual
	25	24 horas
O ₃	100	8 horas
NO ₂	40	Anual
	200	1 hora

Fuente: Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005.

3.5.3.3 Cálculo de excedencias

Para el cálculo de las excedencias, se categorizaron las series de tal forma que 0 se asignó a todos los valores menores al valor del umbral diario (octohorario para O₃) de la norma, y 1 para los valores por encima de éste, de esta manera, el valor asignado corresponde a un día de excedencia. Seguido, se procedió a sumar, para cada año, los nuevos valores de la serie (0 y 1), con el fin de calcular el número de días de excedencias y de no excedencias. Finalmente, se calcularon y graficaron los porcentajes de excedencias para cada año, los cuales fueron calculados de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de excedencias diarias} = \frac{\text{Días de excedencias} * 100\%}{\text{Días de excedencias} + \text{Días de no excedencias}}$$

3.6 ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO

En el análisis de regresión, se describe la naturaleza de la relación entre dos variables, donde los datos provienen de observaciones independientes; sin embargo, cuando la variable independiente es el tiempo, no aplica el supuesto anterior, dado que las observaciones están influenciadas por el pasado y a medida que aumenta el tiempo, es posible que se incrementen o disminuyan los valores observados.





Una serie de tiempo (llamada también serie cronológica o serie temporal) es un conjunto de observaciones numéricas de una variable que está en función del tiempo y que se obtienen secuencialmente en períodos fijos. La unidad de medida del tiempo puede ser: hora, día, mes, trimestre, año o cualquier otro período de tiempo que sea de interés.(35)

En el análisis clásico de las series de tiempo clásico, se utilizan datos muestrales con propósito de hacer inferencia y, por lo tanto, es un procedimiento mediante el cual se identifican y separan los factores relacionados con el tiempo y que influyen sobre los valores observados de la serie. Una vez identificados y aislados tales factores, se les puede utilizar para interpretar los valores históricos de la serie y para pronosticar o predecir valores futuros.

En la **Figura 5** se ilustra el procedimiento para el análisis de series de tiempo aplicado para las series de contaminantes atmosféricos de los municipios que comprenden el Valle de Aburrá.

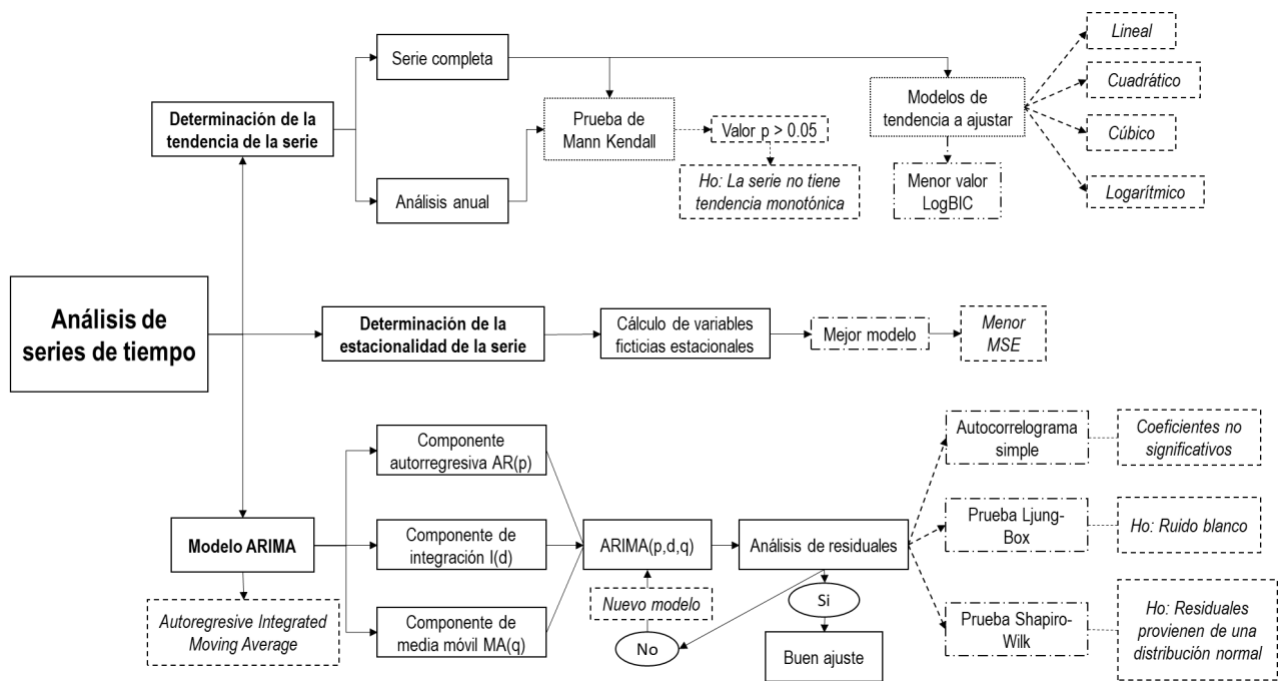


Figura 5. Flujograma del procedimiento del análisis de series de tiempo





3.6.1 Componentes de una serie de tiempo

En el análisis clásico de las series de tiempo se identifican cuatro factores o componentes, los cuales, algunas o todos, pueden estar presentes en una serie particular(35):

- *TENDENCIA (T)*: Es el movimiento general y persistente, a largo plazo, de los valores de la serie de tiempo durante un número prolongado de períodos, generalmente años. Puede ser creciente o decreciente, lineal o no lineal
- *ESTACIONALIDAD (E)*: Es el movimiento hacia arriba o hacia abajo con respecto a la tendencia, no dura más de un período (un año) y se presenta en todos; también se define como fluctuaciones periódicas bastante regulares que ocurren en períodos fijos de menos de un año (meses, trimestres, etc.) las cuales se deben a condiciones climáticas, costumbres sociales o religiosas, etc. Con datos anuales no se estudia la estacionalidad.
- *CÍCLICA (C)*: Es el movimiento recurrente hacia arriba o hacia abajo con respecto a la tendencia y que tiene duración de varios años (de 8 y más años). Se debe, en general, a decisiones políticas o de carácter institucional, como son los ciclos económicos, con sus etapas de prosperidad, recesión y recuperación.
- *IRREGULAR O AL AZAR (I)*: También llamado ruido blanco, en algunos casos. Son variaciones aleatorias con respecto a la tendencia, que no pueden ser adjudicadas a efectos estacionales o cíclicos. Todas las series las poseen. Estas variaciones aleatorias, sin ningún patrón, se deben a sucesos imprevistos como son las huelgas, los huracanes, las inundaciones, etc. Esta es la única componente no sistemática.

3.6.2 Modelos de una serie de tiempo

Luego de especificar las componentes de una serie de tiempo, surge el problema de estimar que parte del valor de y_i (variable dependiente) para cualquier período i dado, puede atribuirse a la tendencia (T), a la estacionalidad (E), a los factores cíclicos (C) o a una variación aleatoria o irregular (I). Para hacer una separación adecuada, hay unos supuestos acerca de la forma en que están relacionadas las componentes en la población que se investiga. Estos supuestos constituyen el modelo de las series de tiempo.

Se han diseñado muchos modelos matemáticos para el análisis de las series de tiempo, tales como el multiplicativo, el aditivo y diferentes combinaciones de los anteriores. En el modelo aditivo se considera que y_i en el período i , es igual a la suma de las cuatro componentes. En este caso, se está admitiendo que las componentes son independientes entre sí, por ejemplo, la tendencia no afecta la estacionalidad ni la ciclicidad, y viceversa. El modelo aditivo está representado por la siguiente ecuación (35):

$$y_i = T_i + E_i + C_i + I_i$$





En el modelo multiplicativo, y_i en el período i , se expresa como producto de las cuatro componentes, cuando los datos se obtienen de manera trimestral o mensual. En este modelo se admite que las componentes están relacionadas entre sí, o sea, que hay dependencia entre ellas, manteniendo la posibilidad de que las componentes provengan de causas diferentes. El modelo multiplicativo está representado por la siguiente ecuación (35):

$$y_i = T_i \times E_i \times C_i \times I_i$$

Con el objeto de estimar cada una de las componentes de la serie de tiempo, las componentes Estacional, Cíclica e Irregular, se tratan normalmente como desviaciones con respecto a la Tendencia, por esto, primero se estima la Tendencia y luego se elimina de los valores de y la variación que pueda atribuirse a ella. La variación que queda en y se atribuye, entonces, a las otras componentes. Cada una de estas componentes se puede aislar mediante técnicas estadísticas adecuadas. Después de haber estimado todas las componentes de la serie, se pueden hacer predicciones del valor de la variable dependiente y en algún punto del futuro, considerando primero el valor de la componente de tendencia en ese punto y modificando luego su valor mediante un ajuste que tenga en cuenta las componentes Estacional y Cíclica.(35)

3.6.3 Pasos en el análisis de una serie de tiempo

A manera introductoria, se grafican los datos para observar las imponentes a través del tiempo, esto es, si hay movimiento a corto, mediano y largo plazo hacia arriba o hacia abajo en la serie o si esta parece oscilar alrededor de una línea horizontal. No obstante, determinar las componentes de una serie solo con la inspección visual, es aventurado por lo que se requiere utilizar criterios objetivos.

3.6.3.1 Determinación de la tendencia de la serie

La tendencia es el factor más estudiado. Sirve para fines predictivos, esto es, para hacer proyecciones o pronósticos a plazo intermedio y largo o para aislar y luego eliminar los efectos de influencia sobre el modelo de la serie de tiempo como guía para un pronóstico a corto plazo (1 año o menos). 1. Como criterio objetivo, se recurre a la prueba de Mann Kendall, la cual plantea como hipótesis nula que la serie no tiene una tendencia monótonica, y en caso tal de que exista suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, el signo de la pendiente de la tendencia está dado por el estadístico τ de Kendall (22). Un valor p mayor que 0.05 permite aceptar la hipótesis nula, es decir, la no existencia de tendencia en los datos.

Existen diferentes modelos para ajustar la tendencia según el enfoque clásico, entre los cuales se encuentran (36):

- Lineal: Útil cuando los datos siguen el patrón de una línea recta, esto es,

$$Y_t = b_0 + b_1 t$$





- Cuadrático: La tendencia se caracteriza por un movimiento curvilíneo. El modelo tiene la siguiente expresión matemática:

$$Y_t = b_0 + b_1t + b_2t^2$$

- Cúbico: Se caracteriza por un movimiento curvilíneo, con presencia de aumentos y disminuciones. El modelo tiene la siguiente expresión matemática:

$$Y_t = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3$$

- Logarítmico: Tiene curvatura inicial más pronunciada que la exponencial pero más suave en su crecimiento posterior. Formalmente:

$$Y_t = b_0 + b_1 \log(t)$$

El hecho de seleccionar la tendencia de una serie de tiempo basándose únicamente en el comportamiento gráfico de la misma es considerado un criterio informal y subjetivo. Una de las técnicas empleadas en la elección del modelo de tendencia que mejor se ajusta a la serie, es el Criterio de Información Bayesiano (BIC). Este criterio desarrollado por Schwartz en 1978, consiste en la asignación de una puntuación global para cada modelo ajustado. A menor sea la puntuación del criterio, mejor es el ajuste del modelo (35,36).

Para el análisis de las tendencias de las series de contaminantes atmosféricos, se evaluaron los modelos mencionados previamente, y luego se seleccionó aquel que tuviera el menor valor del logaritmo del BIC, en las series completas. Además, se evaluó la prueba Mann-Kendall anual para evaluar las tendencias para cada serie.

3.6.4 Determinación de la estacionalidad de la serie:

Es importante aislar y estudiar los movimientos estacionales en una serie de tiempo en periodos menores de un año por dos razones: i) al conocer el valor de la componente estacional para cualquier periodo menor de un año en particular, se puede, con facilidad, ajustar y mejorar las proyecciones de tendencia para fines de pronóstico, y ii) al conocer el valor de la componente estacional, se puede descomponer la serie de tiempo al eliminar las influencias y junto con las pertenecientes a la tendencia y las fluctuaciones irregulares y con ello concentrarse en los movimientos cíclicos de la serie.

El componente estacional de una serie cronológica se expresa por medio de un número llamado índice estacional, que indica el valor de la fluctuación estacional en cada "periodo de tiempo menor de un año" como porcentaje de la tendencia esperada en ese periodo de tiempo. Cuando se conoce que los datos de la serie de tiempo tienen una tendencia lineal, en un modelo multiplicativo los índices estacionales por unidad de tiempo (que puede ser mes, semana, día, hora, minuto o segundo) se calculan dividiendo y por \hat{y} (37):

$$\text{Índice Estacional en la unidad de tiempo} = \left(\frac{y}{\hat{y}} \right) \times 100$$





Para estimar los efectos estacionales en las series de contaminantes atmosféricos, se utilizó la función *seasonaldummy* del paquete *forecast* de R, la cual calcula variables ficticias estacionales(35,37). El mejor modelo ajustado se escogió por tener un menor error cuadrado medio MSE.

3.6.5 Modelos ARIMA

Un modelo ARIMA es aquel que reúne en una sola expresión las componentes autoregresiva y de promedio móvil. Según esta modelación, las influencias sobre el valor tomado por la variable en cada momento del tiempo tiene 4 orígenes fundamentales(31):

- Valores recientes de la variable expresados con autoregresiones no estacionales en el modelo.
- Ruidos (errores aleatorios) en valores recientes de la variable expresados en el modelo con medias móviles no estacionales.
- Valores remotos en la variable expresados en el modelo con autoregresiones estacionales.
- Ruidos (errores aleatorios) en valores remotos de la variable expresados en el modelo con medias móviles estacionales.

Por lo tanto, en un modelo ARIMA, la componente autoregresiva se encarga de determinar cada observación como una combinación lineal de las observaciones anteriores y con la componente de promedio móvil se incluye una parte irregular, aleatoria, que regula el fenómeno.

El término ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) indica que una serie temporal puede ser analizada por medio de la componente autorregresiva de orden p , AR(p) y la de promedio móvil de orden q , MA(q). Si la serie original es no estacionaria con respecto a la media, hay necesidad de diferenciar la serie y por lo tanto el modelo definitivo incluye la componente I (integrated), que indica que para regresar a la serie original es necesario realizar un proceso de inversión sobre la serie transformada(31).

Para la construcción del modelo ARIMA, inicialmente se construye el gráfico de secuencias o de líneas con el fin de analizar si la serie temporal tiene tendencia, estacionalidad, ciclicidad y si cumple con el criterio de estacionariedad con respecto a la media, varianza y autocorrelaciones. Si la serie temporal no fuere estacionaria con respecto a la media, se aplica una diferenciación de orden d ; si no lo fuera con respecto a las autocorrelaciones una diferenciación de orden D y en el caso de varianza inestable la transformación de Box-Cox(31).

3.6.5.1 Análisis de residuales

Como resultado del modelado de una serie, se obtiene una serie residual. La remoción de las componentes de la serie temporal, ya sea la tendencia o la estacionalidad, implica la generación de esta secuencia, por ende, se espera que la serie residual corresponde a la componente aleatoria de la serie original. Por ende, se establecen estrategias para evaluar la suposición de residuo en forma de secuencia aleatoria, el cual, siendo verdadera, implica un buen ajuste del modelo ARIMA seleccionado(38).





El análisis de los residuales consiste en evaluar los siguientes supuestos (35,36):

1. Las funciones de autocorrelación simple no deben tener coeficientes significativos para ningún rezago. Esto se evalúa por medio del gráfico del autocorrelograma simple, en donde los coeficientes no deben estar por fuera de las bandas de no significancia (líneas horizontales punteadas)
2. Los residuales deben comportarse como un ruido aleatorio, con media cero. Para evaluar este supuesto se utiliza la prueba Ljung-Box, cuya hipótesis nula establece que las autocorrelaciones de los residuales se asocian a una serie aleatoria.
3. Los residuales sigan una distribución normal. Para evaluar la normalidad de los residuales se aplica la prueba de Shapiro-Wilk, cuya hipótesis nula establece que los residuales provienen de una distribución normal.

4 RESULTADOS

4.1 IMPUTACIÓN DE DATOS

4.1.1 Gráficas de valoración de los valores perdidos

Se realizaron gráficas por contaminante y por estación, respectivamente, de los municipios del Valle de Aburrá con los datos disponibles para el periodo de análisis de 2008 a 2016 de los contaminantes: PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, NO₂, NO, NO_x, SO₂ y CO. Para las series de PM₁₀ y PM_{2.5} medidas en equipos semiautomáticos, es decir, con una frecuencia de medición de tres días, se realizó la interpolación de los datos con el fin de llevar la serie a datos diarios, como se menciona previamente.

En general, en las gráficas se observa que los periodos de inicio, medición y de los registros no son iguales para cada contaminante cuando se observa el periodo establecido para el análisis. Además, se puede observar que durante el periodo activo de medición de las estaciones, pueden presentarse desde días y semanas sin registros, hasta grandes bloques desde un mes hasta un año de valores faltantes.

Todas las gráficas presentan valores no disponibles, sin importar si se está evaluando todo el periodo de análisis o desde el primer registro de medición. Un ejemplo de esto se observa en la **Figura 6**, la cual muestra los periodos de medición de PM_{2.5} para todas las estaciones que miden este contaminante en el municipio de Medellín. En esta gráfica se evidencian los periodos de medición de cada estación, lo cuales difieren entre sí, además de los valores no disponibles para cada serie de tiempo. Esto permite visualizar la información disponible de PM_{2.5} para analizar en el municipio de Medellín.



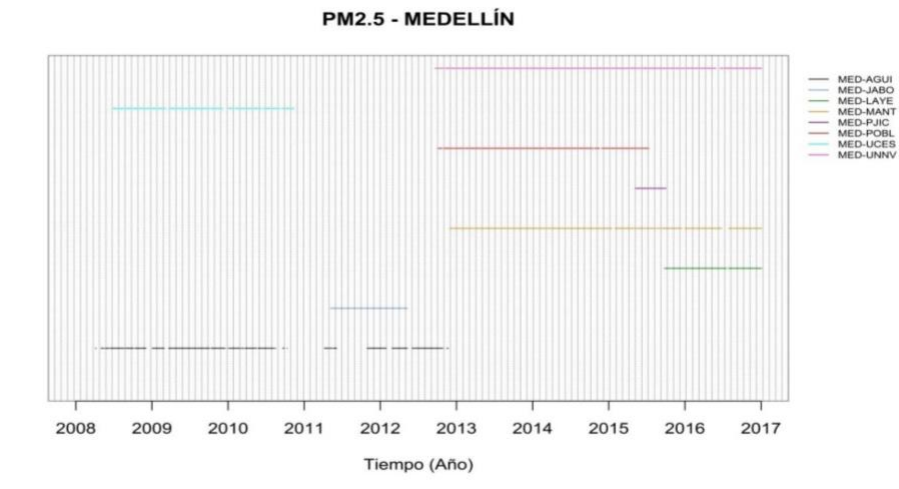


Figura 6. Registros de PM_{2.5} medidos en las estaciones fijas en el municipio de Medellín.

Entre las series temporales de los contaminantes evaluados sólo 14 presentan mediciones a lo largo del periodo de análisis establecido entre 2008 y 2016 (Tabla 11) correspondientes a los contaminantes de PM₁₀ y PM_{2.5}. Para O₃, NO₂, NO y NO_x algunas estaciones presentan mediciones continuas con un bajo porcentaje de valores faltantes a partir del año 2013. Finalmente, los registros de los contaminantes SO₂ y CO son los que presentan un menor periodo de medición; para SO₂ se encuentran mediciones entre un mes y año y medio, mientras que para CO hay mediciones desde junio de 2012 y junio de 2016 (Figura 7y Figura 8). Por esta razón no fueron incluidos los contaminantes CO y SO₂.

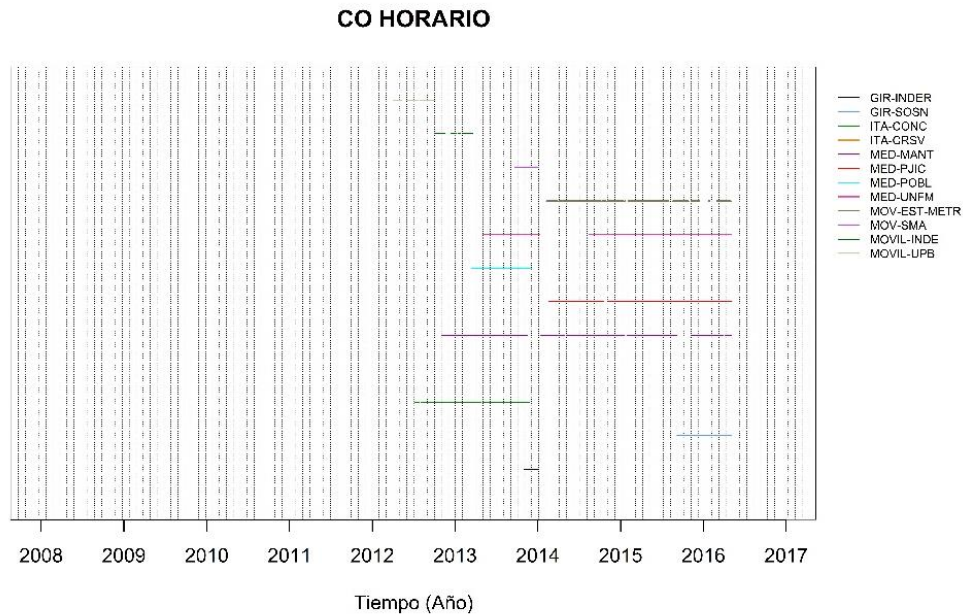


Figura 7. Registros de CO medidos en las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá



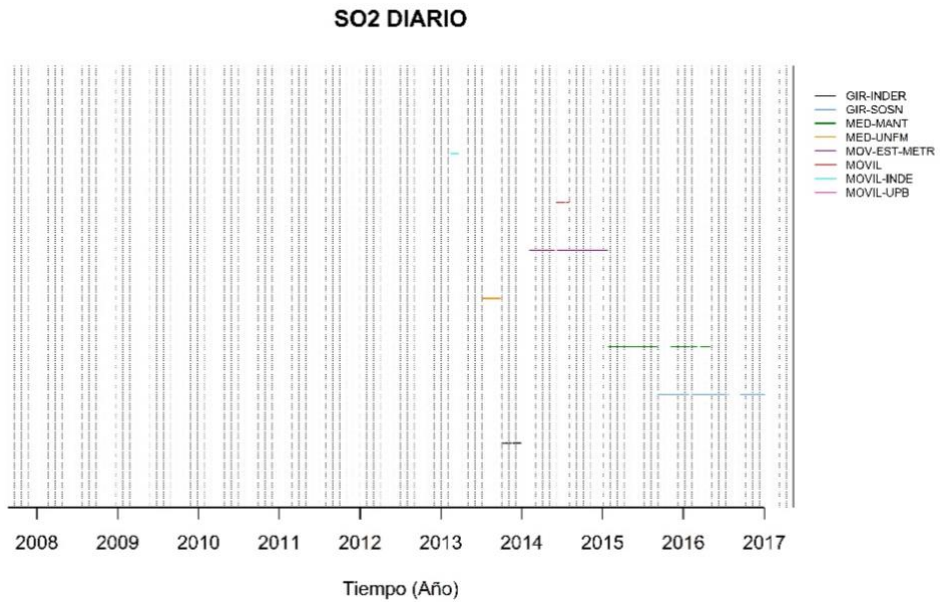


Figura 8. Registros de SO2 medidos en las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá

Tabla 11. Estaciones con periodos de medición entre 2008 y 2016, para el Valle de Aburrá

Contaminante	Estación
PM ₁₀ automático	CAL-PMER
	GIR-IECO
	ITA-CRSV
	MED-EXSA
	MED-PJIC
	MED-UNFM
PM ₁₀ semiautomático	BAR-HSVP
	CAL-PMER
	COP-HSMA
	ITA-PTAR
	MED-PJIC
PM _{2.5}	MED-UNFM
	SAB-CAM
	MED-PJIC





Contaminante	Estación
PM ₁₀ automático	CAL-PMER
	GIR-IECO
	ITA-CRSV
	MED-EXSA
	MED-PJIC
	MED-UNFM
PM ₁₀ semiautomático	BAR-HSVP
	CAL-PMER
	COP-HSMA
	ITA-PTAR
	MED-PJIC
	MED-UNFM
PM _{2.5}	SAB-CAM
	MED-PJIC

Para la toma de decisiones respecto a los distintos métodos de imputación que se puedan aplicar, es importante tener en cuenta todas las variables ambientales medidas en cada estación, por ejemplo, en la **Figura 9**, se puede observar que para la estación MED-MANT existen registros de las tres variables analizadas desde el año 2012 para PM_{2.5}, desde finales de 2014 para PM₁₀ y desde finales de 2015 para O₃. De esta información disponible parte la decisión de considerar o no una imputación múltiple, la cual representa uno de los métodos que permite obtener estimaciones más robustas(9).

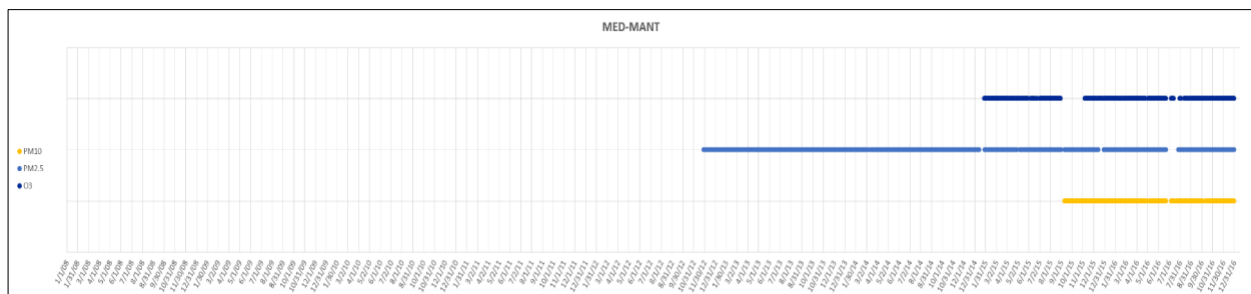


Figura 9. Registros de PM_{2.5}, PM₁₀ y O₃ medidos en la estación MED-MANT





4.1.2 Imputación múltiple y ARIMA

Para aplicar el método de imputación múltiple es necesaria la existencia de variables predictoras asociadas a la serie evaluada, además, se asume que los datos faltantes tienen un patrón MAR.(7) Entre las 55 series de PM_{10} y $PM_{2.5}$ establecidas para imputar, según los criterios mencionados previamente, trece series fueron imputadas con este método (

Municipio	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Bello	1	
Caldas		1
La Estrella		1
Girardota	1	
Itagüí	1	2
Medellín	3	2
Sabaneta	1	
Total	7	6

).

Tabla 12. Series de PM_{10} y $PM_{2.5}$ imputadas por medio del algoritmo EM (imputación múltiple)

Municipio	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Bello	1	
Caldas		1
La Estrella		1
Girardota	1	
Itagüí	1	2
Medellín	3	2
Sabaneta	1	
Total	7	6





Municipio	PM ₁₀	PM _{2.5}
Bello	1	
Caldas		1
La Estrella		1
Girardota	1	
Itagüí	1	2
Medellín	3	2
Sabaneta	1	
Total	7	6

Para la imputación, se optó por utilizar las siguientes variables meteorológicas: humedad relativa (%), temperatura (°C), precipitación (mm) y radiación solar (Wm^{-2}); debido a que, en la literatura se han detectado limitaciones al considerar las variables relacionadas con el viento, debido al fenómeno complejo (caótico) de las mismas (11). Además, al comparar los resultados entre las imputaciones realizadas con todas las variables disponibles y con las variables seleccionadas (humedad relativa, radiación solar, temperatura y precipitación), no se percibe diferencia alguna, por lo tanto, se opta por escoger el modelo más simple, es decir, el que requiere menos variables (**Figura 10**). La imputación múltiple de estas variables se realizó en el software estadístico comercial SPSS 24.



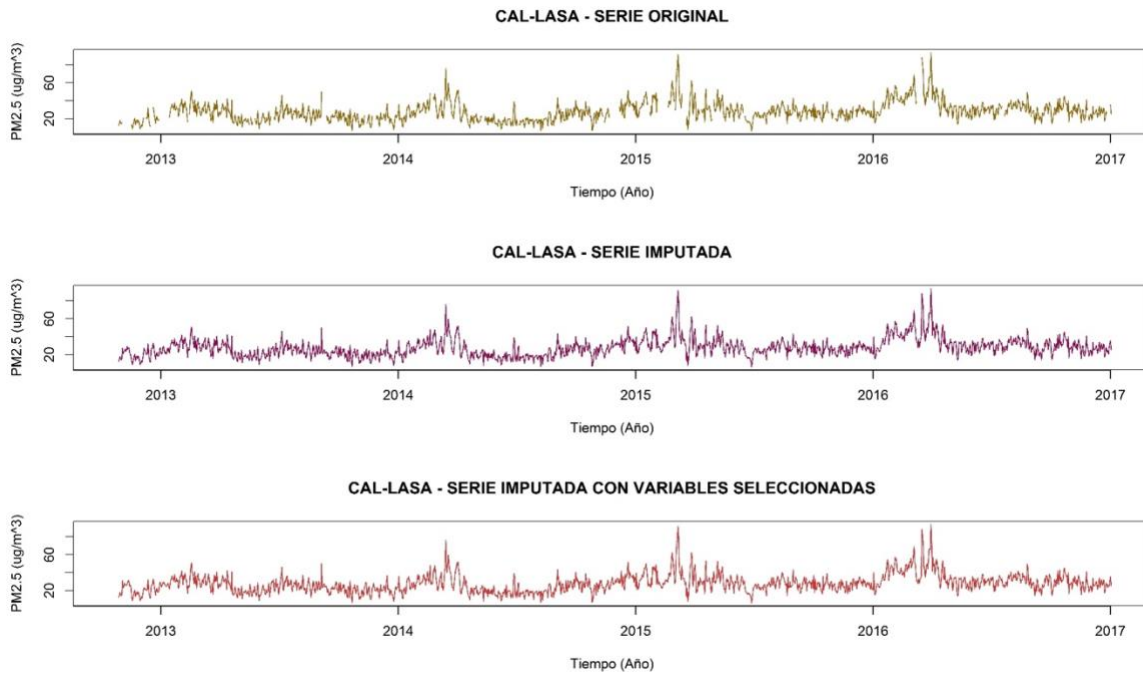


Figura 10. Comparación de la serie original de PM_{2.5} en la estación CAL-LASA en Caldas (línea café), con la serie imputada con todas las variables (línea morada) y la serie imputada con variables seleccionadas (línea rosada).

Al analizar los resultados obtenidos en la imputación múltiple, se observaron varias series en donde algunos bloques de valores faltantes fueron imputados con la media de la serie. Esto dio como resultado que, en la ausencia de datos en grandes periodos de tiempo (p.ej. un mes), se presentará una línea recta horizontal. Este comportamiento se muestra en la Figura 11, en los primeros meses del año 2011 en la serie de PM₁₀ de la estación MED-PJIC del municipio de Medellín. Dichos resultados poco representativos de la varianza en la serie se presentaron debido a la ausencia de datos, no sólo en la serie evaluada, sino también en las variables predictoras. Por esta razón, se evaluó la implementación de otros métodos para sustituir dichos bloques con poco ajuste, prefiriendo aplicar la imputación por medio de un análisis de series de tiempo univariado – ARIMA.



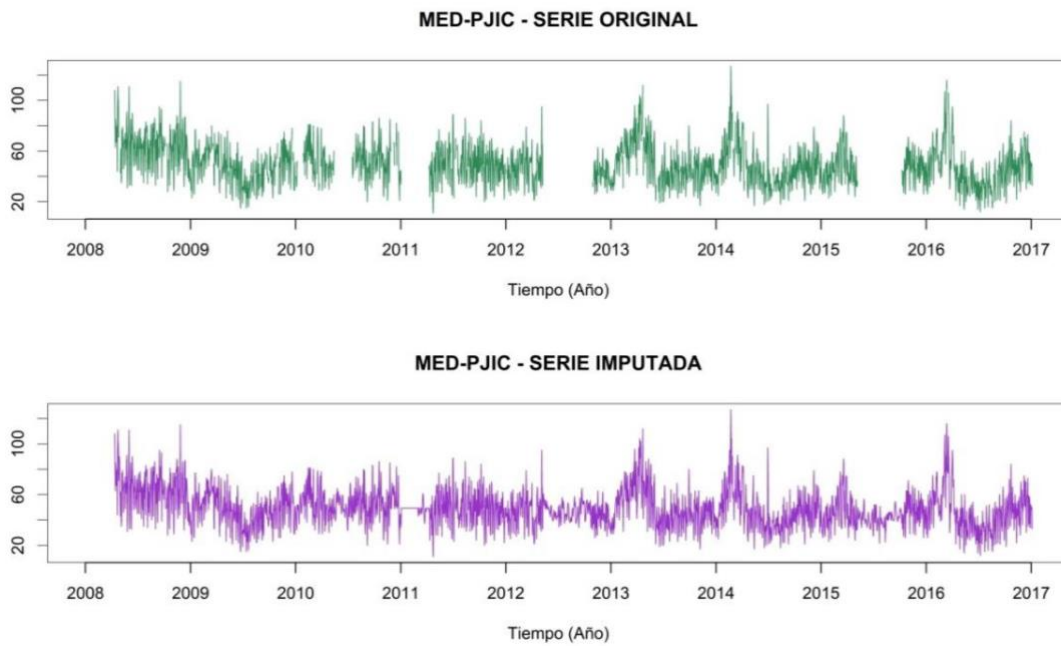


Figura 11. Serie original de PM₁₀ en la estación MED-PJIC en Medellín (línea verde) y serie imputada por medio de la imputación múltiple (línea morada). Elaboración propia.

En la **Tabla 13** se muestran las estaciones con series imputadas por el algoritmo EM – imputación múltiple. Todas las series, a excepción de los datos de PM_{2.5} de la estación CAL-LASA (Corporación Universitaria Laallista) en el municipio de Caldas, requirieron de alguna modificación con el método ARIMA.

Tabla 13. Estaciones con series tratadas con imputación múltiple con sus respectivas variables predictoras

Municipio	Estación	Variables predictoras				
		HR	T	RS	P	Otra
Bello	BEL-USBV					
Caldas	CAL-LASA					
La Estrella	MOV-EST-METR					
Girardota	GIR-IECO					
Itagüí	ITA-CONC					PM ₁₀ PM _{2.5}
	ITA-CJUS					
Medellín	MED-PJIC					PM ₁₀
	MED-UNFM					





Municipio	Estación	Variables predictoras				
		HR	T	RS	P	Otra
	MED-MANT					
	MED-UNNV					
Sabaneta	SAB-CAM					

HR: Humedad relative (%)

RS: Radiación solar (W/m2)

T: Temperatura (°C)

P: Precipitación (mm)

Los resultados de la imputación múltiple aplicada a la serie de $PM_{2.5}$ en la estación CAL-LASA se muestran en la Figura 12 y la Tabla 14. Al comparar la serie original con la serie imputada se observa que la metodología aplicada presenta un buen ajuste, ya que no se presentan cambios significativos en los estadísticos descriptivos y gráficamente no se observan inconsistencias, como la ocurrencia de líneas rectas horizontales.

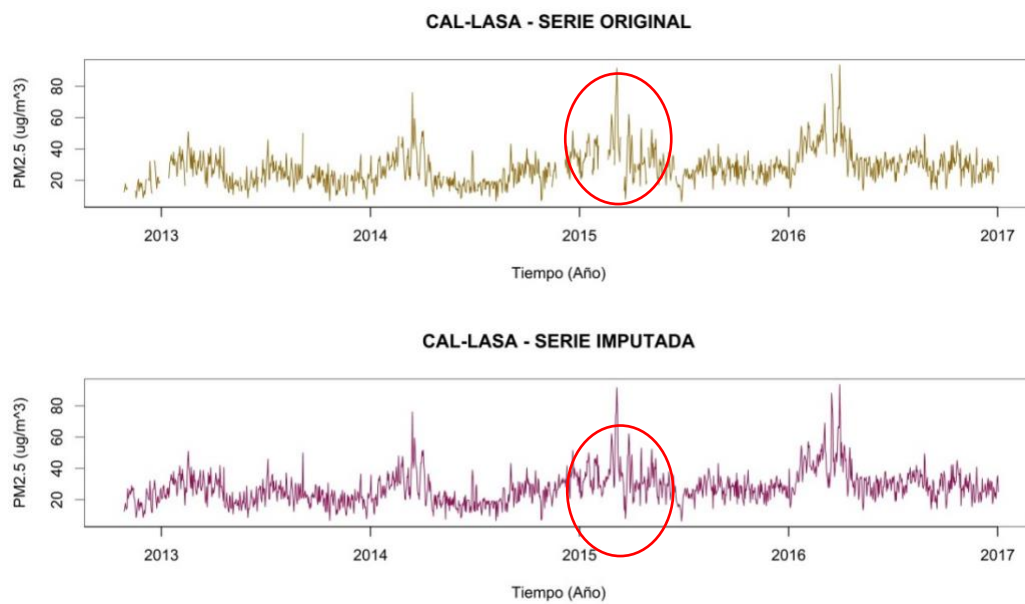


Figura 12. Serie original de $PM_{2.5}$ en la estación CAL-LASA (línea café) y serie imputada por medio del algoritmo EM (línea morada)





Tabla 14. Estadísticos descriptivos de la serie de PM_{2.5} en la estación CAL-LASA, en el municipio de Caldas

Estadísticos descriptivos - PM _{2.5} (µg/m ³)	CAL.LASA	
	Original	Imputada
Media	27.84	27.79
Desviación estándar	10.74	10.27
Mediana	26.60	26.80
Mínimo	6.30	6.30
Máximo	93.60	93.60
Cuartil 1	20.40	20.95
Cuartil 3	33.10	32.50
Varianza	115.33	105.52

Para las demás series tratadas por medio de la imputación múltiple, se presentaron tramos con problemas en la imputación, como se mencionó previamente; por esta razón, dichos tramos fueron modificados con modelos ARIMA. En la Figura 13 se muestra la diferencia entre los resultados arrojados por la imputación múltiple y la imputación por el método ARIMA. Se observa que en el periodo de 2015 donde se presenta la ausencia de las variables predictivas y por ende la imputación arroja una línea recta horizontal, tuvo una mejor aproximación con la aplicación de la imputación por el método ARIMA.



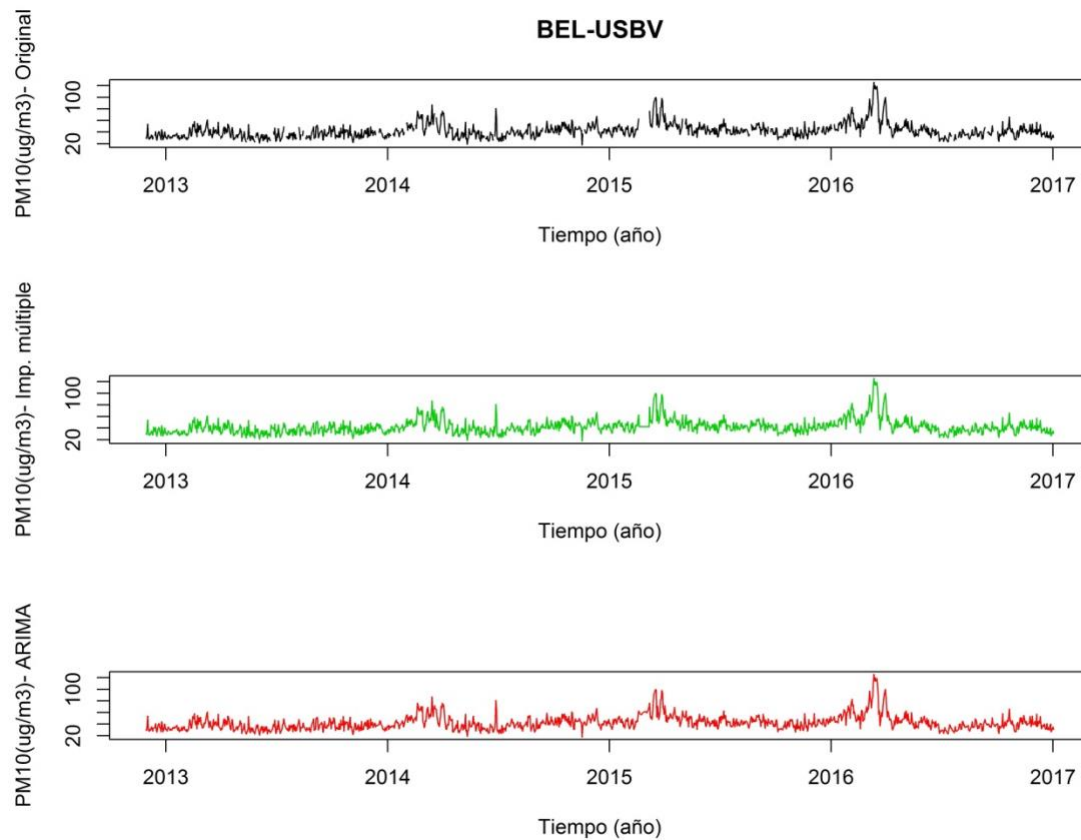


Figura 13. Serie de PM₁₀ en la estación BEL-USBV, en el municipio de Bello. Serie original (línea negra), serie con imputación múltiple (línea verde), serie con imputación con ARIMA (línea roja). Elaboración propia

Por otro lado, para la estación ITA-CONC la imputación por el método ARIMA con filtro de Kalman no fue representativa de la serie de PM_{2.5}, como se observa en la **Figura 14**. Para el periodo de valores perdidos presentados a mediados de 2016 la imputación múltiple arrojó como resultado una línea recta horizontal, y la imputación con ARIMA dio como resultado una parábola, la cual no es representativa del comportamiento general de los datos. Por esta razón, se optó por realizar una partición en la serie desde el primer dato hasta el dato inmediatamente anterior al bloque de valores perdidos en donde se presenta el problema mencionado, para así realizar los pronósticos de series de tiempo ARIMA.



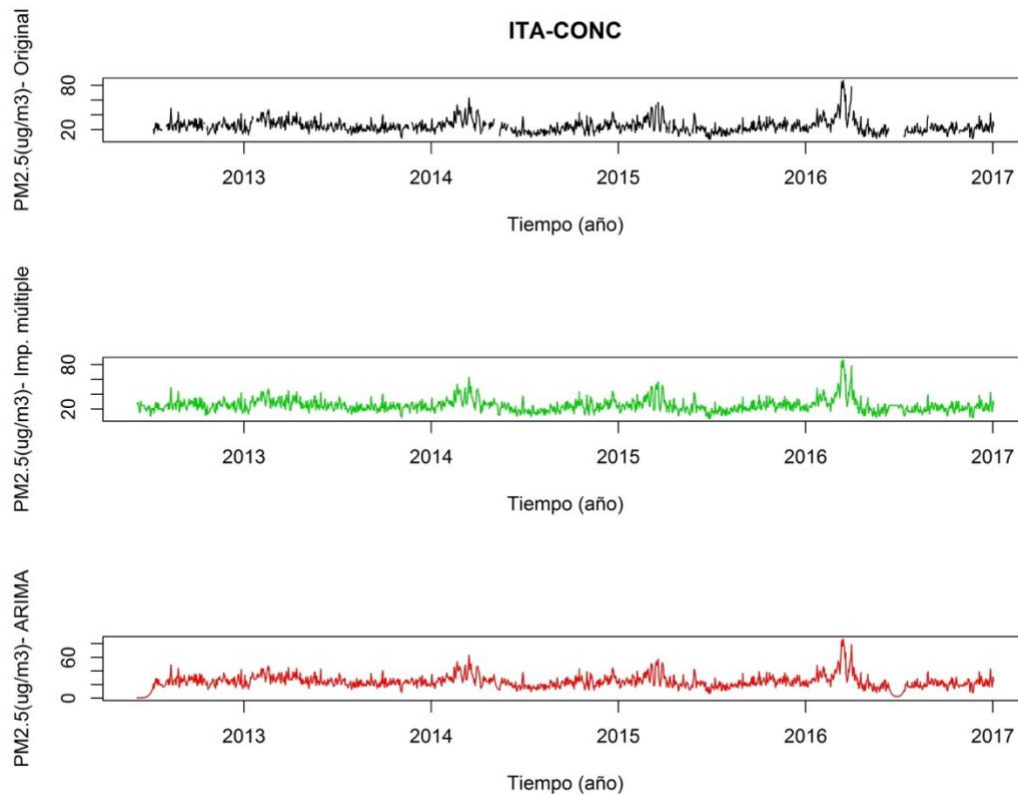


Figura 14. Serie de PM_{2.5} en la estación ITA-CONC, en el municipio de Itagüí. Serie original (línea negra), serie con imputación múltiple (línea verde), serie con imputación con ARIMA con filtro de Kalman (línea roja)

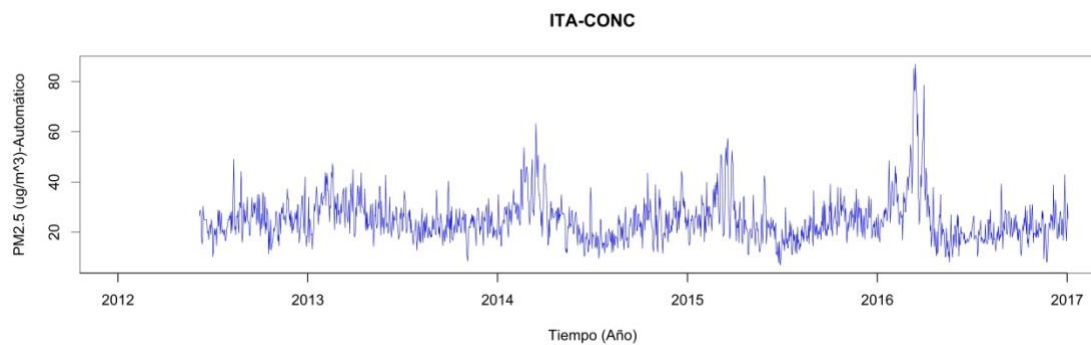


Figura 15. Serie final de PM_{2.5} en la estación ITA-CONC, en el municipio de Itagüí, imputada por medio de una ARIMA(3,1,0)(1,1,1)[30].

En la Figura 15 se muestra la serie final de PM_{2.5} para la estación ITA-CONC, cuyo periodo problemático fue modificado con un ARIMA estacional o SARIMA del siguiente orden: ARIMA(3,1,0)(1,1,1)[30], de la forma ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)[h], en donde P, D, Q corresponden a las componentes autorregresiva, de integración y de media móvil de la componente estacional de la serie y h representa los periodos





pronosticados (39). Dicho modelo, presenta un mejor ajuste, tanto gráfico como estadístico en comparación con los otros métodos aplicados.

4.1.3 Imputación por el método de Plaia & Blondi (2006) (17)

El método para el tratamiento de series de tiempo en bases de datos de calidad del aire desarrollado por Plaia & Blondi (2006) fue utilizado en la imputación de las series univariadas de PM_{10} y $PM_{2.5}$, es decir, para las estaciones que sólo registran la medición de una variable ambiental(17). En total se imputaron con este método un total de 12 series distribuidas en la **Tabla 15**.

Tabla 15. Series de PM_{10} y $PM_{2.5}$ imputadas por medio de la metodología planteada por Plaia & Blondi (2006)

Municipio	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Barbosa	1	
Caldas	2	
Copacabana	1	
La Estrella	1	
Itagüí	2	1
Medellín	3	1
Total	10	2

4.1.4 Redes neuronales

Referente a la imputación de series de tiempo con redes neuronales, se imputaron un total de 103 series; en la

Figura 16 y Figura 17, se presenta gráficamente las series originales (gráfica de la izquierda) y la imputación (gráfica de la derecha). Por cada serie, para cada sub conjunto de datos observados (conocidos), se realizaron 1000 simulaciones y se tomó la de menor valor MSE mediante validación cruzada. Así, si una serie tiene un total de 4 subconjuntos de datos, se realizan aproximadamente 4.000 simulaciones hacia adelante y mil hacia atrás para llenar los datos faltantes



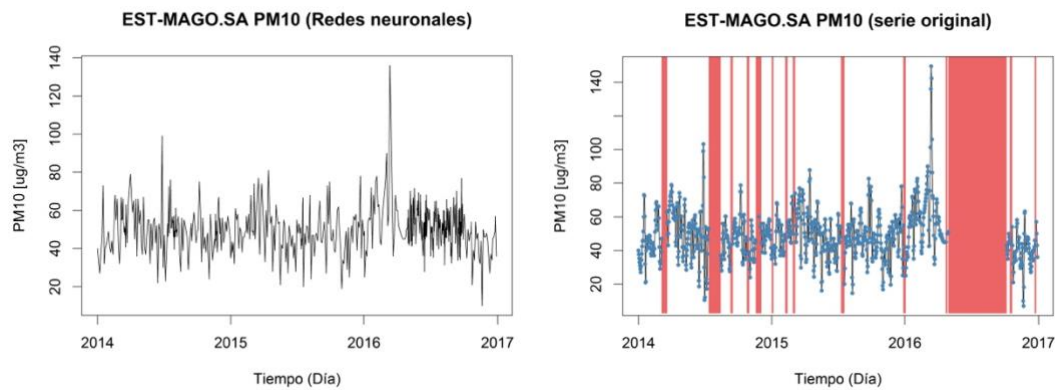


Figura 16. Serie de PM₁₀ registrado en la estación EST-MAGO imputada por redes neuronales

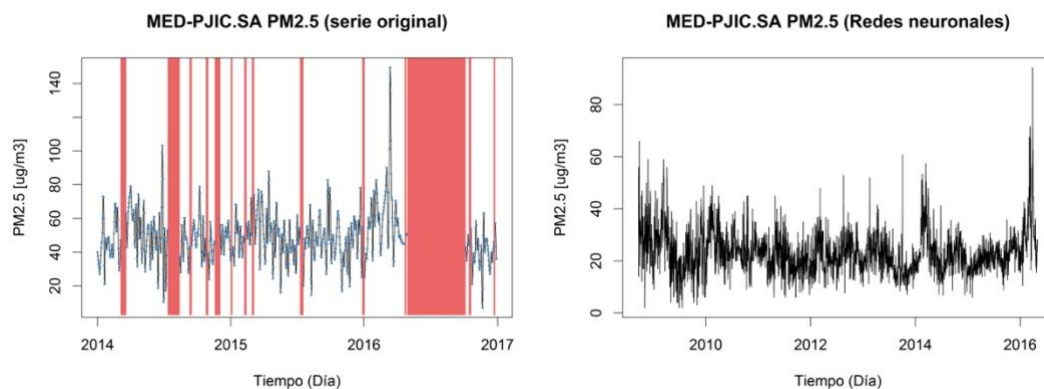


Figura 17. Serie de PM_{2.5} registrado en la estación MED-PJIC imputada por redes neuronales

En general, las metodologías implementadas presentaron un buen ajuste tanto al comparar gráficamente las series originales con las imputadas como al analizar los estadísticos descriptivos asociados a las mismas. Por ende, es prudente utilizar las series para los posibles análisis relacionados a la asociación entre la salud y la contaminación atmosférica, ya que ignorar los valores perdidos implica un gran riesgo de introducir sesgos en los resultados. En el ANEXO A se presentan todas las series imputadas.





4.2 ANÁLISIS DE SERIES ENSAMBLADAS

4.2.1 Correlación por ventanas móviles

Al evaluar la relación lineal entre las series disponibles para un contaminante, en un municipio, se observa que para los periodos en donde se presentan condiciones de estabilidad atmosférica (**Error! Reference source not found.** - Izquierda), al mirar la serie resultante (serie de color rosado), la cual es producto de promediar las series evaluadas cuando las correlaciones fueran estadísticamente significativas, se observa que la correlación entre las series es significativa dado que aproximadamente para todo el periodo evaluado, se presenta continuidad en la misma. Sin embargo, al observar la serie resultante para los periodos en donde no hay condiciones estables en la atmósfera del Valle de Aburrá (**Error! Reference source not found.** - Derecha), se observa que no hay una continuidad en la misma, es decir, existe la presencia de "huecos" en el tramo evaluado, producto de correlaciones mensuales móviles no significativas entre las series evaluadas, relacionadas con una atmósfera heterogénea. Al evaluar cada uno de los seis contaminantes, se observa que para todos se cumple lo mencionado anteriormente, con diferencias en el largo del tramo de no correlación entre las series (**Error! Reference source not found.** a **Figura 21**).

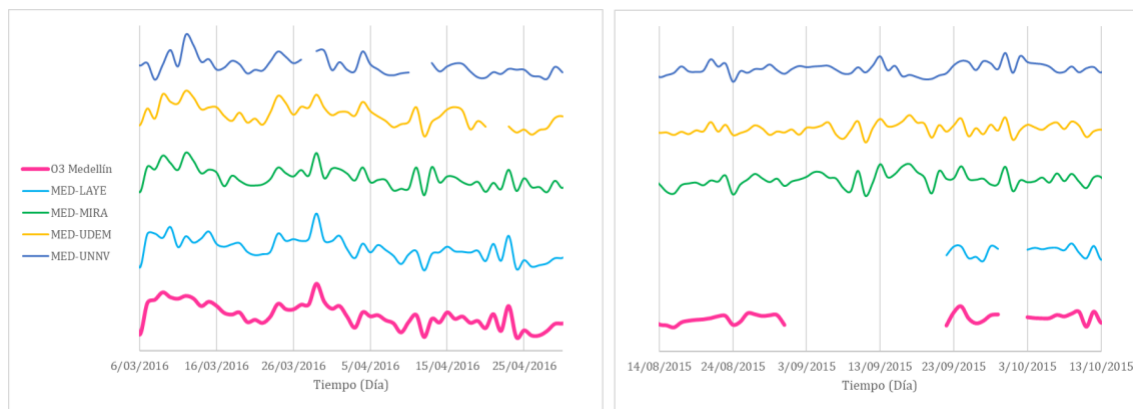


Figura 18. Correlación de Spearman aplicada a ventanas móviles de un mes para las series de O₃ de Medellín. En la gráfica de la izquierda se observa un periodo de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá, mientras que, en la figura derecha, se observa la serie en un periodo de heterogeneidad. La serie de O₃ color rosado, es la resultante



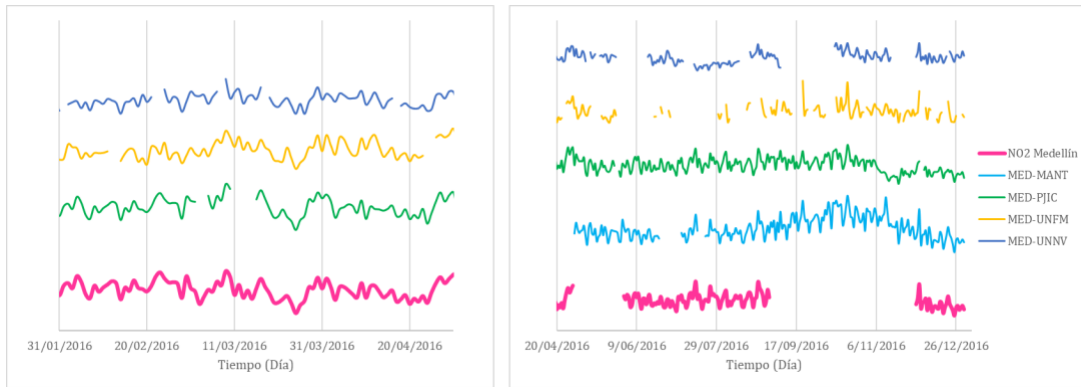


Figura 19. Correlación de Spearman aplicada a ventanas móviles de un mes para las series de NO₂ de Medellín. En la gráfica de la izquierda se observa un periodo de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá, mientras que, en la figura derecha, se observa la serie en un periodo de heterogeneidad. La serie de NO₂ color rosado, es la resultante.

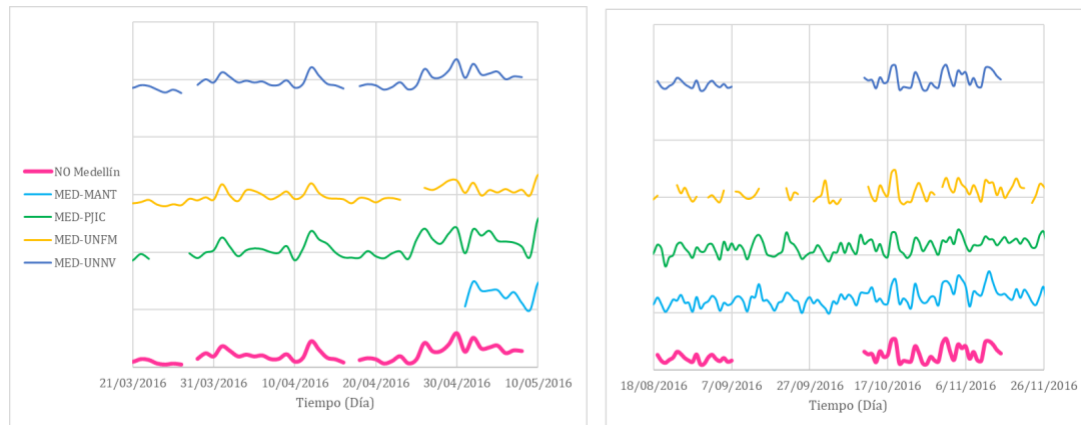


Figura 20. Correlación de Spearman aplicada a ventanas móviles de un mes para las series de NO de Medellín. En la gráfica de la izquierda se observa un periodo de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá, mientras que, en la figura derecha, se observa la serie en un periodo de heterogeneidad. La serie de NO color rosado, es la resultante.

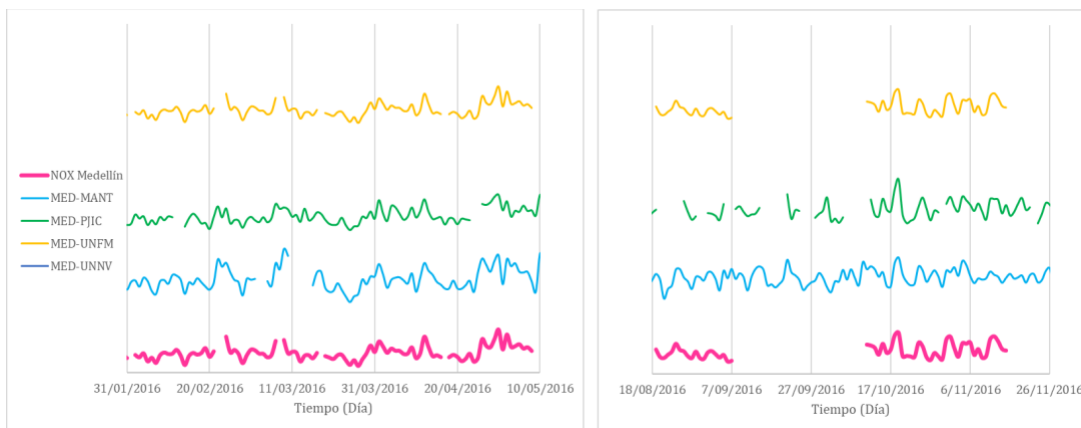


Figura 21. Correlación de Spearman aplicada a ventanas móviles de un mes para las series de NOX de Medellín. En la gráfica de la izquierda se observa un periodo de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá, mientras que, en la figuraderecha, se observa la serie en un periodo de heterogeneidad. La serie de NOX color rosado, es la resultante.





Lo anterior, permite evidenciar la naturaleza del fenómeno evaluado con un enfoque lineal, dado que, se observa que el comportamiento de las series es homogéneo bajo condiciones de estabilidad atmosférica. Sin embargo, también permite evaluar la pertinencia de suponer un comportamiento lineal en este tipo de series, de las cuales se conoce su componente caótica y no lineal.

4.2.2 Entropía

En la **Figura 22** se observa la medida de entropía para dos conjuntos de datos no correlacionados, esta indica que para todos los rezagos revisados ninguna medida está dentro del intervalo de confianza del 5% (líneas punteadas). Mientras que, en la **Figura 23**, se presenta la medida de entropía de PM₁₀ mes a mes, mayo/2008 a dic/2016, entre los datos de las estaciones MED-UNFM y MED-PJIC, se evidencia que existen correlaciones entre ambos conjuntos de datos.

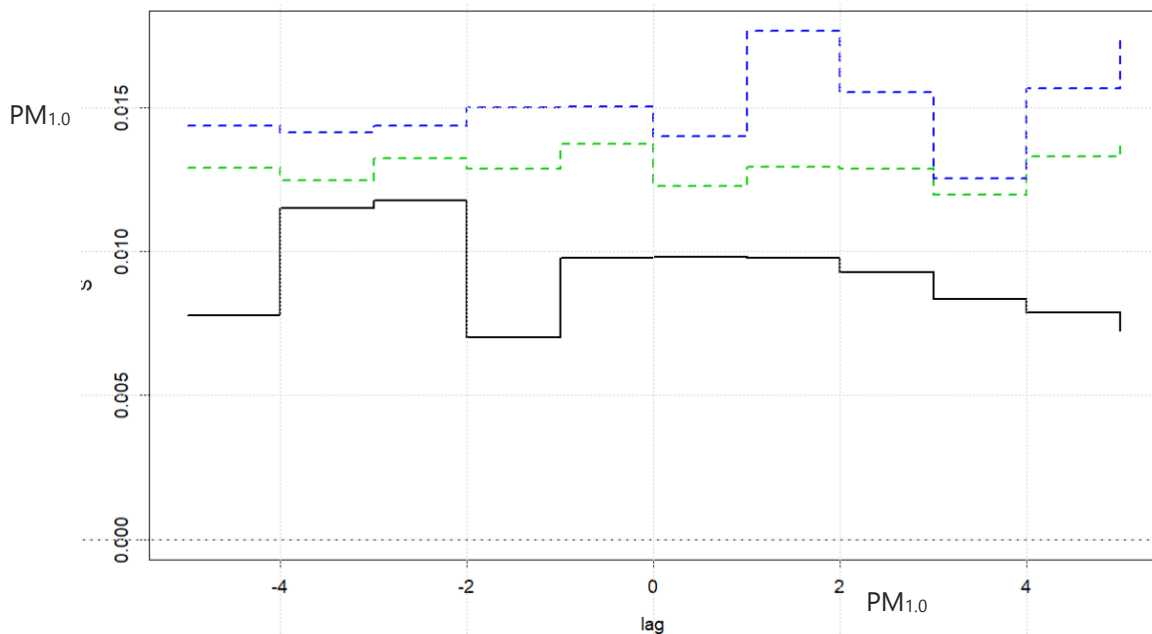


Figura 22. Medida de entropía cruzada entre dos conjuntos de datos no correlacionados



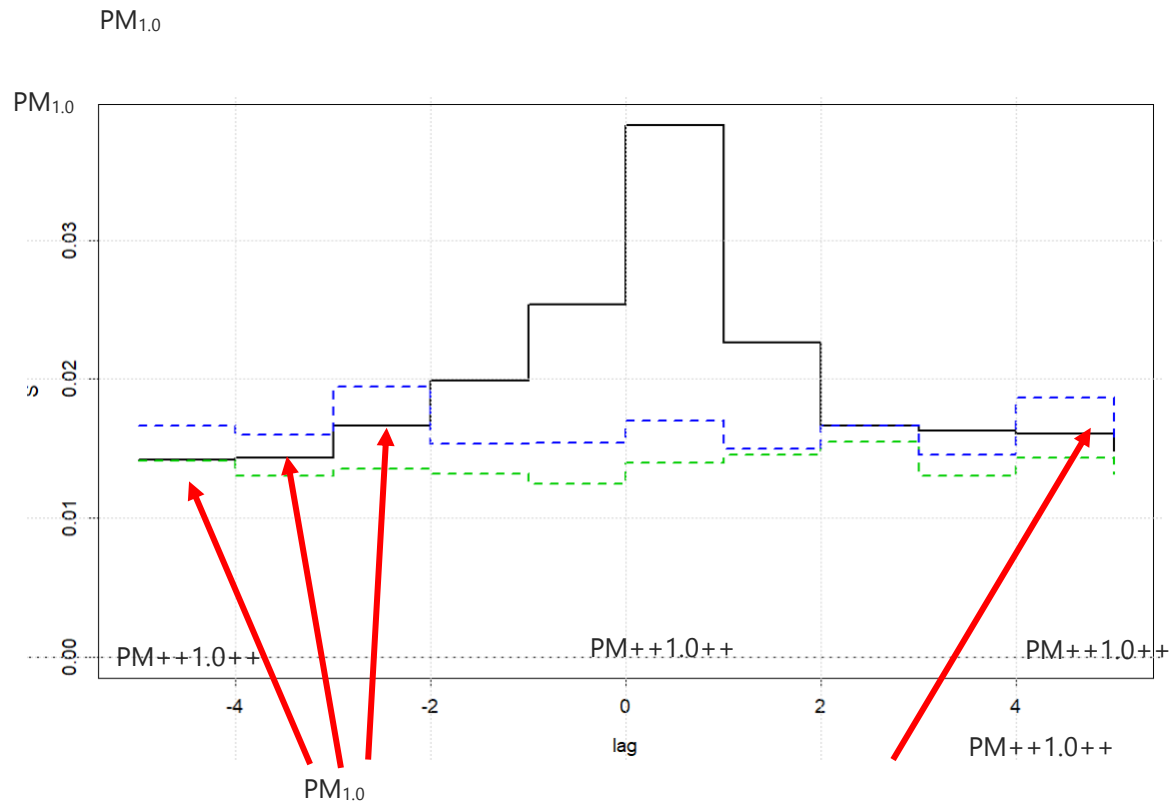


Figura 23. Medida de entropía de PM_{10} mes a mes, mayo 2008 a diciembre 2016, entre los datos de las estaciones MED-UNFM y MED-PJIC

En las **Tabla 16, Tabla 17 y**





Tabla 18, se reportan las medidas de entropía de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y O_3 , respectivamente. Se evidencia que estas series están correlacionadas entre sí; además, cada conjunto de datos (serie) contiene información relevante del fenómeno (PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3) para una ciudad específica.

Los resultados fueron similares a los encontrados con las correlaciones, es decir, se encuentra correlación entre las series de tiempo. Lo que implica que están relacionadas y cada serie de tiempo aporta información relevante sobre el fenómeno correspondiente. Para el caso de Medellín, las series de tiempo de PM_{10} se correlacionan entre sí, lo cual es evidencia que no es indiferente tomar una u otra para representar el fenómeno y se requiere tomar toda la información disponible, considerando que todas aportan información valiosa pero no suficiente del fenómeno. Análogamente, ocurre para los demás municipios y contaminantes.

Entonces, con base en toda esta información que está disponible y relacionada, en la siguiente sección se responde la siguiente pregunta: Cómo combinar toda esta información, tal que se pueda generar un conjunto de dato para cada contaminante por cada ciudad.





Tabla 16 Medida de Entropía para medir la Correlación Cruzada de PM₁₀ Medellín, mes a mes, entre las Estaciones con información disponible.

Estaciones	MED-UNFM	MED-UPB	MED-UDEA.SA	MED-UDEM.SA	MED-VIHE.SA	MED-PJIC	MED-PJIC.SA	MED-AGUI.SA	MED-CORA.SA	MED-EXSA	MED-MANT	MED-MIRA.SA
MED-UNFM		0,0121	0,0144	0,0123	0,0174	0,0142	0,0125	0,0137	0,0149	0,0131	0,0122	0,0119
MED-UPB	0,0165		0,0110	0,0164	0,0131	0,0127	0,0153	0,017	0,0149	0,0143	0,0116	0,0117
MED-UDEA.SA	0,0128	0,0119		0,0142	0,0182	0,0123	0,0121	0,0169	0,0166	0,0121	0,014	0,0168
MED-UDEM.SA	0,0113	0,0134	0,0166		0,0136	0,0143	0,011	0,0129	0,0154	0,0149	0,0138	0,0167
MED-VIHE.SA	0,0148	0,0172	0,0162	0,0166		0,0132	0,0118	0,0129	0,0179	0,0123	0,0114	0,0139
MED-PJIC	0,0183	0,0147	0,0115	0,0125	0,0126		0,0145	0,0151	0,0183	0,0128	0,0112	0,0135
MED-PJIC.SA	0,0153	0,0179	0,0136	0,0144	0,0112	0,0158		0,0165	0,0135	0,0121	0,0130	0,0157
MED-AGUI.SA	0,0112	0,0130	0,0152	0,0184	0,0133	0,0163	0,0139		0,0145	0,0128	0,0128	0,0142
MED-CORA.SA	0,0124	0,0126	0,0151	0,0143	0,0122	0,0155	0,0184	0,0141		0,014	0,0167	0,0111
MED-EXSA	0,0143	0,0176	0,0167	0,0112	0,0131	0,0155	0,0111	0,0177	0,0168		0,0167	0,0118
MED-MANT	0,0149	0,0117	0,0168	0,0145	0,0182	0,0157	0,0181	0,016	0,017	0,0127		0,0163
MED-MIRA.SA	0,0180	0,0110	0,0158	0,0142	0,0184	0,0137	0,0137	0,0132	0,0141	0,0160	0,0182	





Tabla 17. Medida de Entropía para medir la Correlación Cruzada de PM_{2.5} Medellín, mes a mes, entre las Estaciones con información disponible.

Estaciones	MED-POBL	MED-MANT	MED-UNNV	MED-AGUI	MED-JABO	MED-LAYE	MED-PJIC	MED-PJIC.SA	MED-UNFM.SA	MED-UCES
MED-POBL		0,0130	0,0121	0,0149	0,0166	0,0163	0,0121	0,0132	0,0125	0,0161
MED-MANT	0,0122		0,0166	0,0171	0,0121	0,0111	0,0184	0,0160	0,0176	0,0130
MED-UNNV	0,0151	0,0157		0,0114	0,0182	0,0144	0,0158	0,0146	0,0122	0,0172
MED-AGUI	0,0146	0,0120	0,0117		0,0125	0,0172	0,0173	0,0169	0,0149	0,0165
MED-JABO	0,0147	0,0162	0,0154	0,0149		0,0176	0,0161	0,0176	0,0130	0,0120
MED-LAYE	0,0178	0,0146	0,0140	0,0162	0,0118		0,0130	0,0139	0,0153	0,0139
MED-PJIC	0,0115	0,0151	0,0148	0,0144	0,0162	0,0184		0,0157	0,0127	0,0110
MED-PJIC.SA	0,0115	0,0139	0,0160	0,0177	0,0162	0,0180	0,0117		0,0132	0,0123
MED-UNFM.SA	0,0157	0,0128	0,0150	0,0116	0,0119	0,0122	0,0155	0,0172		0,0114
MED-UCES	0,0167	0,0119	0,0153	0,0180	0,0142	0,0122	0,0172	0,0113	0,0164	





Tabla 18. Medida de Entropía para medir la Correlación Cruzada de O₃ Medellín, mes a mes, entre las Estaciones con información disponible.

Estaciones	MED-JABO	MED-LAYE	MED-MANT	MED-MIRA	MED-POBL	MED-UCES	MED-UDEM	MED-UNNV	MED-VIHE
MED-JABO		0,0173	0,0179	0,0130	0,0136	0,0113	0,012	0,0156	0,0128
MED-LAYE	0,0176		0,0137	0,0170	0,0165	0,0179	0,0137	0,017	0,0184
MED-MANT	0,0167	0,0161		0,0164	0,0147	0,0161	0,0147	0,0163	0,0141
MED-MIRA	0,0152	0,0152	0,0115		0,0151	0,0128	0,0116	0,0177	0,0148
MED-POBL	0,0122	0,0172	0,0153	0,0127		0,0135	0,0148	0,0147	0,0172
MED-UCES	0,0148	0,016	0,0131	0,012	0,0143		0,011	0,0171	0,0132
MED-UDEM	0,0149	0,0142	0,0125	0,0144	0,0182	0,0127		0,0136	0,0165
MED-UNNV	0,0116	0,0130	0,0120	0,0149	0,0121	0,0139	0,0169		0,0153
MED-VIHE	0,0140	0,0165	0,0157	0,0182	0,0125	0,0143	0,0185	0,0181	

4.2.3 Combinaciones de las series

Para cada conjunto de series imputadas del mismo contaminante, para cada municipio, y correlacionadas desde un punto de vista no-lineal, se estimó un modelo de efectos mixtos no lineales(40). Para la serie imputada de PM₁₀ de Medellín, se presentan dos episodios de contaminación en la estación UNFM-SA, en los periodos del 20 al 27 de marzo de 2011 y de enero a abril de 2012 (Figura 24). Para el primer periodo, no se logró asociar esta eventualidad a ningún proceso antropogénico; en cuanto al segundo episodio, éste puede estar relacionado con la construcción de la ampliación de la doble calzada de la carrera 80 - 81 entre las calles 65 y 75 y obras complementarias, además de la construcción del Edificio Crucero de La 80 (<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15149339>). Debido a esto, se observa que los valores arrojados por la estación UNFM distorsionan la serie ensamblada resultante, por ende, se decidió no incluir esta serie en el ensamblaje.



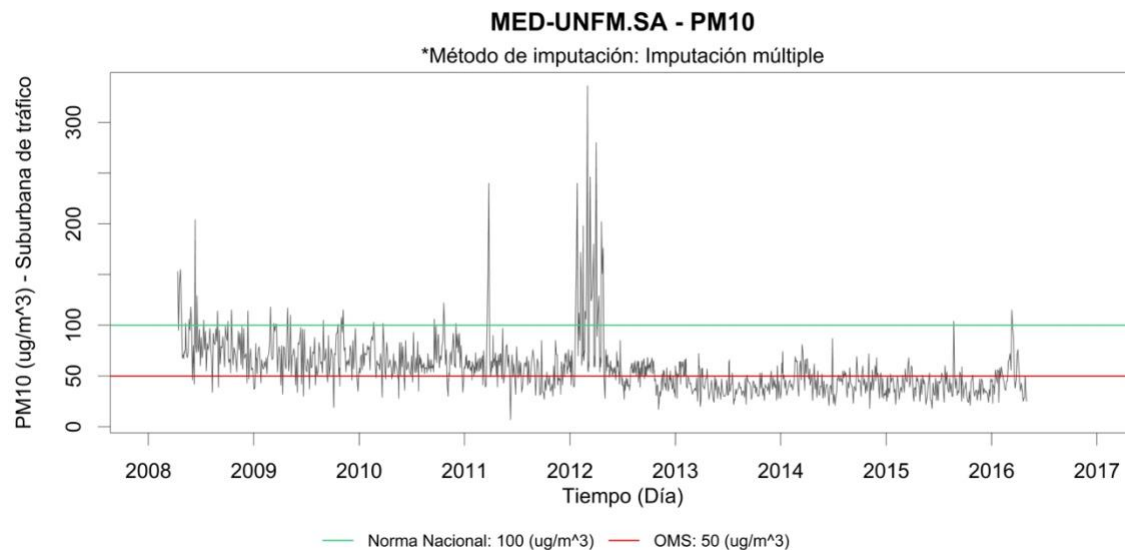


Figura 24. Serie de PM₁₀ semiautomática de la estación MED-UNFM ubicada en el municipio de Medellín

En cuanto al municipio de Bello, desde el 3 de abril de 2008 hasta el 31 de diciembre de 2010 operó la estación BEL-SEPM para el contaminante PM₁₀, la cual es una estación de tráfico. Luego, se instaló la estación BEL-USBV, la cual es de fondo y operó durante el periodo 28 de noviembre de 2012 a 31 de diciembre de 2016, lo que implica un periodo de 23 meses sin información. Por tal motivo, no se procedió a aplicar la metodología de ensamblaje de las series y sólo se utilizaron los datos de PM₁₀ reportados por la estación BEL-USBV.

Lo descrito anteriormente se aplica a las series disponibles para el municipio de Envigado, las cuales fueron reportadas por dos estaciones: ENV-FUND y ENV-UENV, las cuales no funcionaron en el mismo periodo de tiempo, la primera operó entre 2009 y 2013, mientras que la última entre 2015 y 2016. Por ende, se optó por utilizar la información de la primera estación, ya que, a pesar de no tener mediciones recientes, eran las más completas.

En la **Tabla 19** se muestran los municipios en donde, por la información disponible, fue aplicada la metodología de ensamblaje de las series.





Tabla 19. Listado de series utilizadas para la construcción de series ensambladas

Municipio	Serie ensamblada	Series a ensamblar
Caldas	PM ₁₀	CAL-PMER **
		ITA-CRSV **
	PM ₁₀	ITA-DITA **
		ITA-CONC
		ITA-PTAR *
Itagüí	PM _{2.5}	ITA-DITA
		ITA-CJUS
		ITA-CONC
	O ₃	ITA-CONC
		ITA-DITA
La Estrella	PM ₁₀	ITA-PTAR
		EST-MAGO
	PM ₁₀	EST-CAM *
		MED-MANT
		MED-UPB
		MED-MIRA *
		MED-UDEA *
MED-UDEM *		
Medellín	PM ₁₀	MED-VIHE *
		MED-PJIC **
		MED-UNFM
		MED-AGUI *
		MED-CORA *
		MED-EXSA





PM _{2.5}	MED-AGUI
	MED-JABO
	MED-LAYE
	MED-PJIC
	MED-UCES
	MED-PJIC *
	MED-UNFM *
	MED-POBL
	MED-MANT
	MED-UNNV
O ₃	MED-JABO
	MED-LAYE
	MED-MANT
	MED-MIRA
	MED-POBL
	MED-UCES
	MED-UEDEM
MED-UNNV	
MED-VIHE	

*Semiautomática **Automática y semiautomática

En las **Figura 25 y Figura 27**, se presentan las series usadas para obtener una serie que represente el fenómeno de concentración PM_{2.5} y PM₁₀ para Medellín. Nótese que, la serie obtenida conserva los picos de contaminación, los cuales son de gran importancia desde el punto de vista ambiental y epidemiológico (**Figura 26 y Figura 28**).



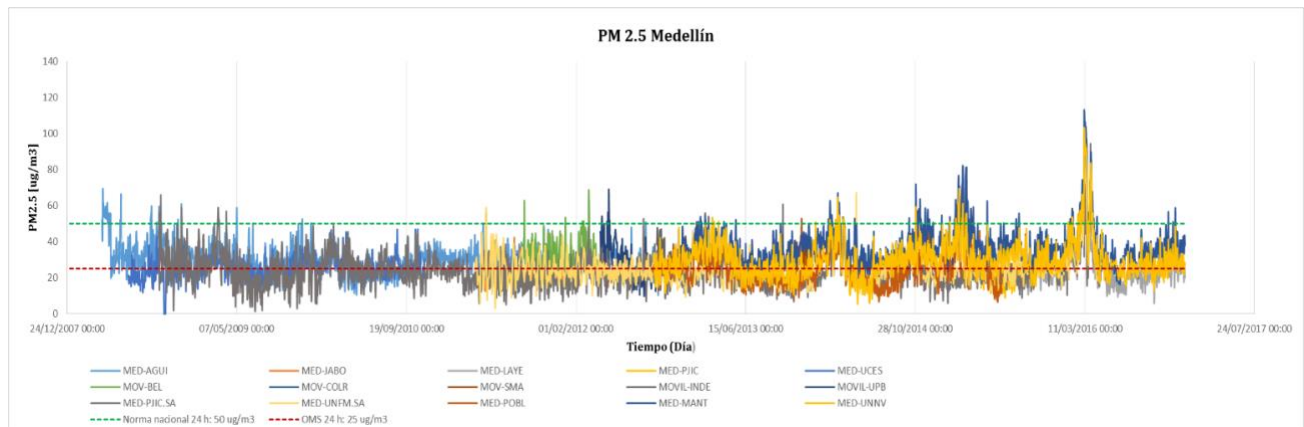


Figura 25. Series de tiempo a combinar de concentraciones de PM_{2.5} en Medellín entre 2008 y 2016.

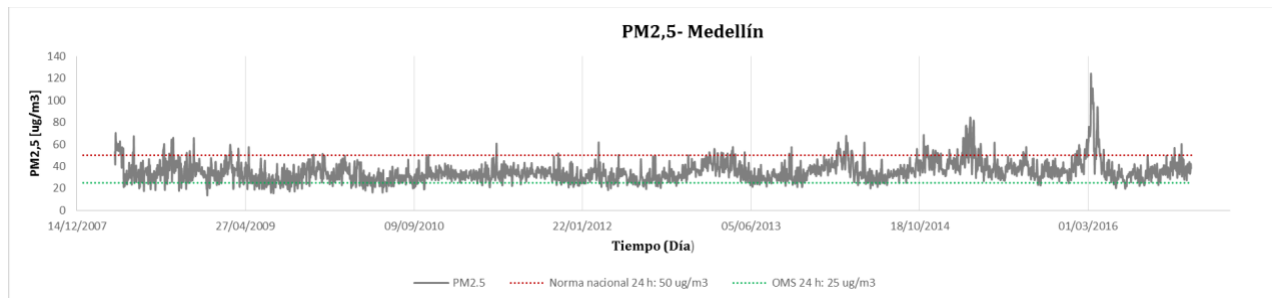


Figura 26. Serie de tiempo combinada de PM_{2.5} en Medellín entre 2008 y 2016.

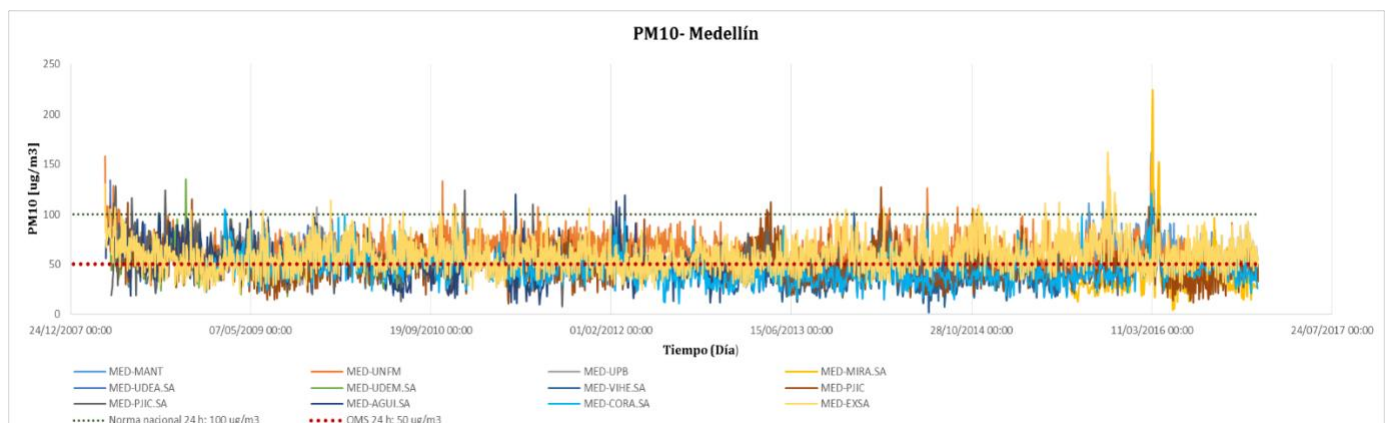


Figura 27. Series de tiempo a combinar de concentraciones de PM₁₀ en Medellín entre 2008 y 2016.



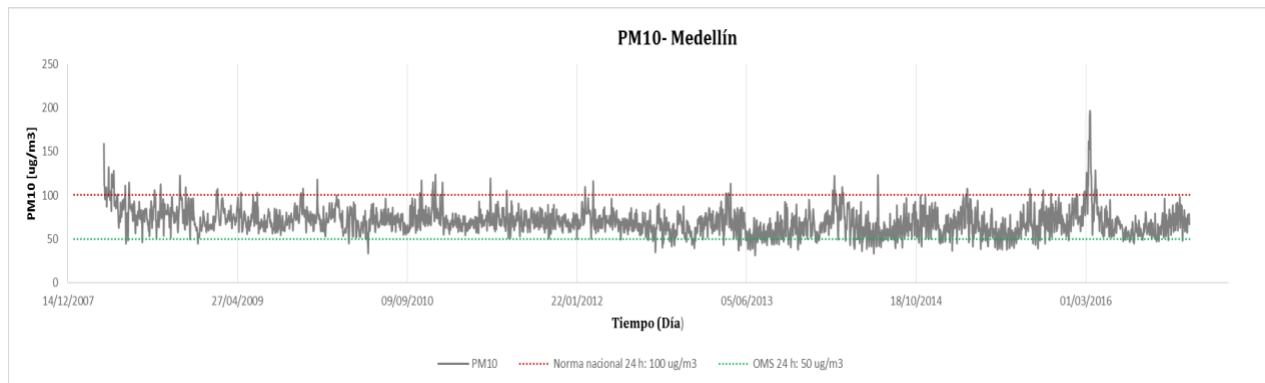


Figura 28. Serie de tiempo combinada de PM₁₀ en Medellín entre 2008 y 2016.

A continuación, se muestran las gráficas de las series combinadas, las cuales fueron utilizadas en el análisis de las tendencias de contaminantes en el Valle de Aburrá,

4.2.3.1 Barbosa

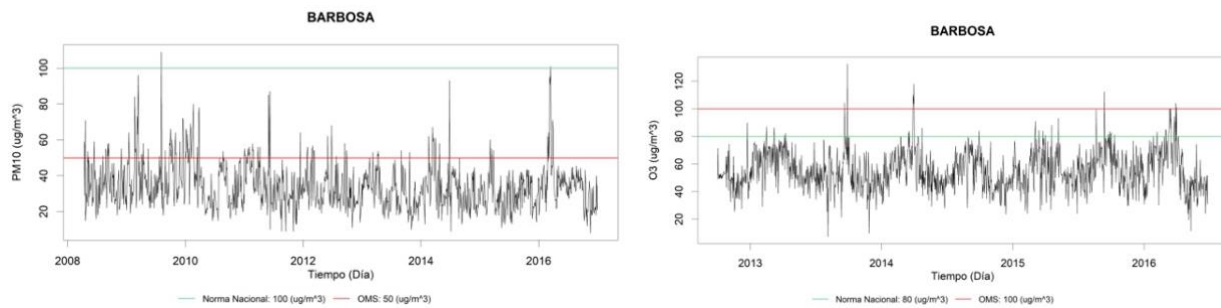


Figura 29. Series de contaminantes a analizar en el municipio de Barbosa





4.2.3.2 Bello

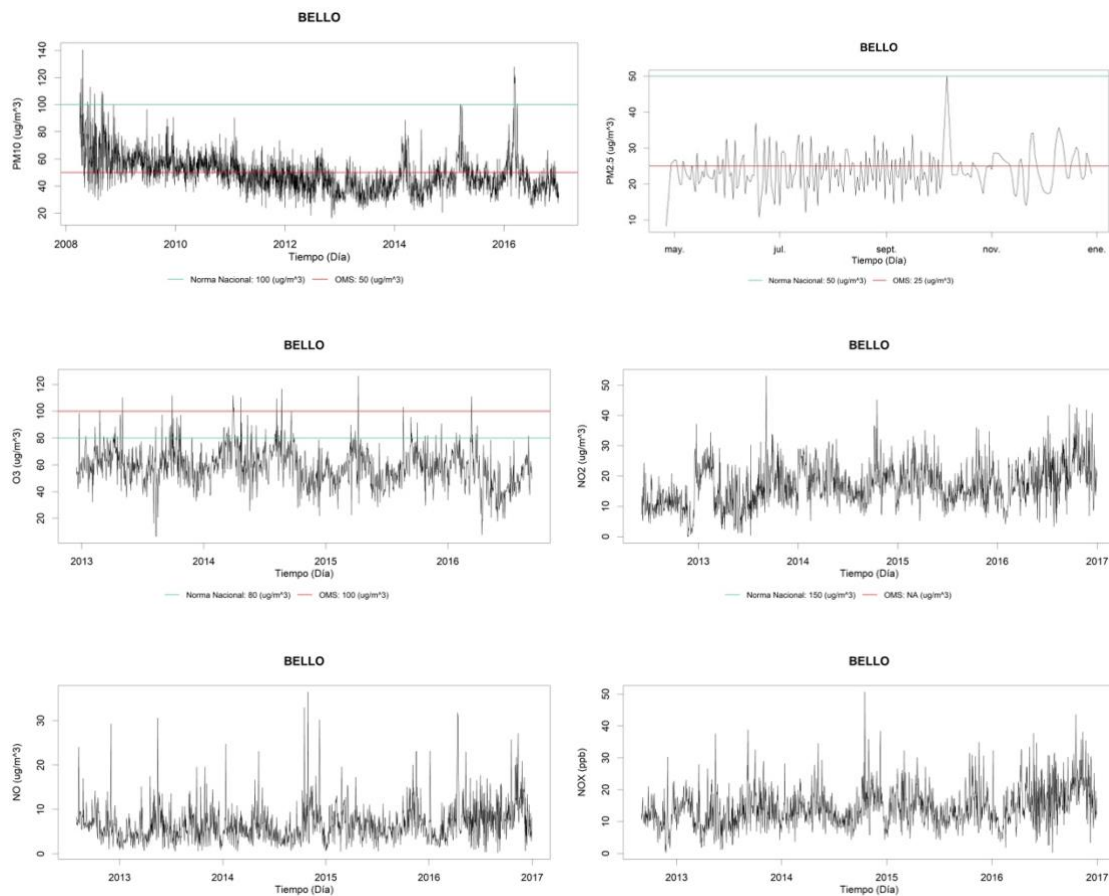


Figura 30. Series de contaminantes a analizar en el municipio de Bello





4.2.3.3 Caldas

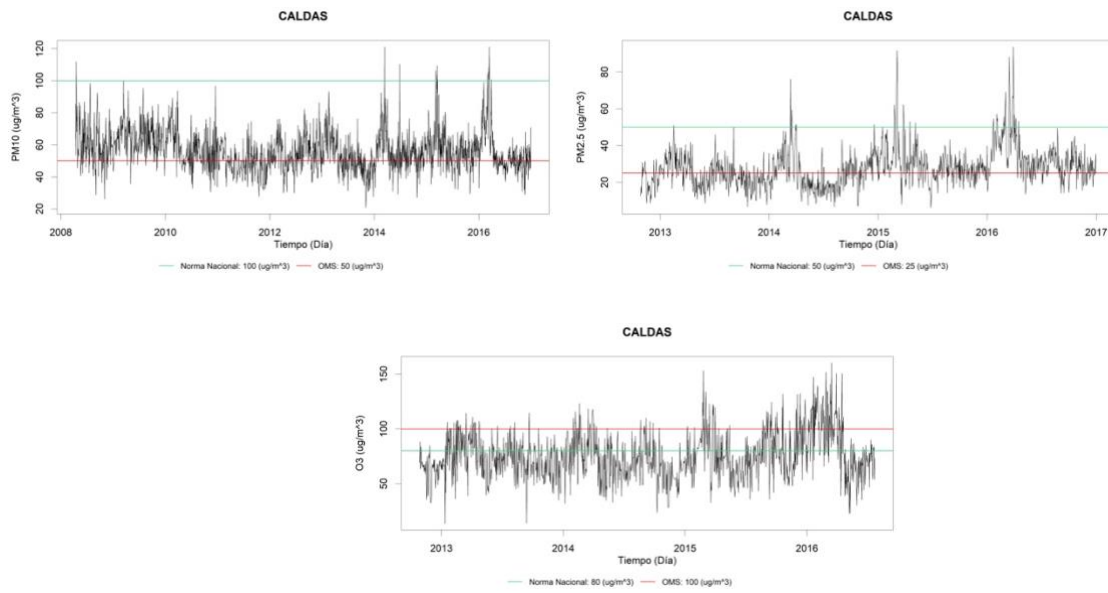


Figura 31. Series de contaminantes a analizar en el municipio de Caldas

4.2.3.4 Copacabana

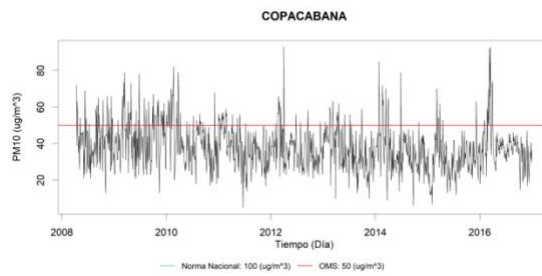


Figura 32. Series de contaminantes a analizar en el municipio de Copacabana





4.2.3.5 Envigado

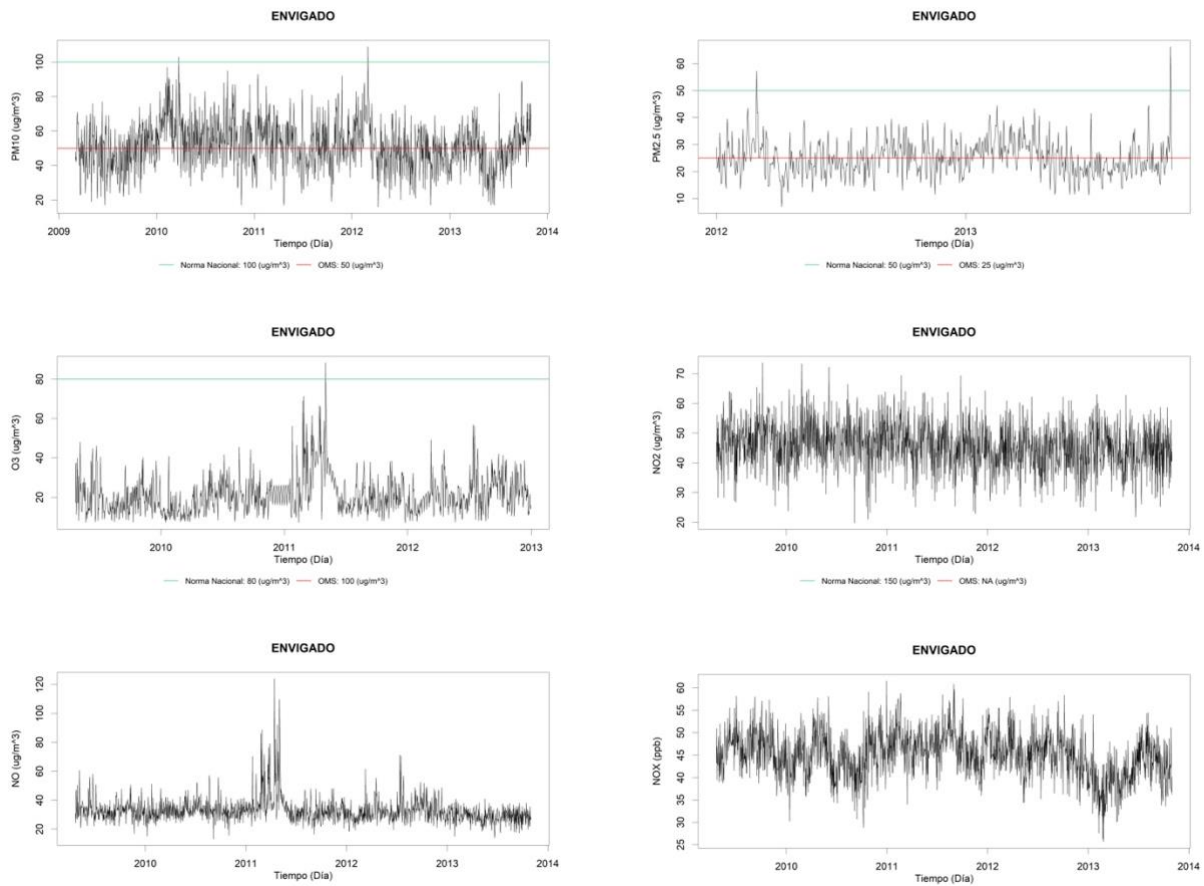


Figura 33. Series de contaminantes a analizar en el municipio de Envigado





4.2.3.6 Girardota

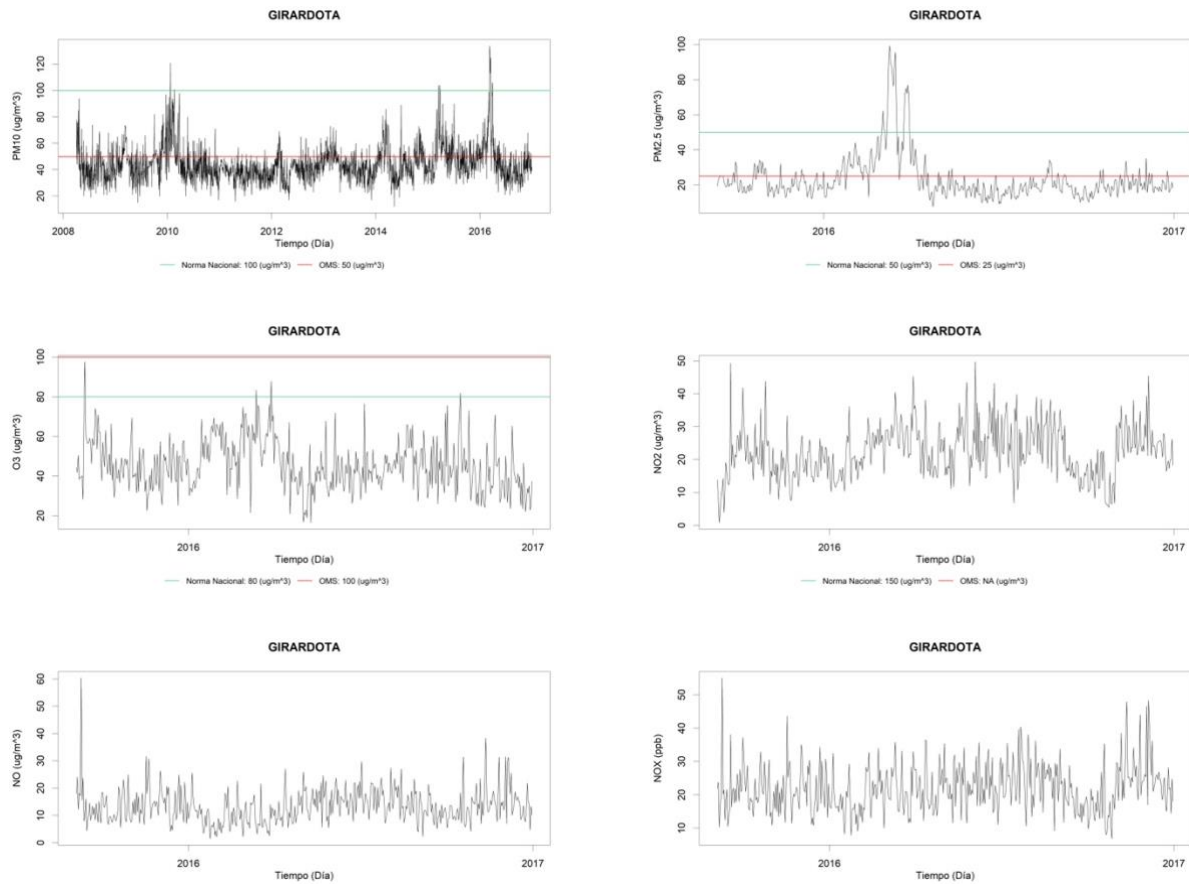


Figura 34. Series de contaminantes a analizar en el municipio de Girardota





4.2.3.7 Itagüí

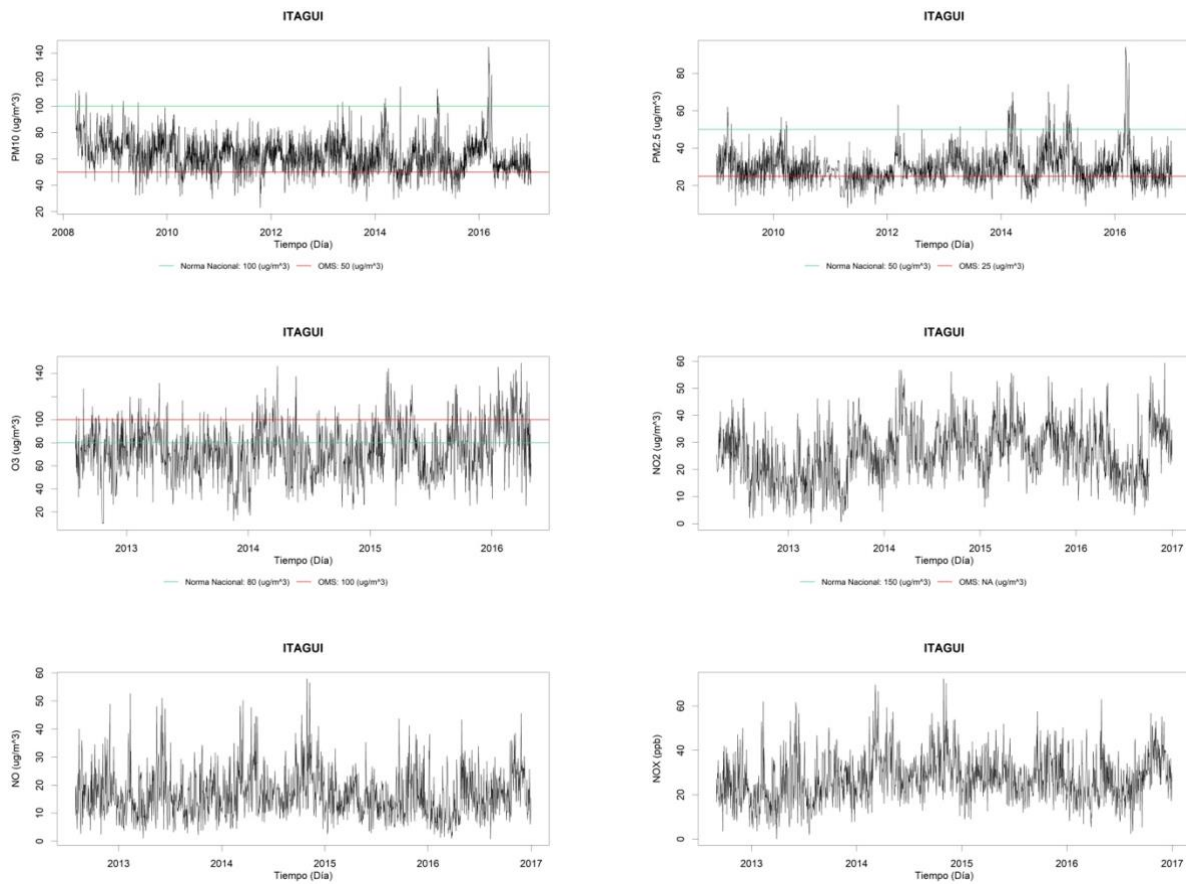


Figura 35. Series de contaminantes a analizar en el municipio de Itagüí





4.2.3.8 La Estrella

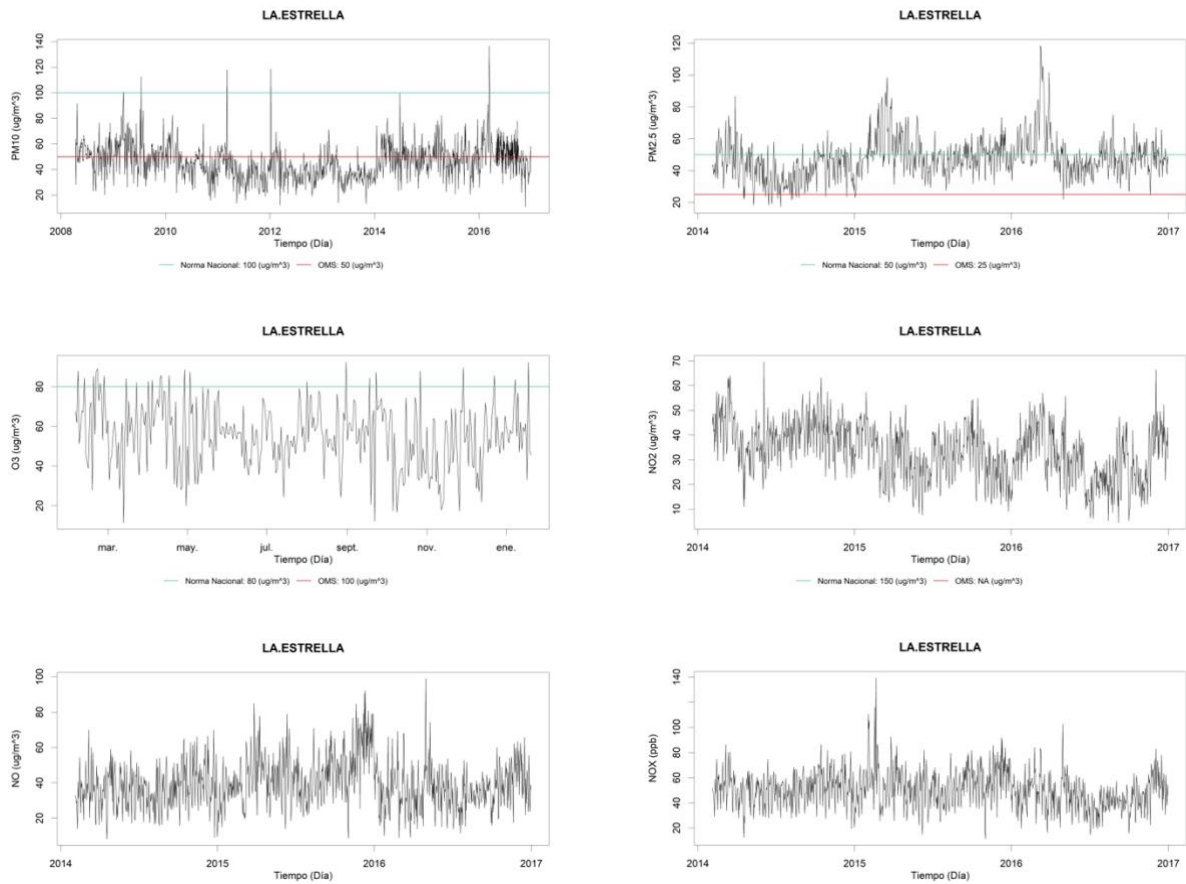


Figura 36. Series de contaminantes a analizar en el municipio de La Estrella





4.2.3.9 Medellín

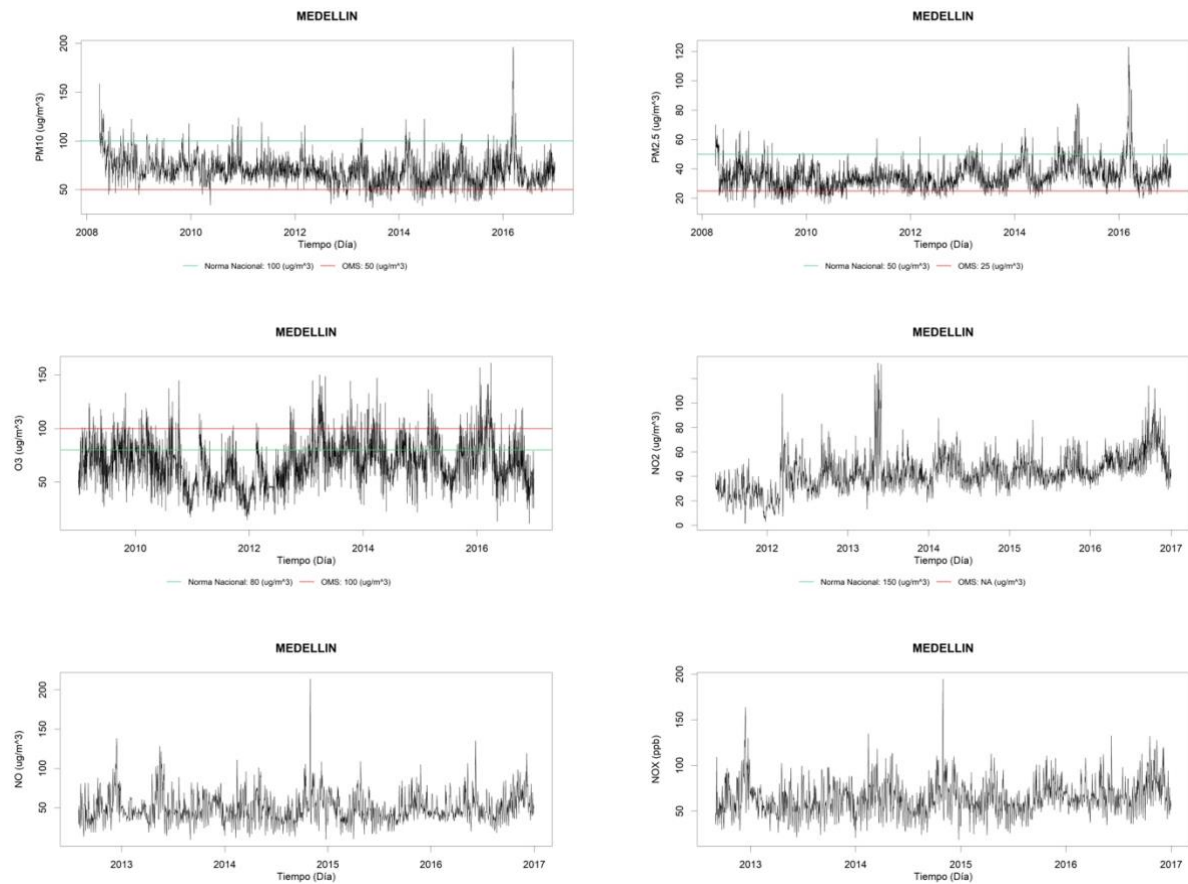


Figura 37. Series de contaminantes a analizar en el municipio de Medellín

4.2.3.10 Sabaneta

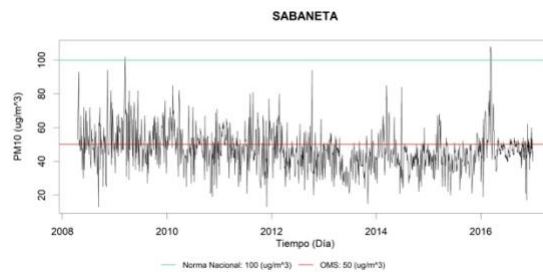


Figura 38. Series de contaminantes a analizar en el municipio de Sabaneta





4.3 ANÁLISIS EXPLORATORIOS DE LAS SERIES ENSAMBLADAS

El presente apartado implicó la realización de un análisis exploratorio del comportamiento de los contaminantes, utilizando para ello: estadísticos descriptivos, análisis de promedios de concentración de los contaminantes por semana, meses y años y finalmente un análisis de excedencias de los mismos durante el periodo de estudio. A continuación, se presenta cada uno de los elementos mencionados en los municipios objeto de estudio.

4.3.1 Barbosa

4.3.1.1 Estadísticos descriptivos para Barbosa

Al evaluar la desviación estándar en cada contaminante del municipio de Barbosa (Tabla 20), se observa que para O₃ dicho estadístico es mayor que para PM₁₀, lo cual indica que hay una mayor variabilidad y menor uniformidad en los registros del primero. Por otro lado, los valores mínimos para los dos contaminantes no sobrepasan los 8 µg/m³, mientras que entre los valores máximos registrados, los contaminantes sobrepasan los límites máximos permisibles diarios y octohorarios, respectivamente, establecidos en la norma nacional (33) e internacional (34).

Tabla 20. Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Barbosa

Contaminante	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Primer cuartil	Tercer cuartil
PM ₁₀ (µg/m ³)	33.898	32.330	11.726	8.000	109.000	25.670	39.738
O ₃ (µg/m ³)	55.462	53.825	14.144	7.352	132.541	45.885	65.127

En la **Figura 39** se puede observar que para PM₁₀ se presenta una leve asimetría relacionada con la basta presencia de valores atípicos, de los cuales, cierta cantidad se encuentra por encima del límite máximo permisible establecido en la normativa colombiana de 100 µg/m³ (diario).

Para la serie de O₃ se observa un sesgo a la derecha, indicando que las concentraciones comprendidas entre el 50% y el 75% de la serie están ligeramente más dispersas que entre el 25% y el 50%. Esto implica que a la derecha del cuartil 2 (mediana) hay más valores separados de la media. Además, los valores atípicos o *outliers* se encuentran muy por encima del límite máximo permisible establecido en la normativa colombiana de 80 µg/m³ (octohorario).





Por otro lado, al evaluar los cuartiles de los diagrama de cajas y bigotes (**Tabla 20**) se puede inferir que el 75% de los datos de los contaminantes (tercer cuartil) se encuentra por debajo del límite máximo diario (octohorario para O₃) permisible tanto para la norma nacional como la internacional.

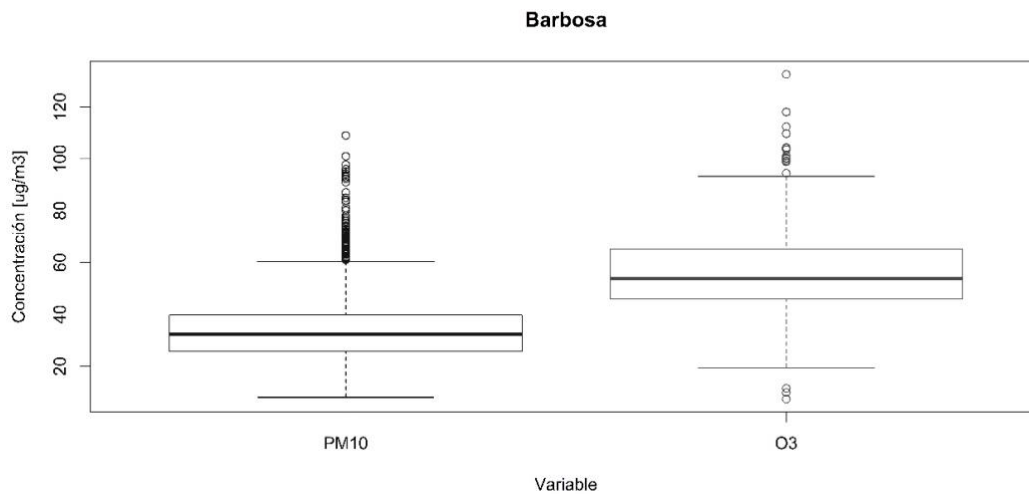


Figura 39.Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM₁₀ y O₃ del municipio de Barbosa

4.3.1.2 Promedios semana, mensual y anual para el municipio de Barbosa

Se puede observar que para PM₁₀ el máximo promedio anual se presentó en el año 2009 y en 2013 para O₃ (**Figura 40**); para el primer contaminante, éste valor no sobrepasa la norma anual establecida en Colombia (50 µg/m³), sin embargo, sí incumple la norma internacional (20 µg/m³) durante todos los años evaluados. Los mayores picos de concentración de PM₁₀ se presentan en los meses de marzo y abril, sin embargo, para O₃ se observa un segundo pico en los meses septiembre y octubre, asociados al periodo de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá relacionado con la estacionalidad climática de la región (**Figura 41**). En general, se observa que los domingos se presentan las menores concentraciones para ambos contaminantes con una tendencia de aumento en los promedios entre los días jueves y sábado (**Figura 42**); esto puede estar asociado con la circulación de vehículos, la cual es menor los domingos.



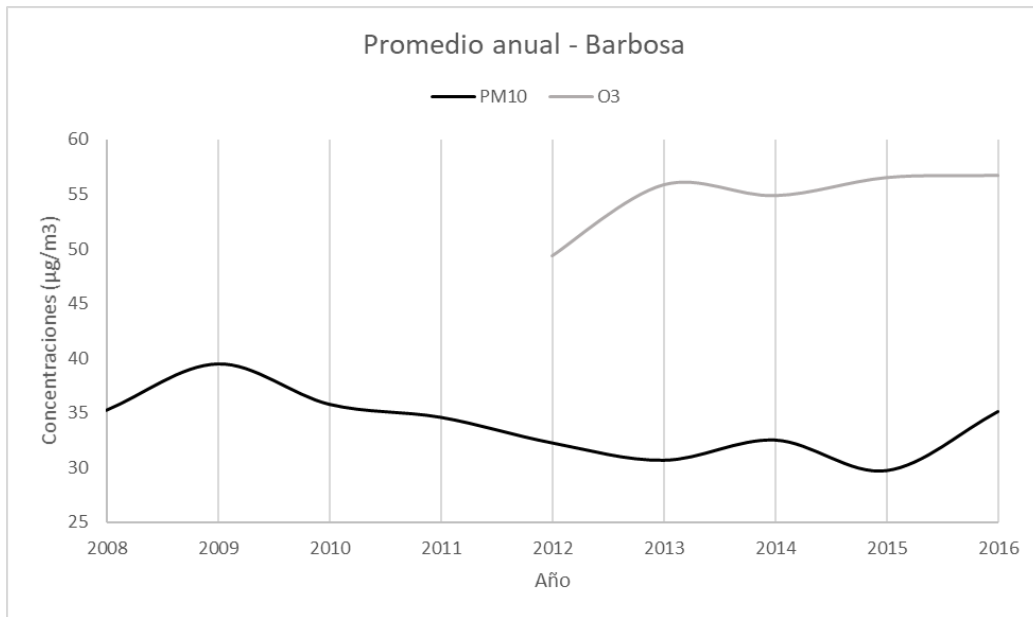


Figura 40. Promedios anuales para las series de PM₁₀ y O₃ del municipio de Barbosa

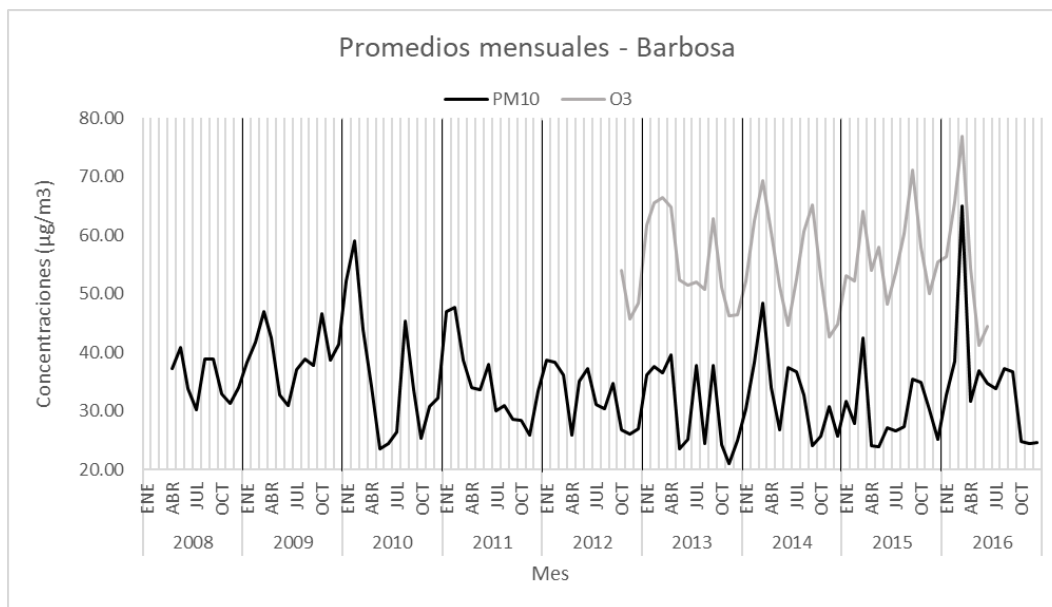


Figura 41. Promedios mensuales para cada año en las series de PM₁₀ y O₃ del municipio de Barbosa



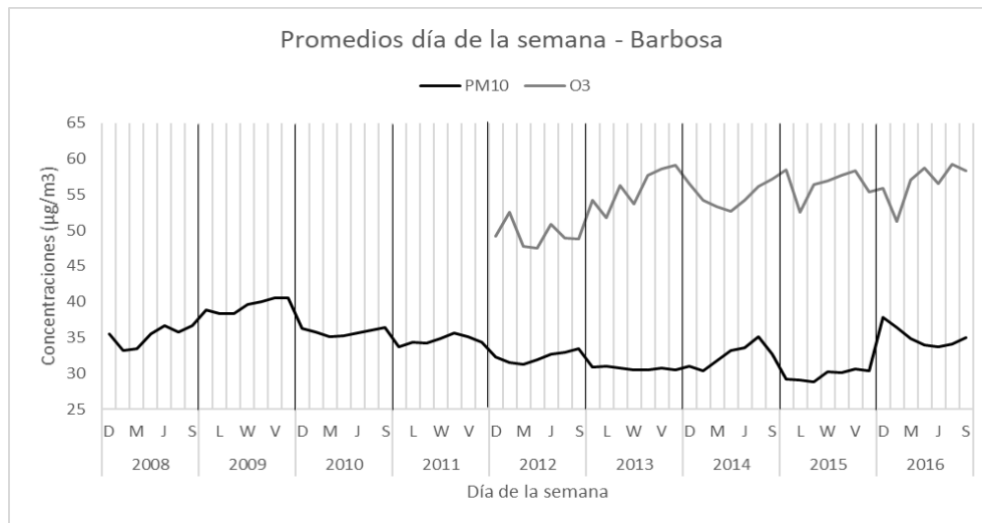


Figura 42. Promedios día de la semana para cada año en las series de PM₁₀ y O₃ del municipio de Barbosa

4.3.13 Excedencias para el municipio de Barbosa

En la Figura 43, las excedencias para PM₁₀ de acuerdo al parámetro internacional, se presentaron durante todos los años de estudio, alcanzando un valor máximo de 19,7% en el año 2009 que equivale a 72 días que excedieron el máximo permitido. El año 2015 presentó el menor porcentaje con un 1,9% para 7 días. Al comparar con la norma colombiana, se presentaron excedencias sólo en los años 2009 y 2016 con valores porcentuales bajos (0,3%) que equivalen a 2 días en total.

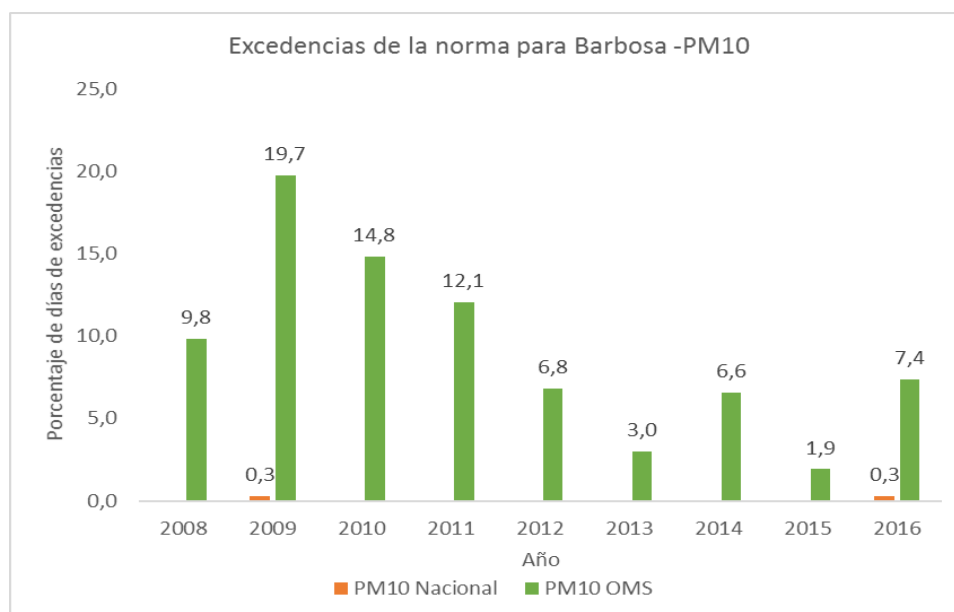


Figura 43. Excedencias de la norma para el contaminante PM₁₀, municipio de Barbosa, en el periodo 2008-2016.





Para el O₃, teniendo en cuenta los parámetros de la OMS, se presentaron excedencias desde el año 2013 al 2016 con un valor porcentual máximo para éste año de 2,2% y un valor mínimo para el 2015 (0,3%). Las excedencias del valor normativo permitido en días equivalen a 11 días en total (**Figura 44**).

De acuerdo a la Resolución 610 de 2010, se observaron excedencias desde al año 2012 al 2016 con un valor porcentual para este mismo año de 9,0%; el valor porcentual mínimo se presentó para el año 2012 (1,1%). Es decir, 50 días en total excedieron el límite normativo permitido durante los años en mención.

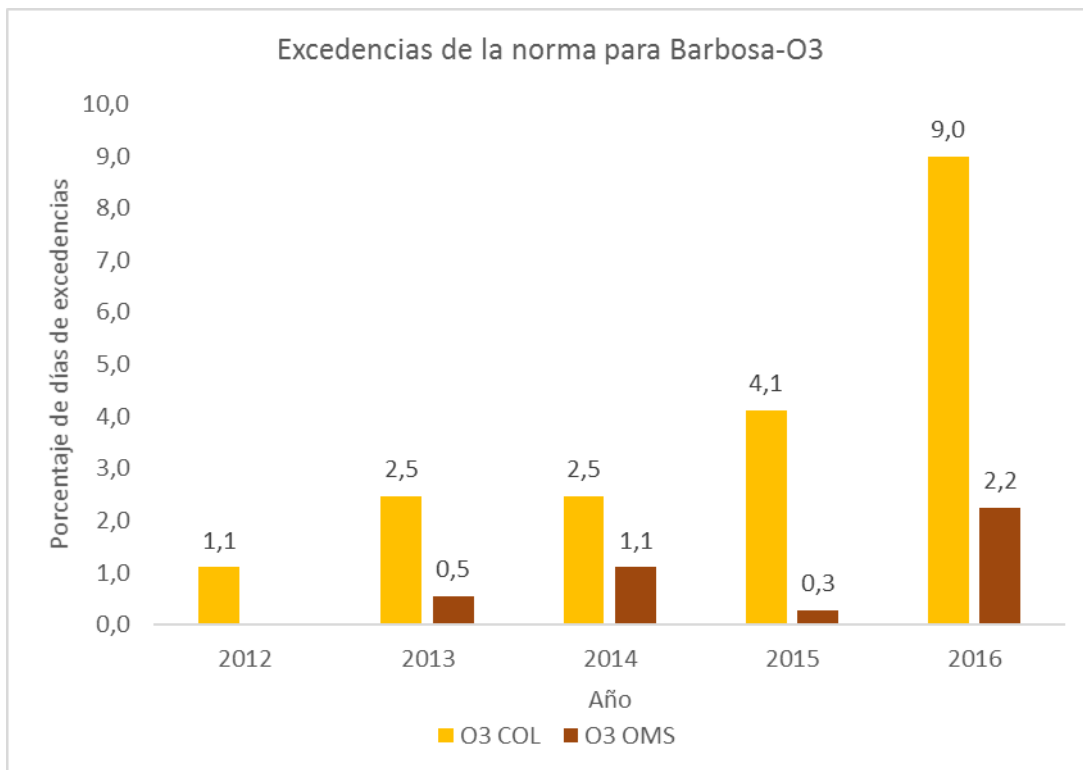


Figura 44.Excedencias de la norma para el contaminante O₃, municipio de Barbosa, en el periodo 2008-2016.

En general, tomando como referencia los lineamientos OMS, en el municipio de Barbosa las mayores excedencias se presentan para PM₁₀ en todos los años correspondientes al periodo de observación, las de O₃ se presentaron en menores valores porcentuales.

4.3.2 Bello

4.3.2.1 Estadísticos descriptivos para Bello

Al evaluar la desviación estándar en cada contaminante del municipio de Bello (**Tabla 21**), se observa el mayor valor es para O₃, seguido por PM₁₀, lo cual indica que hay una mayor variabilidad y menor





uniformidad en los registros de estos contaminantes. Por el contrario, la serie que presenta menor variabilidad con respecto a la media es la de NO.

Por otro lado, los valores mínimos para todos los contaminantes no sobrepasan los $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.208 ppb para NO_x), mientras que los valores máximos registrados de los contaminantes, PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ sobrepasan el límite diario máximo permisible de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para los dos primeros, y el límite octohorario de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el tercero, establecidos en la norma nacional (33).

Tabla 21. Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Bello

Contaminante	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Primer cuartil	Tercer cuartil
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	49.153	47.320	13.867	16.214	140.607	39.850	56.347
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	23.843	22.920	5.510	8.300	50.000	20.328	27.020
O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	58.755	58.279	14.506	6.393	126.393	49.672	67.377
NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	17.065	16.386	6.964	0.000	53.077	12.231	21.671
NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	6.757	6.038	4.128	0.240	36.461	3.999	8.443
NO _x (ppb)	14.457	13.500	6.069	0.208	50.667	10.375	17.804

En la **Figura 45** se puede observar que los contaminantes presentan una leve asimetría relacionada con la basta presencia de valores atípicos, exceptuando el PM_{2.5}, el cual presenta un sesgo a la derecha, indicando que las concentraciones comprendidas entre el 50% y el 75% de la serie están ligeramente más dispersas que entre el 25% y el 50%. Esto implica que a la derecha hay más valores separados de la media.

Por otro lado, al evaluar los cuartiles de los diagrama de cajas y bigotes (**Tabla 21**) se puede inferir que el 75% de los datos de todos los contaminantes (tercer cuartil) se encuentra por debajo del límite máximo diario permisible; sin embargo, al comparar dichos valores con las Guías de la OMS (34), se observa que para PM₁₀ y PM_{2.5}, parte del 75% de los datos se encuentra por encima del umbral internacional.

Es importante mencionar que para PM₁₀ y O₃ los valores atípicos u *outliers* se encuentran muy por encima del límite máximo permisible establecido en la normativa colombiana de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (diario) y $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (octohorario), respectivamente. Particularmente, para el contaminante NO₂ no existen valores que sobrepasen la norma nacional diaria de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



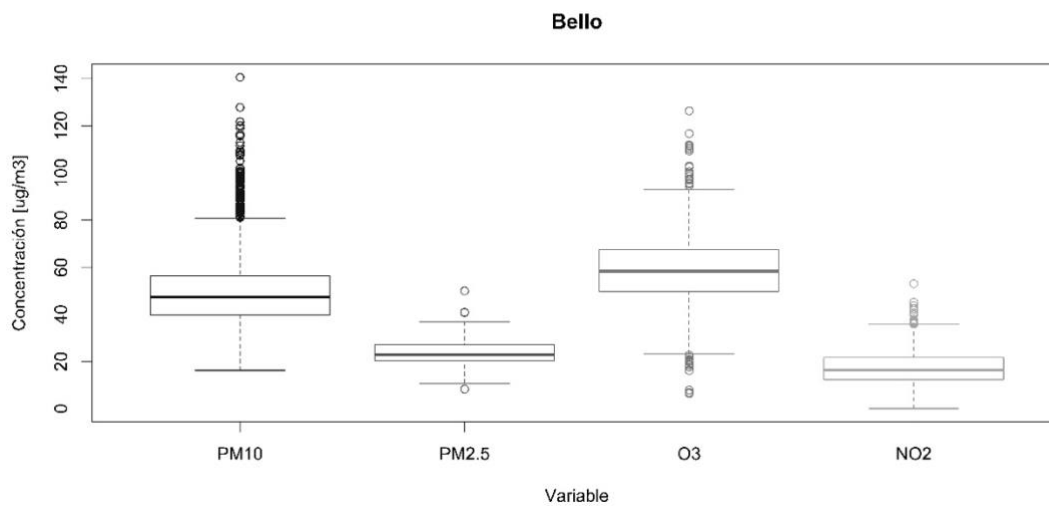


Figura 45. Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ y NO₂ del municipio de Bello

4.3.2.2 Promedios semana, mensual y anual para el municipio de Bello

Se puede observar que para PM₁₀ el máximo promedio anual se presentó en el año 2008, así mismo, éste presentó un descenso, alcanzando un promedio anual mínimo en el año 2013; sin embargo, desde el 2013 comenzaron aumentar dichos valores (Figura 46). Al comparar los valores con los límites máximos permisibles anuales, se observa que los niveles sobrepasan la norma nacional (50 µg/m³) en los años 2008, 2009 y 2010, y la norma internacional (20 µg/m³) durante todos los años evaluados. Por otro lado, para O₃ el valor máximo se presentó en el año 2014 con disminución en las concentraciones promedio a partir del mismo año. Para PM_{2.5} sólo se tiene un año de registro, en el cual se presentó un promedio anual de 23.8 µg/m³, el cual sobrepasa la norma internacional, sin incumplir el umbral de la norma nacional.



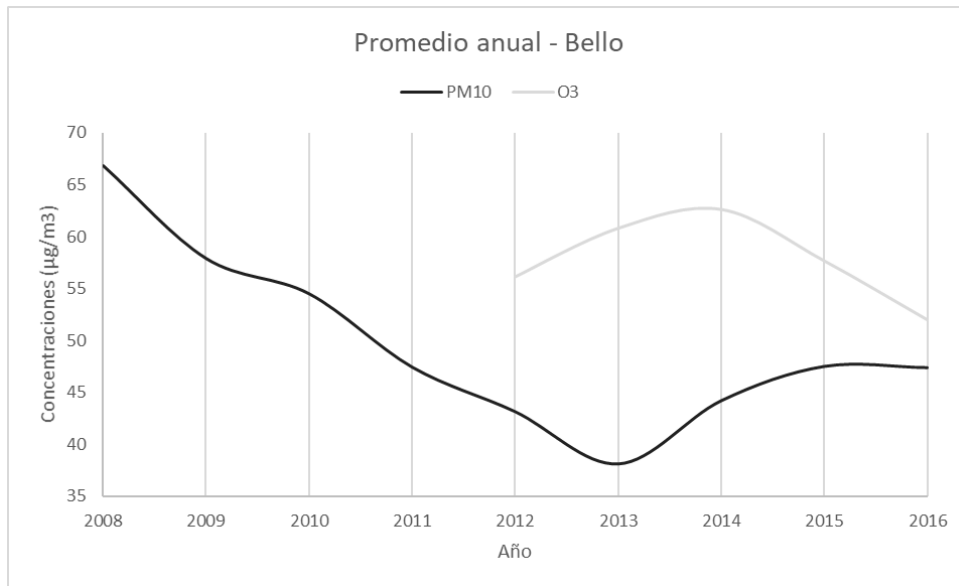


Figura 46. Promedios anuales para las series de PM₁₀ y O₃ del municipio de Bello

Los mayores picos de concentración de PM₁₀ se presentan en los meses de marzo, abril, septiembre y octubre, con un incremento en los niveles desde el año 2014. Para O₃ se observan los picos en el mismo periodo que para PM₁₀, en donde los valores máximos se presentaron en el año 2014. Por otro lado, para PM_{2.5} sólo se observa un pico entre los meses septiembre y octubre (**Figura 47**). Estos aumentos estacionales en las concentraciones están asociados a las épocas de lluvia del país, las cuales propician condiciones de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá.

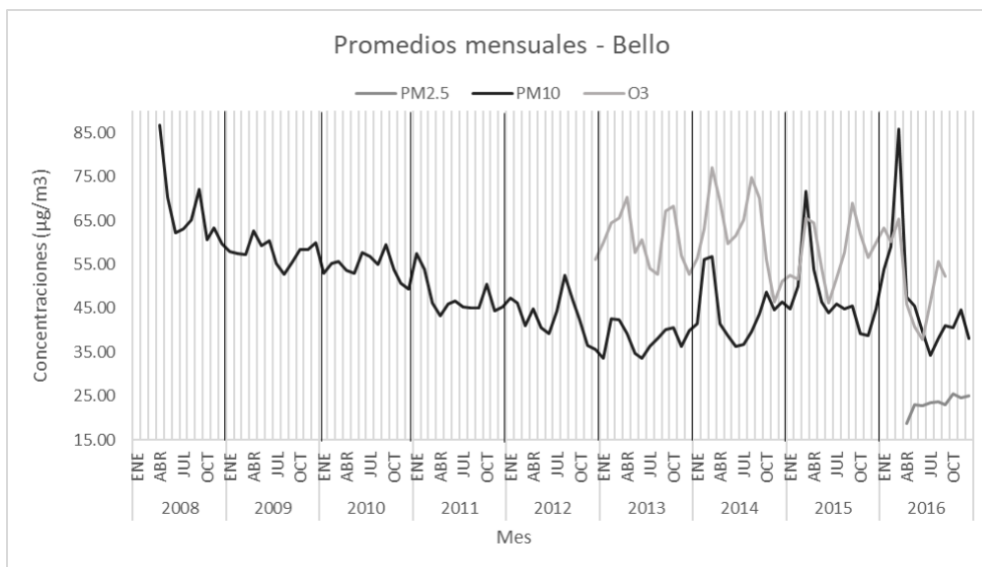


Figura 47. Promedios mensuales para cada año en las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Bello





En general, se observa que los domingos se presentan las menores concentraciones para los contaminantes con una tendencia de aumento en los promedios entre los días jueves y sábado (Figura 48); esto puede estar asociado con la circulación de vehículos la cual es menor los domingos.

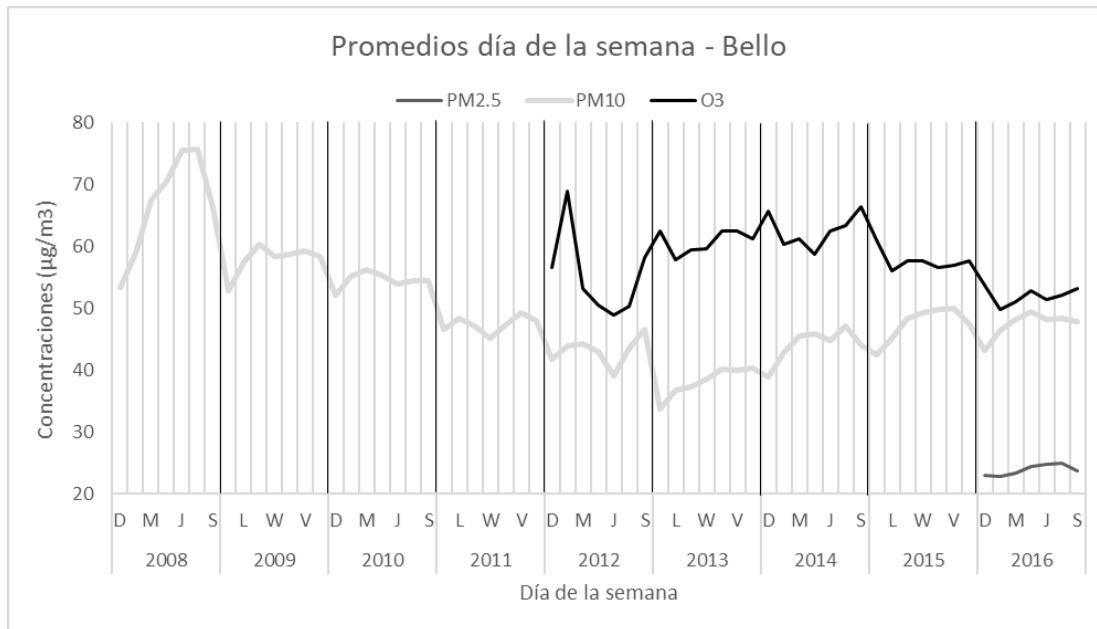


Figura 48. Promedios día de la semana para cada año en las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Bello

4.3.2.3 Excedencias para el municipio de Bello

Durante el periodo de análisis de PM₁₀ de acuerdo a la norma internacional, éste presenta excedencias durante todo el periodo de estudio, destacándose un mayor porcentaje de ellas en el año 2009 con un 81,9%; es decir, 1341 días excedieron el máximo permitido (50µg/m³diario) durante todo el periodo de estudio. Se puede observar una considerable disminución del porcentaje de excedencias entre los años 2011 y 2013 (Figura 49).

Teniendo en cuenta la normatividad colombiana, sólo los años 2008 (5,1%), 2015 (0,3%) y 2016 (2,5%) presentaron excedencias de PM₁₀, las cuales son mucho menores si se compara con los valores porcentuales de la normatividad internacional. Estas excedencias equivalen a un total de 24 días durante todo el periodo de estudio.

Para PM_{2.5} sólo se presentaron excedencias en el año 2016 y con valores del 40% y 0,4% de acuerdo a la normatividad internacional y nacional respectivamente.



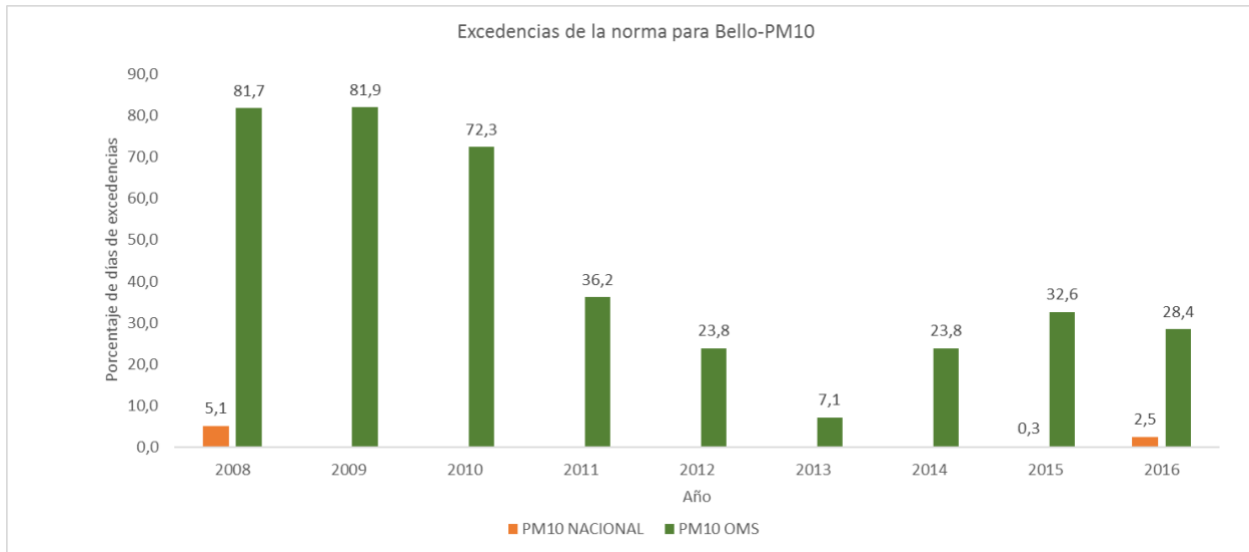


Figura 49.Excedencias de la norma para el contaminante PM₁₀, municipio de Bello, en el periodo 2008-2016.

En el caso del O₃ de acuerdo a la reglamentación internacional, se presentan excedencias a partir del año 2013 las cuales representan porcentajes relativamente bajos si se comparan con la norma Colombiana; es decir, 90 días durante todo el tiempo de estudio excedieron el máximo permitido (80 µg/m³ octohorario) según la Resolución 610 de 2010 y 11 días en total excedieron el máximo permitido de acuerdo a los criterios OMS (Figura 50).

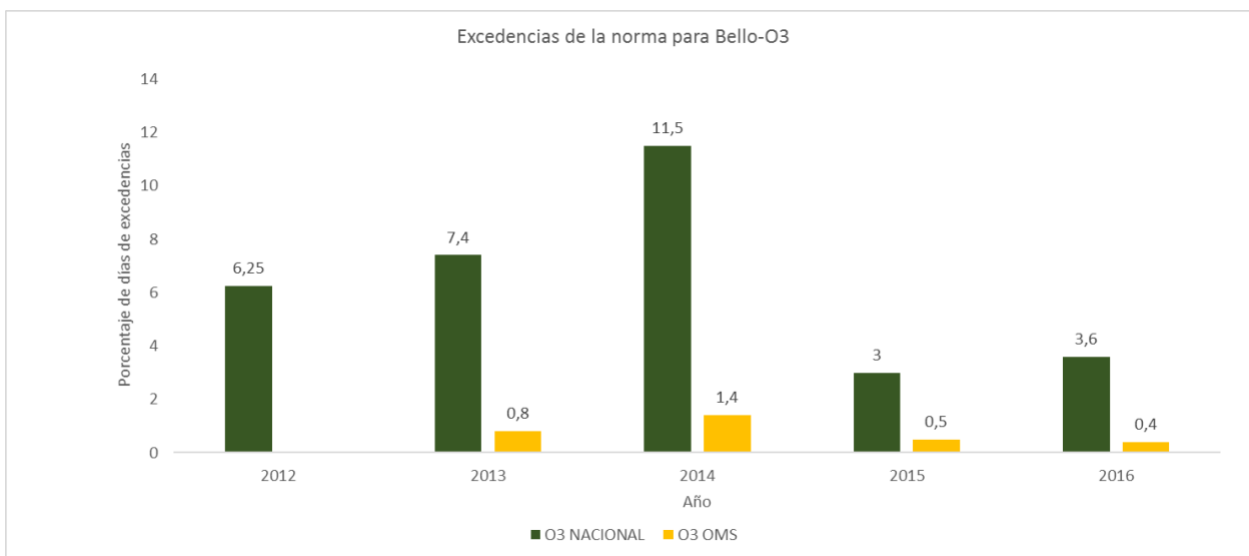


Figura 50.Excedencias de la norma para el contaminante O₃, municipio de Bello, en el periodo 2008-2016.

Entre los tres contaminantes evaluados, el mayor número de excedencias de la norma colombiana se presentó para O₃ en el año 2014, con un 11,5%, por otro lado, de acuerdo a los parámetros de la OMS, la mayor excedencia se presentó para PM₁₀ alcanzando un valor máximo en el año 2009 (81,9%).





4.3.3 Caldas

4.3.3.1 Estadísticos descriptivos para Caldas

Al evaluar la desviación estándar en cada contaminante del municipio de Caldas (**Tabla 22**), se observa el mayor valor es para O_3 , seguido por PM_{10} , lo cual indica que hay una mayor variabilidad y menor uniformidad en los registros de estos contaminantes. Por el contrario, la serie que presenta menor variabilidad con respecto a la media es la de $PM_{2.5}$.

Por otro lado, los valores mínimos para todos los contaminantes no sobrepasan los $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que entre los valores máximos registrados, los tres contaminantes disponibles para este municipio sobrepasan el límite máximo permisible de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para PM_{10} y $PM_{2.5}$, y el límite octohorario de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para O_3 , establecidos en la norma nacional.

Tabla 22. Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Caldas

Contaminante	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Primer cuartil	Tercer cuartil
PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	56.379	54.996	12.206	20.713	121.157	48.272	62.954
$PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	27.795	26.800	10.273	6.300	93.600	20.950	32.500
O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	75.111	73.033	21.029	13.525	160.328	61.324	87.442

En la **Figura 51** se puede observar que los contaminantes presentan una leve asimetría relacionada con la basta presencia de valores atípicos. Dichos valores se encuentran muy por encima del límite máximo permisible establecido en la normativa colombiana, para los contaminantes $PM_{2.5}$ y O_3 ; sin embargo, al ser comparados con la norma internacional, para todos los contaminantes, los valores atípicos sobrepasan el umbral establecido.

Por otro lado, al evaluar los cuartiles de los diagrama de cajas y bigotes (**Tabla 22**) se puede inferir que el 75% de los datos de PM_{10} (tercer cuartil) se encuentra por debajo del límite máximo diario permisible de la norma nacional; sin embargo, al comparar dichos valores con las Guías de la OMS (34), se observa que para PM_{10} y $PM_{2.5}$, parte del 75% de los datos se encuentra por encima del umbral internacional, contrario al O_3 , cuyos valores no lo sobrepasan.



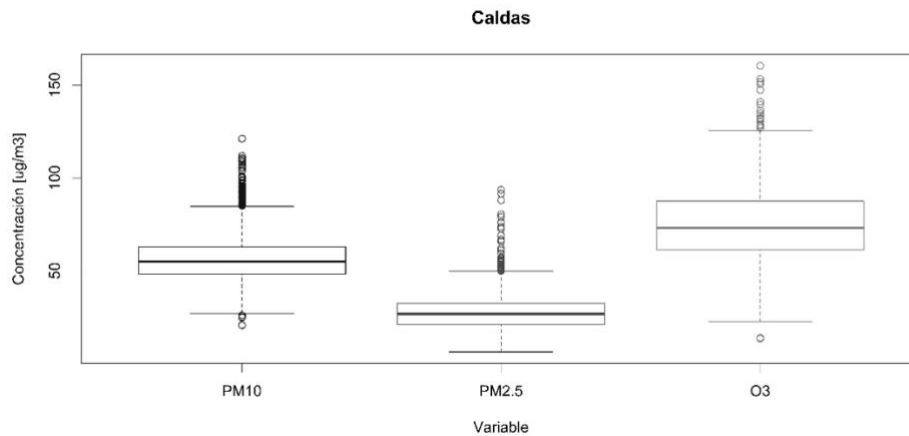


Figura 51. Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Caldas

4.3.3.2 Promedios semana, mensual y anual para el municipio de Caldas

Se puede observar que para PM₁₀ el máximo promedio anual se presentó en el año 2009 (**Figura 52**), año a partir del cual se presentó una disminución paulatina hasta el año 2011, en donde comenzaron a aumentar los promedios anuales. Al comparar dichos valores con los límites máximos permisibles anuales, se observa que los niveles sobrepasan la norma nacional (50 µg/m³) en todos los años, exceptuando el 2011, y la norma internacional (20 µg/m³) durante todos los años evaluados. Por otro lado, para O₃ el valor máximo se presentó en el año 2016.

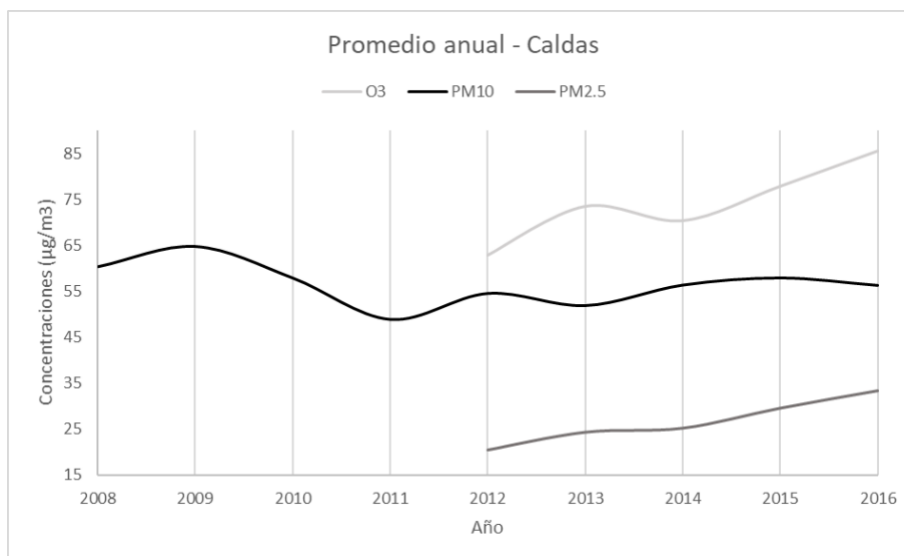


Figura 52. Promedios anuales para las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Caldas





Para $PM_{2.5}$ se presentó en el año 2016, en donde se evidencia que los promedios anuales se han incrementado de manera consistente, lo cual puede estar asociado al hecho que los picos de concentraciones que se presentan en los meses de marzo y abril han incrementado en gran medida (**Figura 53**). Al comparar los promedios anuales con valores con los límites máximos permisibles, se observa que los niveles sobrepasan la norma nacional ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en los años 2014 a 2016, y la norma internacional ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) durante todos los años evaluados.

Los mayores picos de concentración de PM_{10} se presentan en los meses de marzo y abril, con un incremento en los niveles desde el año 2013. Para O_3 se observa además, un segundo pico en los meses de septiembre y octubre, en donde los valores máximos se presentaron en el año 2016 (**Figura 53**). Estos aumentos estacionales en las concentraciones están asociados a las épocas de lluvia del país, las cuales propician condiciones de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá.

En general, se observa que los domingos se presentan las menores concentraciones para los contaminantes con una tendencia de aumento en los promedios entre los días jueves y sábado (**Figura 54**); esto puede estar asociado con la circulación de vehículos la cual es menor los domingos.

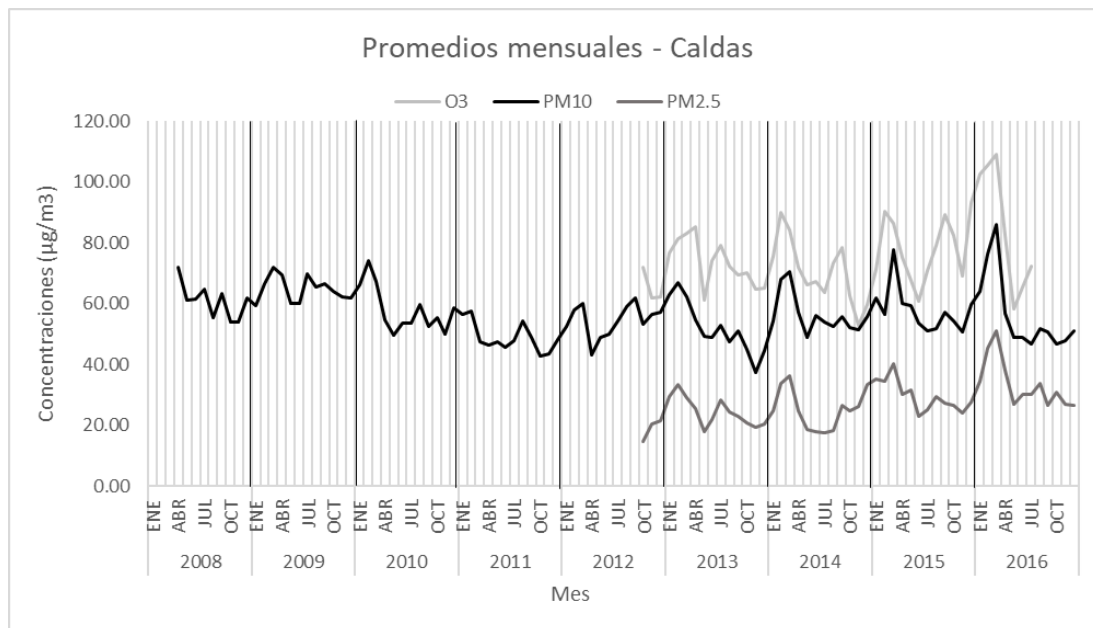


Figura 53. Promedios mensuales para cada año en las series de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y O_3 del municipio de Caldas



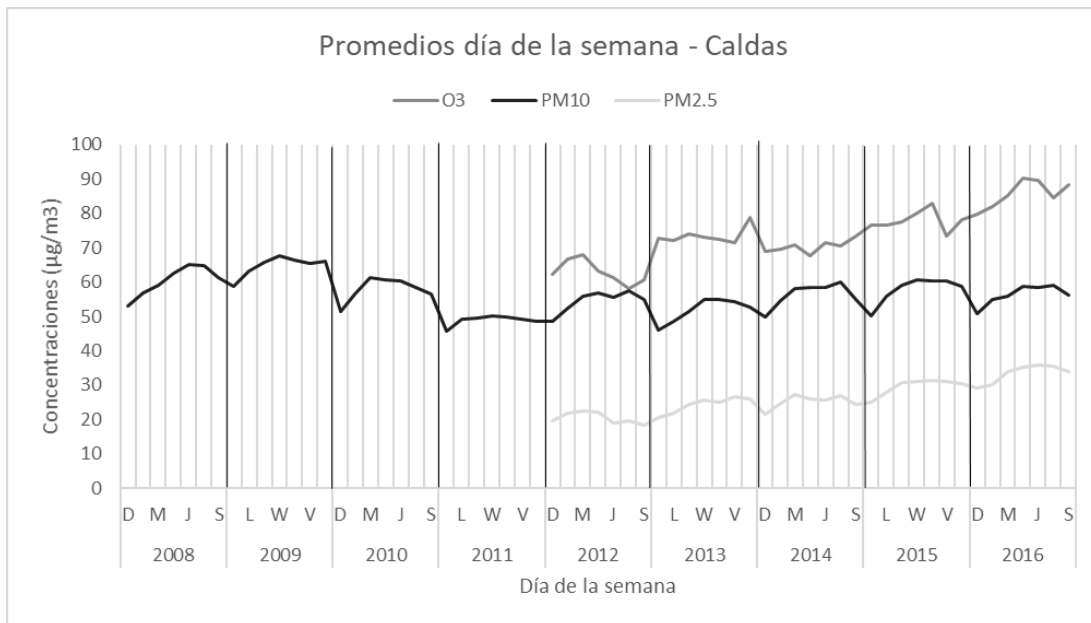


Figura 54. Promedios día de la semana para cada año en las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Caldas

4.3.3.3 Excedencias para el municipio de Caldas

Para el municipio de Caldas, durante el periodo de medición de PM₁₀ se encontró que para todos los años hay días de excedencias de acuerdo a los parámetros de la OMS, sin embargo, de acuerdo a la norma Colombiana, las excedencias se presentaron sólo en el año 2008, 2014 a 2016; es decir, éste contaminante excedió los 100 µg/m³ diarios permitidos en un 0,4%, 0,5%, 1,4% y 2,7% para los 365 días de cada año respectivamente, mostrando un incremento de las excedencias en los últimos tres años.

De acuerdo a los parámetros internacionales la disminución de las excedencias se encontró para los años 2011, 2013 y 2016, siendo el menor valor para el año 2011 (41,6%). Por el contrario, los valores máximos del porcentaje de excedencias en el periodo de registro se presentaron para los años 2008 (81,1%) y 2009 (94,5%).



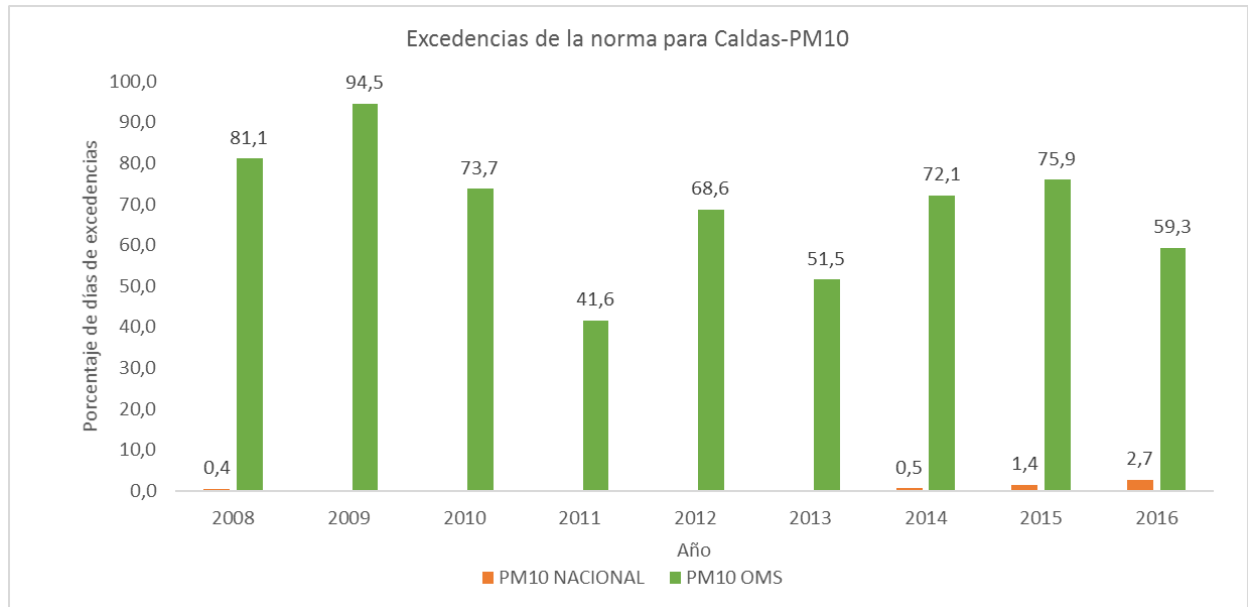


Figura 55.Excedencias de la norma para el contaminante PM₁₀, municipio de Caldas, en el periodo 2008-2016.

Para PM_{2,5}, teniendo en cuenta la norma internacional, se observa un aumento en el porcentaje de excedencias a partir del año 2012, éstas alcanzan una mayor magnitud para el año 2016 (80,6%); ésta misma tendencia ocurre al analizar la normatividad en Colombia, sin embargo, los valores porcentuales de excedencias son menores comparados con los lineamientos OMS; dado que para el año 2016 se encontró un 6,8% (Figura 56).

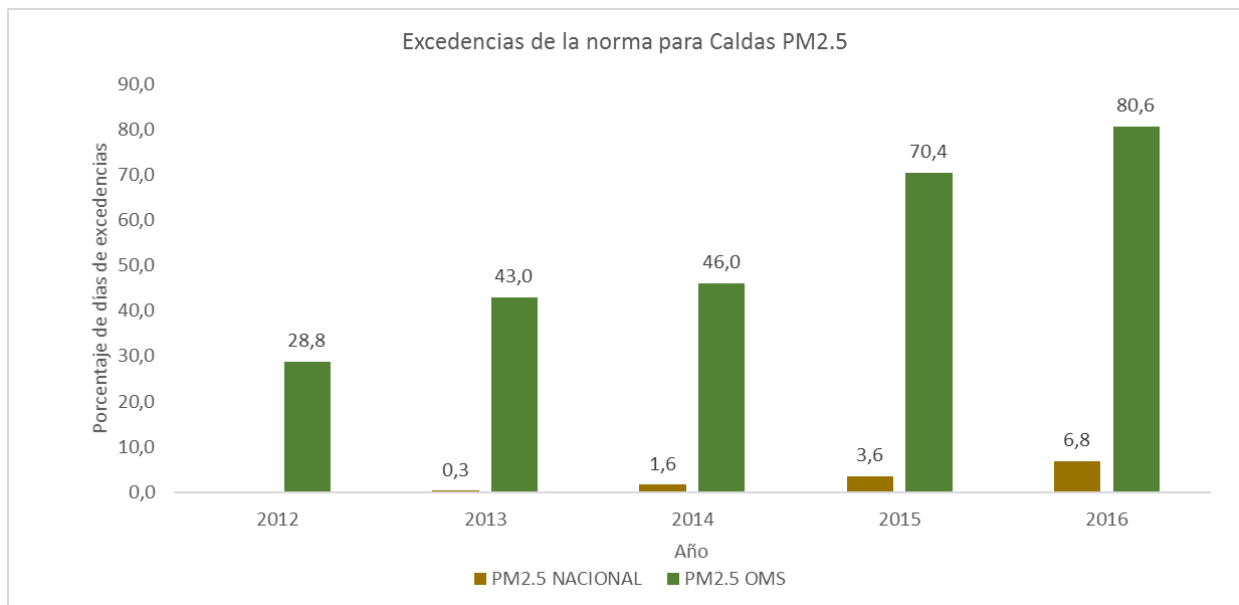


Figura 56.Excedencias de la norma para el contaminante PM_{2,5}, municipio de Caldas, en el periodo 2008-2016.





Dado que la reglamentación en Colombia para el O_3 es más restrictiva (sólo acepta un límite de $80 \mu g/m^3$ para ocho horas), se puede observar un mayor número de porcentaje de excedencias comparada con los valores porcentuales internacionales. Esto demuestra una tendencia marcada al aumento del O_3 en los últimos tres años del periodo de la serie, alcanzando un valor máximo de excedencia de un 51,2% para el año 2016 (Figura 57).

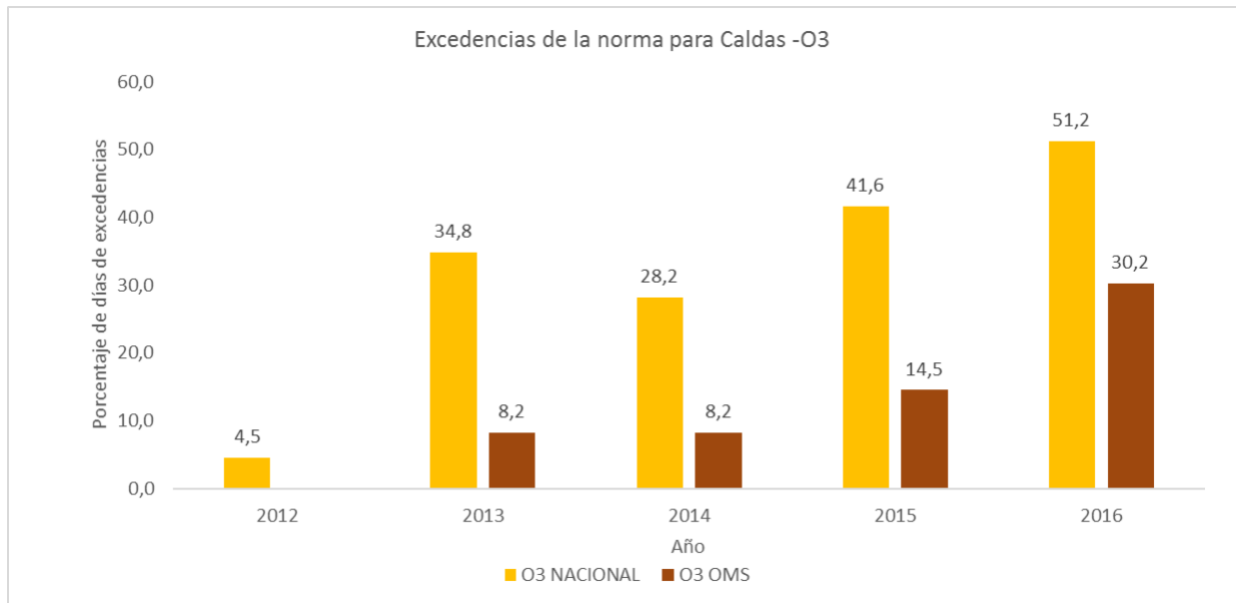


Figura 57.Excedencias de la norma para el contaminante O_3 , municipio de Caldas, en el periodo 2008-2016.

Entre los tres contaminantes evaluados, el mayor número de excedencias de la norma colombiana se presentó para O_3 en el año 2016, con un 51,2%, por otro lado, de acuerdo a los parámetros de la OMS, el mayor porcentaje se dio para PM_{10} en el año 2009, con un 94.5% de excedencias.





4.3.4 Copacabana

4.3.4.1 Estadísticos descriptivos para Copacabana

Al evaluar la desviación estándar de PM_{10} para el municipio de Copacabana (Tabla 23), ésta indica variabilidad de los datos en relación al promedio; el valor mínimo no sobrepasa los $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras, que el máximo registrado sobrepasa el límite establecido por los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ diario).

Tabla 23. Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Copacabana

Contaminante	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Primer Cuartil	Tercer Cuartil
$PM_{10}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	37.791	36.980	11.084	5.000	93.000	30.330	44.000

En la **Figura 58** se puede observar una leve asimetría relacionada con la presencia de valores atípicos, de los cuales todos se encuentran por encima del límite máximo permisible establecido por la OMS.

Al analizar los cuartiles del diagrama de cajas y bigotes (**Tabla 23** y **Figura 58**), se puede inferir que el 75% de los datos de PM_{10} (tercer cuartil) se encuentran por debajo del límite máximo diario permitido tanto para la norma nacional como internacional. El 50% de las concentraciones del contaminante se encuentran dentro de un valor de $13,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (rango intercuartílico).

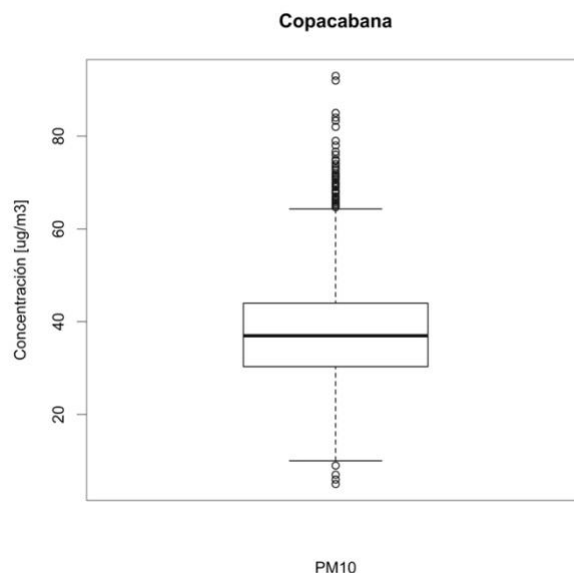


Figura 58. Diagrama de cajas y bigotes para la serie de PM_{10} del municipio de Copacabana





4.3.4.2 Promedios semana, mensual y anual para el municipio de Copacabana

Se puede observar que para PM₁₀ el máximo promedio anual se presentó en el año 2009, año en cual empezó a disminuir el promedio hasta el año 2015, en donde comenzaron a aumentar dichos valores (**Figura 59**). Al comparar dichos valores con los límites máximos permisibles anuales, se observa que los niveles no sobrepasan la norma nacional (50 µg/m³), sin embargo, incumplen la norma internacional (20 µg/m³) durante todos los años evaluados.

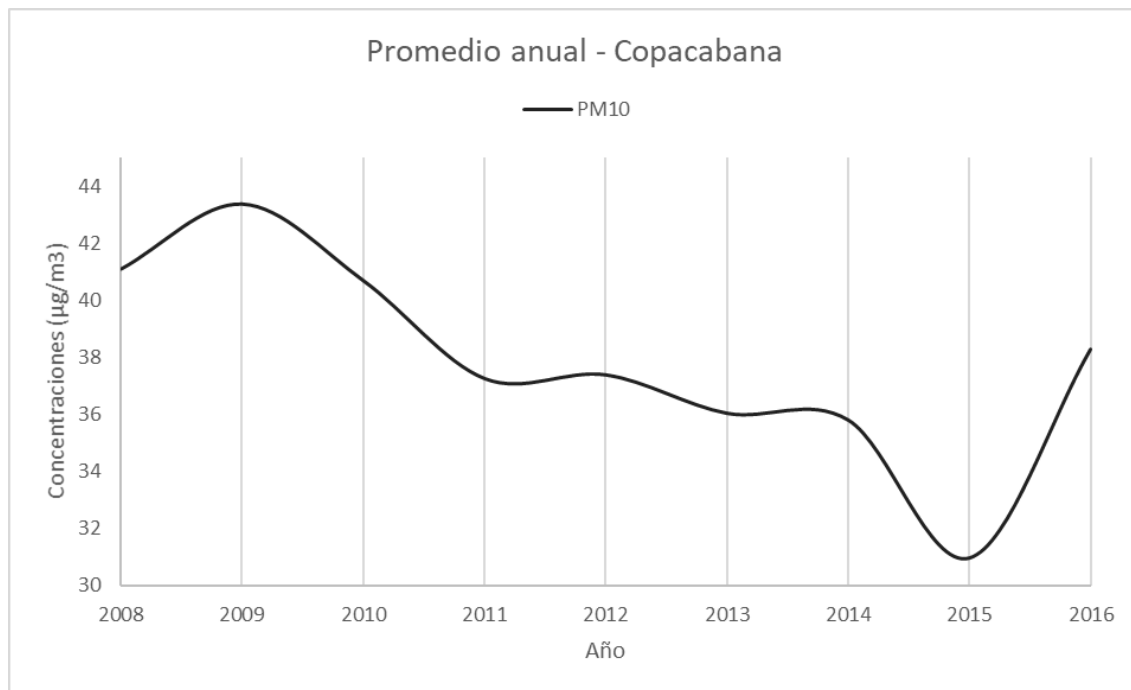


Figura 59. Promedios anuales para la serie de PM₁₀ del municipio de Copacabana

Los mayores picos de concentración de PM₁₀ se presentan en los meses de marzo y abril y septiembre y octubre, siendo más intensos en el primer periodo mencionado, con un incremento general en los niveles desde el año 2014 (Figura 60). Estos aumentos estacionales en las concentraciones están asociados a las épocas de lluvia del país, las cuales propician condiciones de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá.



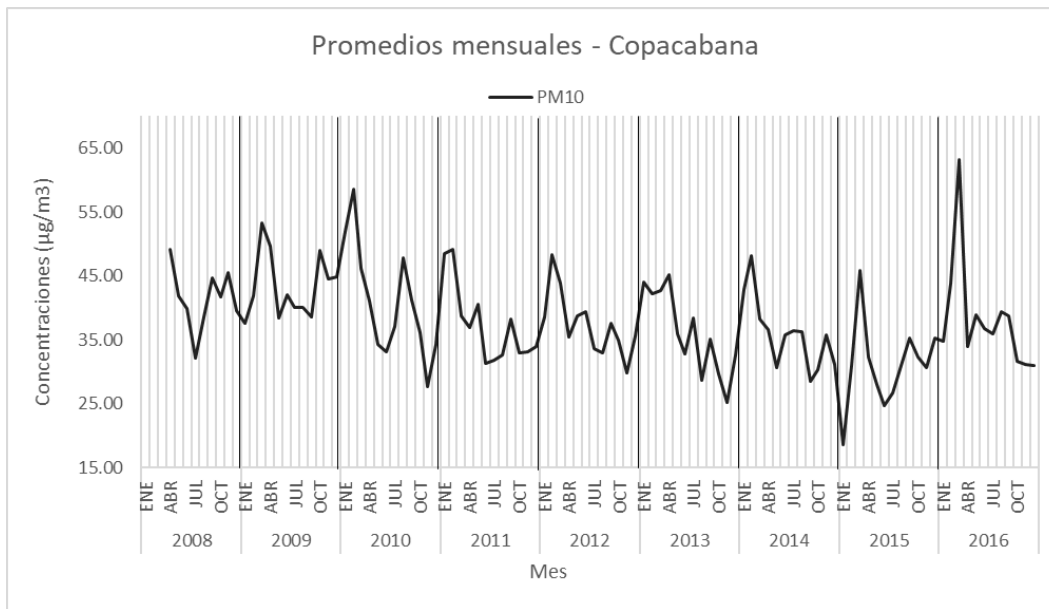


Figura 60. Promedios mensuales para cada año en la serie de PM₁₀ del municipio de Copacabana

En general, se observa que los domingos se presentan las menores concentraciones para los contaminantes con una tendencia de aumento en los promedios entre los días jueves y sábado (**Figura 61**); esto puede estar asociado con la circulación de vehículos la cual es menor los domingos. Es importante mencionar que para el año 2015, el cual representa un “punto de inflexión”, es decir, antes de este año, los niveles presentaron una disminución paulatina, mientras que después comenzaron a aumentar.

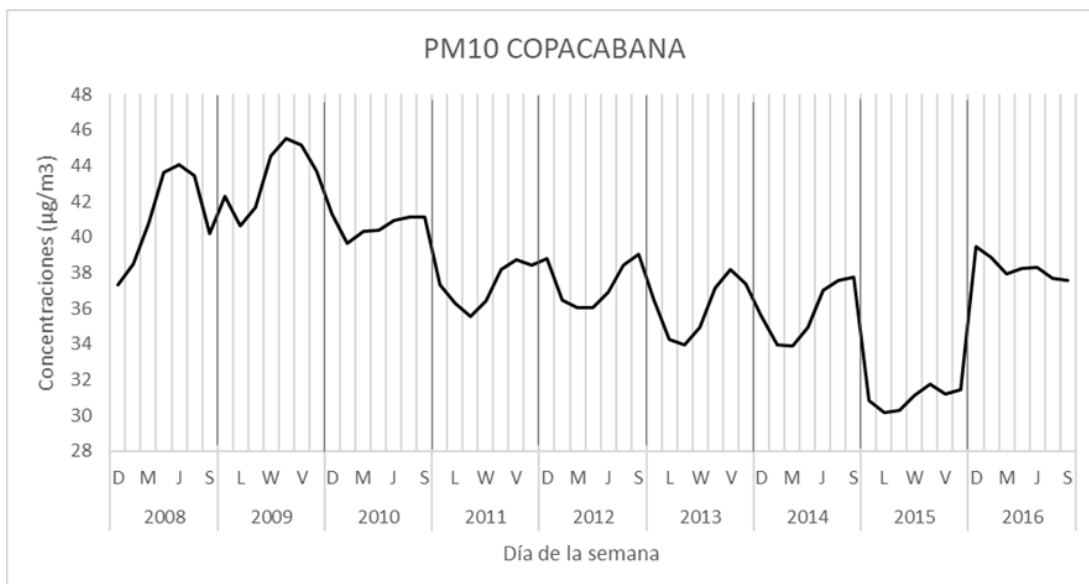


Figura 61. Promedios día de la semana para cada año en la serie de PM₁₀ del municipio de Copacabana





4.3.4.3 Excedencias para el municipio de Copacabana

Las excedencias para PM₁₀, de acuerdo a los lineamientos de la OMS, en el año 2009 se presentó el mayor valor porcentual de excedencias (28,2%) con 103 días que excedieron el límite máximo permitido. El menor valor porcentual se presentó en el año 2015 (4,1%), en el cual 15 días del año excedieron el valor límite permitido.

Respecto a la norma nacional, sólo se presentaron excedencias para los años 2009 y 2016 con un valor porcentual de 0.3% respectivamente, esto equivale a que solo en un día del año se presentaron valores que pasaron el máximo permitido (Figura 62).

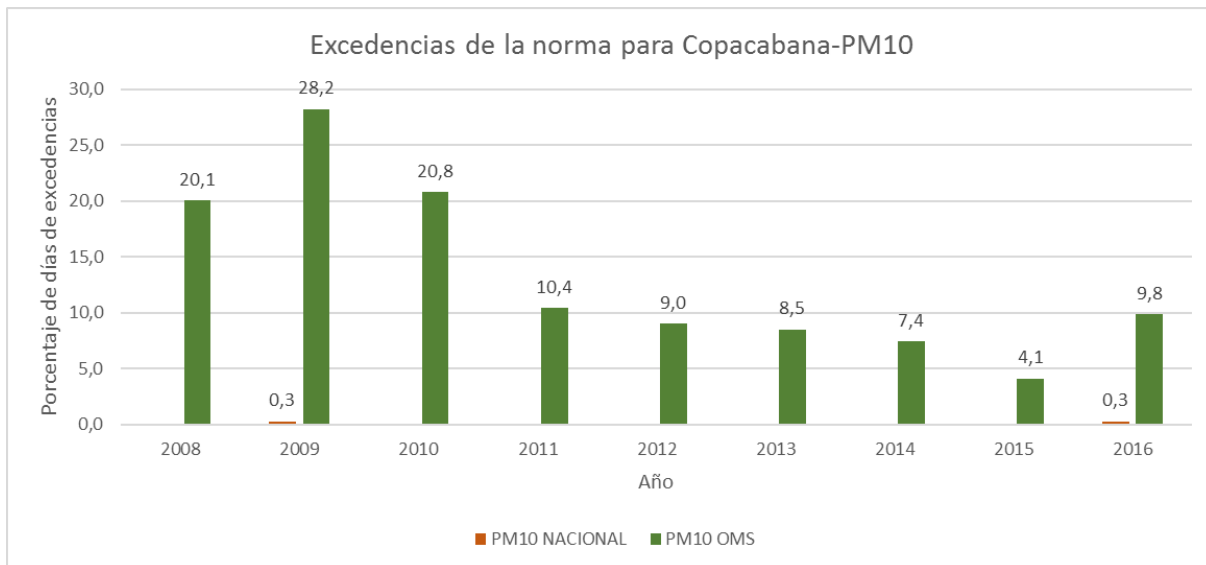


Figura 62 .Excedencias de la norma para el contaminante PM₁₀, municipio de Copacabana, en el periodo 2008-2016.





4.3.5 Envigado

4.3.5.1 Estadísticos descriptivos para Envigado

Al evaluar la desviación estándar en cada contaminante del municipio de Envigado (Tabla 24), se observa una mayor variabilidad para el PM_{10} , por el contrario, la serie que presenta menor variabilidad con respecto a la media corresponde a NO_x . Por otro lado, los valores mínimos para todos los contaminantes no sobrepasan el límite máximo permitido en la norma nacional, mientras que los máximos registrados para PM_{10} y $PM_{2.5}$ exceden el límite permitido de acuerdo a los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud ($50 \mu g/m^3$ y $25 \mu g/m^3$ respectivamente), el O_3 sobrepasa el valor máximo permitido de acuerdo a la Resolución 610 de 2010 ($80 \mu g/m^3$ octohorario).

Tabla 24. Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Envigado.

Contaminante	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Primer Cuartil	Tercer Cuartil
$PM_{10}(\mu g/m^3)$	51.635	51.452	13.369	16.000	109.000	43.000	60.000
$PM_{2.5}(\mu g/m^3)$	25.065	24.550	6.568	6.900	66.300	20.572	28.775
$O_3(\mu g/m^3)$	21.434	19.708	9.596	6.964	88.333	14.565	25.698
$NO_2(\mu g/m^3)$	45.728	45.845	7.884	19.801	73.712	40.411	51.047
$NO(\mu g/m^3)$	32.930	31.922	8.565	13.237	123.981	27.991	35.689
$NO_x(\mu g/m^3)$	45.033	45.093	5.176	25.682	61.555	41.662	48.478

En la Figura 63 se puede observar que todos los contaminantes presentan una leve asimetría relacionada con la presencia de valores atípicos. Estos valores se encuentran por encima de la norma nacional para las series de PM_{10} y $PM_{2.5}$, para el NO_2 , los valores atípicos no sobrepasan el límite diario permitido ($150 \mu g/m^3$).

Al evaluar los cuartiles de los diagramas de cajas y bigotes (Tabla 24) para PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 y NO_2 de acuerdo a la normativa nacional, el 75% de los datos (tercer cuartil) se encuentran por debajo del límite máximo diario permisible; sin embargo, al comparar dichos valores con los lineamientos de la OMS, se observa que para PM_{10} y $PM_{2.5}$, parte del 75% de los datos se encuentran por encima del umbral internacional. El 50% de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, se encuentran dentro de valores como $17 \mu g/m^3$ y $8,20 \mu g/m^3$ (rango intercuartílico) respectivamente.



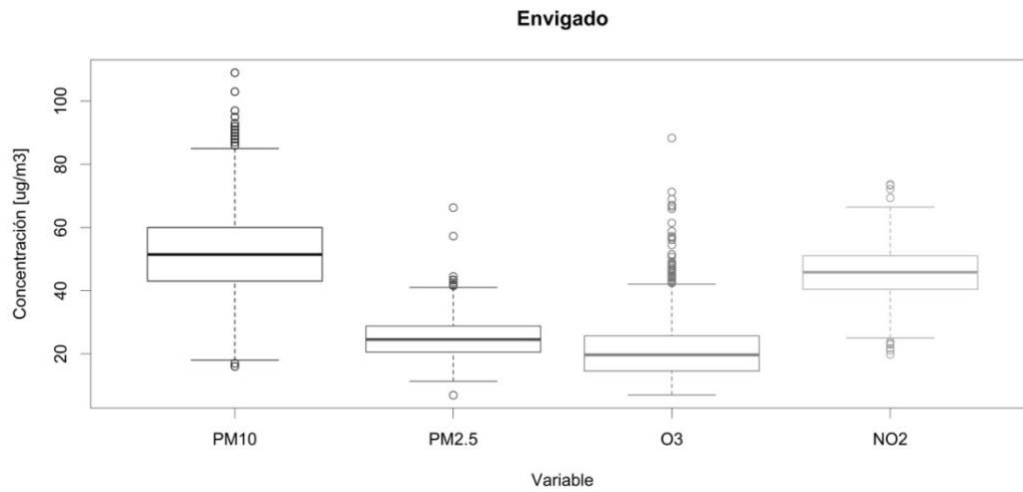


Figura 63. Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ y NO₂ del municipio de Envigado

4.3.5.2 Promedios semana, mensual y anual para el municipio de Envigado

Se puede observar que para PM₁₀ el máximo promedio anual se presentó en el año 2010, año en el cual empezó a disminuir el promedio anual, sin embargo, desde el 2014 comenzaron aumentar dichos valores (Figura 64). Al comparar los valores con los límites máximos permisibles anuales, se observa que los niveles sobrepasan la norma nacional (50 µg/m³) en los años 2010 y 2011, y la norma internacional (20 µg/m³) durante todos los años evaluados. Por otro lado, para PM_{2.5} el valor máximo se presentó en el año 2013; éste sobrepasa la norma nacional (25 µg/m³). Para O₃ el valor máximo se presentó en el año 2011 con disminución en las concentraciones promedios a partir de este año.

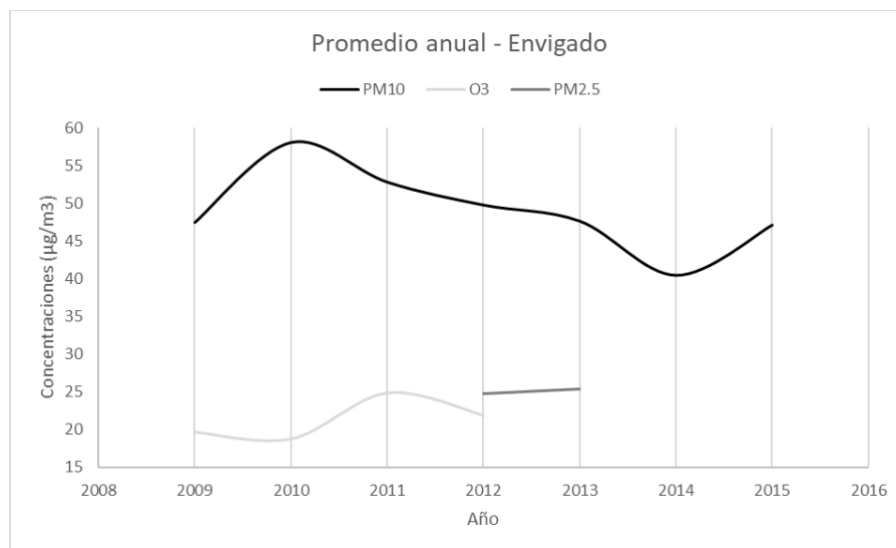


Figura 64. Promedios anuales para las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Envigado





Para todos los contaminantes, los mayores picos de concentración se presentan en los meses de marzo y abril, con un incremento en los niveles desde el año 2011 para PM₁₀. Para O₃ el pico de concentración más marcado se presentó en el año 2011 (**Figura 65**). Estos aumentos estacionales en las concentraciones están asociados a las épocas de lluvia del país, las cuales propician condiciones de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá.

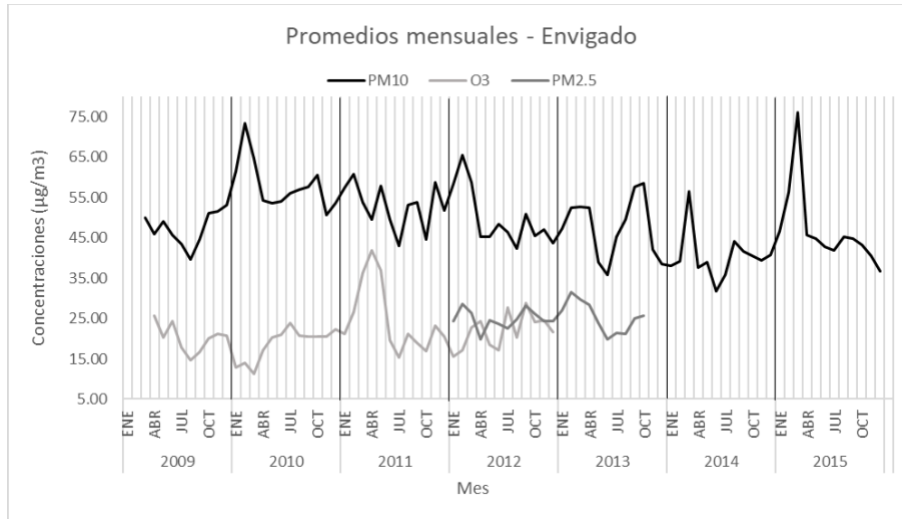


Figura 65. Promedios mensuales para cada año en las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Envigado

En general, se observa que los días sábado y domingo se presentan las menores concentraciones para los contaminantes con una tendencia de aumento en los promedios entre los días miércoles y viernes (Figura 66); esto puede estar asociado con la circulación de vehículos la cual es menor los fines de semana.

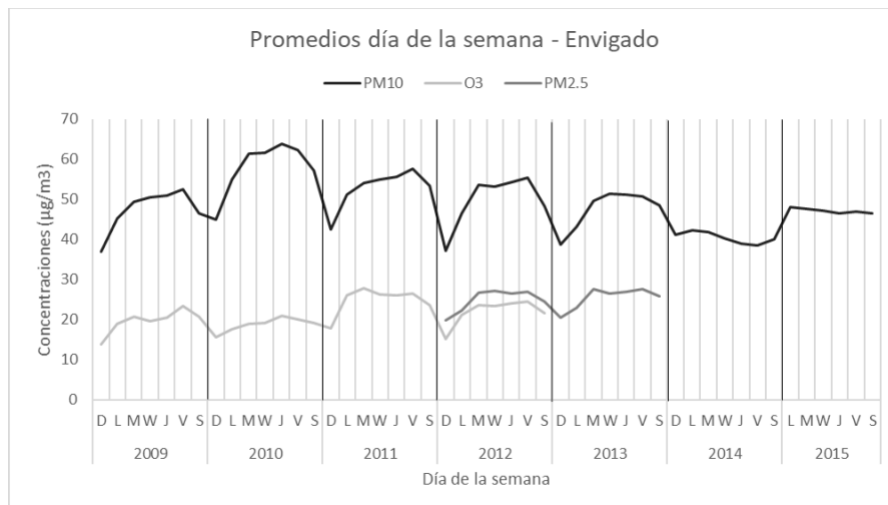


Figura 66. Promedios día de la semana para cada año en las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Envigado





4.3.5.3 Excedencias para el municipio de Envigado

En la Figura 67; para PM₁₀, se puede observar un alto porcentaje de excedencias que comprenden del 2009 al 2013, alcanzando un valor máximo para el año 2010 (73,7%); es decir, 949 días en total sobrepasaron el límite máximo permitido de acuerdo a los parámetros de la OMS. Los años 2014 a 2016 no mostraron excedencias de éste contaminante. Teniendo en cuenta los lineamientos nacionales, los valores porcentuales son mucho más bajos (0,3%) comparados con las excedencias del orden internacional, los cuales sólo se presentan para los años 2010 y 2012.

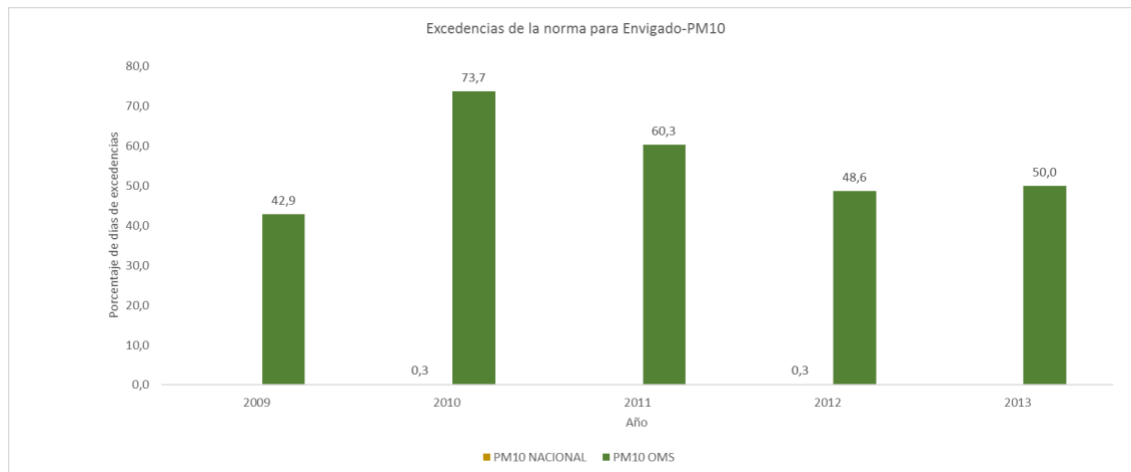


Figura 67. Excedencias de la norma para el contaminante PM₁₀, municipio de Envigado, en el periodo 2008-2016.

En el caso específico de PM_{2.5} de acuerdo a los lineamientos OMS, se presentan excedencias solo para los años 2012 y 2013 con valores porcentuales relativamente iguales (47% y 47,4% respectivamente), lo cual equivale a que 316 días en total excedieron el valor máximo permitido. Tomando como referencia el parámetro nacional, éste contaminante presenta menor valor porcentual de excedencias equivalente a 0,3% únicamente para los años 2012 y 2013; los demás años, no presentaron excedencias.

En relación al O₃, sólo se presentan excedencias para el año 2011 con un valor porcentual de 0,3% de acuerdo al parámetro nacional; no se obtienen excedencias de este contaminante en relación con los lineamientos internacionales.

En general, para el municipio de Envigado las mayores excedencias ocurren para PM₁₀, seguido de PM_{2.5} de acuerdo con los estándares normativos de la OMS; el O₃ no presenta excedencias según este parámetro.





4.3.6 Girardota

4.3.6.1 Estadísticos descriptivos para Girardota

Al evaluar la desviación estándar en cada contaminante en el municipio de Girardota (Tabla 25), se observan valores mayores para PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ lo cual indica una mayor variabilidad y menor uniformidad en los registros de estos contaminantes; la serie con menor variabilidad con respecto a la media corresponde a NO (DE = 6,2).

En esta misma línea, los valores mínimos para todos los contaminantes no sobrepasan los valores límite estipulados para la norma nacional y los lineamientos de la OMS. Para el caso de los valores máximos registrados, el PM₁₀ y PM_{2.5} sobrepasan los límites diarios permisibles de 100 µg/m³ y 50 µg/m³ respectivamente, el O₃ sobrepasa el límite octohorario de 80 µg/m³ permitido de acuerdo a la Resolución 610 de 2010.

Tabla 25. Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Girardota

Contaminante	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Primer Cuartil	Tercer Cuartil
PM ₁₀ (µg/m ³)	44.434	43.000	13.418	12.000	134.000	36.000	50.000
PM _{2.5} (µg/m ³)	23.571	19.800	13.207	7.600	99.300	16.700	25.900
O ₃ (µg/m ³)	45.702	44.234	12.692	16.475	97.623	36.836	53.189
NO ₂ (µg/m ³)	22.261	21.800	7.863	0.809	49.664	16.743	27.260
NO (µg/m ³)	13.365	12.797	6.185	1.473	60.374	8.853	16.672
NO _x (µg/m ³)	21.979	21.054	7.090	6.849	55.046	17.249	25.808

En la **Figura 68** se puede observar que todos los contaminantes presentan una leve asimetría relacionada con la presencia de valores atípicos; teniendo en cuenta la norma colombiana, para el caso de PM₁₀, algunos de estos se encuentran por encima del valor máximo permitido. El PM_{2.5}, presenta un sesgo a la derecha indicando que las concentraciones comprendidas entre el 50% y el 75% de la serie están ligeramente más dispersas que entre el 25% y el 50%.

Al observar los cuartiles de los diagramas de cajas y bigotes (**Tabla 25**) se puede inferir que, para PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ y O₃, el 75% de los datos (tercer cuartil) se encuentran por debajo del límite máximo diario permisible de acuerdo a la norma nacional; sin embargo, para PM_{2.5} al comparar este valor con los lineamientos de la OMS, parte del 75% de los datos se encuentran levemente por encima del umbral. El 50% de las concentraciones de PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ y O₃, se encuentran en valores como 14 µg/m³, 9.2 µg/m³, 7.82 µg/m³ y 16.35 µg/m³ (rango intercuartílico) respectivamente.



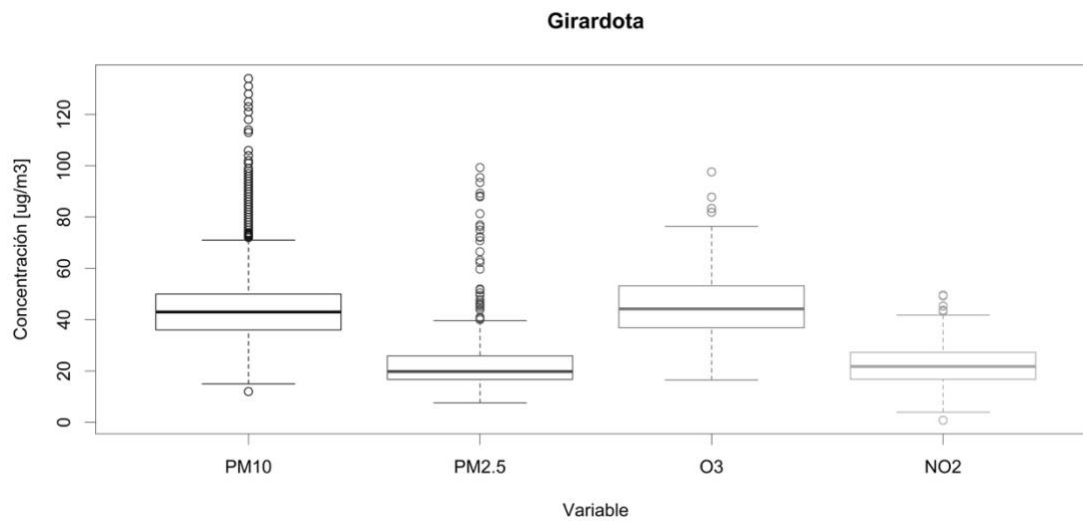


Figura 68.Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ y NO₂ del municipio de Girardota

4.3.6.2 Promedios semana, mensual y anual para el municipio de Girardota

Se puede observar que para PM₁₀ los valores promedio anuales estuvieron en un aumento desde el año 2011 hasta el 2015, año en el que se obtuvo el valor máximo (**Figura 69**). Al comparar dichos valores con los límites máximos permisibles anuales, se observa que sólo en éste año se sobrepasa la norma nacional (50 µg/m³), mientras que la norma internacional (20 µg/m³) se excede durante todos los años evaluados.

Para PM_{2.5} se observa que el valor promedio anual máximo se presentó en el año 2016, sin embargo, este nivel no sobrepasa la norma nacional de 20 µg/m³, pero sí incumple los estándares establecidos en la norma internacional (10 µg/m³). Por otro lado, para O₃ el valor máximo se presentó en el año 2015, lo que implica una disminución en las concentraciones para el año 2016.



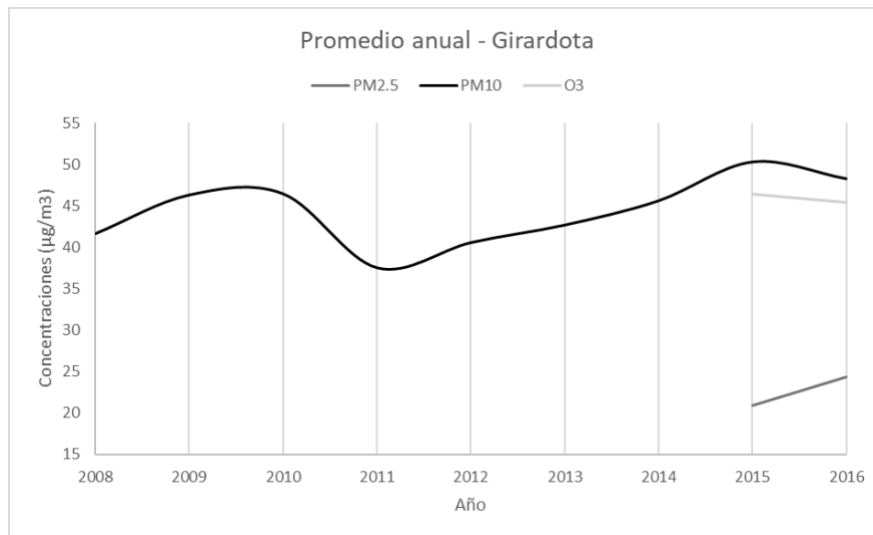


Figura 69. Promedios anuales para las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Girardota

Los mayores picos de concentración en los tres contaminantes se presentan en los meses de marzo, abril, septiembre y octubre para el caso del O₃. Para PM₁₀ se observa un incremento en los niveles desde el año 2014 (**Figura 70**). Estos aumentos estacionales en las concentraciones están asociados a las épocas de lluvia del país, las cuales propician condiciones de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá.

En general, se observa que los días sábado y domingo se presentan las menores concentraciones para los contaminantes con una tendencia de aumento en los promedios entre los días miércoles y viernes (**Figura 71**); esto puede estar asociado con la circulación de vehículos la cual es menor los fines de semana.

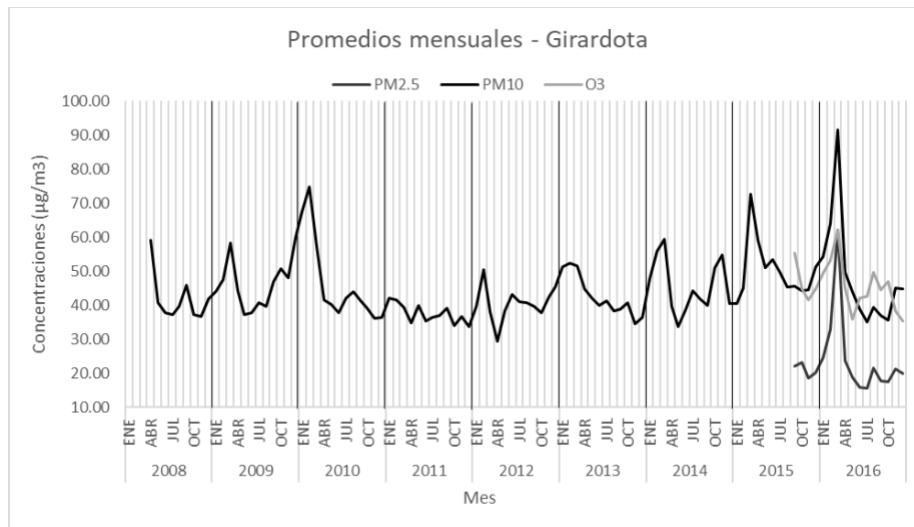


Figura 70. Promedios mensuales para cada año en las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Girardota



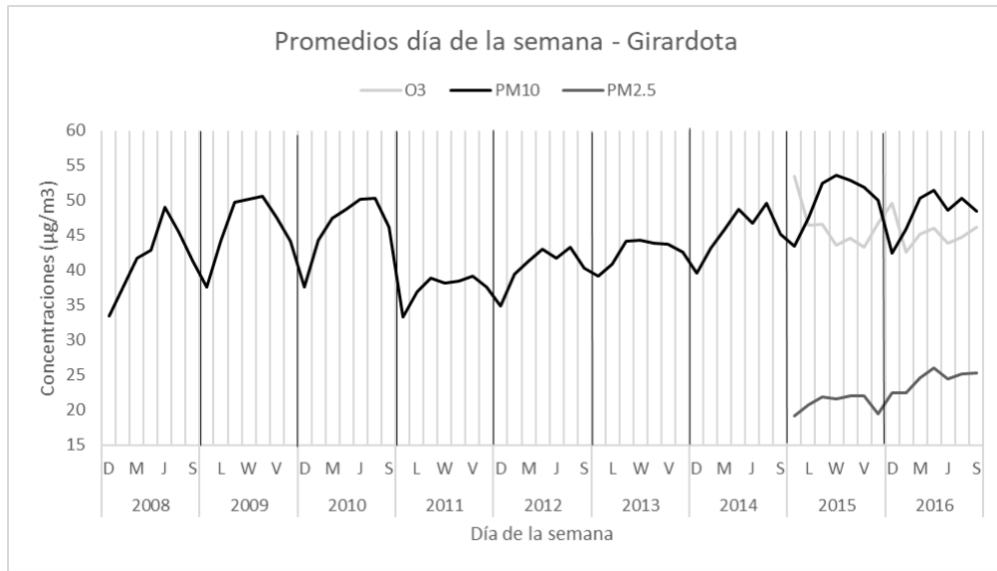


Figura 71. Promedios día de la semana para cada año en las series de PM10, PM2.5 y O3 del municipio de Girardota

4.3.6.3 Excedencias para el municipio de Girardota

De acuerdo a la Figura 72 para la normatividad internacional, el PM₁₀ presenta excedencias durante todo los años de estudio, con un nivel máximo en el año 2015 (46,3%) y un valor mínimo en el año 2011(2,5%); es decir 169 días y 9 días que sobrepasaron el límite máximo permitido respectivamente. Si se tiene en cuenta la norma nacional, sólo se presentaron excedencias para los años 2010, 2015 y 2016 con un máximo porcentual para este año de 3,0% (11 días excedieron el límite permitido).

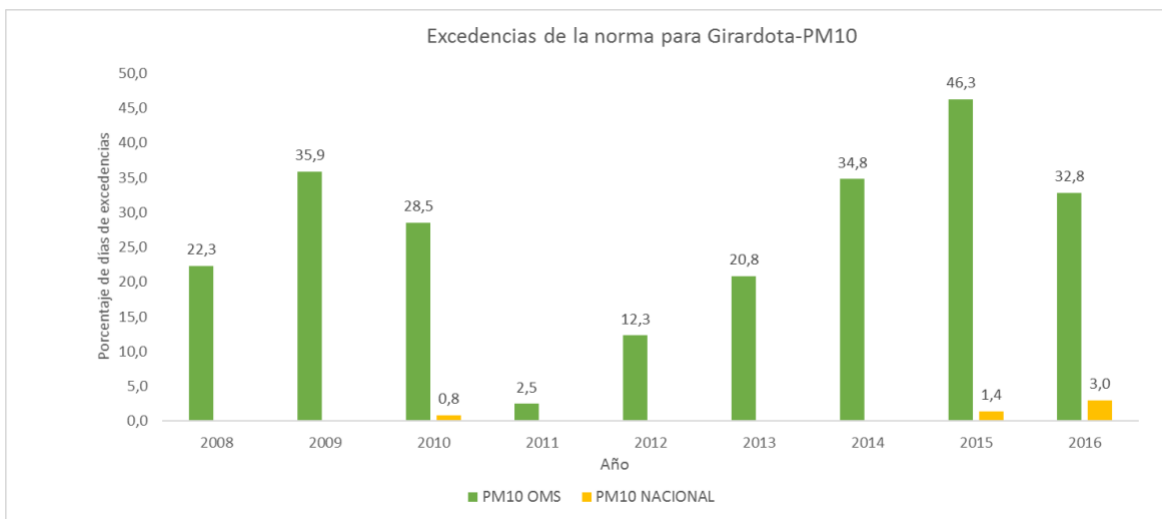


Figura 72. Excedencias de la norma para el contaminante PM₁₀, municipio de Girardota, en el periodo 2008-2016.





Para el $PM_{2.5}$ sólo se presentaron excedencias en los años 2015 y 2016 teniendo en cuenta la normatividad internacional, con porcentajes de 20,7% y de 29,5% respectivamente (131 días en total para los años 2015 y 2016 excedieron el máximo permitido). De acuerdo a la norma nacional, sólo se presentaron excedencias para el año 2016 con un valor porcentual de 5,5%, lo que equivale a 20 días (**Figura 73**).

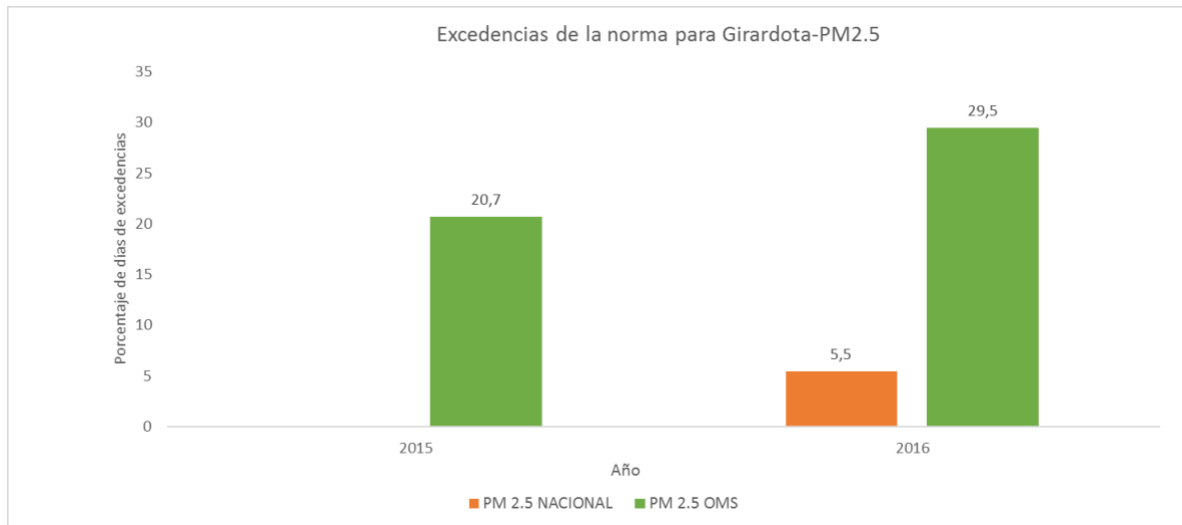


Figura 73. Excedencias de la norma para el contaminante $PM_{2.5}$, municipio de Girardota, en el periodo 2008-2016.

De acuerdo a la normatividad nacional, el O_3 sólo presentó excedencias en los años 2015 y 2016 con valores porcentuales relativamente bajos en comparación con los anteriores contaminantes (0,8%); no se encontraron excedencias con los parámetros internacionales.

En general, en el municipio de Girardota las mayores excedencias se presentan para PM_{10} , seguido de $PM_{2.5}$ de acuerdo a los parámetros internacionales; los parámetros nacionales no muestran excedencias de éstos contaminantes para todos los años.





4.3.7 Itagüí

4.3.7.1 Estadísticos descriptivos para Itagüí

Al evaluar la desviación estándar en cada contaminante del municipio de Itagüí (Tabla 26), se observa un mayor valor para O_3 , seguido por PM_{10} , lo cual indica una mayor variabilidad y menor uniformidad en los registros de estos contaminantes; la serie de NO , presenta menor variabilidad ($DE= 8,625$) con respecto a la media.

De acuerdo a la norma nacional, los valores mínimos para todos los contaminantes no sobrepasan los $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras en los valores máximos registrados, PM_{10} , y $PM_{2.5}$ sobrepasan el límite diario máximo permisible de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (con valores de $144,884 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $94,113 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente), el O_3 , supera el límite octohorario de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con un valor de $149,139 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 26. Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Itagüí

Contaminantes	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Primer Cuartil	Tercer Cuartil
$PM_{10}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	63.124	62.426	13.153	23.077	144.884	54.001	70.782
$PM_{2.5}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	29.723	28.545	8.929	8.240	94.113	24.096	33.426
$O_3(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	74.146	73.770	23.233	9.836	149.139	57.818	89.490
$NO_2(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	26.264	26.186	10.018	0.001	59.378	19.130	33.349
$NO(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	16.858	15.815	8.265	0.808	57.944	10.944	21.529
$NOX(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	27.592	26.800	10.343	0.083	72.292	20.405	34.052

En la **Figura 74** se puede observar que todos los contaminantes presentan una leve asimetría relacionada con la presencia de valores atípicos. Dichos valores se encuentran muy por encima del límite máximo permisible establecido en la norma nacional, a excepción de NO_2 , cuyos valores escasamente sobrepasan los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Al evaluar los cuartiles de los diagramas de cajas y bigotes (**Tabla 26**) se puede inferir que, para los contaminantes PM_{10} , $PM_{2.5}$ y NO_2 el 75% de los datos (tercer cuartil) se encuentran por debajo del límite máximo diario permisible; sin embargo, al comparar éstos valores con los lineamientos de la OMS, se observa que para PM_{10} , $PM_{2.5}$ y O_3 , parte del 75% de los datos se encuentran por encima del umbral internacional.



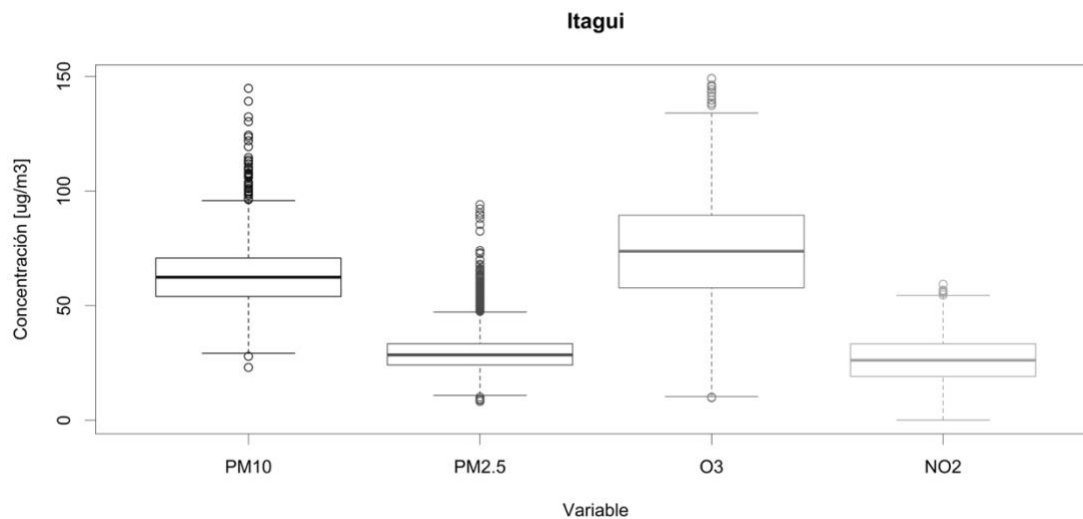


Figura 74. Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ y NO₂ del municipio de Itagüí

4.3.7.2 Promedios semana, mensual y anual para el municipio de Itagüí

Se puede observar que para PM₁₀ el máximo promedio anual se presentó en el año 2008, año en cual los niveles disminuyeron hasta el año 2010, para luego permanecer relativamente constantes con fluctuaciones leves (**Figura 75**). Al comparar dichos valores con los límites máximos permisibles anuales, se observa que los niveles sobrepasan la norma nacional e internacional para todos los años evaluados.

Así mismo, para PM_{2.5} se observan leves fluctuaciones en los valores promedios anuales, presentando un máximo en el año 2014. En todos los años se incumple la normativa nacional, excepto para el año 2011, y la internacional. Por otro lado, para O₃ el valor máximo se presentó en el año 2016.

Para todos los contaminantes, los mayores picos de concentración se presentan en los meses de marzo y abril, con un incremento en los niveles desde el año 2014. Además, para O₃ se observan picos entre los meses septiembre y octubre (**Figura 76**). Estos aumentos estacionales en las concentraciones están asociados a las épocas de lluvia del país, las cuales propician condiciones de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá.

En general, se observa que en los domingos se presentan las menores concentraciones para los contaminantes con una tendencia de aumento en los promedios entre los días miércoles y sábado (**Figura 77**); esto puede estar asociado con la circulación de vehículos la cual es menor los domingos.



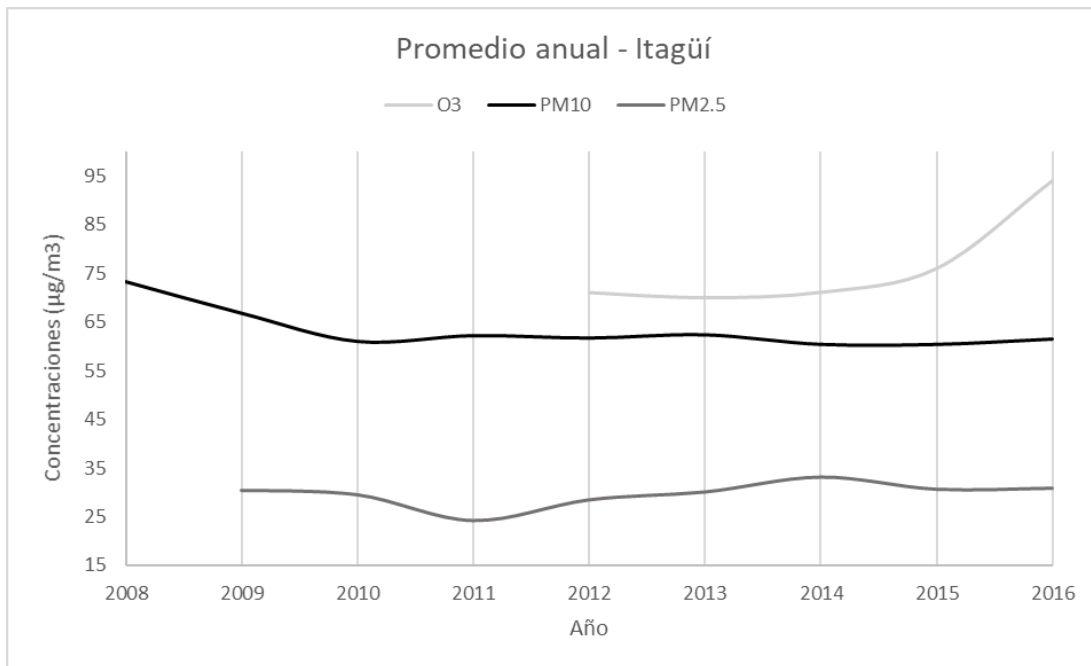


Figura 75. Promedios anuales para las series de PM10, PM2.5 y O3 del municipio de Itagüí

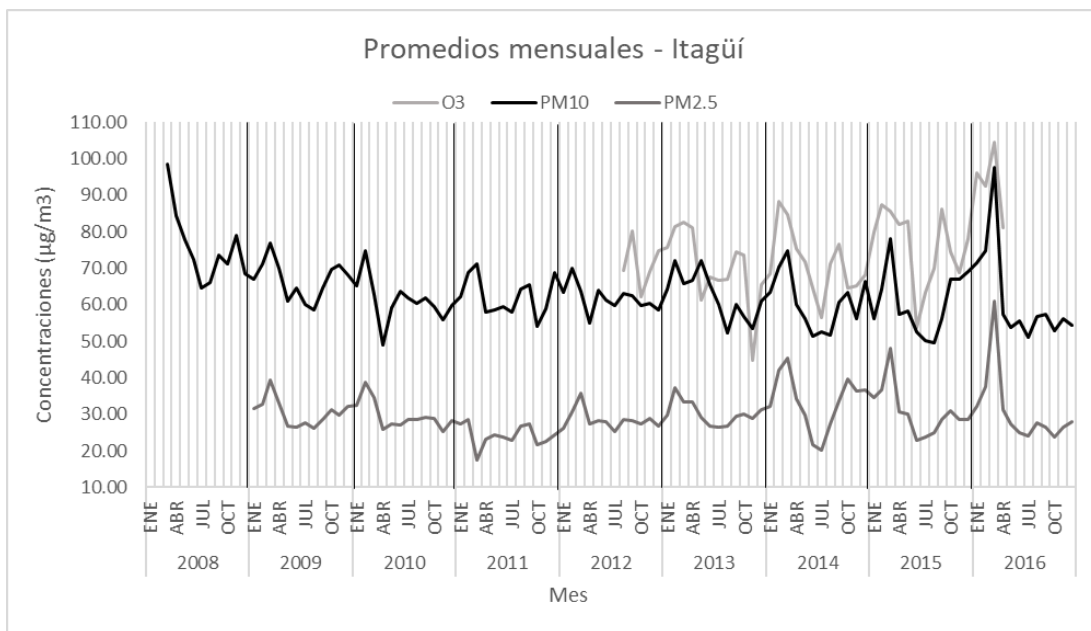


Figura 76. Promedios mensuales para cada año en las series de PM10, PM2.5 y O3 del municipio de Itagüí



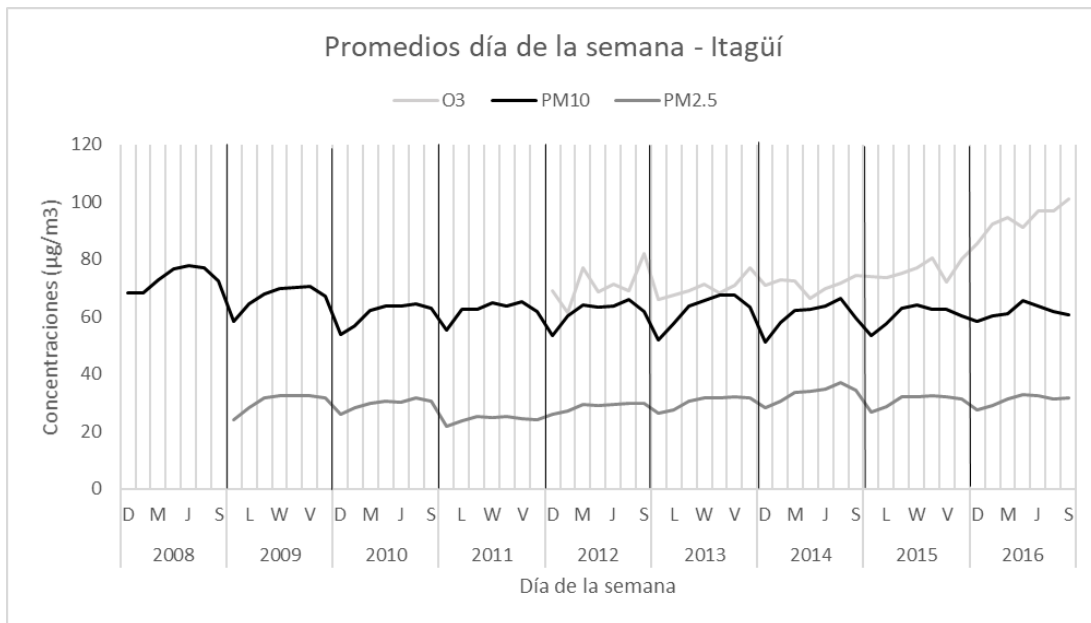


Figura 77. Promedios día de la semana para cada año en las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Itagüí

4.3.7.3 Excedencias para el municipio de Itagüí

En la **Figura 78**, se puede observar el comportamiento de las excedencias para PM₁₀. De acuerdo a los lineamientos de la OMS, en el año 2008 se presentaron los mayores valores porcentuales (98,9%); es decir, que durante este año, 276 días excedieron el valor máximo permitido. El año 2014 presentó los valores porcentuales de excedencias más bajos con un 78,9% con 288 días que sobrepasaron el límite permitido.

Al tener en cuenta los lineamientos de la Resolución 610 de 2010, los valores de excedencia más altos de PM₁₀ se presentaron en el año 2016 (4,1%) y los valores más bajos en los años 2009 y 2013. Los años 2010, 2011 y 2012 no presentaron excedencias.



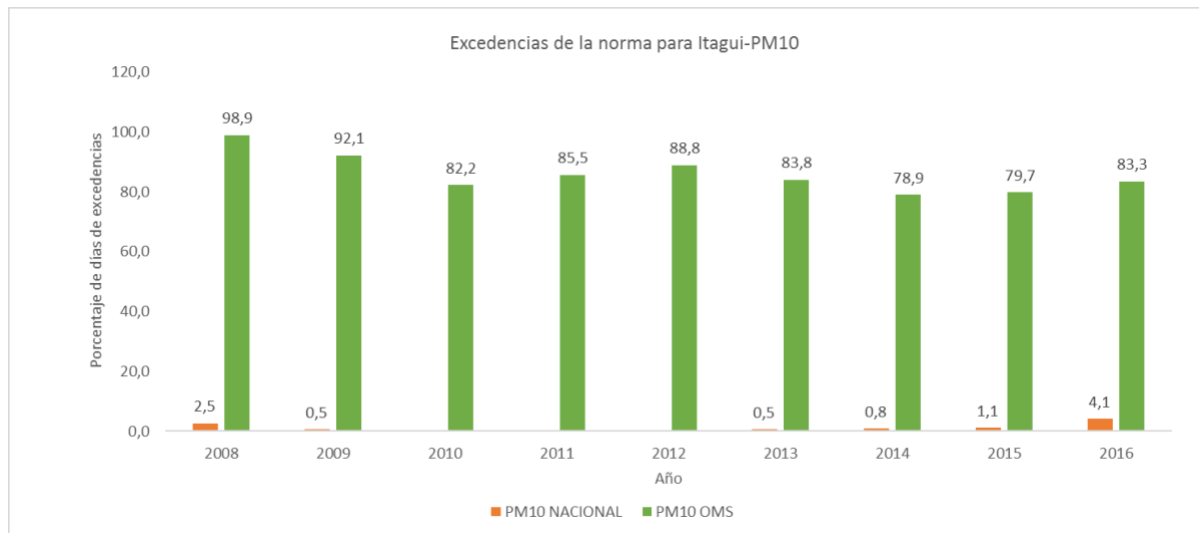


Figura 78.Excedencias de la norma para el contaminante PM10, municipio de Itagüí, en el periodo 2008-2016.

Para el contaminante PM_{2.5} (**Figura 79**), de acuerdo a los parámetros de la OMS, se presentan excedencias a partir del año 2009 con un valor máximo porcentual de 80,5%, es decir, 294 días excedieron el valor máximo permitido. El valor porcentual menor se presenta en el año 2011 (44,9%) con 164 días que excedieron el máximo permitido.

Teniendo en cuenta los lineamientos nacionales, el año 2014 presentó el mayor valor porcentual de excedencias con un 7,7%; es decir, 28 días excedieron el valor máximo permitido. Los años de menores excedencias fueron el 2012 y 2013 con un valor porcentual de 0,3%, lo cual equivale a un día del año de excedencia del valor máximo permitido del contaminante. Los años 2008 y 2011 no presentaron excedencias para PM_{2.5}.

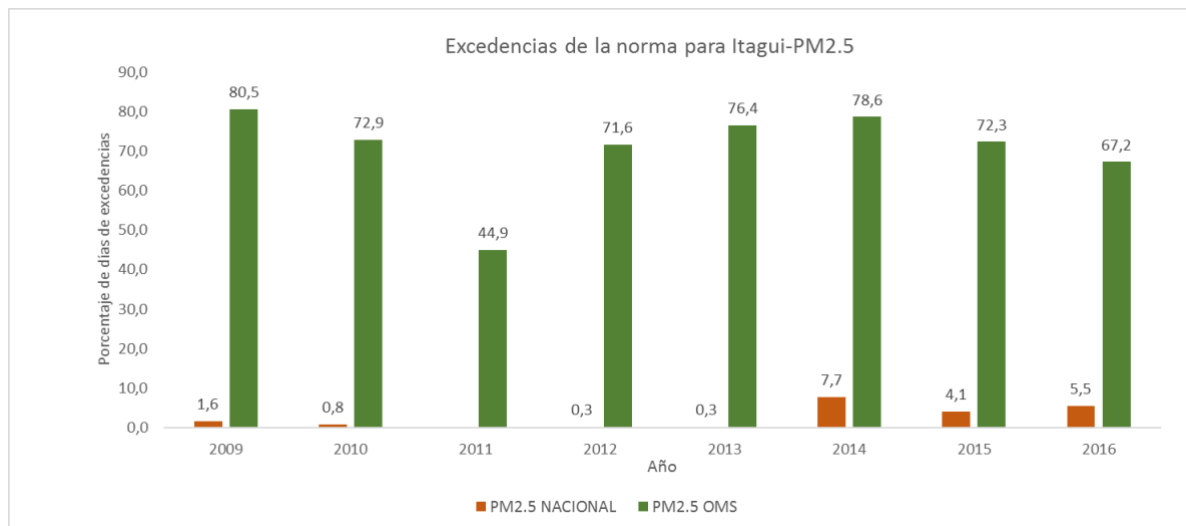


Figura 79.Excedencias de la norma para el contaminante PM_{2.5}, municipio de Itagüí, en el periodo 2008-2016





Para el caso de O₃ (Ver Figura 80), se puede observar que el año 2016 presentó el valor porcentual más alto del periodo de tiempo estudiado tanto para los lineamientos de la OMS (44,9%) como los nacionales (70,3%). Es decir, los días que sobrepasaron el valor máximo permitido fueron de 53 y 83 de acuerdo a los parámetros internacionales y nacionales respectivamente.

El año 2013 presentó el valor porcentual más bajo del periodo de tiempo estudiado tanto para los lineamientos de la OMS (6,3%) como para los nacionales (31%). Es decir, los días que sobrepasaron el valor máximo permitido fueron de 23 y 113 de acuerdo a los parámetros internacionales y nacionales respectivamente.

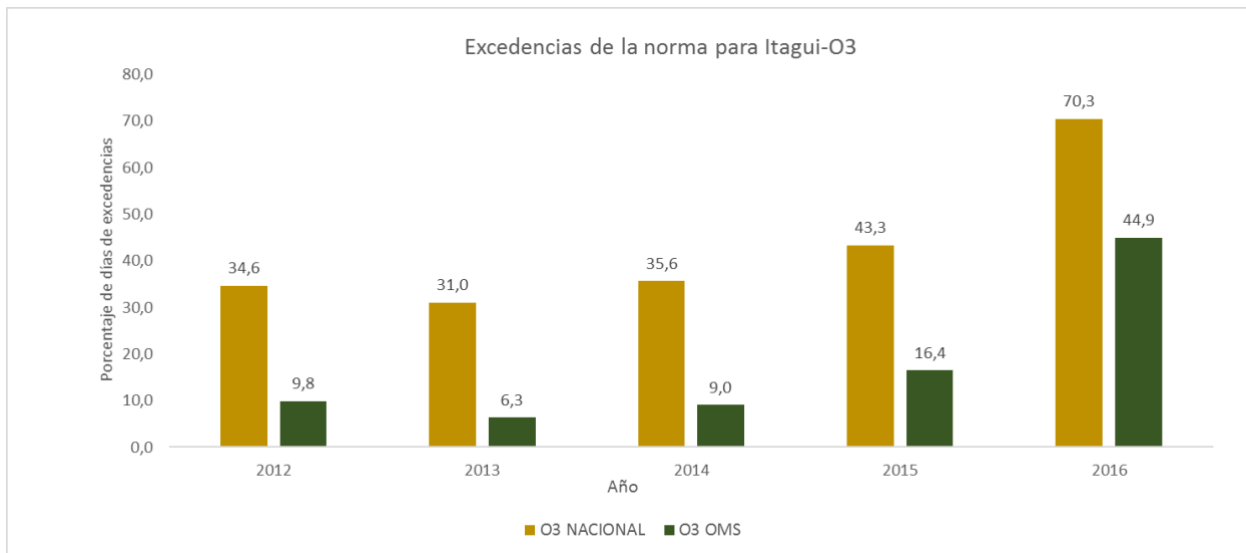


Figura 80.Excedencias de la norma para el contaminante O₃, municipio de Itagüí, en el periodo 2008-2016

4.3.8 La Estrella

4.3.8.1 Estadísticos descriptivos para La Estrella

Al evaluar la desviación estándar en cada contaminante del municipio de La Estrella (**Tabla 27**), se observa que para O₃ dicho estadístico es mayor, seguido de NO, lo cual indica que existe una mayor variabilidad y menor uniformidad en los registros de éstos contaminantes. La serie que presenta menor variabilidad con respecto a la media corresponde a NO₂ (DE = 10,882).

De acuerdo a la norma nacional, los valores mínimos para todos los contaminantes no sobrepasan los 17,300 µg/m³, mientras que en los valores máximos registrados de los contaminantes, PM₁₀ y PM_{2.5} sobrepasan el límite diario máximo permisible de 100 µg/m³ y 50 µg/m³ respectivamente; el O₃ sobrepasa el límite octohorario de 80 µg/m³ (con un valor máximo de 92,459 µg/m³).





Tabla 27. Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de La Estrella

Contaminantes	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Primer Cuartil	Tercer Cuartil
PM ₁₀	46.187	45.772	12.800	10.869	136.697	37.200	53.762
PM _{2,5}	47.943	47.100	13.052	17.300	118.400	39.988	53.200
O ₃	55.280	55.956	16.341	11.475	92.459	44.988	66.910
NO ₂	33.695	33.891	10.982	4.581	69.563	26.237	41.612
NO	39.464	38.395	13.583	8.244	98.939	30.588	47.693
NOX	50.581	50.376	14.467	11.453	139.353	40.588	59.502

En la **Figura 81** se puede observar que el PM₁₀ y PM_{2,5} presentan una leve asimetría relacionada con la presencia de valores atípicos, de los cuales cierta cantidad se encuentran por encima del límite máximo permitido establecido en la normatividad colombiana. La serie de O₃ no presenta valores atípicos.

Al observar los cuartiles de los diagramas de cajas y bigotes (**Tabla 27**) se puede inferir que, para los contaminantes PM₁₀, O₃ y NO₂ el 75% de los datos (tercer cuartil) se encuentran por debajo del límite máximo permisible; sin embargo, al comparar éstos valores con los lineamientos de la OMS, se observa que para PM₁₀ y PM_{2,5} parte del 75% de los datos se encuentran por encima del umbral internacional.

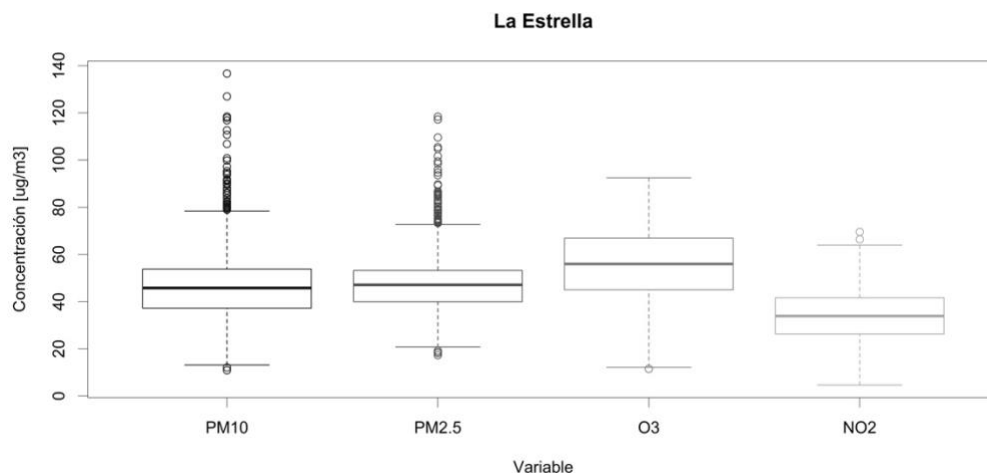


Figura 81. Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM₁₀, PM_{2,5}, O₃ y NO₂ del municipio de La Estrella





4.3.8.2 Promedios semana, mensual y anual para el municipio de La Estrella

Se puede observar que para PM₁₀ el máximo promedio anual se presentó en el año 2009, año en cual empezó a disminuir el promedio anual, sin embargo, desde el 2013 comenzaron aumentar dichos valores (**Figura 82**). Al comparar los valores con los límites máximos permisibles anuales, se observa que los niveles sobrepasan la norma nacional (50 µg/m³) en los años 2008, 2009, 2014 y 2016, y la norma internacional (20 µg/m³) durante todos los años evaluados. Para O₃ el valor máximo se presentó en el año 2015.

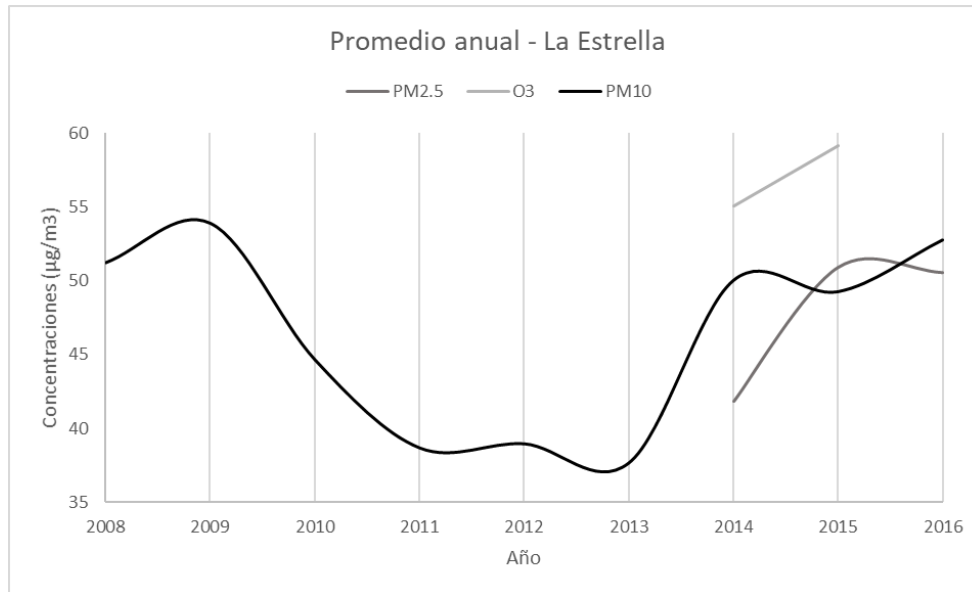


Figura 82. Promedios anuales para las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de La Estrella

Particularmente, para PM_{2.5} los niveles para el año 2015 son mayores que para PM₁₀, como se explicó anteriormente, esto se debe a la ubicación de la estación que registró la información (MOV-EST-METR; estación de tráfico (**Tabla 5**); en este mismo año, se presentó el promedio máximo. Todos los niveles para esta serie sobrepasan el límite anual permisible de 25 µg/m³, establecido en la norma nacional.

Para todos los contaminantes, los mayores picos de concentración de PM₁₀ se presentan en los meses de marzo y abril, seguido de otros de menor magnitud en septiembre y octubre, con un incremento en los niveles desde el año 2014 (**Figura 83**). Se puede observar que a pesar que la información para las series de PM₁₀ y PM_{2.5} proviene de estaciones con diferentes ubicaciones geográficas y clasificación, los comportamientos en ambas series son similares, dado que los picos están condicionados por las condiciones meteorológicas del Valle de Aburrá, durante las épocas de lluvias, las cuales, propician estabilidad en la atmósfera de la zona de estudio.



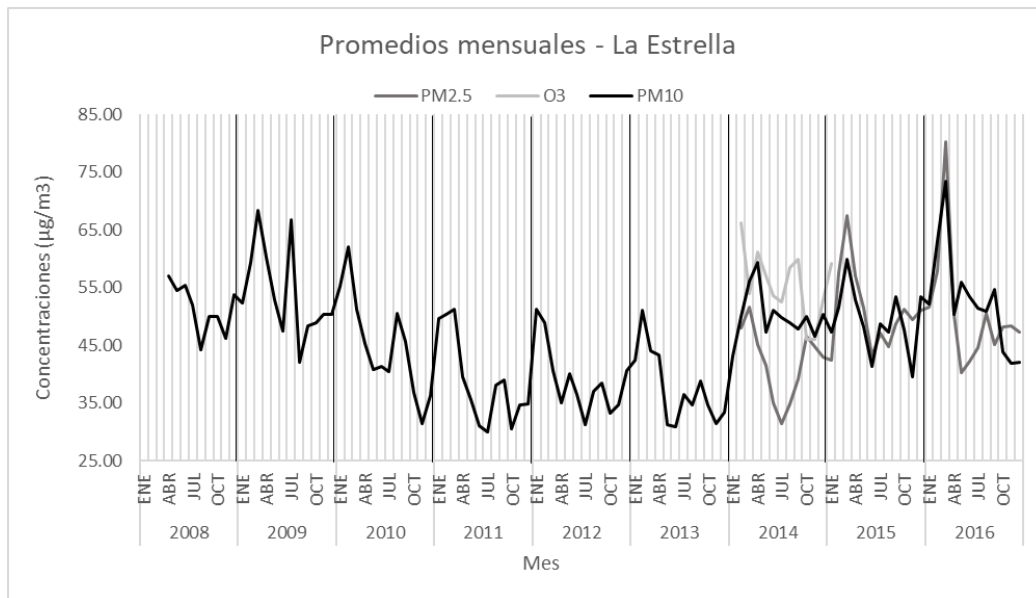


Figura 83. Promedios mensuales para cada año en las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de La Estrella

En general, se observa que los domingos presentan las menores concentraciones para los contaminantes con una tendencia de aumento en los promedios entre los días miércoles y viernes (**Figura 84**); esto puede estar asociado con la circulación de vehículos la cual es menor los domingos.

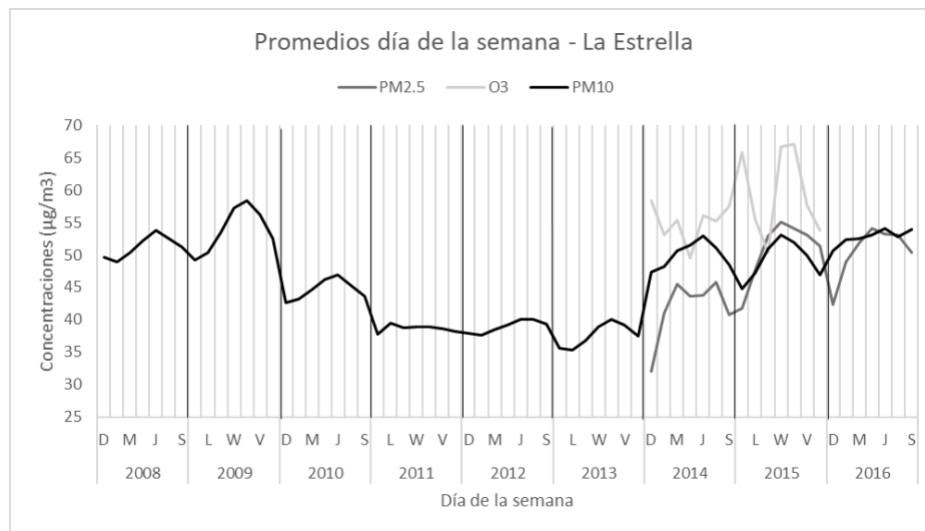


Figura 84. Promedios día de la semana para cada año en las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de La Estrella





4.3.8.3 Excedencias para el municipio de La Estrella

En la **Figura 85**, para PM₁₀, de acuerdo a los lineamientos de la OMS, el mayor porcentaje de excedencias se presentó en el año 2009 (59,5%) con 217 días que sobrepasaron el límite máximo permitido. El menor valor porcentual se presentó en el año 2013 (8,8%) con 32 días que excedieron el máximo permitido.

Al observar las excedencias de acuerdo a los parámetros nacionales, éstas solo se presentaron en los años 2009, 2011, 2012 y 2016; el mayor valor porcentual se presentó en el año 2016 (1,4%) con 5 días que excedieron el máximo permitido. El menor valor porcentual corresponde a los años 2011 y 2012 (0,3%) en el cual sólo un día de cada año excedió el límite máximo.

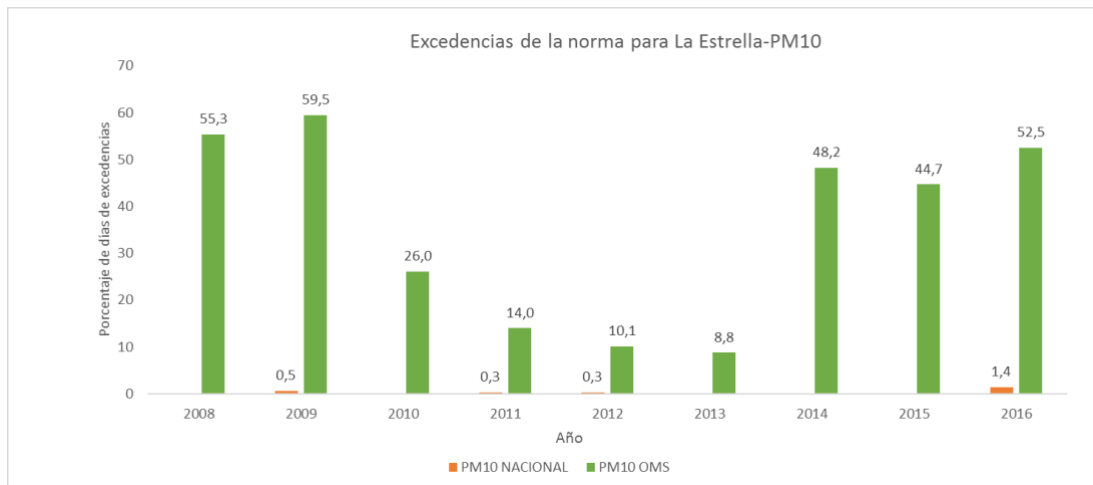


Figura 85. Excedencias de la norma para el contaminante PM₁₀, municipio de La Estrella, en el periodo 2008-2016

Teniendo en cuenta los lineamientos OMS, en el caso de PM 2.5 (**Figura 86**) sólo se presentaron excedencias en el periodo 2014 a 2016, con valores superiores al 90%; los años 2015 y 2016 presentaron el mayor valor porcentual de excedencias (99,5%), lo cual significa que 363 y 364 días de cada año respectivamente sobrepasaron el límite superior permitido (25µg/m³diario).

Desde los estándares nacionales, se puede observar que el mayor valor porcentual de excedencias se presentó en el año 2015 (47,7%), en el cual 174 días del año excedieron el límite máximo permitido (50 µg/m³diario).



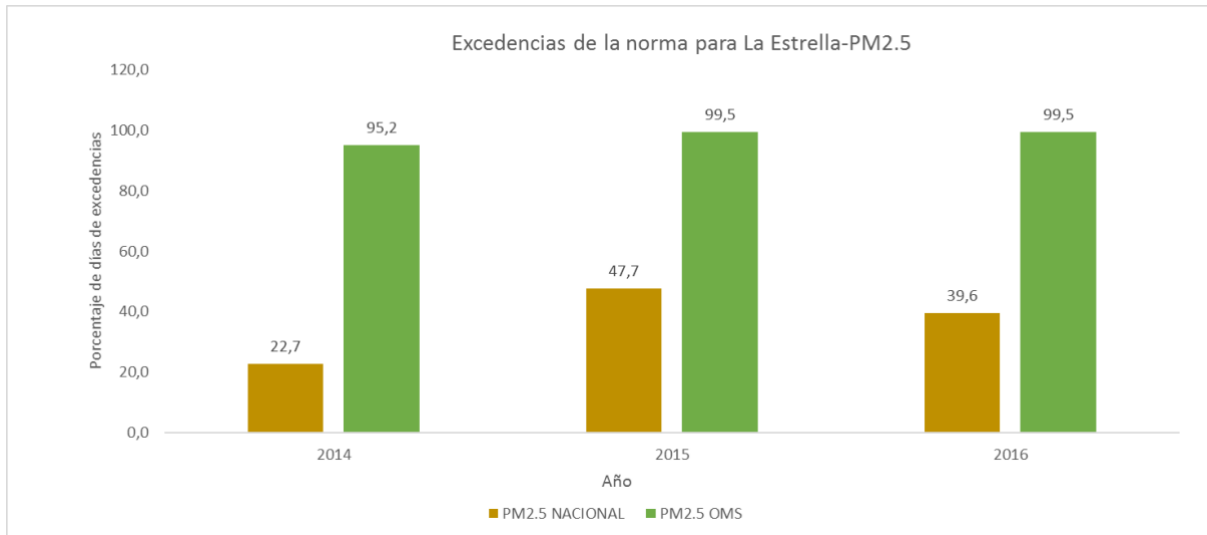


Figura 86.Excedencias de la norma para el contaminante PM_{2.5}, municipio de La Estrella, en el periodo 2008-2016

Finalmente, para el O₃ sólo se presentaron excedencias en los años 2014 y 2015 teniendo en cuenta el parámetro colombiano; no se presentaron excedencias de acuerdo a los lineamientos de la OMS.

4.3.9Medellín

4.3.9.1 Estadísticos descriptivos para Medellín

Al evaluar la desviación estándar en cada contaminantedel municipio de Medellín (**Tabla 28**), se observa el valor mayor para O₃, seguido por NO_x, lo cual indica una mayor variabilidad y menor uniformidad en los registros de estos contaminantes. Por el contrario, la serie que presenta menor variabilidad con respecto a la media es la de PM_{2.5}.

Por otro lado, los valores mínimos para todos los contaminantes no sobrepasan los 32 µg/m³ (19 ppb para NO_x), mientras en los valores máximos registrados, los contaminantes PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ sobrepasan el límite diario máximo permisible de 100 µg/m³ y 50 µg/m³, para los dos primeros, y el límite octohorario de 80 µg/m³ para el tercero, establecidos en la norma nacional.





Tabla 28. Estadísticos descriptivos de las series de contaminantes del municipio de Medellín

Contaminante	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Primer cuartil	Tercer cuartil
PM ₁₀ (µg/m ³)	70.020	68.658	14.626	31.462	196.439	60.846	77.343
PM _{2.5} (µg/m ³)	35.573	34.137	9.650	13.604	123.133	29.747	39.391
O ₃ (µg/m ³)	67.692	66.485	21.992	11.086	161.375	51.793	81.294
NO ₂ (µg/m ³)	43.417	42.106	15.304	1.389	133.149	34.529	51.201
NO (µg/m ³)	49.761	46.212	18.339	9.178	213.967	37.998	58.787
NO _x (ppb)	64.894	62.798	18.446	18.636	194.861	52.903	74.741

En la **Figura 87** se puede observar que todos los contaminantes presentan una leve asimetría relacionada con la basta presencia de valores atípicos. Dichos valores se encuentran muy por encima del límite máximo permisible establecido en la normativa colombiana, excepto para el contaminante NO₂, cuyos valores no sobrepasan la norma nacional diaria de 150 µg/m³.

Por otro lado, al evaluar los cuartiles de los diagramas de cajas y bigotes (Tabla 28) se puede inferir que, para los contaminantes PM₁₀, PM_{2.5} y NO₂ el 75% de los datos (tercer cuartil) se encuentra por debajo del límite máximo diario permisible; sin embargo, al comparar dichos valores con las Guías de la OMS, se observa que para PM₁₀ y PM_{2.5}, parte del 75% de los datos se encuentra por encima del umbral internacional. Particularmente, para O₃ se observa que parte del 75% de los datos se encuentra por encima del umbral nacional; sin embargo, esto no sucede al ser comparado con la norma internacional, ya que los límites máximos permisibles son más laxos en la segunda.

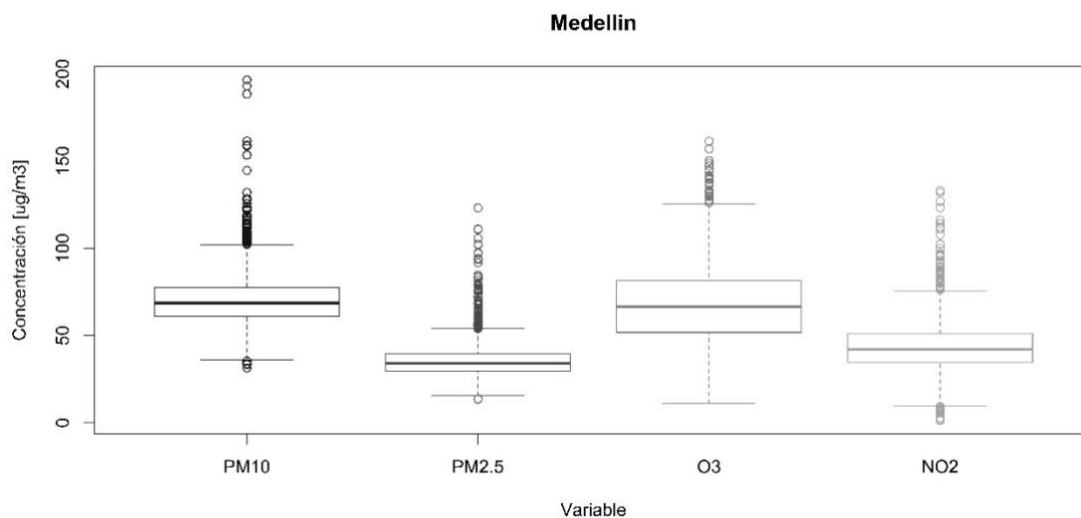


Figura 87. Diagrama de cajas y bigotes para las series de PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ y NO₂ del municipio de Medellín





4.3.9.2 Promedios semana, mensual y anual para el municipio de Medellín

Se puede observar que para PM_{10} el máximo promedio anual se presentó en el año 2008, año en el cual empezó a disminuir el promedio anual, sin embargo, dichos valores comenzaron a aumentar desde el 2015 (**Figura 88**). Por otro lado, para $PM_{2.5}$ los niveles han aumentado progresivamente desde el año 2012, alcanzando el valor máximo en el año 2015. Al comparar los valores de ambas series con los límites máximos permisibles anuales, se observa que los niveles sobrepasan la norma nacional en todo el periodo temporal evaluado. Para O_3 el valor máximo se presentó en el año 2013 con disminución en las concentraciones promedio a partir de este año.

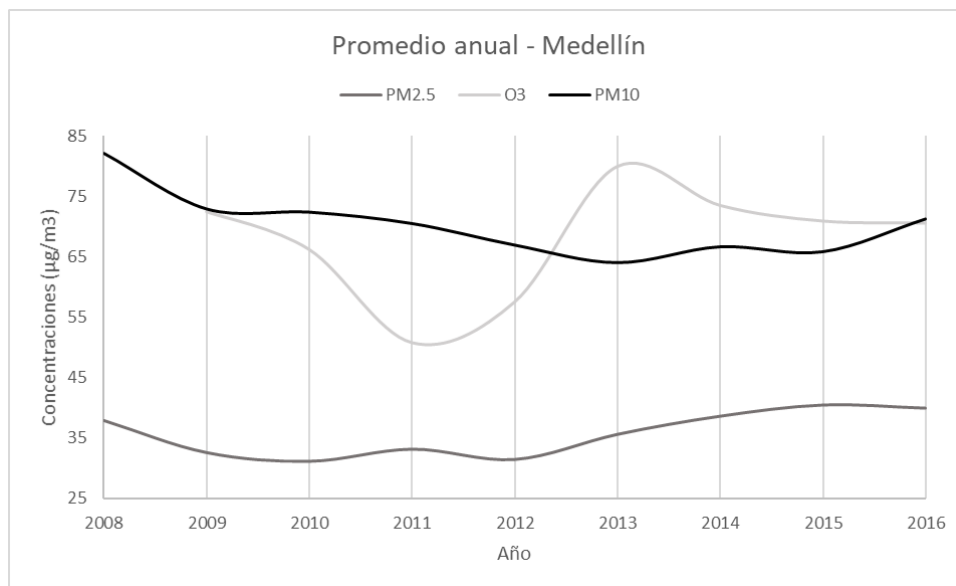


Figura 88. Promedios anuales para las series de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y O_3 del municipio de Medellín

Para las series evaluadas, los mayores picos de concentración se presentan en los meses de marzo y abril, con un incremento en los niveles desde el año 2014. Además, para O_3 se observan picos en los meses septiembre y octubre (**Figura 89**). Estos aumentos estacionales en las concentraciones están asociados a las épocas de lluvia del país, las cuales propician condiciones de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá.



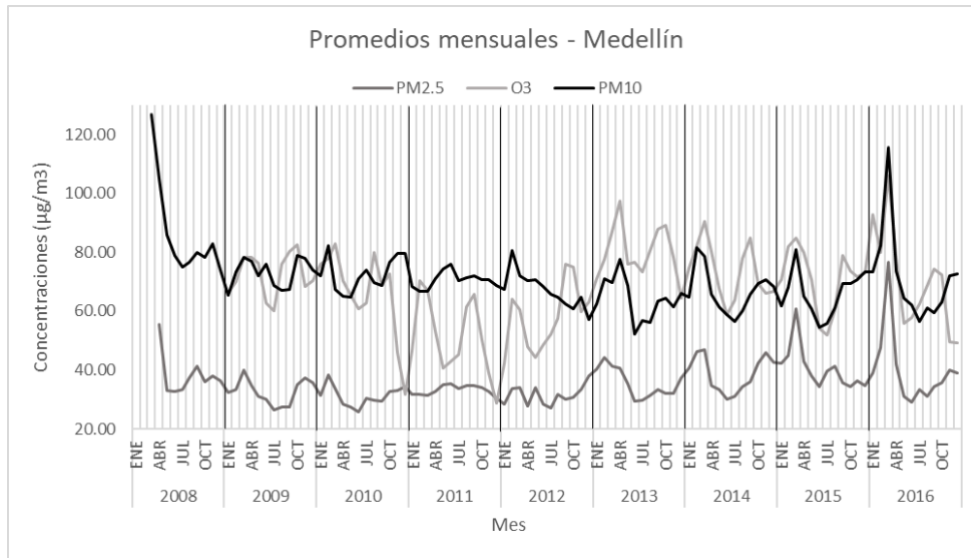


Figura 89. Promedios mensuales para cada año en las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Medellín

En general, se observa que los días sábado y domingo se presentan las menores concentraciones para los contaminantes con una tendencia de aumento en los promedios entre los días miércoles y viernes (**Figura 90**); esto puede estar asociado con la circulación de vehículos la cual es menor los fines de semana.

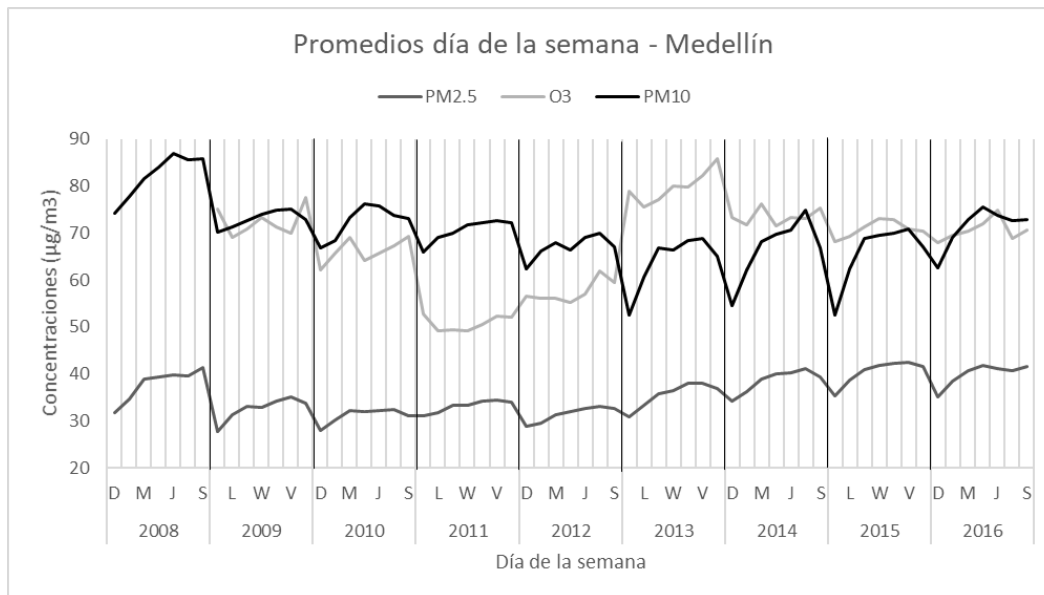


Figura 90. Promedios día de la semana para cada año en las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Medellín





4.3.9.3 Excedencias para el Municipio de Medellín

Para PM₁₀, de acuerdo a los lineamientos dados por la OMS, la ciudad de Medellín presenta un alto porcentaje de excedencias que alcanzan un 100% para los años 2009 y 2011; es decir, que 365 días excedieron el límite máximo permitido (50 µg/m³) en cada uno de los años respectivos. El valor porcentual menor se presentó en el año 2014 (88,8%) que equivale a 324 días que sobrepasaron el límite máximo permitido (Ver Figura 91).

Al revisar las excedencias teniendo en cuenta la normatividad en Colombia, los valores porcentuales son mucho menores en comparación con los parámetros de la OMS. El valor porcentual máximo se observa para el año 2008 (12,6%) y el mínimo para los años 2011 y 2012 (0,5%) seguido del año 2013 (0,8%). Para este caso, solo 35 días del año 2008 sobrepasaron el máximo permitido y para los años 2011 y 2012 solo dos días respectivamente (Ver Figura 91).

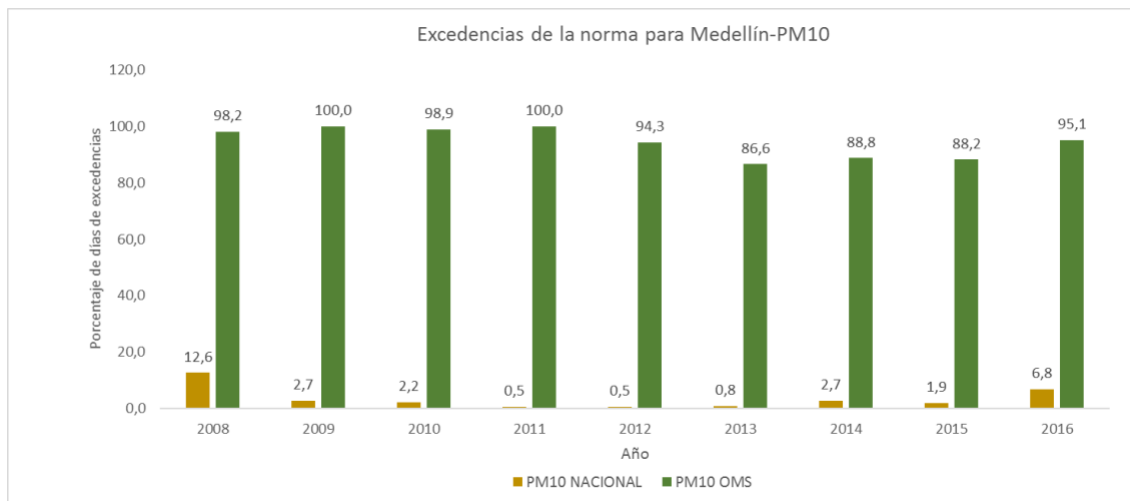


Figura 91. Excedencias de la norma para el contaminante PM₁₀, municipio de Medellín, en el periodo 2008-2016

La **Figura 92** muestra el comportamiento de las excedencias para PM_{2.5}; de acuerdo a los parámetros de la OMS, se presenta un alto porcentaje de excedencias durante todos los años de observación, destacándose valores porcentuales por encima del 90% para los años 2008, 2011, 2013 a 2016. Durante el año 2015, 362 días excedieron el valor máximo permitido, seguido del año 2014 con 350 días.

El análisis de acuerdo a la normatividad Colombiana, arroja menores valores porcentuales durante el periodo de estudio, mostrando un valor porcentual de excedencias máximo de 14,8% en el año 2008 (40 días excedieron el valor máximo permitido) y un valor porcentual mínimo de 0,3% para el año 2010 (sólo un día excedió el valor máximo permitido).



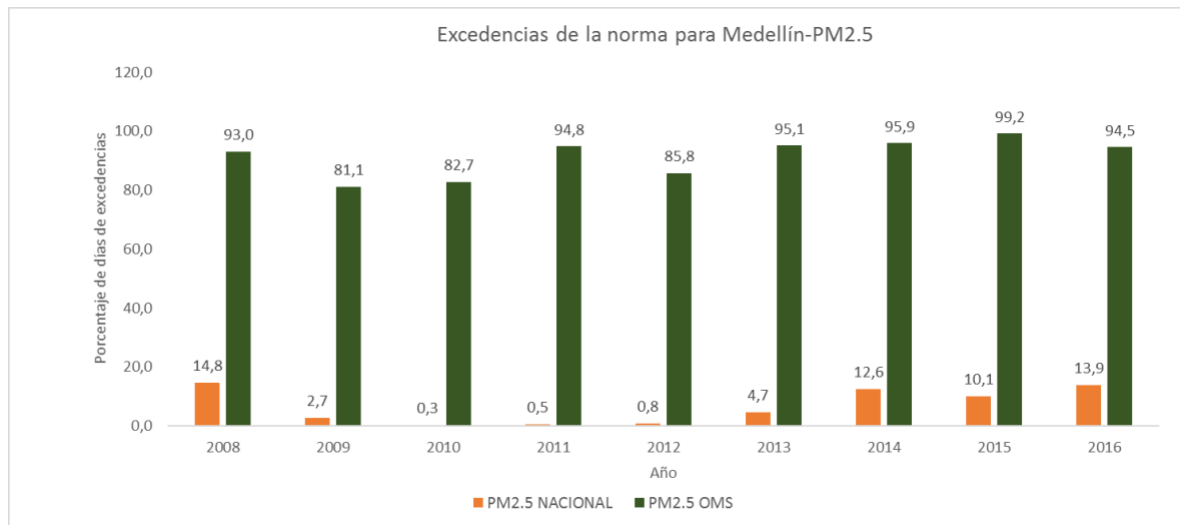


Figura 92.Excedencias de la norma para el contaminante PM_{2.5}, municipio de Medellín, en el periodo 2008-2016

En la **Figura 93** se puede observar el comportamiento de las excedencias para el O₃. El año 2013 presentó el valor porcentual más alto del periodo de tiempo estudiado tanto para los lineamientos de la OMS (14,2%) como los nacionales (44,1%). Es decir, los días que sobrepasaron el valor máximo permitido fueron de 52 y 161 de acuerdo a los parámetros internacionales y nacionales respectivamente.

El año 2011 presentó el valor porcentual más bajo del periodo de tiempo estudiado tanto para los lineamientos de la OMS (0,8%) como para los nacionales (8,8%).

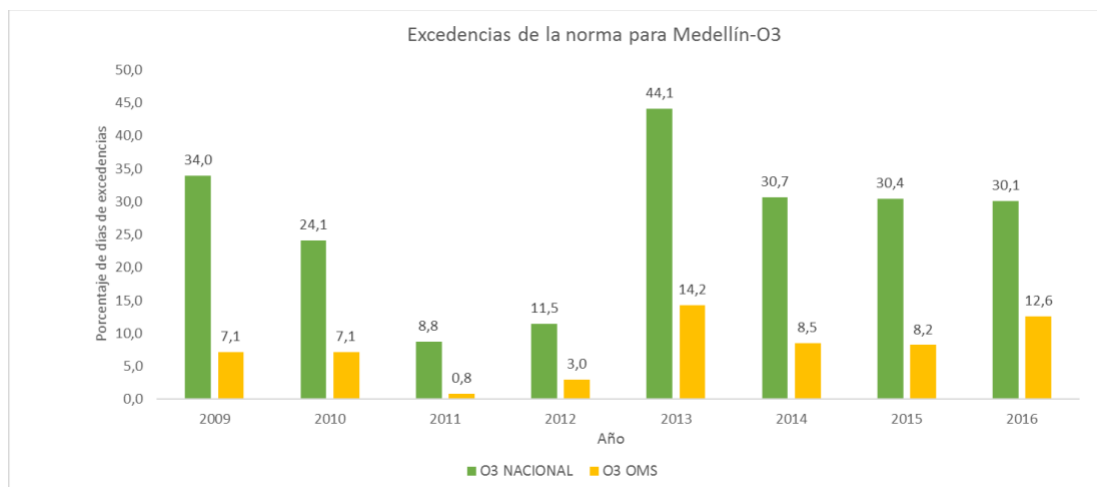


Figura 93.Excedencias de la norma para el contaminante O₃, municipio de Medellín, en el periodo 2008-2016

En general, el municipio de Medellín presenta excedencias de los tres contaminantes estudiados durante todo el periodo 2008-2016, destacándose valores porcentuales de excedencias cercanos al 100% para PM₁₀ y PM_{2.5}. Las excedencias para O₃, aunque en menores proporciones que los anteriores, se presentan en mayor porcentaje de acuerdo a los parámetros normativos nacionales.





4.3.10 Sabaneta

4.3.10.1 Estadísticos descriptivos para Sabaneta

Al observar la desviación estándar de PM₁₀ para el municipio de Sabaneta (Tabla 29), ésta indica variabilidad de los datos en relación al promedio; el valor mínimo no sobrepasa los 13 µg/m³ mientras, que el máximo registrado sobrepasa el límite establecido por los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud (50 µg/m³ diario) y la normatividad nacional (100 µg/m³ diario).

Tabla 29. Estadísticos descriptivos de las serie de contaminantes del municipio de Sabaneta

Contaminante	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Primer Cuartil	Tercer Cuartil
PM10	46,761	46,000	10,957	13,000	108,000	40,000	52,000

En la Figura 94 se puede observar una leve asimetría relacionada con la presencia de valores atípicos de los cuales todos se encuentran por encima del límite máximo permitido establecido por la OMS.

Al analizar los cuartiles del diagrama de cajas y bigotes (Tabla 29), se puede inferir que el 75% de los datos de PM₁₀ (tercer cuartil) se encuentran por debajo del límite máximo diario permitido para la norma nacional. El 50% de las concentraciones del contaminante se encuentra dentro de un valor de 12 µg/m³ (rango intercuartílico).

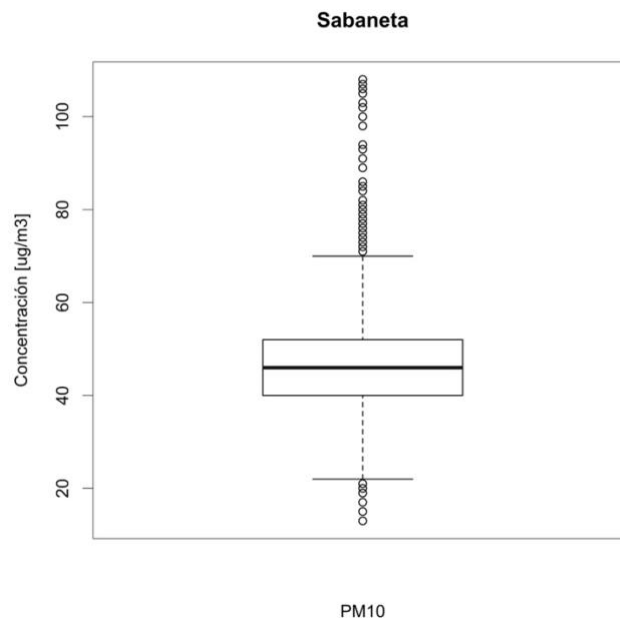


Figura 94. Diagrama de cajas y bigotes para la serie de PM₁₀ del municipio de Sabaneta



4.3.10.2 Promedios semana, mensual y anual para el municipio de Sabaneta

Se puede observar que para PM₁₀ el máximo promedio anual se presentó en el año 2009, año en cual empezó a disminuir el promedio anual hasta el año 2013, en donde comenzaron a aumentar dichos valores (**Figura 95**). Al comparar dichos valores con los límites máximos permisibles anuales, se observa que los niveles sobrepasan la norma nacional (50 µg/m³) en los años 2008, 2009 y 2016, sin embargo, se incumple la norma internacional (20 µg/m³) durante todo el periodo evaluado.

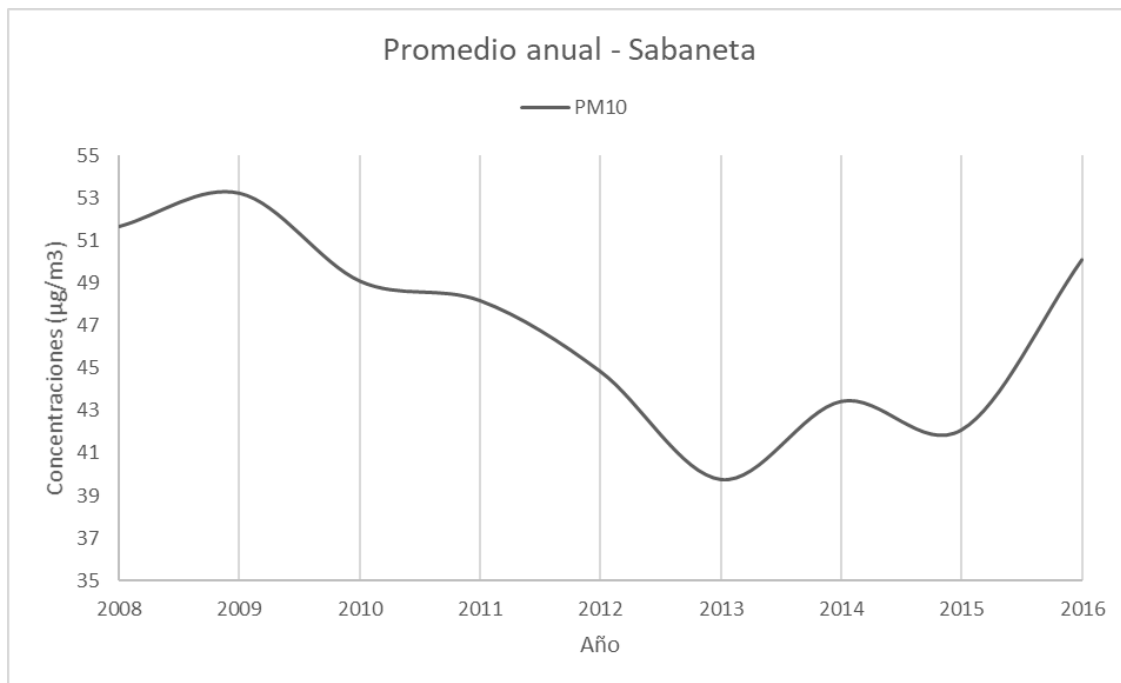


Figura 95. Promedios anuales para la serie de PM₁₀ del municipio de Sabaneta

Los mayores picos de concentración de PM₁₀ se presentan en los meses de marzo y abril, con un incremento general en los niveles desde el año 2014 (**Figura 96**). Estos aumentos estacionales en las concentraciones están asociados a las épocas de lluvia del país, las cuales propician condiciones de estabilidad atmosférica en el Valle de Aburrá.



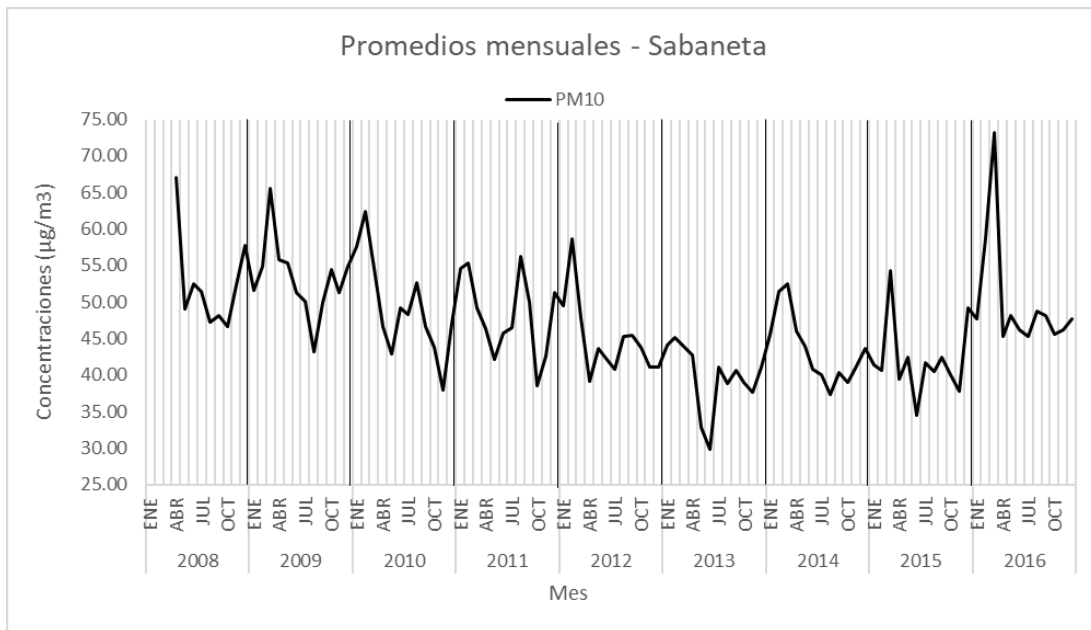


Figura 96. Promedios mensuales para cada año en la serie de PM₁₀ del municipio de Sabaneta

En general, se observa que los domingos se presentan las menores concentraciones para los contaminantes con una tendencia de aumento en los promedios entre los días jueves y sábado (**Figura 97**); esto puede estar asociado con la circulación de vehículos la cual es menor los domingos.

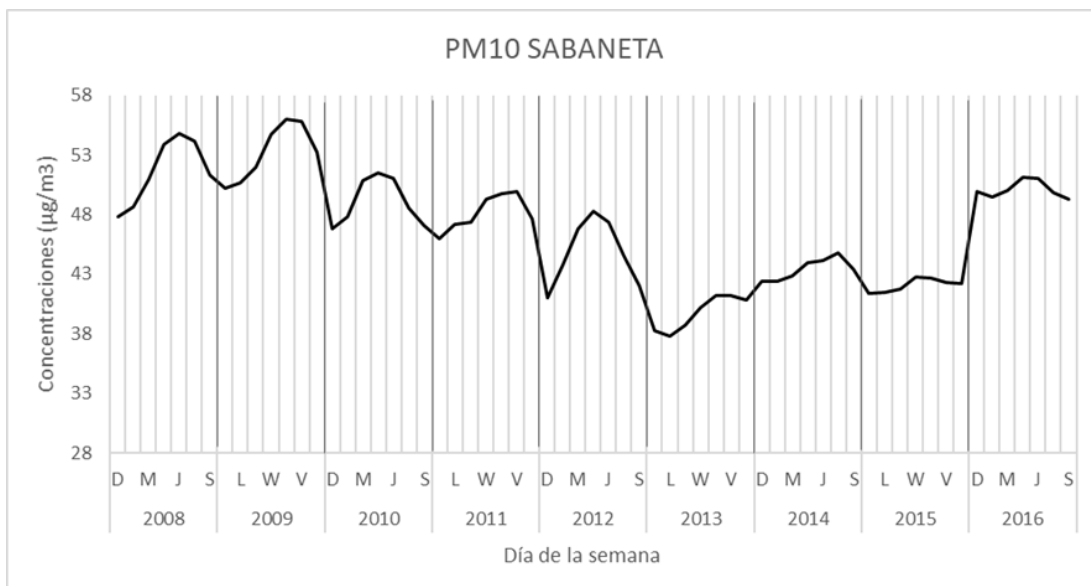


Figura 97. Promedios día de la semana para cada año en la serie de PM₁₀ del municipio de Sabaneta





4.3.10.3 Excedencias para el municipio de Sabaneta

Las excedencias para PM₁₀ se pueden observar en la Figura 98. de acuerdo a los lineamientos de la OMS, en el año 2009 se presentó el mayor valor porcentual de excedencias (57%) con 208 días que excedieron el límite máximo permitido. El menor valor porcentual se presentó en el año 2013 (10,1%), en el cual 37 días del año excedieron el valor límite permitido.

De acuerdo a la norma nacional, sólo se presentaron excedencias para los años 2009 y 2016 con un valor porcentual de 0.3% y 1,6% respectivamente, esto equivale a que solo en un día del año 2009 se presentaron valores que pasaron el máximo permitido, lo cual ocurrió en 6 días del año 2016.

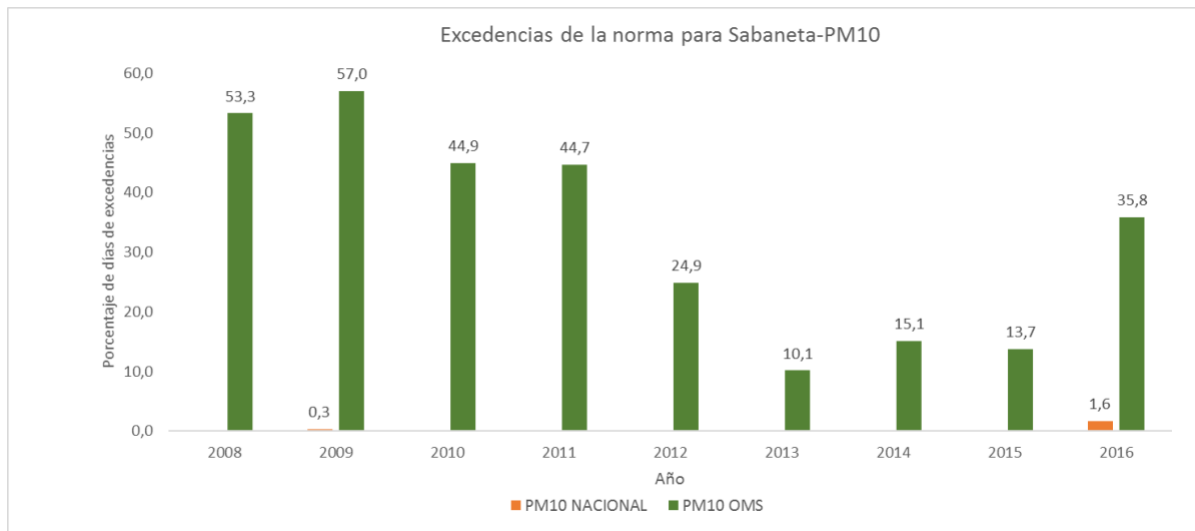


Figura 98. Excedencias de la norma para el contaminante PM₁₀, municipio de Sabaneta, en el periodo 2008-2016





4.4 ANÁLISIS DE LAS SERIES: ARIMAS POR MUNICIPIO

4.4.1 Barbosa

4.4.1.1 Tendencia

Al evaluar el valor p de la prueba Mann-Kendall, se observa que para O₃ no hay una tendencia significativa (valor p > 0.05), mientras que para PM₁₀ se observa la existencia de una pendiente monótonica decreciente, estadísticamente significativa, cuya mejor representación se da a través de un modelo logarítmico con un error cuadrático medio asociado de 11.525 (Tabla 30).

Tabla 30. Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Barbosa

Contaminante	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Modelo ajustado	LogBIC	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	-0.1161	0.000	Logarítmico	4.894	11.525	2.20E-16
O ₃	0.0094	0.6027	---	---	---	---

Se evidencia que el modelo logarítmico ajustado, asigna una tendencia monótonica decreciente a la serie, lo cual corrobora el resultado de la prueba Mann-Kendall (Figura 99). A pesar que el modelo logarítmico es una aproximación a la tendencia de la serie, éste no es suficiente para representar la serie de PM₁₀ en el municipio de Barbosa, dado que al aplicar la prueba Ljung-Box, se concluye que los residuales no provienen de un ruido blanco (valor p < 0.05), por ende, es necesario evaluar la existencia de una componente estacional en la serie.

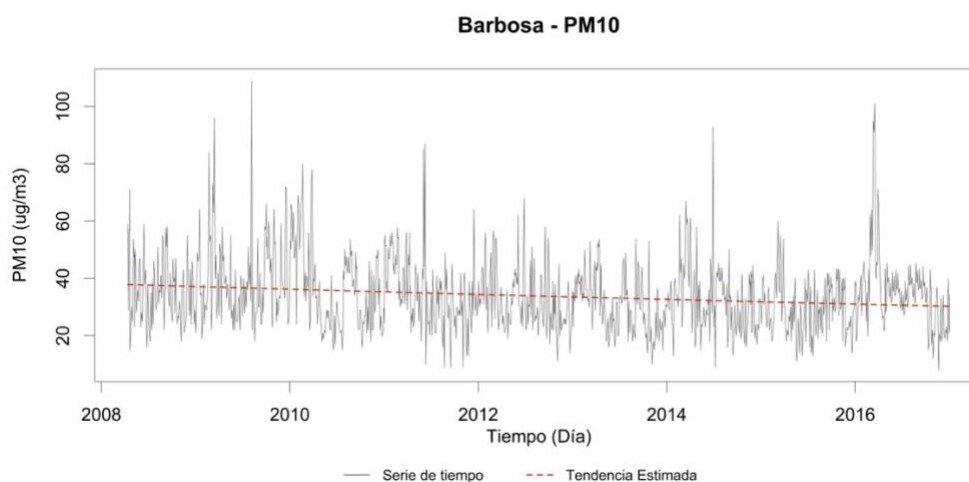


Figura 99. Modelo de tendencia exponencial ajustado para la serie diaria de PM₁₀ del municipio de Barbosa





Aunque durante el periodo 2008-2016 se encontró una pendiente significativa decreciente para la serie de PM_{10} , al evaluar la tendencia anual se observa que para los años 2009 y 2015 ésta no fue significativa (Tabla 31). Para la serie de O_3 , la cual no tiene una tendencia significativa, durante 4 de los 5 años de funcionamiento de la estación, la prueba de Mann-Kendall arroja la existencia de una tendencia monótonica significativa decreciente.

Tabla 31. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, en PM_{10} y O_3 del municipio de Barbosa

Año	PM_{10}			O_3		
	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Tendencia	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Tendencia
2008	-0.0872	0.0357	SI	---	---	---
2009	0.0133	0.7055	NO	---	---	---
2010	-0.2722	0	SI	---	---	---
2011	-0.3399	0	SI	---	---	---
2012	-0.2415	0	SI	-0.1597	0.0252	SI
2013	-0.3126	0	SI	-0.3069	0	SI
2014	-0.2299	0	SI	-0.1732	0	SI
2015	-0.003	0.9326	NO	0.0313	0.373	NO
2016	-0.296	0	SI	-0.2748	0	SI

4.4.1.2 Estacionalidad

Para la serie de PM_{10} se observan picos marcados en los meses septiembre-octubre y marzo-abril, siendo este último el de mayor magnitud; además, es posible visualizar una tendencia decreciente en la componente estacional (**Figura 100**). Por otro lado, para la serie de O_3 se presenta una estacionalidad bimodal en el año, correspondiente a los periodos mencionados para la serie de PM_{10} (**Figura 101**). Estos periodos se encuentran relacionados, en gran medida, con la estacionalidad climática de la región.



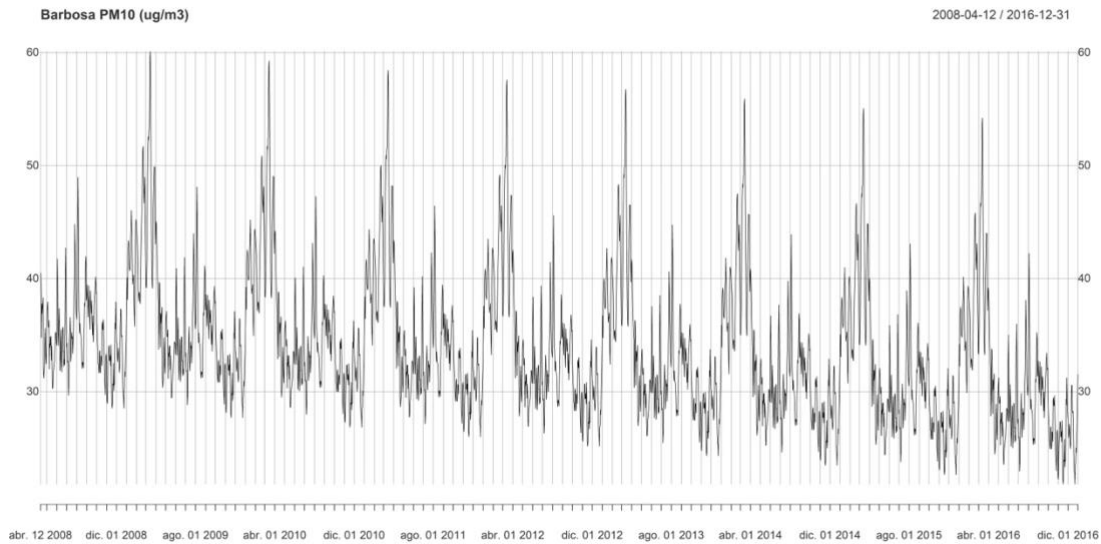


Figura 100. Estacionalidad de la serie de PM₁₀ del municipio de Barbosa

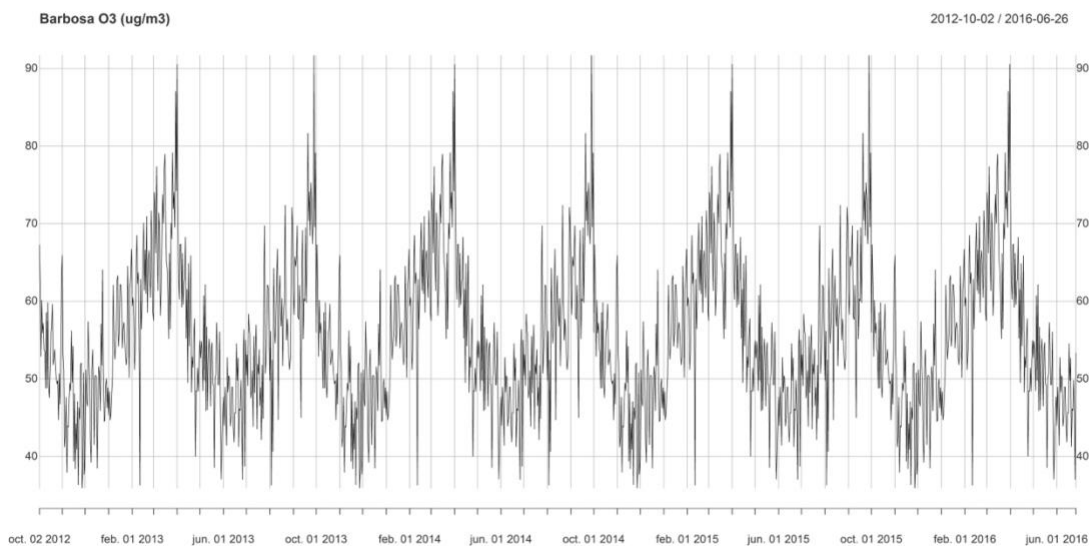


Figura 101. Estacionalidad de la serie de O₃ del municipio de Barbosa

Al evaluar el error y ajuste de estos modelos estacionales, se encuentra que ninguno de los residuales cumple con el supuesto de ruido blanco (**Tabla 32**), por ende, estos no son suficientes para modelar las series evaluadas.





Tabla 32. Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Barbosa

Contaminante	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	10.71187	2.20E-16
O ₃	11.99345	2.20E-16

4.4.2 Bello

4.4.2.1 Tendencia

Al evaluar el valor p de la prueba Mann-Kendall (**Tabla 33**), se observa que para todas las series hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula (valor p > 0.05), es decir que existe la presencia de tendencias monotónicas estadísticamente significativas en estas series, siendo la mayoría crecientes, exceptuando las series de PM₁₀ y O₃.

Es importante mencionar que, a pesar que se encontró con la prueba Mann-Kendall la presencia de una tendencia significativa para PM_{2.5} y NO, entre los cuatro modelos utilizados para representar dicha componente de las series de tiempo, ninguno de los modelos ajustados cumplió los supuestos, es decir, ninguno de los modelos planteados permite representar las tendencias de estos contaminantes en el municipio de Bello.

Tabla 33. Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Bello

Contaminante	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Modelo ajustado	LogBIC	RMSE	Ljung-Box
PM ₁₀	-0.3205	0	Cuadrático	4.933		
PM _{2.5}	0.0984	0.021	NO	---		
O ₃	-0.1506	0	Lineal	5.305	14.125	2.20E-16
NO	0.1254	0	NO	---	4.046	2.20E-16
NO ₂	0.2156	0	Cúbico	3.732	6.413	2.20E-16
NO _x	0.1878	0	Logarítmico	3.526	5.806	2.20E-16

Entre los cuatro modelos de tendencia evaluados, para PM₁₀ y O₃, el cuadrático y el lineal tuvieron el mejor ajuste, al tener el menor valor del Logaritmo del Criterio de Información Bayesiano (LogBIC) (**Figura 102** y





Figura 103). Al observar el sentido de las tendencias de manera gráfica, se corroboran los resultados de la prueba Mann-Kendall, la cual asigna una tendencia monótonica decreciente a la serie.

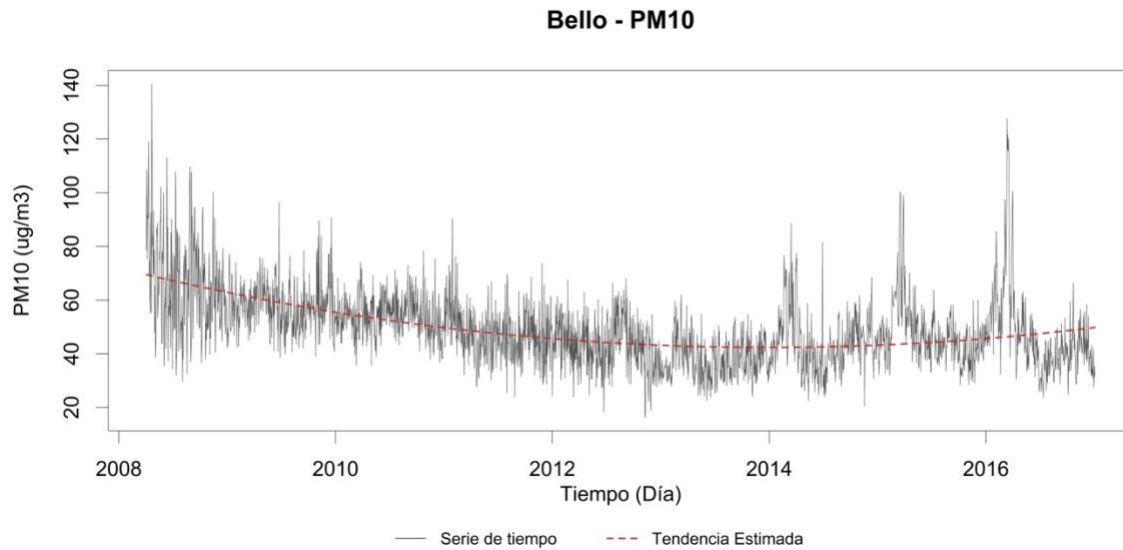


Figura 102. Modelo de tendencia cuadrático ajustado para la serie diaria de PM₁₀ del municipio de Bello

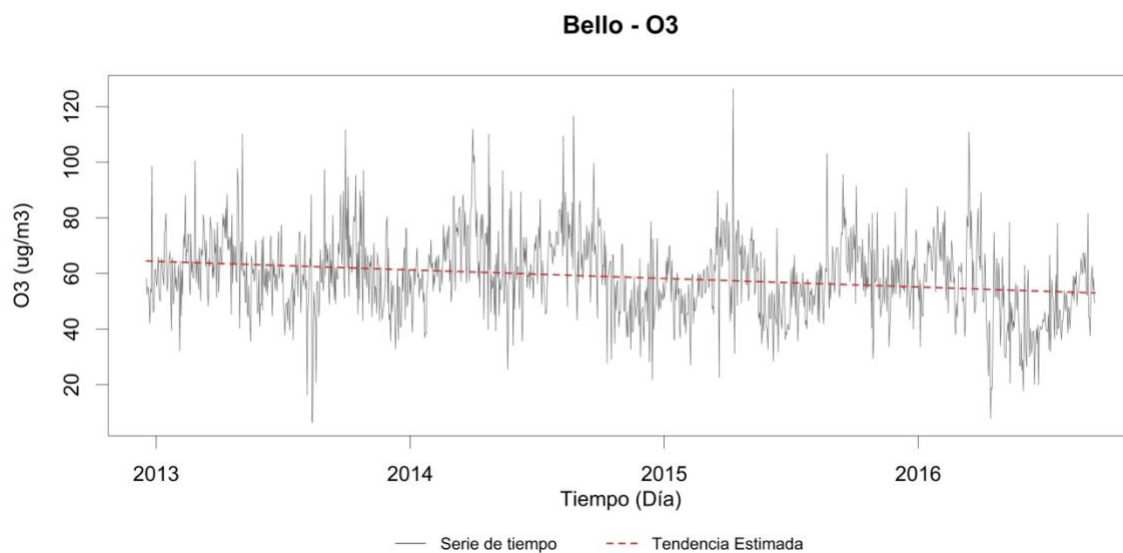


Figura 103. Modelo de tendencia lineal ajustado para la serie diaria de O₃ del municipio de Bello

Específicamente, para el caso de PM₁₀, aunque la tendencia en general es negativa, por la naturaleza del modelo matemático lineal ajustado se presenta un cambio paulatino en la pendiente de la tendencia en el





tramo 2014-2016. Esto indicaría que las concentraciones de PM₁₀ se han incrementado en los últimos años del periodo de análisis. Para evaluar estadísticamente este comportamiento, en la **Tabla 34** se muestran los resultados de la prueba Mann-Kendall para cada año de los contaminantes PM₁₀ y O₃ en Bello. Al observar el resultado de la prueba para PM₁₀ en los años 2014-2016, se encuentra que para el año 2014 la tendencia no es significativa, mientras que para 2015 y 2016 si es significativa con pendiente negativa, es decir, a pesar que el modelo ajustado reporta gráficamente una tendencia creciente de los niveles de PM₁₀ en el tramo evaluado, la prueba no paramétrica Mann-Kendall refuta dicho comportamiento.

Además, se observa que para los años 2009, 2010 y 2013 no se encontró una tendencia significativa y, para el resto de los años, la pendiente de la tendencia es negativa y significativa. Por otro lado, para la serie de O₃, la cual tiene una tendencia significativa decreciente para todo el periodo de medición, durante 1 de los 5 años de funcionamiento de la estación la prueba de Mann-Kendall arroja la existencia de una tendencia monotónica significativa creciente.

Tabla 34. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, en PM₁₀ y O₃ del municipio de Bello

Año	PM ₁₀			O ₃		
	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Tendencia	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Tendencia
2008	-0.1725	0	SI	---	---	---
2009	-0.0393	0.2627	NO	---	---	---
2010	-0.0635	0.0702	NO	---	---	---
2011	-0.1463	0	SI	---	---	---
2012	-0.1305	2.00E-04	SI	0.0833	0.6853	NO
2013	0.0449	0.2009	NO	-0.11	0.0017	SI
2014	0.0214	0.5412	NO	-0.1548	0	SI
2015	-0.2582	0	SI	0.0975	0.0055	SI
2016	-0.3503	0	SI	-0.2007	0	SI

En la **Figura 104** y **Figura 105** se muestran los modelos de tendencia cúbico y logarítmico ajustados a la serie de NO₂ y NO_x del municipio de Bello, respectivamente. De la **Tabla 33** se observa que la prueba Mann-Kendall asigna una tendencia monotónica creciente a ambas series, con el signo positivo del τ , situación que se corrobora con la figura de los modelos ajustados. En la **Figura 104**, se observa que gráficamente, para el periodo comprendido entre los años 2014 y 2015, la serie de NO₂ pareciera no tener una tendencia ni creciente ni decreciente, sin embargo, al observar la Tabla 35 se encuentra que para este periodo de tiempo, la tendencia es creciente y significativa, caso contrario ocurre para los años 2012 y 2013, en donde la tendencia no es significativa.



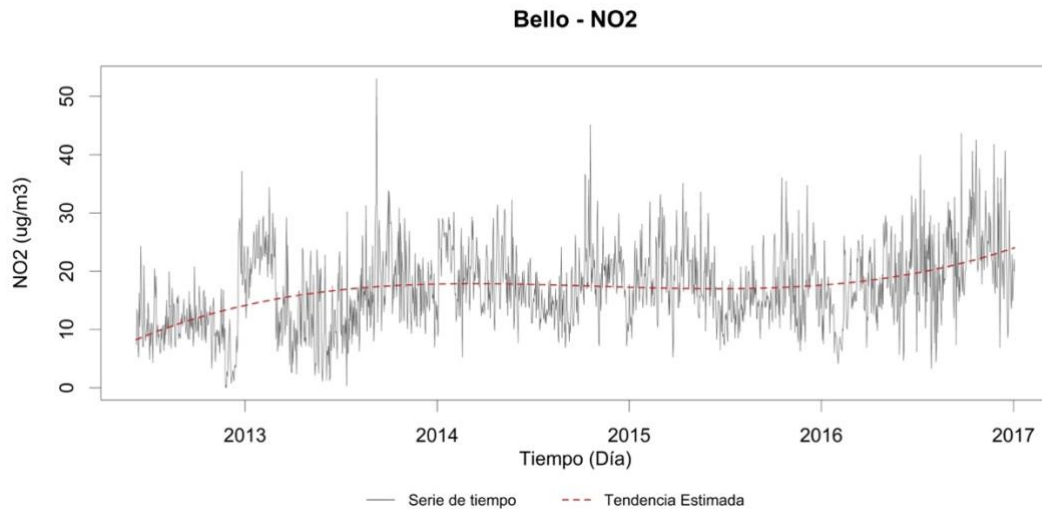


Figura 104. Modelo de tendencia cúbico ajustado para la serie diaria de NO₂ del municipio de Bello

Una situación particular ocurre en la serie de NO_x (**Figura 105**). Aunque se haya encontrado una tendencia creciente significativa para toda la serie, al evaluar las tendencias anuales se observa que, de los cinco años de registro de la serie, sólo uno presenta una tendencia significativa. Esto implicaría que la tendencia significativa para todo el periodo comprendido entre 2012-2016, está condicionada principalmente por la existencia de una tendencia en el año 2016.

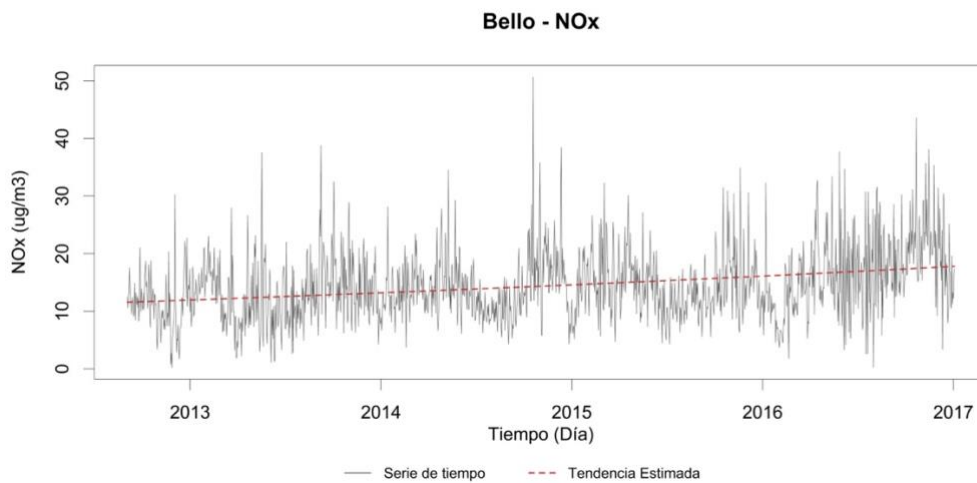


Figura 105. Modelo de tendencia logarítmico ajustado para la serie diaria de NO_x del municipio de Bello

Para el caso particular de la serie de NO se mencionó previamente que los datos presentan una tendencia significativa creciente, sin embargo al analizar las tendencias anuales (**Tabla 35**), se encuentra que para los años 2014 y 2015 la serie no tiene una tendencia significativa, mientras que para los años 2012, 2013 y 2016 sí, siendo la primera decreciente y las dos últimas crecientes, lo que implica un aumento de las concentraciones de NO en los últimos años del periodo de estudio.





Tabla 35. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, en NO₂ y NO_x del municipio de Bello

Serie	Prueba Mann-Kendall	Año				
		2012	2013	2014	2015	2016
NO ₂	τ	-0.015	0.0166	-0.1235	-0.113	0.312
	Valor p	0.747	0.6367	4.00E-04	0.0013	0
	Tendencia	NO	NO	SI	SI	SI
NO	τ	-0.263	0.1284	0.0399	0.0178	0.231
	Valor p	0	3.00E-04	0.2563	0.6115	0
	Tendencia	SI	SI	NO	NO	SI
NO _x	τ	-0.114	0.0493	0.0433	-0.037	0.292
	Valor p	0.0637	0.1605	0.2169	0.2895	0
	Tendencia	NO	NO	NO	NO	SI

A pesar que los modelos ajustados son una aproximación a las tendencias de las series, éstos no son suficientes para representar de manera eficiente el comportamiento de las series de contaminantes del municipio de Bello, dado que los residuales no son ruido blanco (valor p de la prueba Ljung-Box menor que 0.05 - Tabla 34), por ende, es necesario evaluar la existencia de una componente estacional en las series.

4.4.2.2 Estacionalidad

Para la serie de PM₁₀ se observan picos marcados en los meses septiembre-octubre y marzo-abril, siendo este último el de mayor magnitud (**Figura 106**). Por otro lado, para la serie de O₃ se presenta una estacionalidad bimodal en el año, correspondiente a los periodos mencionados para la serie de PM₁₀ (**Figura 107**), lo cual está relacionado en gran medida con la estacionalidad climática de la región. Para ambas series es posible visualizar la tendencia decreciente en la componente estacional.



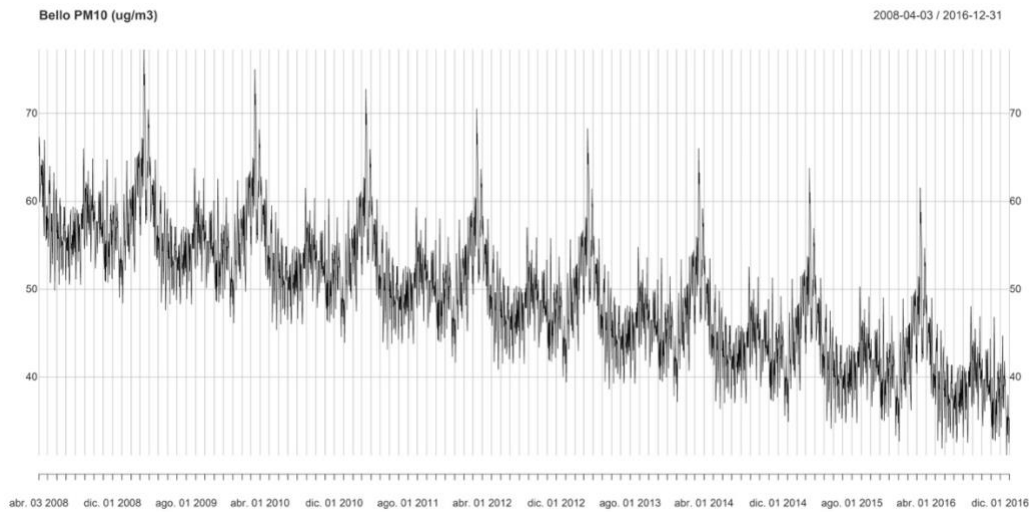


Figura 106. Estacionalidad de la serie de PM₁₀ del municipio de Bello

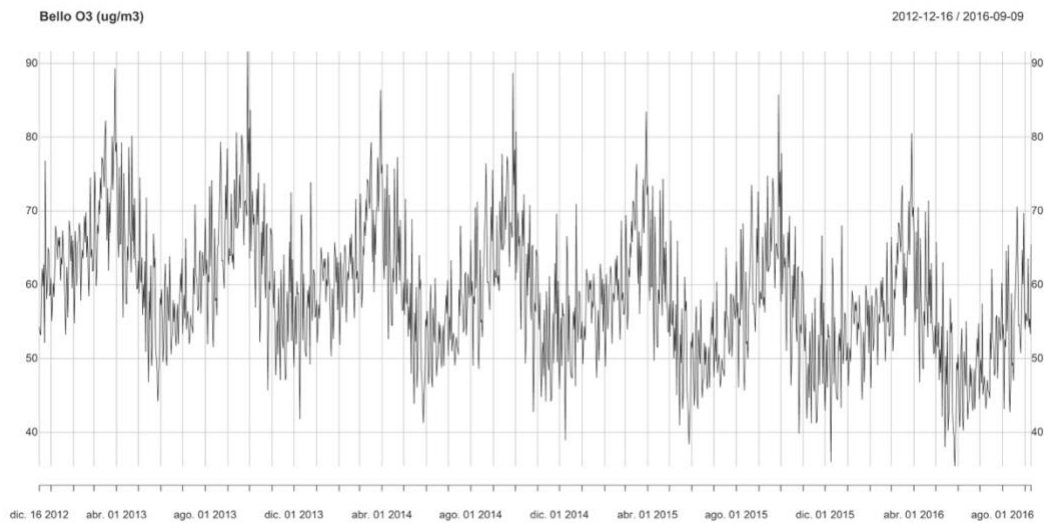


Figura 107. Estacionalidad de la serie de O₃ del municipio de Bello

En las **Figura 108**, **Figura 109** y **Figura 110** ilustran los modelos estacionales de la serie de NO₂, NO y NO_x del municipio de Bello, respectivamente. Para todas las series se observan picos marcados en los meses septiembre-octubre y marzo-abril, siendo el primero, el de mayor magnitud. Esto implica que se esperaría que los niveles de estos contaminantes fueran más altos en la segunda época lluviosa que se presenta en el año, caso contrario ocurre con los otros contaminantes, en donde se esperan episodios de altas concentraciones en la primera época lluviosa del año. Además, en las figuras de la componente estacional de las series de NO₂ y NO_x (**Figura 108** y **Figura 109**) se evidencia la tendencia creciente presente en los datos.



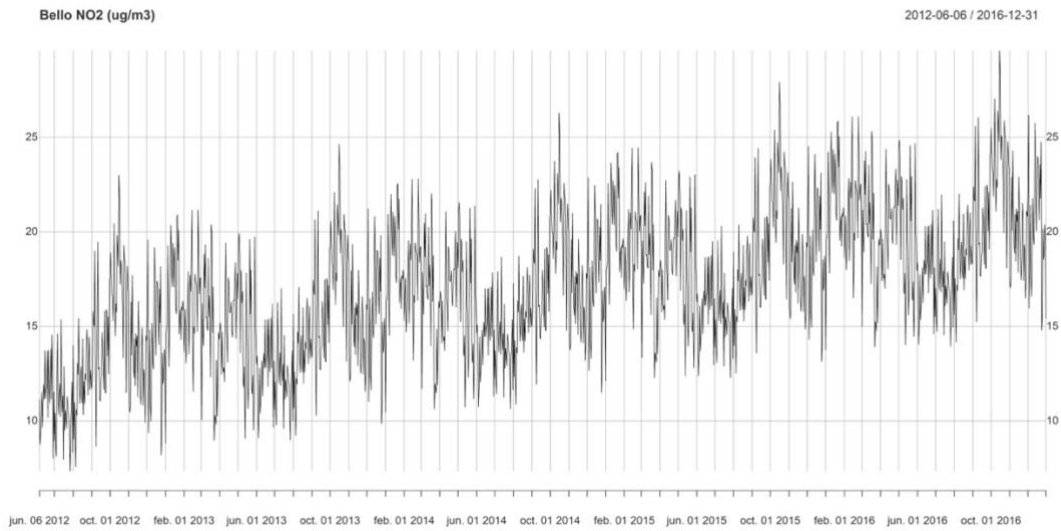


Figura 108. Estacionalidad de la serie de NO₂ del municipio de Bello

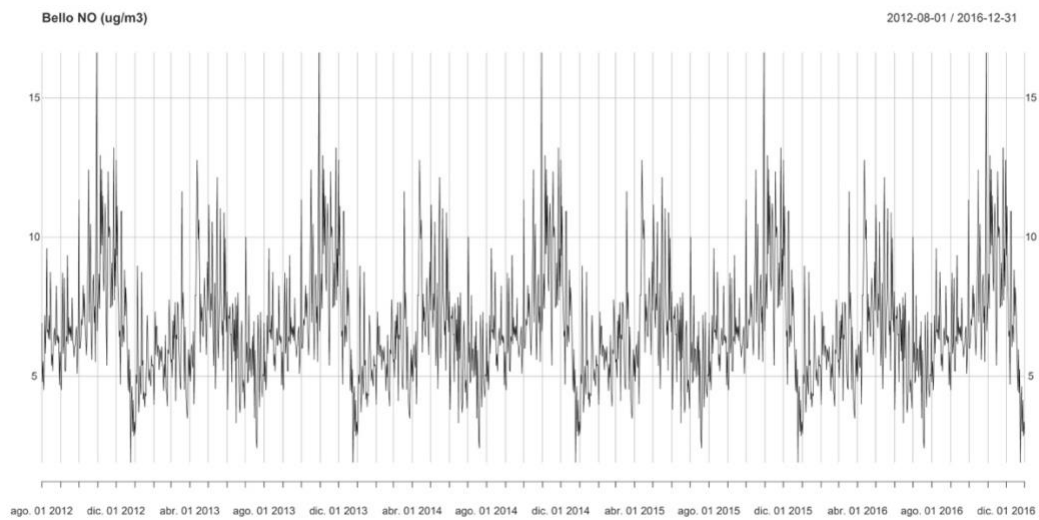


Figura 109. Estacionalidad de la serie de NO del municipio de Bello



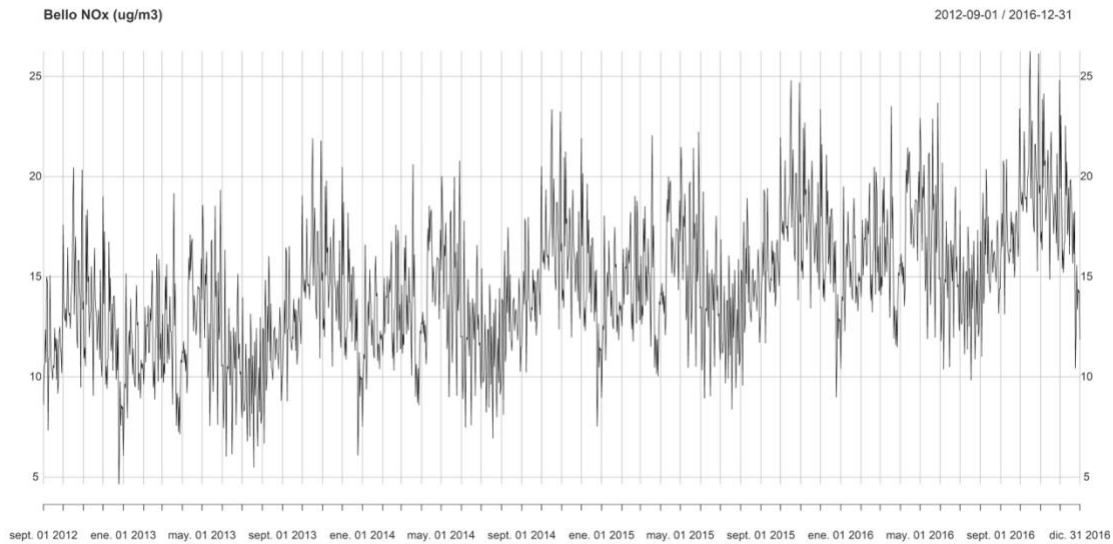


Figura 110. Estacionalidad de la serie de NOX del municipio de Bello

Al evaluar el error y ajuste de estos modelos estacionales, se encuentra que ninguno de los residuales cumple con el supuesto de ruido blanco (**Tabla 36**), por lo tanto, estos modelos no son suficientes para modelar las series evaluadas.

Tabla 36. Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Bello

Contaminante	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM10	12.580	2.20E-16
O3	13.630	2.20E-16
NO	3.952	2.20E-16
NO2	6.673	2.20E-16
NOX	5.792	2.20E-16

Para PM_{2.5} no se encontró un modelo estacional con la metodología planteada. Esto puede estar relacionado a que se está trabajando con una serie de menos de un año, dado que el primer dato se registra para el 29 de abril de 2016. Por ende, en este corto periodo de tiempo, no se alcanzan a percibir los picos estacionales en los meses marzo-abril, asociados a la época lluviosa de la región.





4.4.3 Caldas

4.4.3.1 Tendencia

Al evaluar el valor p de la prueba Mann-Kendall, se observa que para las series de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, es decir que existe la presencia de tendencias monotónicas estadísticamente significativas en estas series, siendo la tendencia del PM₁₀ negativa y la de PM_{2.5} y O₃ positiva (Tabla 37).

Es importante mencionar que, a pesar de que para O₃ se encontró con la prueba Mann-Kendall la presencia de una tendencia significativa, entre los cuatro modelos utilizados para representar dicha componente de las series de tiempo, ninguno cumplió los supuestos, es decir, ninguno de los modelos planteados permite representar las tendencias del O₃ en el municipio de Caldas.

Tabla 37. Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Caldas

Contaminante	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Modelo ajustado	LogBIC	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	-0.127	0	Cuadrático	4.952	11.854	2.20E-16
PM _{2.5}	0.0984	0.021	Lineal	4.580	9.834	2.20E-16
O ₃	0.0859	0	NO	---	---	---

En las **Figura 111** y **Figura 112** se muestran los modelos de tendencia cuadrático y lineal ajustados a la serie de PM₁₀ y PM_{2.5} del municipio de Caldas, respectivamente. Estos modelos, entre los cuatro evaluados, tuvieron el mejor ajuste. Al observar el sentido de las tendencias gráficamente, se observa que para PM₁₀ el modelo ajustado decrece hasta el año 2015 y luego cambia progresivamente a una pendiente positiva, debido a la naturaleza del modelo cuadrático. Para el PM_{2.5}, se corroboran los resultados de la prueba Mann-Kendall, la cual asigna una tendencia monotónica creciente a la serie.



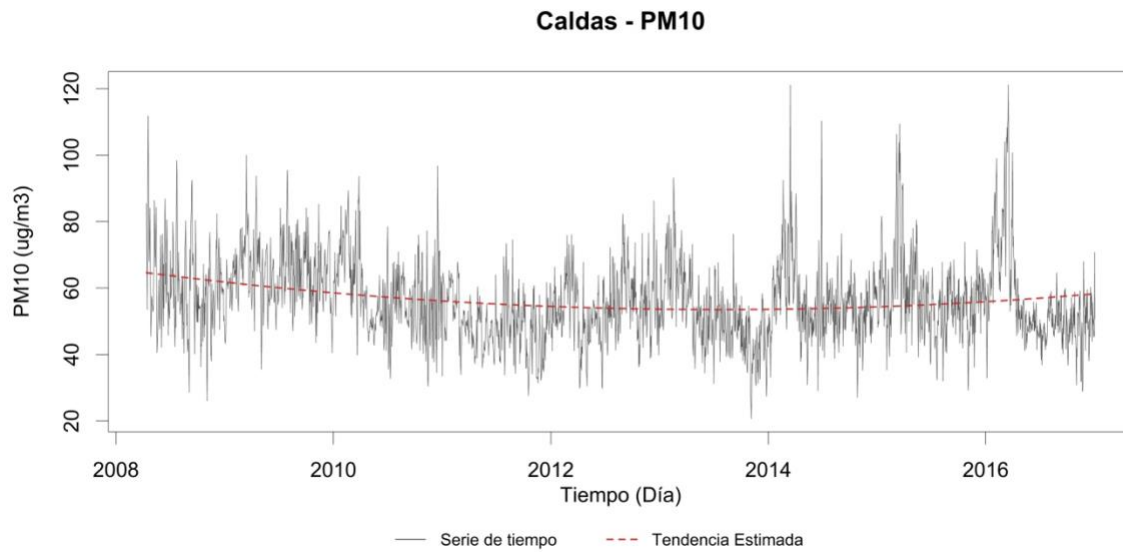


Figura 111. Modelo de tendencia cuadrático ajustado para la serie diaria de PM₁₀ del municipio de Caldas

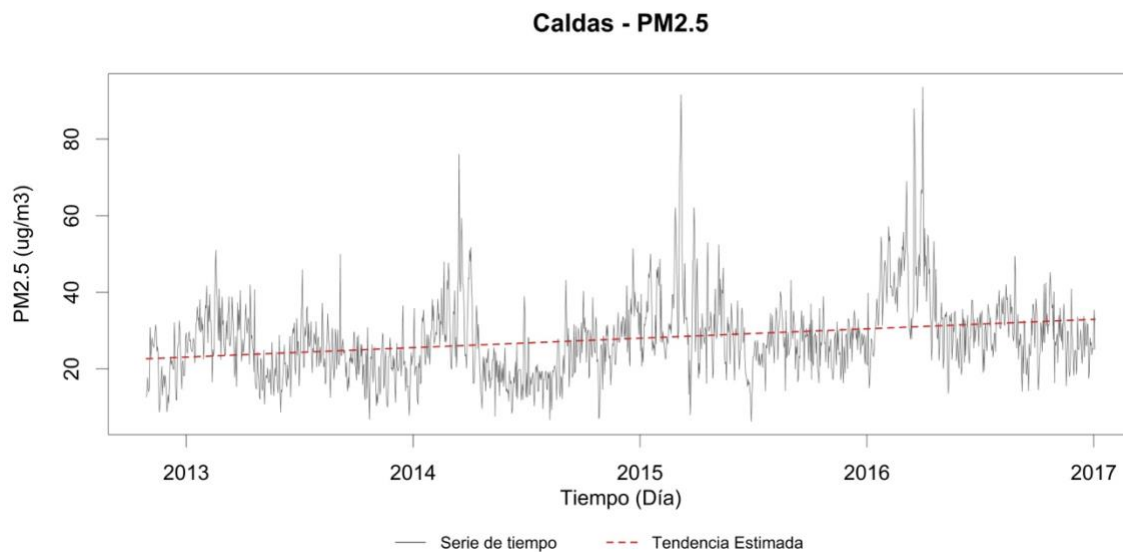


Figura 112. Modelo de tendencia lineal ajustado para la serie diaria de PM_{2.5} del municipio de Caldas

En el caso de PM₁₀ se observa que a pesar de que para todo el periodo comprendido entre 2008-2016 se haya encontrado una pendiente significativa decreciente, al evaluar la tendencia anualmente se observa que para el año 2009 no se encontró una tendencia significativa. Además, contrario a los otros años, para el 2012, la tendencia es creciente (**Tabla 38**). Las series de PM_{2.5} y O₃ tienen una tendencia significativa creciente a lo largo de todo el periodo de medición, sin embargo, en los 3 años cuyas pendientes se encontraron significativas, la prueba de Mann-Kendall arroja pendientes negativas.





Tabla 38. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, en PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ del municipio de Caldas

Serie	Prueba Mann-Kendall	Año								
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
PM ₁₀	τ	-0.1184	-0.0351	-0.2416	-0.1933	0.101	-0.4515	-0.133	-0.1486	-0.349
	Valor p	0.0041	0.3173	0	0	0.0039	0	1.00E-04	0	0
	Tendencia	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
PM _{2.5}	τ	---	---	---	---	0.0691	-0.2856	0.0271	-0.2152	-0.3022
	Valor p	---	---	---	---	0.4159	0	0.4401	0	0
	Tendencia	---	---	---	---	NO	SI	NO	SI	SI
O ₃	τ	---	---	---	---	-0.1105	-0.1885	-0.2469	0.0598	-0.3755
	Valor p	---	---	---	---	0.1915	0	0	0.0884	0
	Tendencia	---	---	---	---	NO	SI	SI	NO	SI

A pesar que los modelos ajustados son una aproximación a las tendencias de las series, éstos no son suficientes para representar las series de contaminantes del municipio de Caldas, debido a que los residuales no son ruido blanco (valor p de la prueba Ljung-Box menor que 0.05 -**Tabla 37**). Por ende, es necesario evaluar la existencia de una componente estacional en las series.

4.4.3.2 Estacionalidad

Para las series de PM₁₀(**Figura 113**) y O₃(**Figura 114**) se observan picos marcados en los meses marzo-abril, seguidos por otros de menor magnitud en los meses septiembre-octubre. Por otro lado, para la serie de PM_{2.5} (Figura 115) sólo se presenta un pico marcado en el año, correspondiente a los meses marzo-abril, lo cual está relacionado en gran medida con la estacionalidad climática de la región. Para las series de PM₁₀ y PM_{2.5} es posible visualizar la tendencia decreciente y creciente, respectivamente, en la componente estacional.



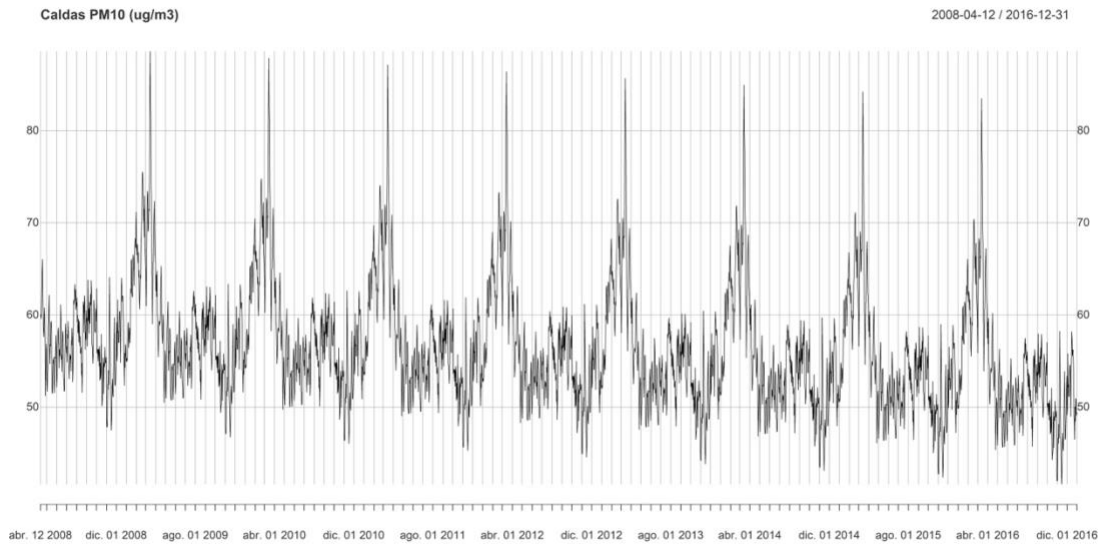


Figura 113. Estacionalidad de la serie de PM₁₀ del municipio de Caldas

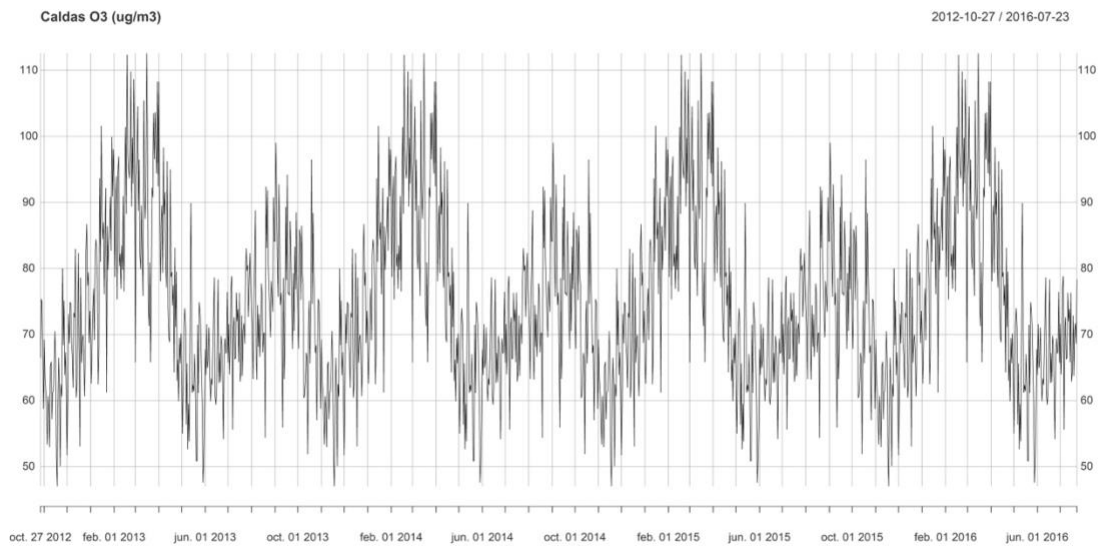


Figura 114. Estacionalidad de la serie de O₃ del municipio de Caldas



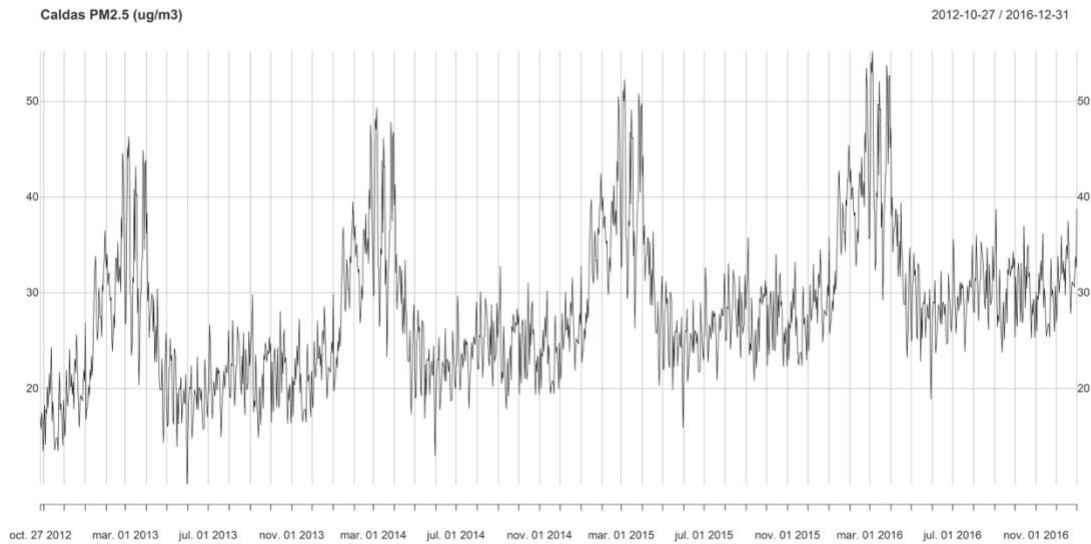


Figura 115. Estacionalidad de la serie de PM_{2.5} del municipio de Caldas

Al evaluar el error y ajuste de estos modelos estacionales, se encuentra que ninguno de los residuales cumple con el supuesto de ruido blanco (**Tabla 39**), por ende, estos modelos no son suficientes para modelar las series evaluadas.

Tabla 39. Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Caldas

Contaminante	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	11.075	2.20E-16
PM _{2.5}	8.337	2.20E-16
O ₃	19.145	2.20E-16

4.4.4 Copacabana

4.4.4.1 Tendencia

En la **Tabla 40** se muestra el resultado de la prueba Mann-Kendall y el modelo de tendencia ajustado para PM₁₀ del municipio de Copacabana. Al evaluar el valor p de la prueba Mann-Kendall, se observa que para esta serie hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, es decir que existe la presencia de una tendencia monótona estadísticamente significativa, siendo ésta negativa.





Tabla 40. Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Caldas

Contaminante	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Modelo ajustado	LogBIC	RMSE	Valor p Ljung-Box
Copacabana	-0.1831	0	Logarítmico	4.7460	10.706	2.20E-16

En la **Figura 116** se muestran los modelos de tendencia cuadrático y lineal ajustados a la serie de PM₁₀ del municipio de Copacabana. Este modelo presentó el mejor ajuste de entre los cuatro evaluados, representado por un menor valor del Logaritmo del Criterio de Información Bayesiano (LogBIC). Al observar el sentido de las tendencias gráficamente, se observa que para PM₁₀ el modelo ajustado tiene una pendiente negativa.

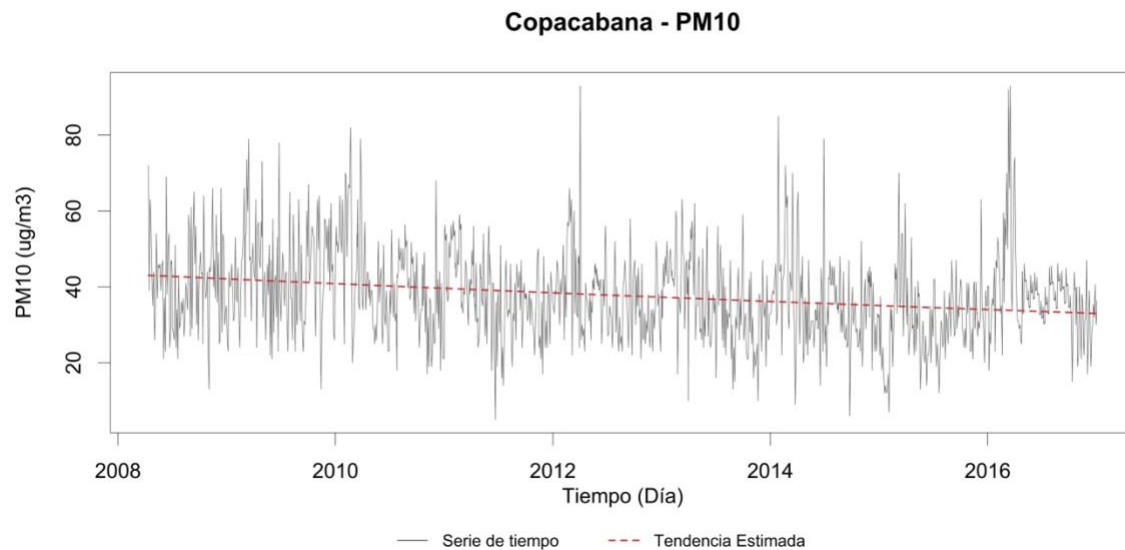


Figura 116. Modelo de tendencia logarítmico ajustado para la serie diaria de PM₁₀ del municipio de Copacabana

En la **Tabla 41** se muestran los resultados de la prueba Mann-Kendall para cada año de PM₁₀ en Copacabana. Se observa que a pesar que para todo el periodo comprendido entre 2008-2016 se haya encontrado una pendiente significativa decreciente, al evaluar la tendencia anualmente se presenta que para los años 2008 y 2009 no se encontró una tendencia significativa. Además, contrario a los otros años, para el 2015, la tendencia es creciente.





Tabla 41. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada a PM₁₀ para cada año, del municipio de Copacabana

Año	PM ₁₀ τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Tendencia
2008	0.0213	0.6072	NO
2009	0.0335	0.3413	NO
2010	-0.3138	0	SI
2011	-0.3173	0	SI
2012	-0.2158	0	SI
2013	-0.3566	0	SI
2014	-0.2121	0.00E+00	SI
2015	0.1242	0.0004	SI
2016	-0.2379	0	SI

A pesar que el modelo ajustado es una aproximación a la tendencia de la serie, éste no es suficiente para representar el comportamiento del PM₁₀, del municipio de Copacabana, debido a que los residuales no son ruido blanco (valor p de la prueba Ljung-Box menor que 0.05 -**Tabla 40**) por ende, es necesario evaluar la existencia de una componente estacional en la serie.

4.4.4.2 Estacionalidad

En la **Figura 117**, se observa el modelo estacional de la serie de PM₁₀ del municipio de Copacabana. Se observan picos marcados en los meses marzo-abril, seguidos por otros de menor magnitud en los meses septiembre-octubre, lo cual está relacionado en gran medida con la estacionalidad climática de la región. Además, es posible visualizar la tendencia decreciente, en la componente estacional.



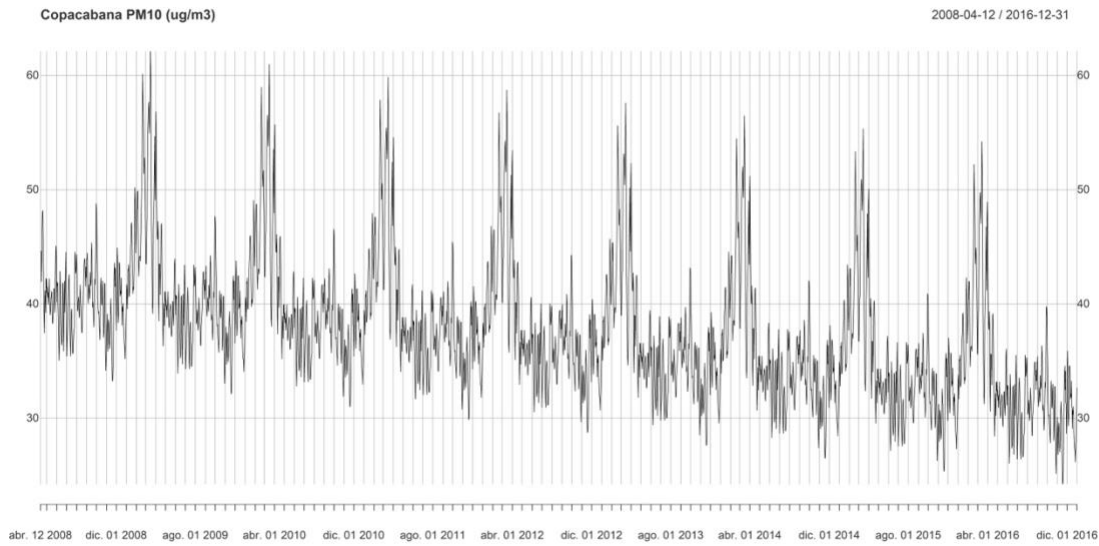


Figura 117. Estacionalidad de la serie de PM₁₀ del municipio de Copacabana

Al evaluar el error y ajuste de estos modelos estacionales, se encuentra que ninguno de los residuales cumple con el supuesto de ruido blanco (**Tabla 42**), por ende, estos modelos no son suficientes para modelar las series evaluadas.

Tabla 42. Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Copacabana

Contaminante	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	11.075	2.20E-16
PM _{2.5}	8.337	2.20E-16
O ₃	19.145	2.20E-16

4.4.5 Envigado

4.4.5.1 Tendencia

Al evaluar el valor p de la prueba Mann-Kendall, se observa que para todas las series, excepto para PM_{2.5}, hay suficiente evidencia que soporta la existencia de tendencias monotónicas estadísticamente significativas en estas series, siendo la mayoría decrecientes, exceptuando la tendencia para O₃(Tabla 43).

Es importante mencionar que, a pesar que la prueba Mann-Kendall arrojó una tendencia significativa para la mayoría de las series, sólo se ajustaron modelos lineales de tendencia para las series de PM₁₀ y NO_x.





Entre los cuatro modelos utilizados para representar dicha componente de las series de tiempo, se encontró el mejor ajuste con los modelos cúbico y lineal para PM₁₀ y NO_x, respectivamente.

Tabla 43. Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Envigado

Contaminante	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Modelo ajustado	LogBIC	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	-0.0622	0.0001	Cúbico	5.120	12.840	2.20E-16
PM _{2.5}	-0.0301	0.2453	NO	---	---	---
O ₃	0.125	0	NO	---	---	---
NO	-0.1282	0	NO	---	---	---
NO ₂	-0.1269	0	NO	---	---	---
NOX	-0.1506	0	Lineal	3.241	5.0367	2.20E-16

En la **Figura 118** y **Figura 119** se muestran los modelos de tendencia cúbico y lineal ajustados a la serie de PM₁₀ y NO_x del municipio de Envigado, respectivamente. Estos modelos, entre los cuatro evaluados, tuvieron el mejor ajuste, representado por un menor valor del Logaritmo del Criterio de Información Bayesiano (LogBIC). Al observar el sentido de las tendencias de manera gráfica, se corrobora los resultados de la prueba Mann-Kendall, la cual asigna una tendencia monotónica decreciente a la serie con el signo negativo del τ .

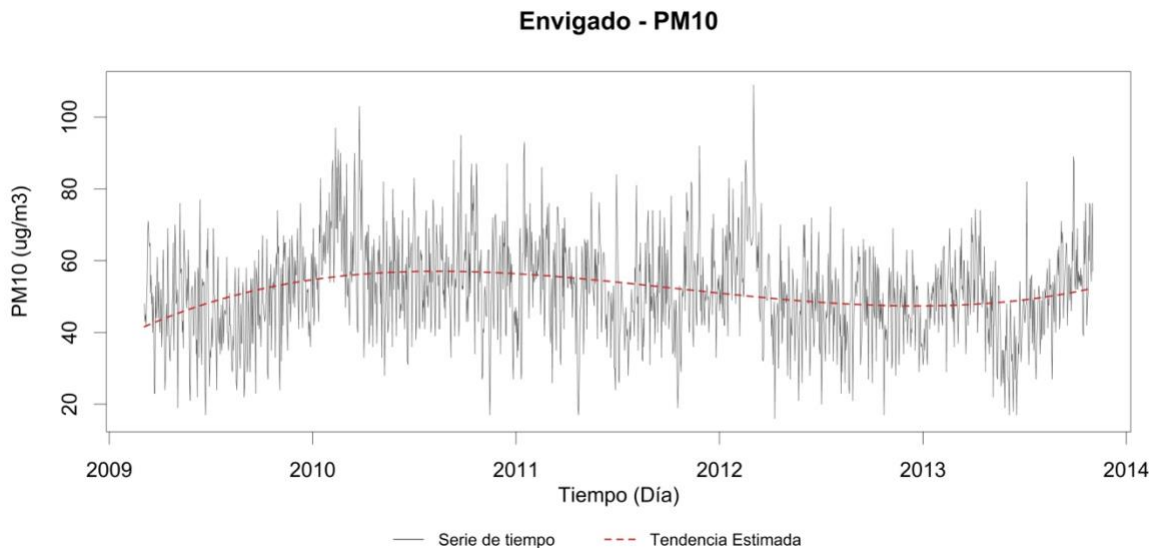


Figura 118. Modelo de tendencia cúbico ajustado para la serie diaria de PM₁₀ del municipio de Envigado



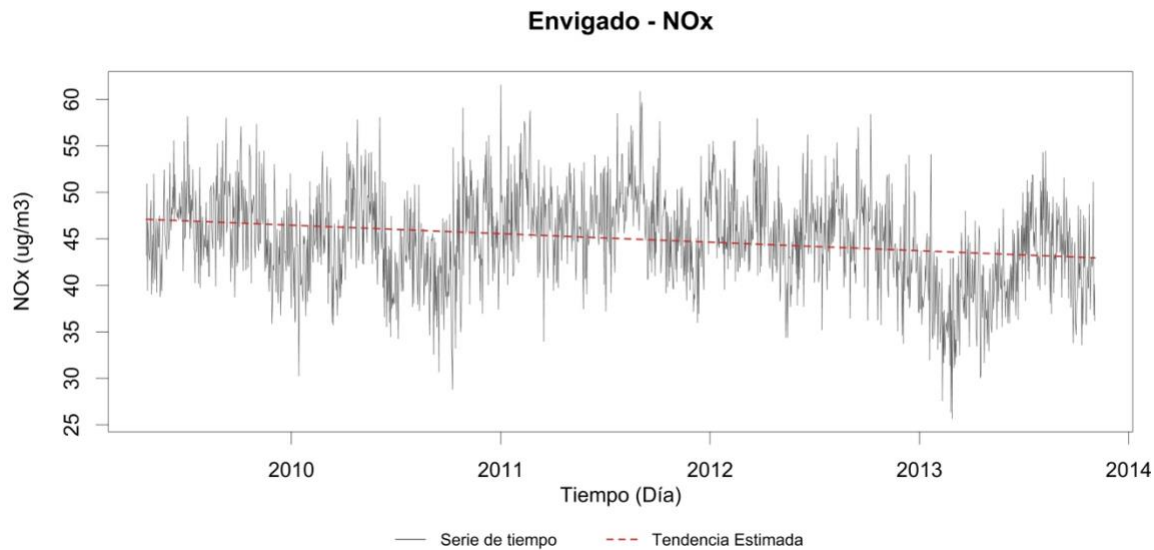


Figura 119. Modelo de tendencia lineal ajustado para la serie diaria de NOx del municipio de Envigado

Específicamente, para el caso de PM_{10} , aunque la tendencia en general es negativa, por la naturaleza del modelo cúbico ajustado, se presentan diferentes pendientes en tres periodos de tiempo: 2009-2010, 2010-2013 y 2013-2014. Esto indicaría que las concentraciones de PM_{10} tenían una tendencia creciente hasta antes del año 2010, año en el cual la pendiente comenzó a decrecer paulatinamente hasta el 2013, para luego volver a incrementarse levemente. Para evaluar estadísticamente este comportamiento, en la Tabla 44 se muestran los resultados de la prueba Mann-Kendall para cada año de los contaminantes en Envigado. Al observar el resultado de la prueba para PM_{10} , se encuentra que para los años 2009 y 2013 la tendencia es creciente y significativa, mientras que para los años 2010 a 2012 es decreciente y significativa, es decir que la prueba Mann-Kendall corrobora el comportamiento observado con el modelo de tendencia ajustado.

Tabla 44. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para los contaminantes del municipio de Envigado

Contaminante	Prueba Mann-Kendall	Año				
		2009	2010	2011	2012	2013
PM_{10}	τ	0.0836	-0.1487	-0.1085	-0.2407	0.1078
	Valor p	0.0315	0	0.0021	0	0.0054
	Tendencia	SI	SI	SI	SI	SI
$PM_{2.5}$	τ	---	---	---	0.0246	-0.2563
	Valor p	---	---	---	0.4834	0
	Tendencia	---	---	---	NO	SI





Contaminante	Prueba Mann-Kendall	Año				
		2009	2010	2011	2012	2013
O ₃	τ	0.0067	0.3279	-0.2021	0.2023	---
	Valor p	0.8736	0	0	0	---
	Tendencia	NO	SI	SI	SI	---
NO	τ	-0.0236	0.062	-0.216	0.1436	-0.0536
	Valor p	0.5764	0.0771	0	0	0.163
	Tendencia	NO	NO	SI	SI	NO
NO ₂	τ	-0.0081	0.0039	-0.1029	-0.0219	-0.0556
	Valor p	0.8476	0.9108	0.0033	0.5325	0.148
	Tendencia	NO	NO	SI	NO	NO
NO _x	τ	-0.0661	-0.0021	-0.1128	-0.1381	0.2611
	Valor p	0.1165	0.9517	0.0013	1.00E-04	0
	Tendencia	NO	NO	SI	SI	SI

Por otro lado, para la serie de PM_{2.5} se encuentra una tendencia decreciente y significativa sólo para el año 2013, siendo esta insuficiente para declarar la existencia de una tendencia monótonica significativa para todo el periodo registrado de PM_{2.5}. Algo similar ocurre con la serie de NO₂, la cual presenta únicamente una tendencia significativa y decreciente para el año 2011.

Para O₃ y NO_x se tienen tres años con tendencias significativas: 2010 a 2012 y 2011 a 2013, respectivamente. La prueba de Mann-Kendall para la serie completa de O₃ arroja una tendencia creciente significativa, algo que se observa entre los años con tendencia significativa excepto para el año 2011, cuya pendiente es negativa. Por otro lado, 2 de los 3 años con tendencia significativa en la serie de NO_x, tienen pendiente negativa, al igual que la serie evaluada en todo el periodo de medición; caso contrario sucede en el año 2013, cuya pendiente es positiva. Asimismo, para la serie de NO sólo se encontraron tendencias significativas para los años 2011 (negativa) y 2012 (positiva).

A pesar que los modelos ajustados son una aproximación a las tendencias de las series, éstos no son suficientes para representar las series de contaminantes del municipio de Envigado, debido a que los residuales no son ruido blanco (valor p de la prueba Ljung-Box menor que 0.05 -**Tabla 43**). Por ende, es necesario evaluar la existencia de una componente estacional en las series.





4.4.5.2 Estacionalidad

En la **Figura 120 a Figura 123** se observan los modelos estacionales de la serie de PM₁₀, O₃, NO y NO_x del municipio de Envigado, respectivamente. Para estas series, se observan picos marcados en los meses marzo–abril, siendo más evidentes en la serie de NO. Esto, a diferencia de los contaminantes evaluados en los otros municipios, muestra un comportamiento monomodal estacional de estos cuatro contaminantes, situación que puede ser asociada al periodo de medición de las series, comprendido entre los años 2009 y 2013, dado que se ha observado que la estacionalidad bimodal de los contaminantes se viene presentando desde el año 2014. Además, en las figuras de la componente estacional de las series de PM₁₀ y NO_x (**Figura 120 y Figura 123**) se evidencia la tendencia decreciente presente en los datos.

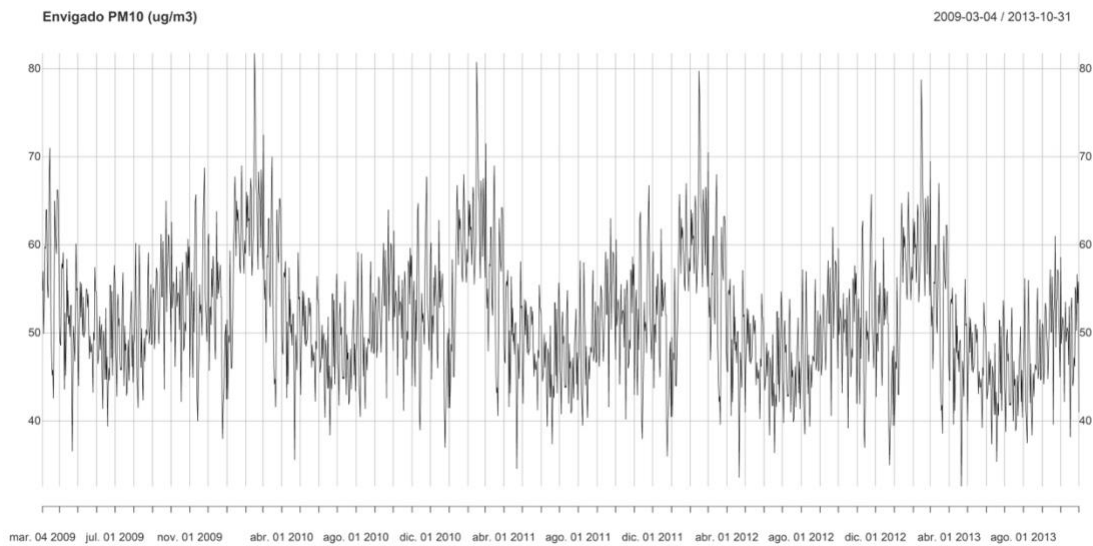


Figura 120. Estacionalidad de la serie de PM₁₀ del municipio de Envigado

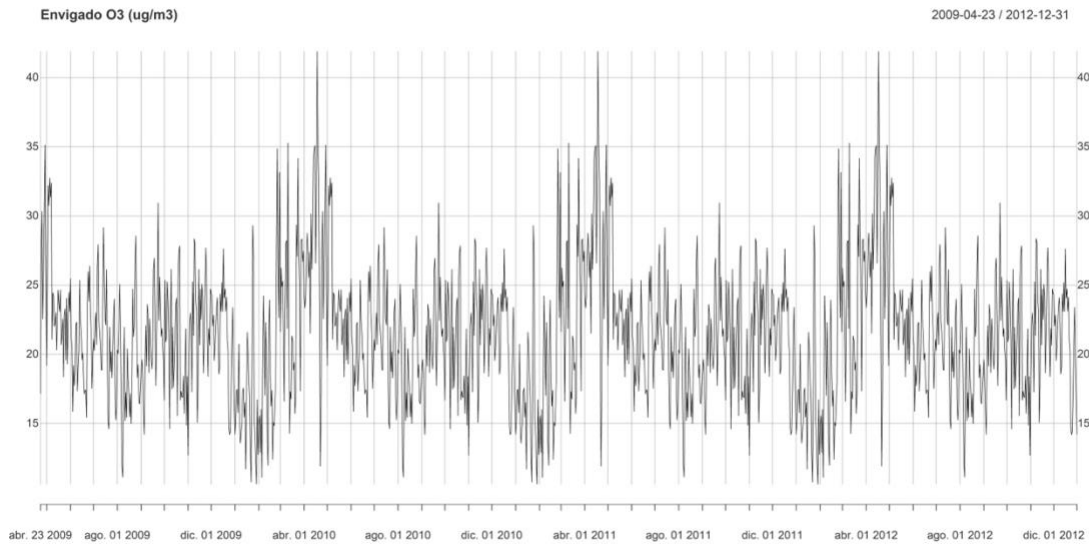


Figura 121. Estacionalidad de la serie de O₃ del municipio de Envigado

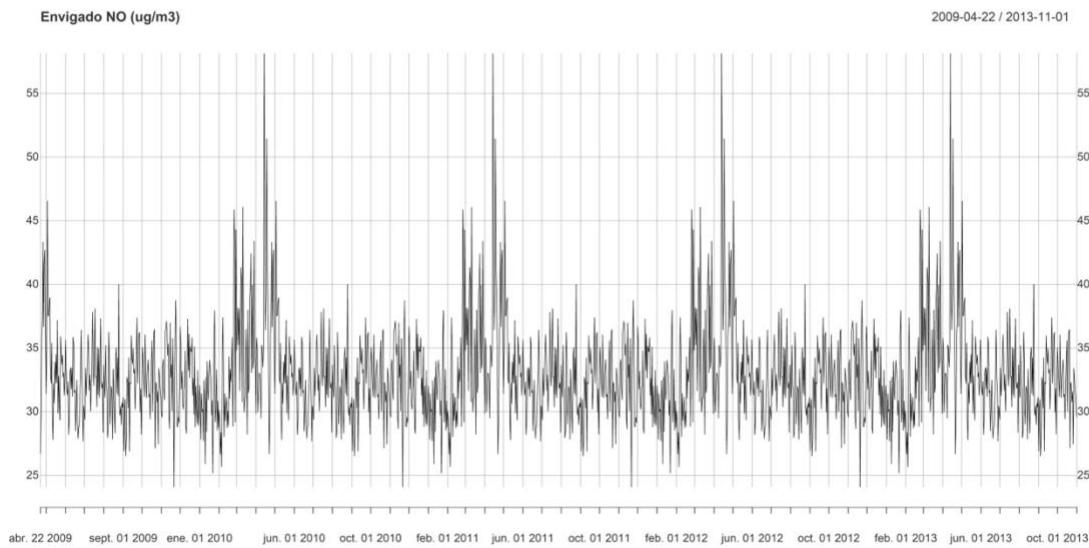


Figura 122. Estacionalidad de la serie de NO del municipio de Envigado



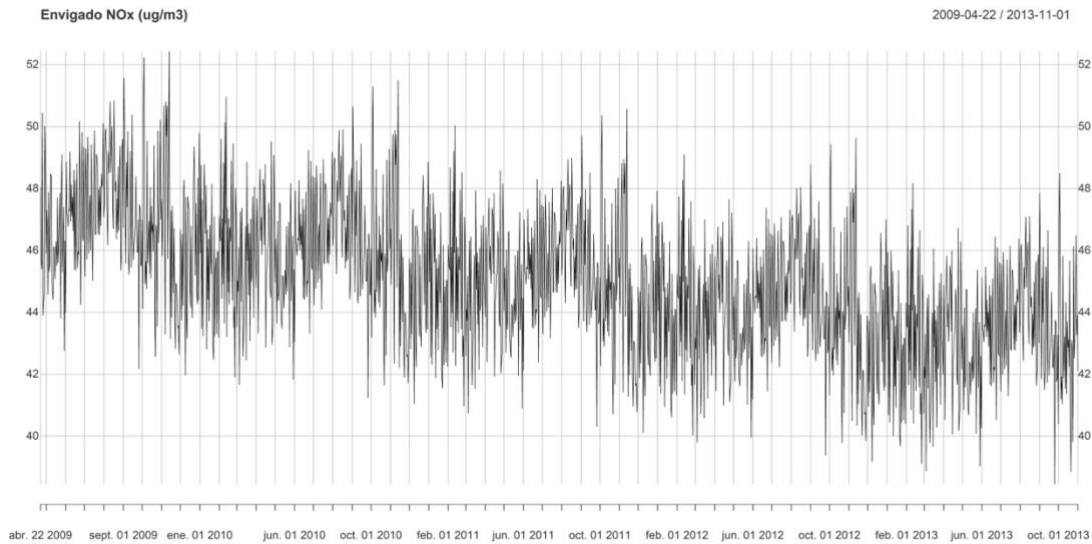


Figura 123. Estacionalidad de la serie de NOX del municipio de Envigado

Contrario a lo anterior, para la serie de PM_{2.5} (**Figura 124**) se presenta una estacionalidad bimodal en el año, correspondiente a los periodos marzo-abril y septiembre-octubre, asociados a las épocas lluviosas en Colombia. Finalmente, la serie de NO₂ (**Figura 125**) presenta incrementos y disminuciones estacionales de la magnitud de los contaminantes en los meses marzo-abril y diciembre, respectivamente.

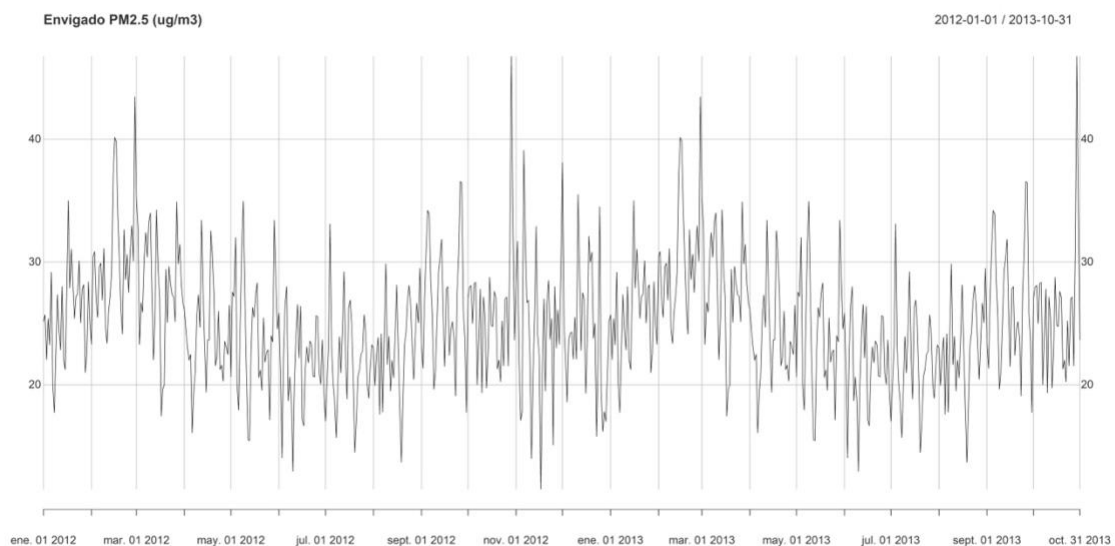


Figura 124. Estacionalidad de la serie de PM_{2.5} del municipio de Envigado



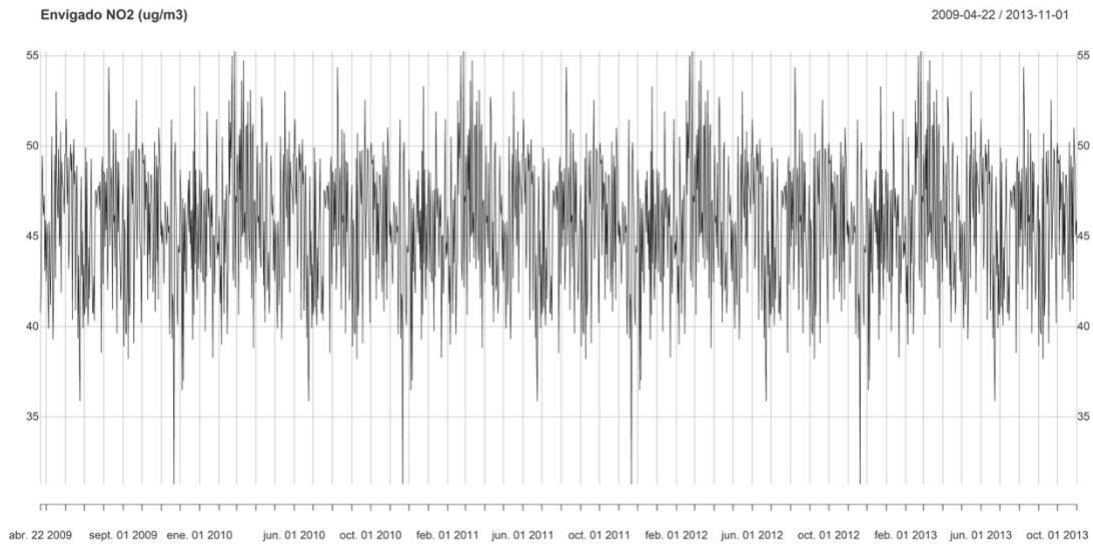


Figura 125. Estacionalidad de la serie de NO₂ del municipio de Envigado

Al evaluar el error y ajuste de estos modelos estacionales, se encuentra que ninguno de los residuales cumple con el supuesto de ruido blanco (**Tabla 45**), por ende, estos modelos no son suficientes para modelar las series evaluadas.

Tabla 45. Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Envigado

Contaminante	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	12.870	2.20E-16
PM _{2.5}	6.186	2.20E-16
O ₃	9.690	2.20E-16
NO	8.670	2.20E-16
NO ₂	7.917	0.01257
NOX	5.243647	2.20E-16





4.4.6 Girardota

4.4.6.1 Tendencia

Al evaluar el valor p de la prueba Mann-Kendall, se observa que para todas las series hay suficiente evidencia que soporta la existencia de tendencias monotónicas estadísticamente significativas, siendo la mayoría crecientes, exceptuando la tendencia para PM_{2.5} y O₃ (**Tabla 46**).

Es importante mencionar que, a pesar que la prueba Mann-Kendall arrojó una tendencia significativa para todas las series, ningún modelo de tendencia se logró ajustara los datos. Esto indica que es necesario evaluar otro tipo de modelos para encontrar uno que sea eficiente para representar los cambios en el tiempo de las series del municipio de Girardota.

Tabla 46. Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Girardota

Contaminante	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall
PM ₁₀	0.0734	0
PM _{2.5}	-0.1325	0
O ₃	-0.1538	0
NO	0.0818	0.0071
NO ₂	0.1087	3.00E-04
NOX	0.0901	0.003

Al observar el resultado de la prueba Mann-Kendall anual para PM₁₀ (**Tabla 47**), se encuentra que para todos los años excepto el 2009 la tendencia es creciente y significativa. Esto implica que a pesar de que en todo el periodo exista una tendencia monotónica creciente, al evaluar la tendencia anual, se presentan, en su mayoría, pendientes positivas en las tendencias. Para 2012 y 2014 no se encuentra una tendencia significativa.





Tabla 47. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para PM₁₀ del municipio de Girardota

Año	PM ₁₀ τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Tendencia
2008	-0.1343	0.0011	SI
2009	0.117	9.00E-04	SI
2010	-0.3604	0	SI
2011	-0.2152	0	SI
2012	0.0616	0.0812	NO
2013	-0.4078	0	SI
2014	-0.0413	0.2444	NO
2015	-0.0773	0.0292	SI
2016	-0.3151	0	SI

Por otro lado, para las series de PM_{2.5} y O₃ se encuentra una tendencia decreciente y significativa para los dos años de información disponible (2015 y 2016); resultado congruente con la pendiente negativa presente para todo el periodo en ambas series (Tabla 48). Para las series de NO y NO_x, se encuentran tendencias crecientes y significativas sólo para el año 2016. Finalmente, para la serie de NO₂ no se presentan tendencias significativas en los años evaluados.





Tabla 48. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para PM_{2.5}, O₃, NO, NO₂ y NO_x del municipio de Girardota

Contaminante	Prueba Mann-Kendall	Año	
		2015	2016
PM _{2.5}	τ	-0.1387	-0.2202
	Valor p	0.0317	0
	Tendencia	SI	SI
O ₃	τ	-0.1714	-0.2171
	Valor p	0.0058	0
	Tendencia	SI	SI
NO	τ	0.0665	0.1743
	Valor p	0.2845	0
	Tendencia	NO	SI
NO ₂	τ	0.006	-0.0126
	Valor p	0.925	0.7198
	Tendencia	NO	NO
NO _x	τ	0.0375	0.1052
	Valor p	0.5473	0.0027
	Tendencia	NO	SI





4.4.6.2 Estacionalidad

Para la serie de PM₁₀ (**Figura 126**) se presenta una estacionalidad monomodal marcada en el año, correspondiente al periodo marzo-abril, asociados a la época lluviosa en Colombia. Para el PM_{2.5} se observa el mismo comportamiento que en el PM₁₀, es decir que, el modelo estacional ajustado presenta un pico marcado en el periodo marzo-abril (**Figura 127**).

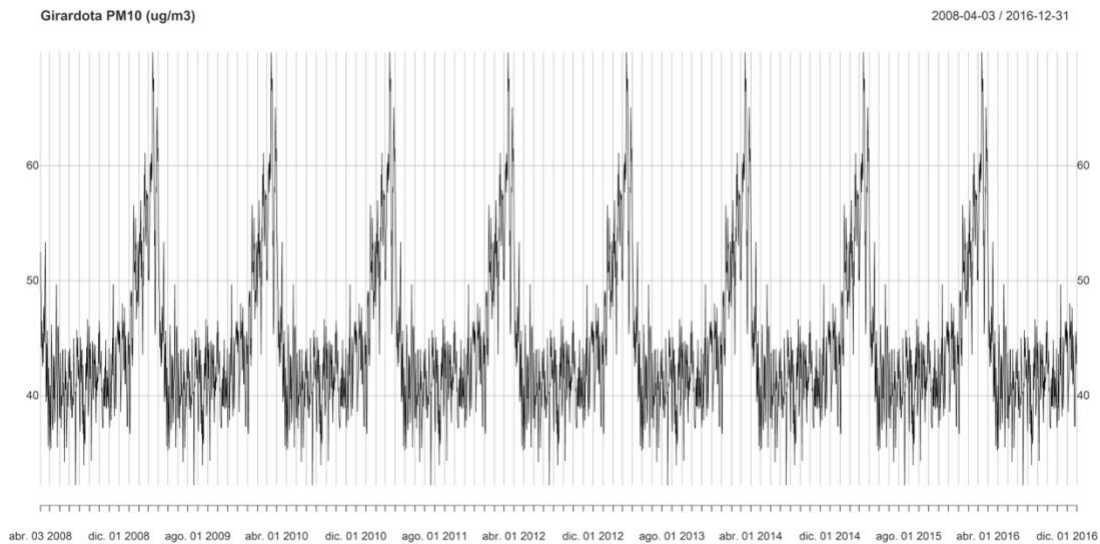


Figura 126. Estacionalidad de la serie de PM₁₀ del municipio de Girardota

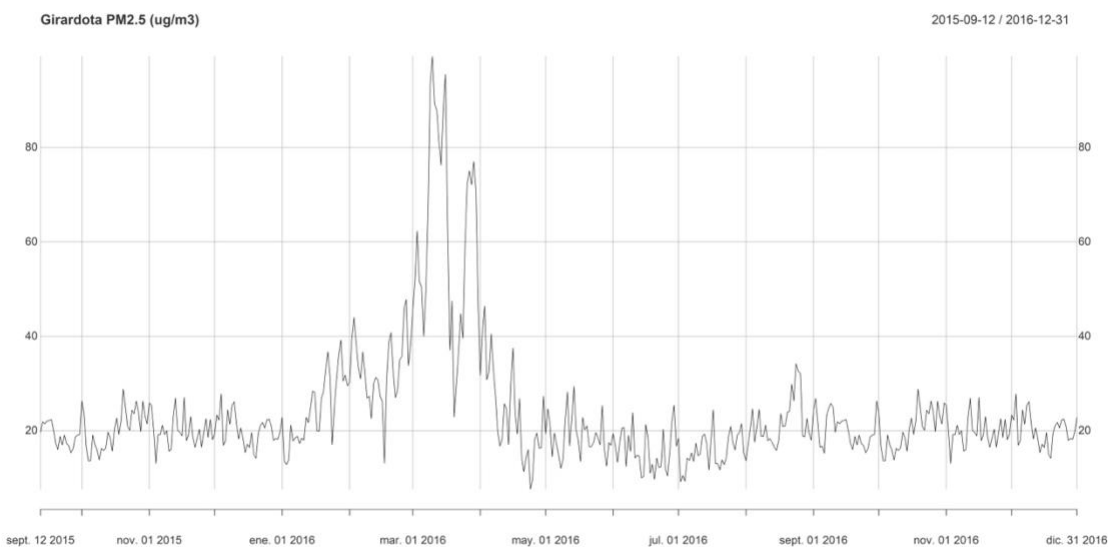


Figura 127. Estacionalidad de la serie de PM_{2.5} del municipio de Girardota





Para las series de O₃ (Figura 128), NO (Figura 129), NO₂ (Figura 130) y NO_x (Figura 131), la estacionalidad modelada no presenta picos muy marcados; esto se debe a la cantidad de datos disponibles, los cuales no permiten evidenciar con mayor facilidad los picos estacionales. Sin embargo, se observa una disminución en las concentraciones en el periodo diciembre-marzo para todas las series, exceptuando la serie de O₃, la cual presenta un pico entre enero y abril más notorio.

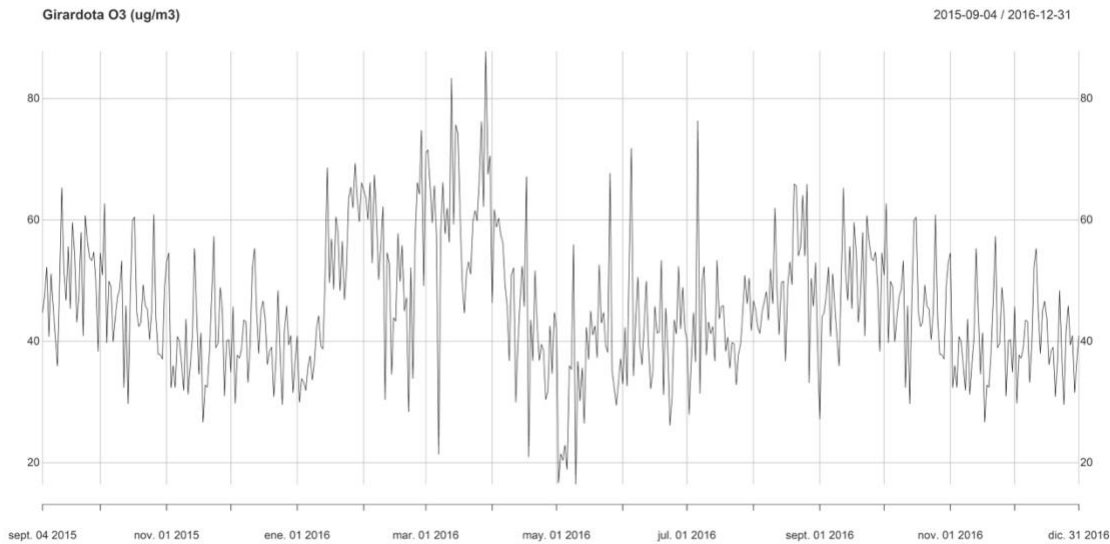


Figura 128. Estacionalidad de la serie de O₃ del municipio de Girardota

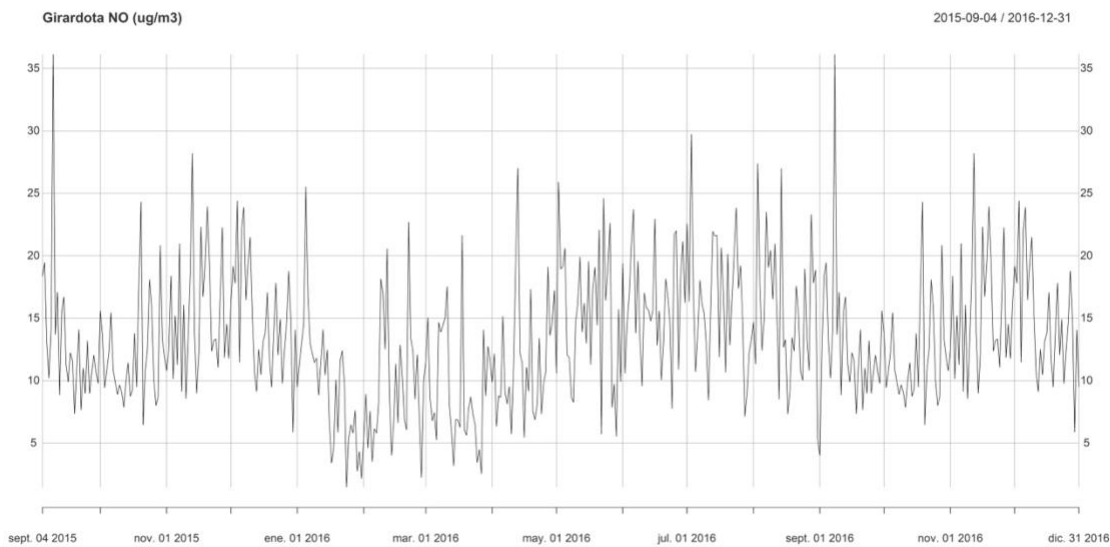


Figura 129. Estacionalidad de la serie de NO del municipio de Girardota



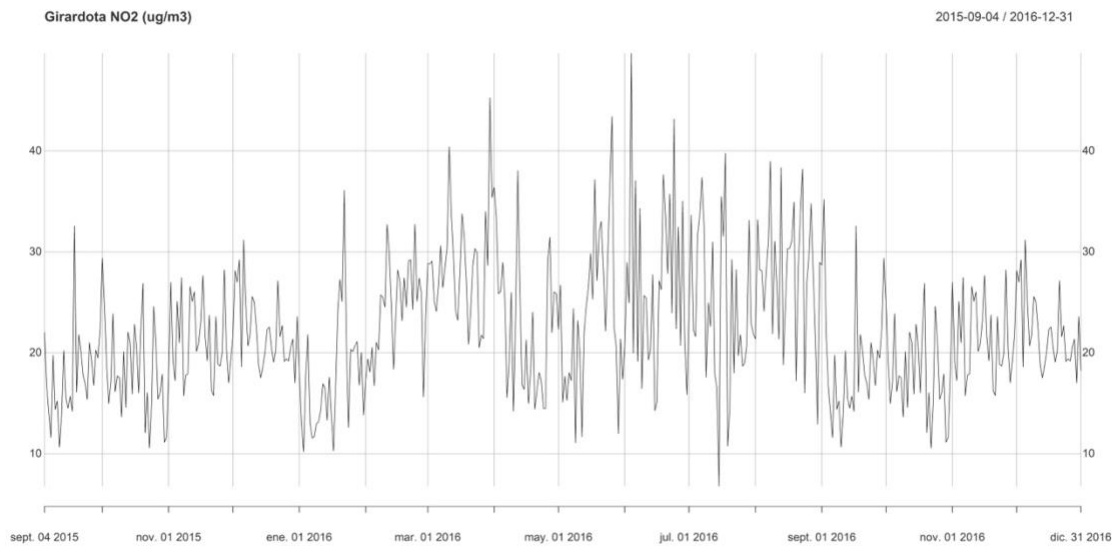


Figura 130. Estacionalidad de la serie de NO₂ del municipio de Girardota

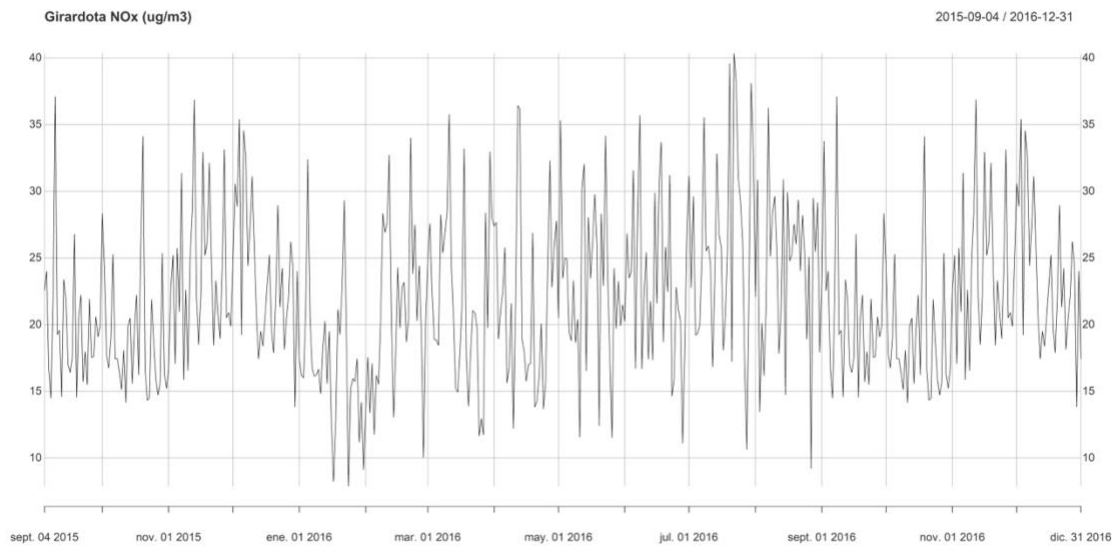


Figura 131. Estacionalidad de la serie de NO_x del municipio de Girardota

Al evaluar el error y ajuste de estos modelos estacionales, se encuentra que ninguno de los residuales cumple con el supuesto de ruido blanco (Tabla 49), por ende, estos modelos no son suficientes para modelar las series evaluadas.





Tabla 49. Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Girardota

Contaminante	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	12.467	2.20E-16
PM _{2.5}	5.203	2.20E-16
O ₃	12.526	2.20E-16
NO	6.260	1.50E-07
NO ₂	8.551	2.20E-16
NOX	7.322	8.22E-15

4.4.7 Itagüí

4.4.7.1 Tendencia

Al evaluar el valor p de la prueba Mann-Kendall, se observa que, para todas las series, excepto para PM_{2.5} y NO, hay suficiente evidencia que soporta la existencia de tendencias monotónicas estadísticamente significativas en estas series, siendo la mayoría decrecientes, exceptuando la tendencia para PM₁₀ (**Tabla 50**).

Es importante mencionar que, a pesar de que la prueba Mann-Kendall arrojó una tendencia significativa, sólo se ajustaron modelos lineales de tendencia para las series de PM₁₀ y NO₂. Entre los cuatro modelos utilizados para representar dicha componente de las series de tiempo, se encontró el mejor ajuste con los modelos logarítmico y cúbico para PM₁₀ y NO₂, respectivamente.

Tabla 50. Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Itagüí

Contaminante	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Modelo ajustado	LogBIC	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	-0.1739	0	Logarítmico	5.109	12.838	2.20E-16
PM _{2.5}	0.0238	0.0538	Cúbico	4.319	8.627	2.20E-16
O ₃	0.0864	0	NO	---	---	---
NO	-0.0101	0.5433	NO	---	---	---
NO ₂	0.1429	0	Lineal	4.566	9.768	2.20E-16
NOX	0.1008	0	NO	---	---	---





Los modelos cúbico y lineal ajustados para PM₁₀ (**Figura 132**) y NO₂ (**Figura 133**), respectivamente, entre los cuatro evaluados, presentaron el mejor ajuste por tener el menor valor del Logaritmo del Criterio de Información Bayesiano (LogBIC). Al observar el sentido de las tendencias de manera gráfica, se corrobora los resultados de la prueba Mann-Kendall, la cual asigna una tendencia monótonica decreciente para PM₁₀ y creciente para NO₂.

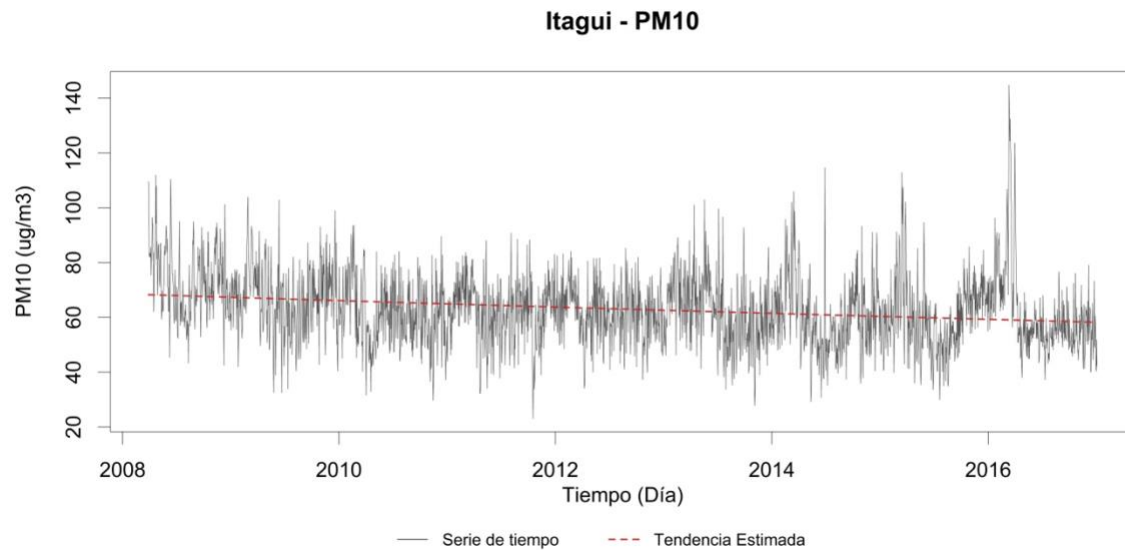


Figura 132. Modelo de tendencia logarítmico ajustado para la serie diaria de PM₁₀ del municipio de Itagüí

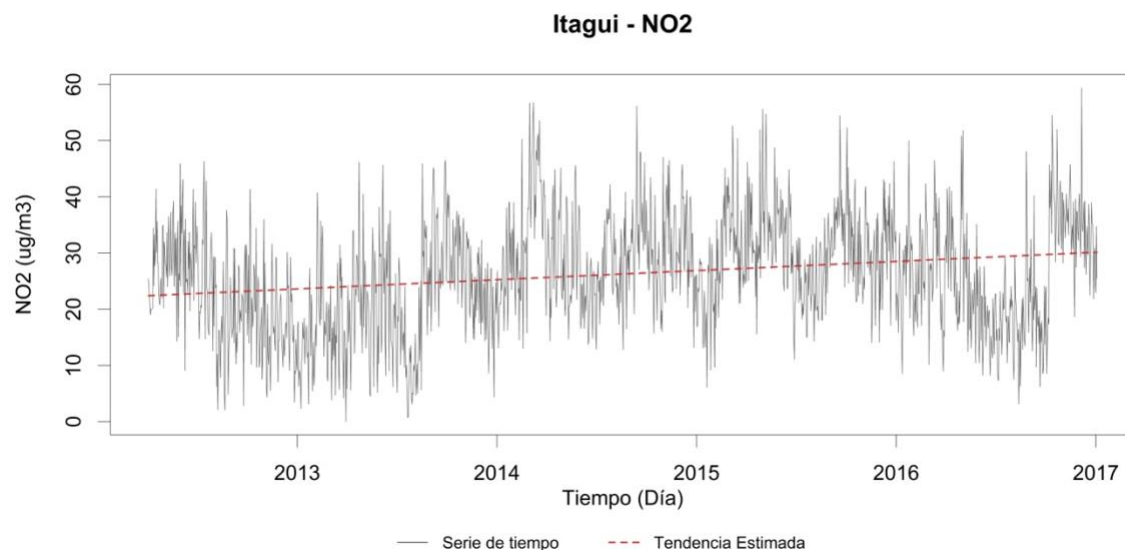
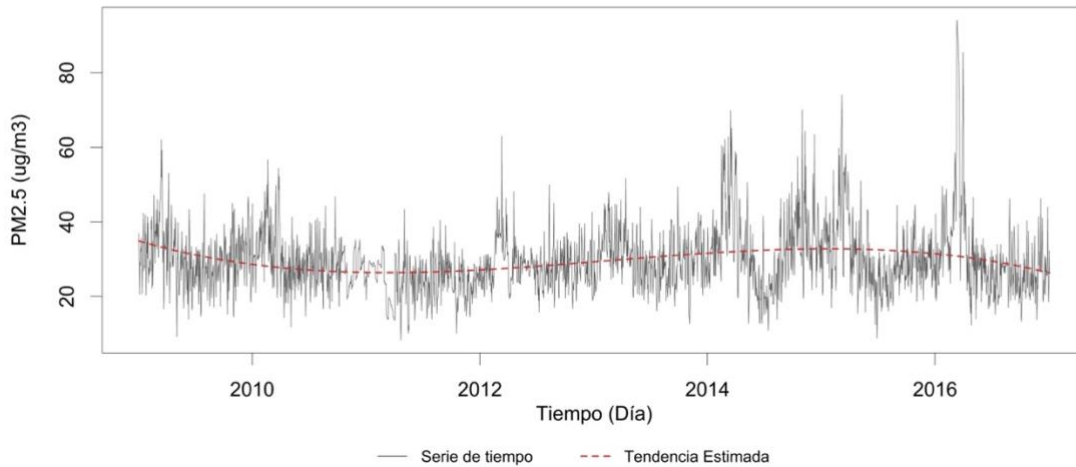


Figura 133. Modelo de tendencia lineal ajustado para la serie diaria de NO₂ del municipio de Itagüí





Itagui - PM2.5



Por otro lado, para $PM_{2.5}$, a pesar de que no se encuentra una tendencia significativa con la prueba Mann-Kendall, al evaluar los modelos, el cúbico se ajusta a la serie (

Itagui - PM2.5

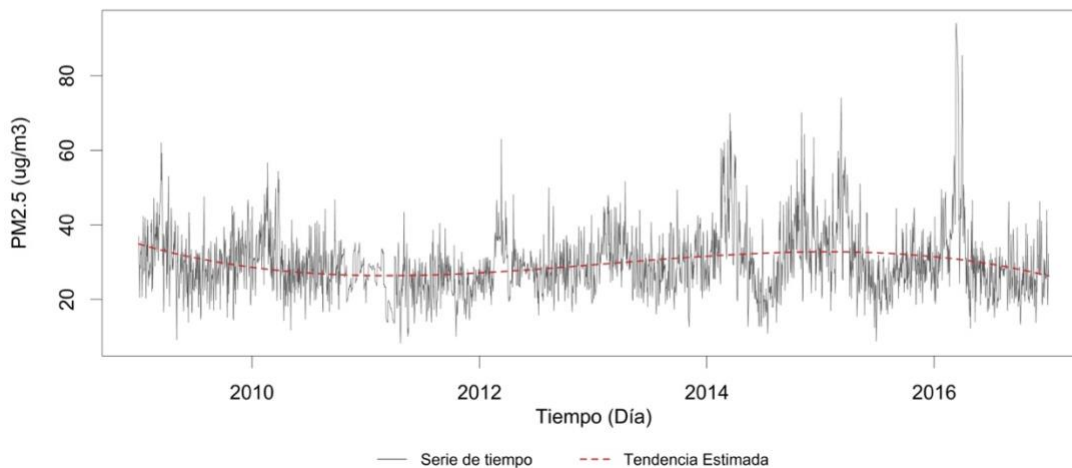


Figura 134). Esto puede presentarse dado que, al mirar la serie de manera global, no se perciben cambios en la media con el tiempo en una sola dirección, sin embargo, al evaluar la serie con el modelo ajustado se pueden percibir cambios leves en las pendientes que podrían ocasionar el ajuste del modelo cúbico.



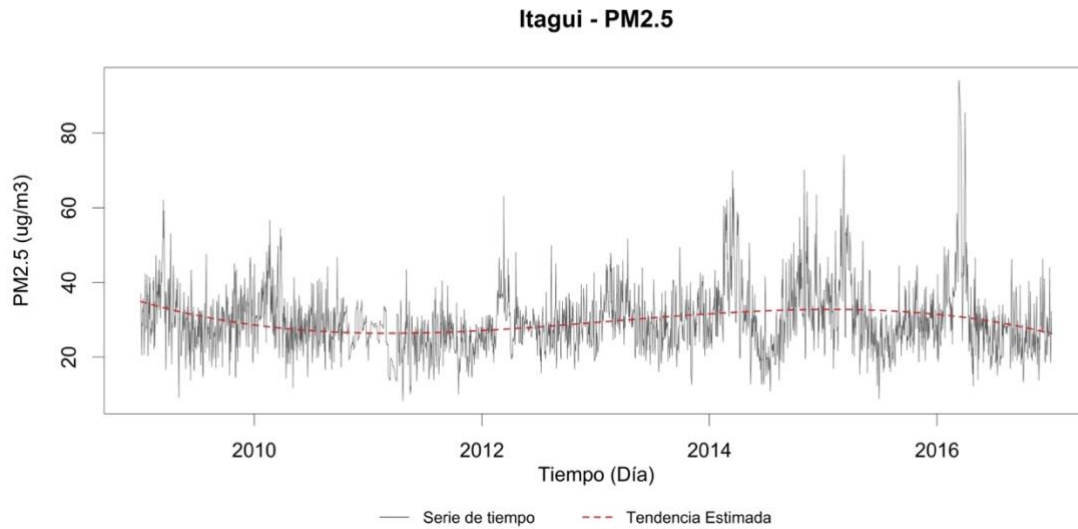


Figura 134. Modelo de tendencia cúbico ajustado para la serie diaria de PM_{2.5} del municipio de Itagüí

Para las series de PM₁₀ y PM_{2.5}, se encuentra que para todos los años las tendencias son decrecientes y significativas, exceptuando para PM₁₀ en el año 2015, para todos los años menos 2009 y 2011 para PM₁₀ y 2011 y 2014 para PM_{2.5} (Tabla 51). A pesar que el modelo cúbico presenta cambios paulatinos en la pendiente de la tendencia simulada para PM_{2.5}, para los años 2012 a 2015 se presenta una leve tendencia creciente, contraria para el resto de los años, la prueba Mann-Kendall arroja resultados diferentes. Esto indica que la exploración gráfica de una serie no es suficiente para probar o no la existencia de tendencias y otros comportamientos que se puedan presentar; es necesario aplicar pruebas estadísticas para corroborar las impresiones que se concluyen a partir del gráfico de la serie temporal.

Tabla 51. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para PM₁₀ y PM_{2.5} del municipio de Itagüí

Año	PM ₁₀			PM _{2.5}		
	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Tendencia	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Tendencia
2008	-0.1203	0.0027	SI	---	---	---
2009	-0.0438	0.2114	NO	-0.0812	0.0206	SI
2010	-0.0976	0.0054	SI	-0.1622	0	SI
2011	-0.0514	0.1428	NO	-0.067	0.056	NO
2012	-0.1133	0.0012	SI	-0.0784	0.0251	SI
2013	-0.2366	0	SI	-0.1233	4.00E-04	SI





Año	PM ₁₀			PM _{2.5}		
	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Tendencia	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Tendencia
2014	-0.081	0.021	SI	-0.0045	0.8985	NO
2015	0.104	0.003	SI	-0.1955	0	SI
2016	-0.3246	0	SI	-0.2723	0	SI

Para O₃, se encuentra que para todos los años las tendencias son decrecientes y significativas, exceptuando para el año 2012. Por el contrario, para NO y NO_x todos los años, excepto para 2012 y 2015, tienen pendientes positivas y significativas. Finalmente, para la serie de NO₂, no se presentaron tendencias significativas para los años 2014 y 2015; por otro lado, para los años 2013 y 2016 las pendientes son positivas, mientras que para 2012 es negativa. **(Tabla 52)**





Tabla 52. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para O₃, NO, NO₂ y NO_x del municipio de Itagüí

Contaminante	Prueba Mann-Kendall	Año				
		2012	2013	2014	2015	2016
O ₃	τ	-9.00E-04	-0.1864	-0.1145	-0.0831	-0.053
	Valor p	0.9887	0	0.0011	0.0178	0.3959
	Tendencia	NO	SI	SI	SI	NO
NO	τ	0.0219	0.0753	0.1173	0.019	0.2451
	Valor p	0.6886	0.0318	8.00E-04	0.5888	0
	Tendencia	NO	SI	SI	NO	SI
NO ₂	τ	-0.3346	0.2066	0.0274	0.0592	0.0778
	Valor p	0	0	0.4353	0.0914	0.0262
	Tendencia	SI	SI	NO	NO	SI
NO _x	τ	-0.055	0.1697	0.0884	0.0431	0.2419
	Valor p	0.3701	0	0.0117	0.2193	0
	Tendencia	NO	SI	SI	NO	SI

A pesar de que los modelos ajustados son una aproximación a las tendencias de las series, éstos no son suficientes para representar las series de contaminantes del municipio de Itagüí, debido a que los residuales no son ruido blanco (valor p de la prueba Ljung-Box menor que 0.05 -Tabla 50), por ende, es necesario evaluar la existencia de una componente estacional en las series.

4.4.7.2 Estacionalidad

En las series de PM₁₀ y O₃, se observan picos marcados en los meses marzo–abril. Esto, a diferencia de los contaminantes evaluados en los otros municipios, muestra un comportamiento monomodal estacional asociado a una de las épocas lluviosas de la región. Además, en las figuras de la componente estacional de las series de PM₁₀ y PM_{2.5} (**Figura 135** y **Figura 136**) se evidencia la tendencia decreciente y creciente en los datos, respectivamente.



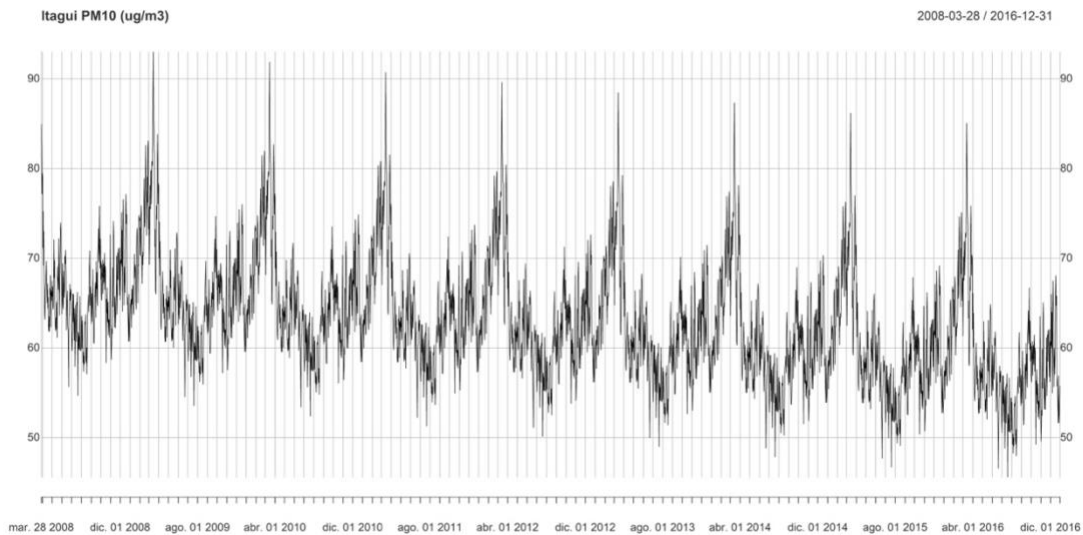


Figura 135. Estacionalidad de la serie de PM₁₀ del municipio de Itagüí

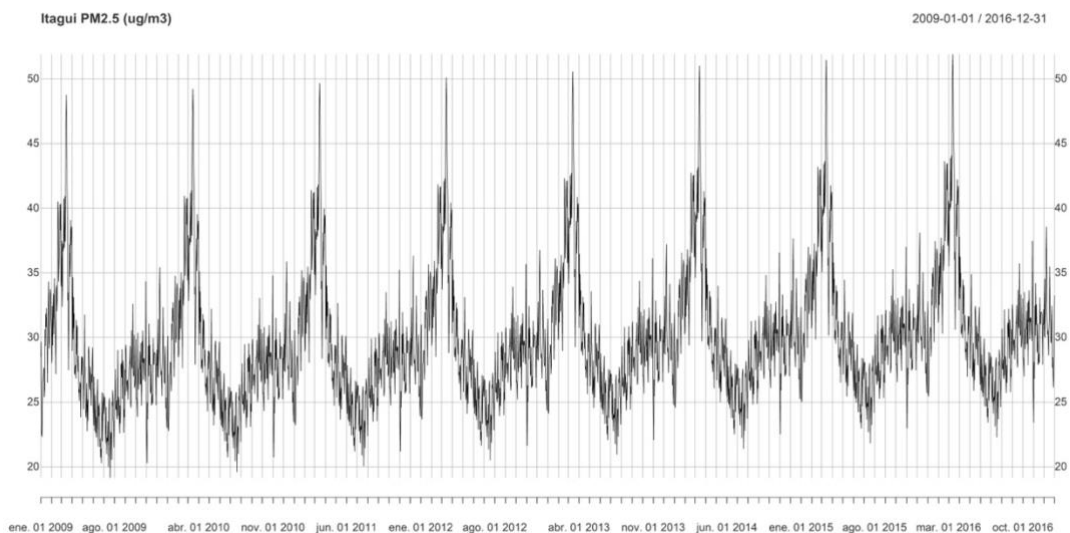


Figura 136. Estacionalidad de la serie de PM_{2.5} del municipio de Itagüí

Contrario a lo anterior, para las series de O₃, NO, NO₂ y NO_x (**Figura 137**, **Figura 138**, **Figura 139** y **Figura 140**) se presenta una estacionalidad bimodal en el año, correspondiente a los periodos marzo-abril y septiembre-octubre, asociados a las épocas lluviosas en Colombia. Específicamente para O₃, en el segundo periodo se presentan picos de menor magnitud en comparación con el primer pico estacional.



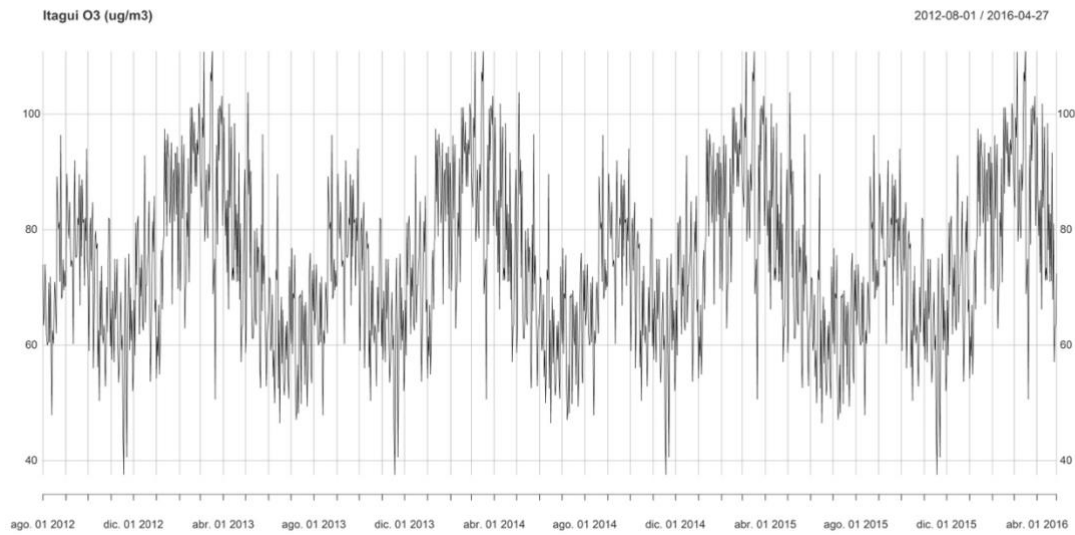


Figura 137. Estacionalidad de la serie de O₃ del municipio de Itagüí

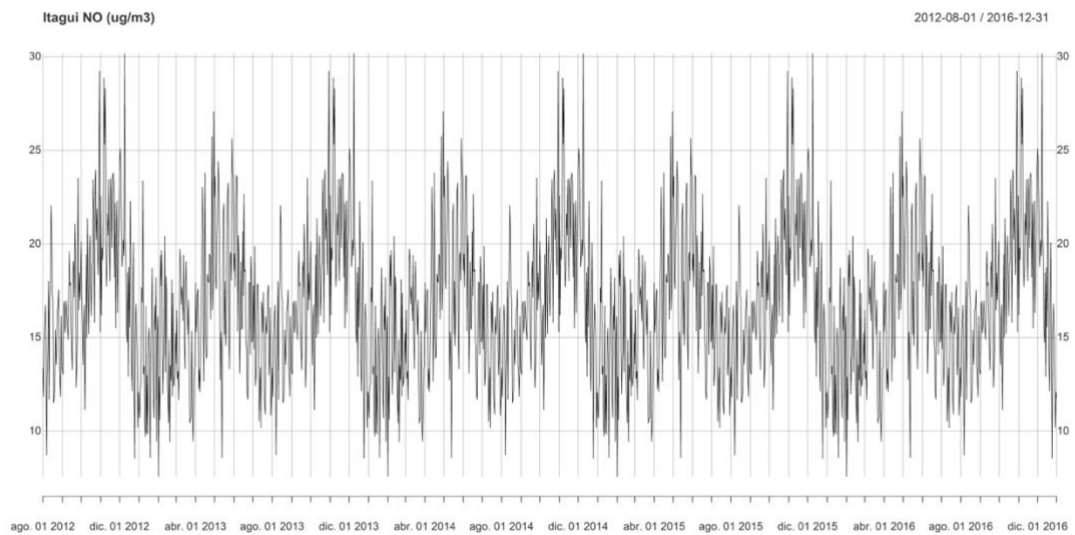


Figura 138. Estacionalidad de la serie de NO del municipio de Itagüí



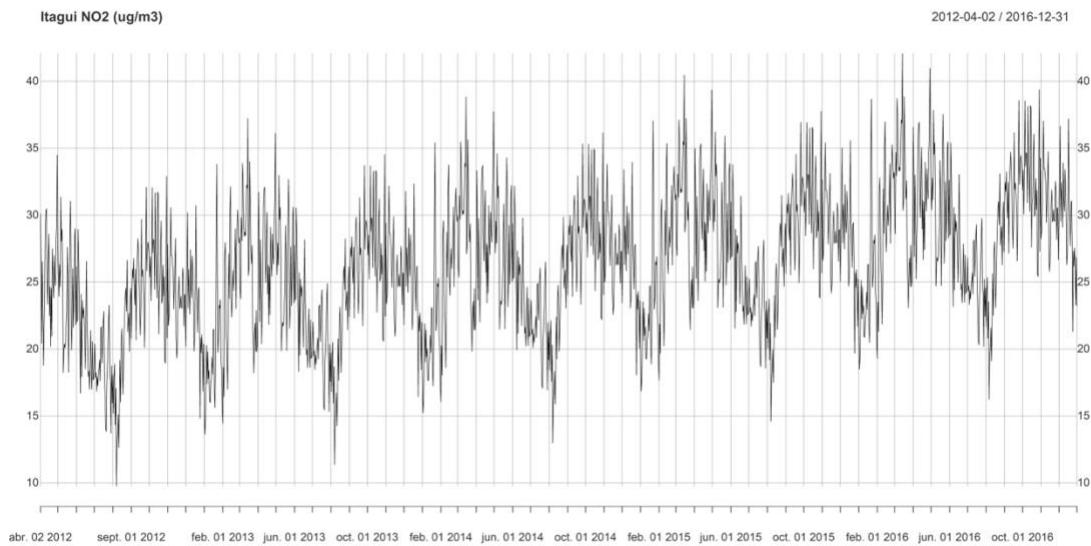


Figura 139. Estacionalidad de la serie de NO₂ del municipio de Itagüí

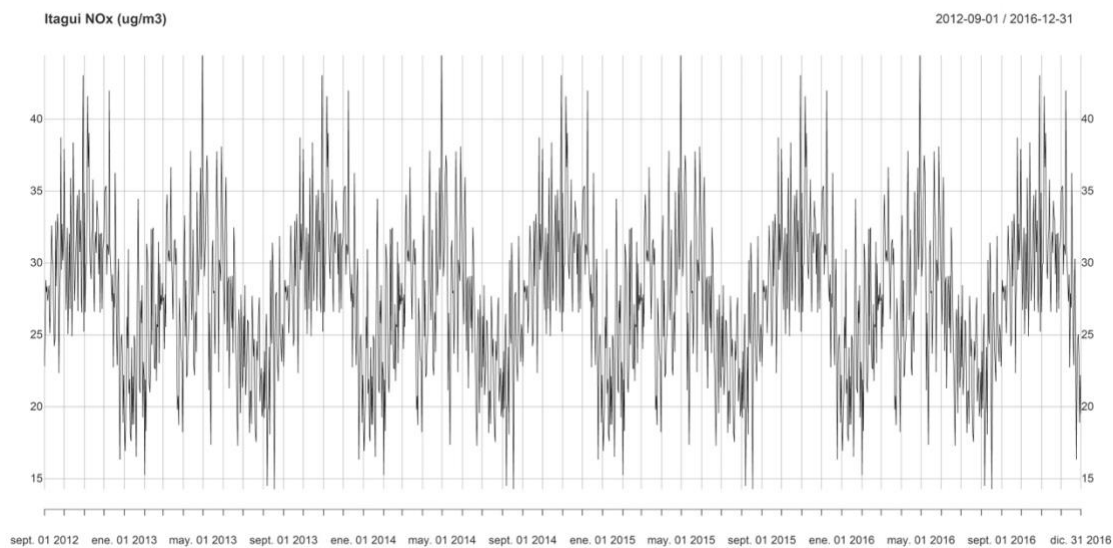


Figura 140. Estacionalidad de la serie de NO_x del municipio de Itagüí

Al evaluar el error y ajuste de estos modelos estacionales, se encuentra que ninguno de los residuales cumple con el supuesto de ruido blanco (Tabla 53), por ende, estos modelos no son suficientes para modelar las series evaluadas.





Tabla 53. Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Itagüí

Contaminante	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	12.123	2.20E-16
PM _{2.5}	8.035	2.20E-16
O ₃	21.723	2.20E-16
NO	8.215	2.20E-16
NO ₂	9.759	2.20E-16
NOX	10.178	2.20E-16

4.4.8 La Estrella

4.4.8.1 Tendencia

Al evaluar el valor p de la prueba Mann-Kendall, se observa que, para todas las series, excepto para PM₁₀ y NO, hay suficiente evidencia que soporta la existencia de tendencias monotónicas estadísticamente significativas en estas series, siendo la mayoría decrecientes, exceptuando la tendencia para PM_{2.5} (**Tabla 54**).

Es importante mencionar que, a pesar que la prueba Mann-Kendall arrojó una tendencia significativa, sólo se ajustaron modelos lineales de tendencia para las series de PM₁₀ y NO₂. Entre los cuatro modelos utilizados para representar dicha componente de las series de tiempo, se encontró el mejor ajuste con los modelos cuadrático y logarítmico para PM₁₀ y NO₂, respectivamente. Sin embargo, para PM₁₀, la prueba Mann-Kendall no aceptó la existencia de una tendencia significativa.

Tabla 54. Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de La Estrella

Contaminante	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Modelo ajustado	LogBIC	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	-0.0063	0.5912	Cuadrático	4.935	11.755	2.20E-16
PM _{2.5}	0.1258	0	NO	---	---	---
O ₃	-0.107	0.0028	NO	---	---	---
NO	0.033	0.1077	NO	---	---	---
NO ₂	-0.2736	0	Logarítmico	4.623	10.031	2.20E-16
NOX	-0.0996	0	NO	---	---	---





El modelo logarítmico ajustado para la serie de NO₂ (**Figura 141**), entre los cuatro evaluados, presentó el mejor ajuste por tener el menor valor del Logaritmo del Criterio de Información Bayesiano (LogBIC). Al observar el sentido de la tendencia de manera gráfica, se corroboran los resultados de la prueba Mann-Kendall para la serie de NO₂, la cual asigna una tendencia monótonica decreciente.

Para el caso específico de la serie de PM₁₀ (**Figura 142**), a pesar de que no se encuentra una tendencia significativa con la prueba Mann-Kendall, al evaluar los modelos, el cuadrático se ajusta a la serie. Esto puede presentarse dado que, al mirar la serie de manera global, no se perciben cambios en la media con el tiempo en una sola dirección, sin embargo, al evaluar la serie con el modelo ajustado se pueden percibir cambios leves en la pendiente, con punto de corte en el año 2013, en donde la tendencia pasa de ser negativa a positiva.

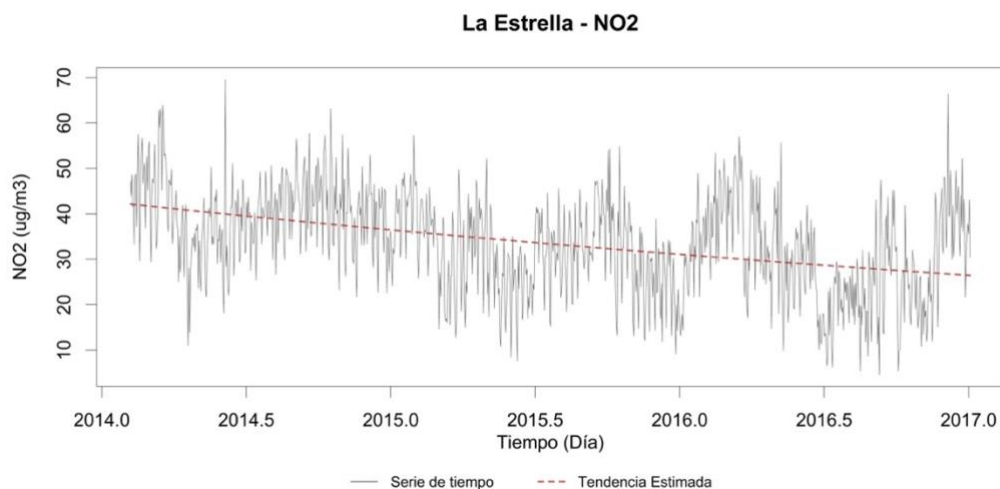


Figura 141. Modelo de tendencia logarítmico ajustado para la serie diaria de NO₂ del municipio de La Estrella

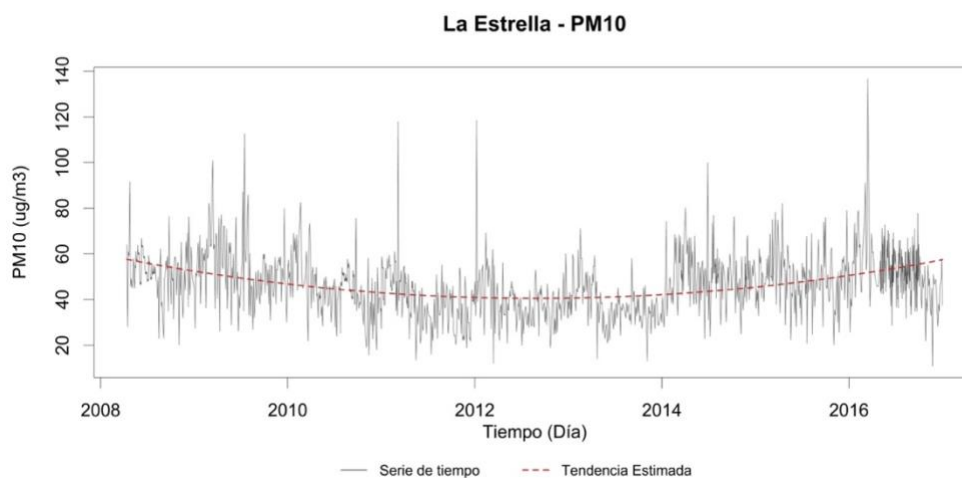


Figura 142. Modelo de tendencia cuadrático ajustado para la serie diaria de PM₁₀ del municipio de La Estrella





Para la serie de PM₁₀, se encuentra que para todos los años las tendencias son decrecientes y significativas, exceptuando para el año 2014 (**Tabla 55**). A pesar que el modelo cúbico presenta cambios paulatinos en la pendiente de la tendencia simulada para PM₁₀, para los años 2008 a 2013 se presenta una leve tendencia decreciente, y para 2013 a 2016, creciente, la prueba Mann-Kendall arroja resultados diferentes. Esto indica que la exploración gráfica de una serie no es suficiente para probar o no la existencia de tendencias y otros comportamientos que se puedan presentar; es necesario aplicar pruebas estadísticas para corroborar las impresiones que se concluyen a partir del gráfico de la serie temporal.

Tabla 55. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para PM₁₀ del municipio de La Estrella

Año	PM ₁₀ τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Tendencia
2008	-0.124	0.0027	SI
2009	-0.1968	0	SI
2010	-0.3947	0	SI
2011	-0.3247	0	SI
2012	-0.2001	0	SI
2013	-0.3122	0	SI
2014	-0.0136	0.6982	NO
2015	-0.0715	0.0415	SI
2016	-0.3062	0	SI

Para PM_{2.5}, O₃ y NO₂, se encuentra que para todos los años las tendencias son decrecientes y significativas, exceptuando el 2016 para PM_{2.5}, 2015 para O₃ y 2014 para NO₂. Por el contrario, para NO y NO_x todos los años, excepto para 2012 y 2016 para NO_x, tienen pendientes positivas y significativas (Tabla 56).





Tabla 56. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para PM_{2.5}, O₃, NO, NO₂ y NO_x del municipio de La Estrella

Serie	Prueba Mann-Kendall	Año		
		2014	2015	2016
PM _{2.5}	τ	-0.0503	-0.0443	-0.1403
	Valor p	0.1724	0.207	1.00E-04
	Tendencia	NO	NO	SI
O ₃	τ	-0.1337	-0.1263	---
	Valor p	3.00E-04	0.4555	---
	Tendencia	SI	NO	---
NO	τ	0.0873	0.2985	0.0806
	Valor p	0.0178	0	0.0213
	Tendencia	SI	SI	SI
NO ₂	τ	-0.0116	-0.1687	-0.1231
	Valor p	0.7523	0	4.00E-04
	Tendencia	NO	SI	SI
NO _x	τ	0.0548	0.1286	-0.0111
	Valor p	0.1368	2.00E-04	0.751
	Tendencia	NO	SI	NO

A pesar que los modelos ajustados son una aproximación a las tendencias de las series, éstos no son suficientes para representar las series de contaminantes del municipio de La Estrella, debido a que los residuales no son ruido blanco (valor p de la prueba Ljung-Box menor que 0.05 -**Tabla 54**), por ende, es necesario evaluar la existencia de una componente estacional en las series.

4.4.8.2 Estacionalidad

En las series de PM₁₀ y PM_{2.5} (**Figura 143** y **Figura 144**), se observan picos marcados en los meses marzo-abril. Esto, a diferencia de los contaminantes evaluados en los otros municipios, muestra un comportamiento monomodal estacional asociado a una de las épocas lluviosas de la región.



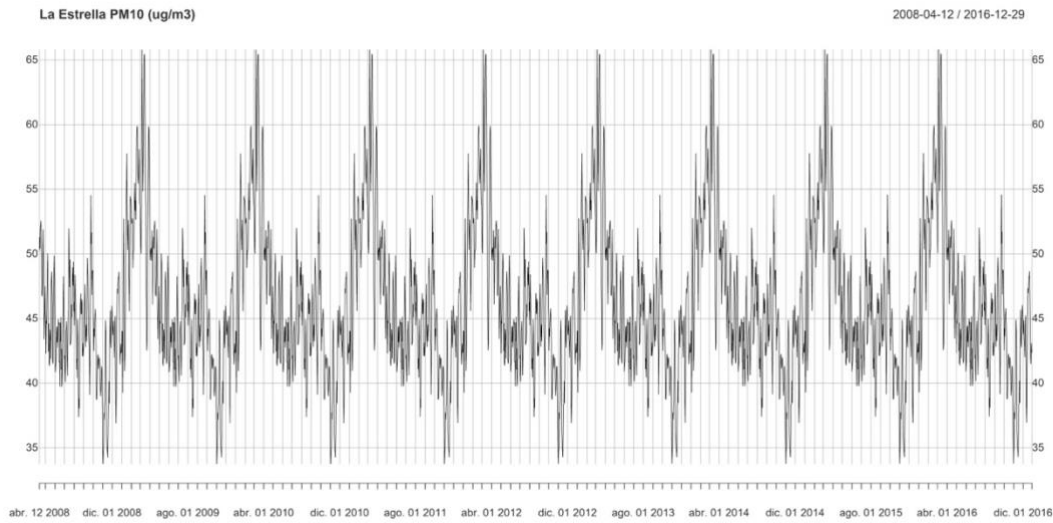


Figura 143. Estacionalidad de la serie de PM₁₀ del municipio de La Estrella

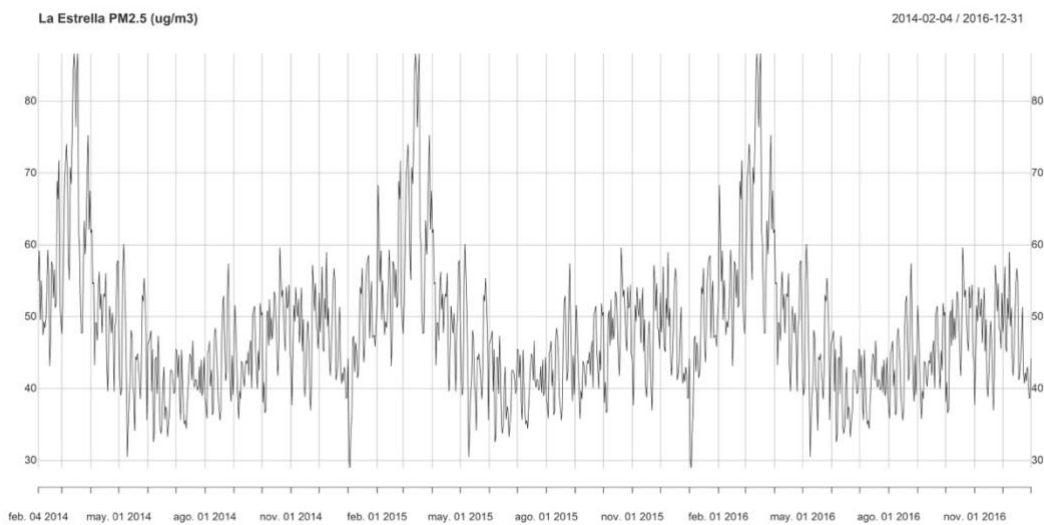


Figura 144. Estacionalidad de la serie de PM_{2.5} del municipio de La Estrella

Contrario a lo anterior, para las series de NO, NO₂ y NO_x (**Figura 145**, **Figura 146** y **Figura 147**) se presenta una estacionalidad bimodal en el año, correspondiente a los periodos marzo-mayo y noviembre-diciembre para las serie de NO, mientras que para las otras series se presenta un pico entre diciembre y marzo. Como la principal fuente de emisión de estos contaminantes es el parque automotor, el incremento de las emisiones en estas épocas del año puede estar asociado a un efecto antropogénico y no a un efecto estacional de las lluvias en Colombia.



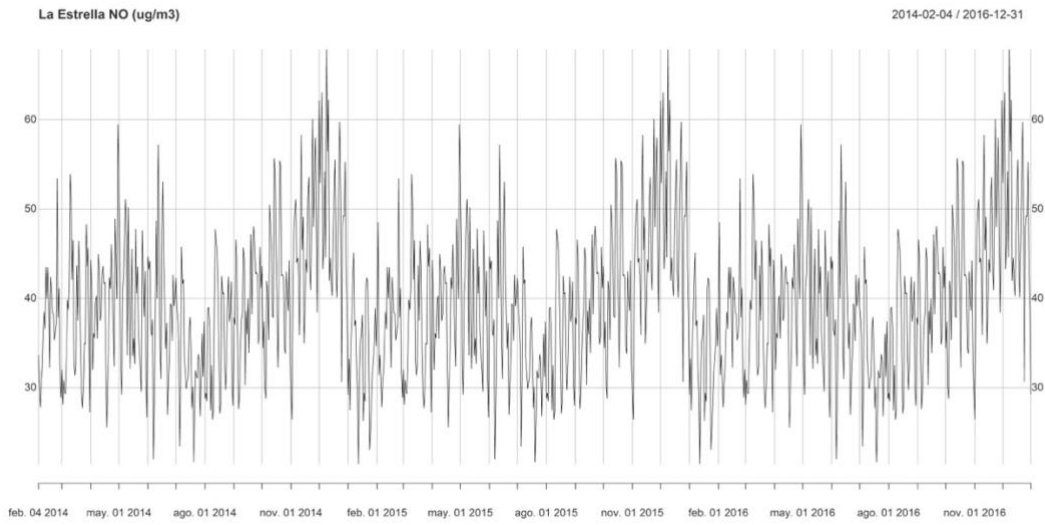


Figura 145. Estacionalidad de la serie de NO del municipio de La Estrella

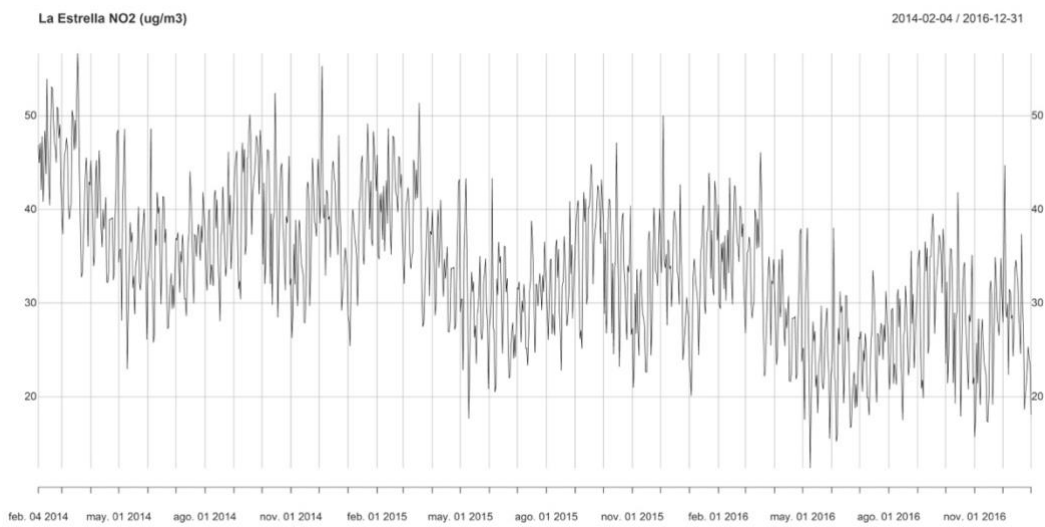


Figura 146. Estacionalidad de la serie de NO₂ del municipio de La Estrella



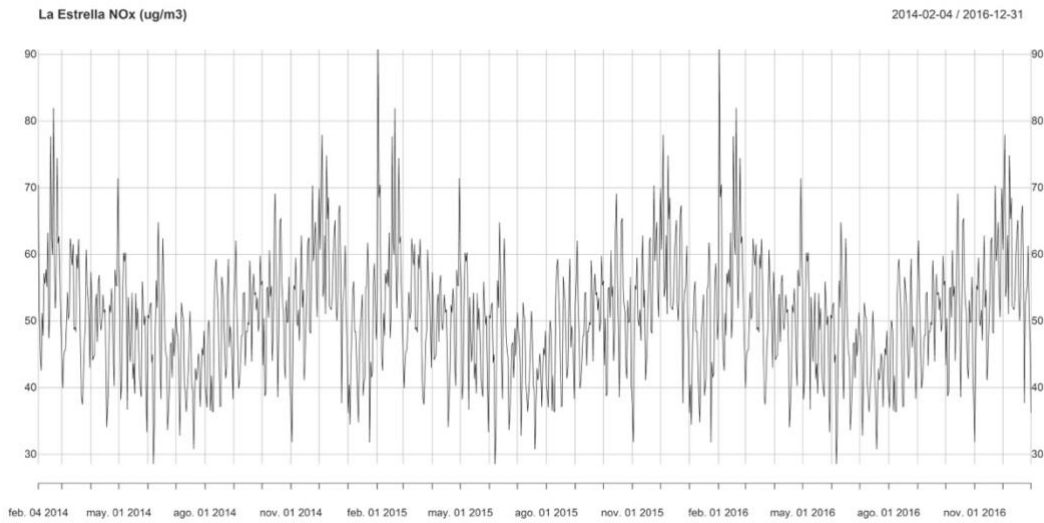


Figura 147. Estacionalidad de la serie de NOX del municipio de La Estrella

Al evaluar el error y ajuste de estos modelos estacionales, se encuentra que ninguno de los residuales cumple con el supuesto de ruido blanco (**Tabla 57**), por ende, estos modelos no son suficientes para modelar las series evaluadas.

Tabla 57. Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de La Estrella

Contaminante	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM10	12.202	2.20E-16
PM2.5	11.212	2.20E-16
NO	13.397	2.20E-16
NO2	9.912	2.20E-16
NOX	14.046	2.20E-16





4.4.9 Medellín

4.4.9.1 Tendencia

Al evaluar el valor p de la prueba Mann-Kendall, se observa que, para todas las series, excepto para NO, hay suficiente evidencia que soporta la existencia de tendencias monotónicas estadísticamente significativas en estas series, siendo la mayoría crecientes, exceptuando la tendencia para PM₁₀ (Tabla 58).

Es importante mencionar que, a pesar que la prueba Mann-Kendall arrojó una tendencia significativa, no se ajustó un modelo lineal de tendencia para la serie de NO_x. Entre los cuatro modelos utilizados para representar dicha componente de las series de tiempo, se encontró mejor ajuste con los modelos cuadrático para PM₁₀ (Figura 148) y cúbico para PM_{2,5}, O₃ y NO₂ (Figura 149, Figura 150 y Figura 151).

Tabla 58. Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Medellín

Contaminante	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Modelo ajustado	LogBIC	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	-0.1947	0	Cuadrático	5.276	13.943	2.20E-16
PM _{2,5}	0.1526	0	Cúbico	4.414	9.050	2.20E-16
O ₃	0.0626	0	Cúbico	6.078	20.787	2.20E-16
NO	0.0292	0.0786	NO	---	---	---
NO ₂	0.3685	0	Cúbico	5.112	12.801	2.20E-16
NOX	0.114	0	NO	---	---	---

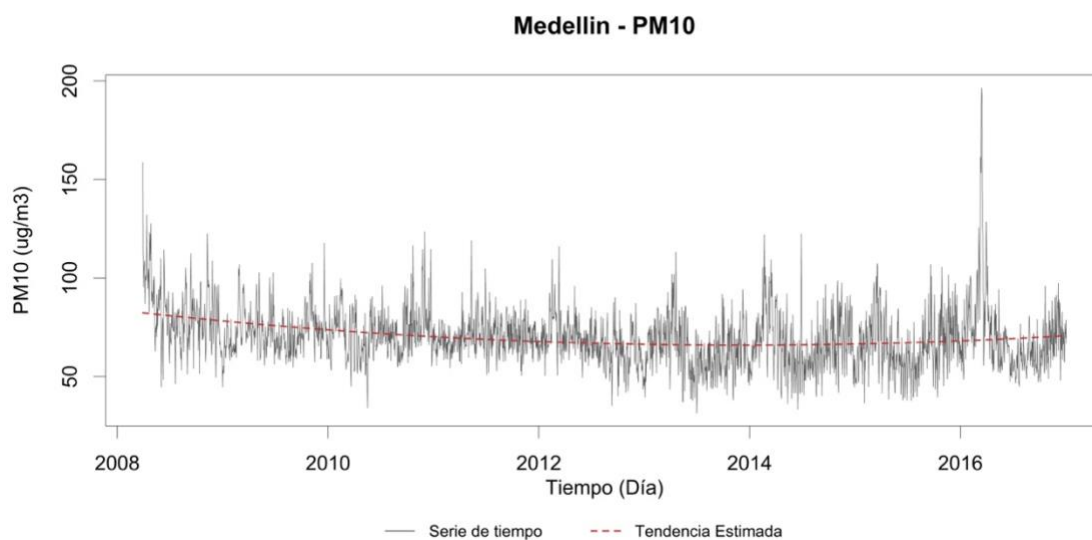


Figura 148. Modelo de tendencia cuadrático ajustado para la serie diaria de PM₁₀ del municipio de Medellín





Por la naturaleza del modelo cúbico ajustado para las series de $PM_{2.5}$, O_3 y NO_2 , se presentan cambios en el signo de la pendiente, la cual pasa de ser levemente negativa a positiva y nuevamente negativa para las dos primeras series, mientras que para la serie de NO_2 , se mantiene una pendiente positiva a lo largo del tiempo y lo que cambia es el ángulo de la misma, el cual comienza muy pronunciado para luego suavizarse.

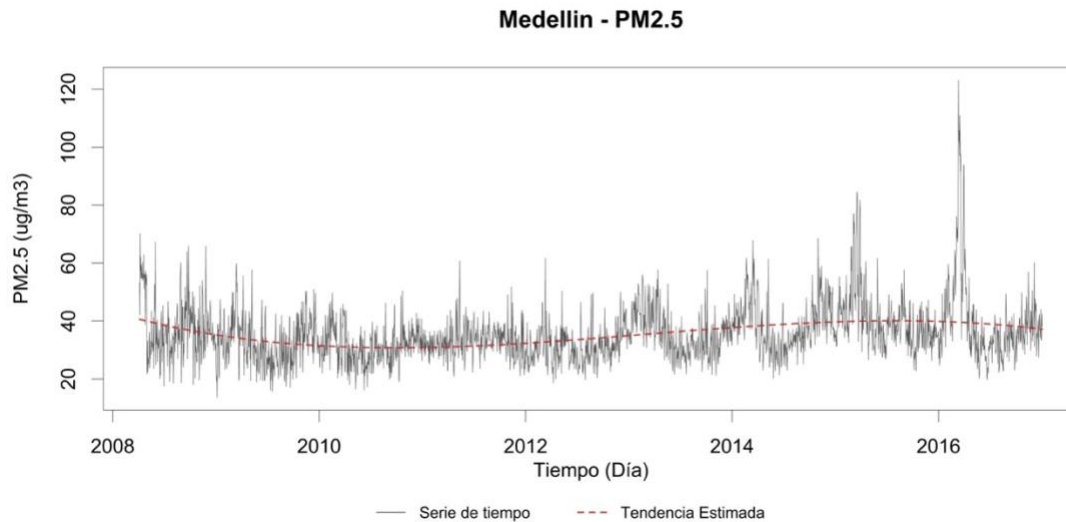


Figura 149. Modelo de tendencia cúbico ajustado para la serie diaria de $PM_{2.5}$ del municipio de Medellín

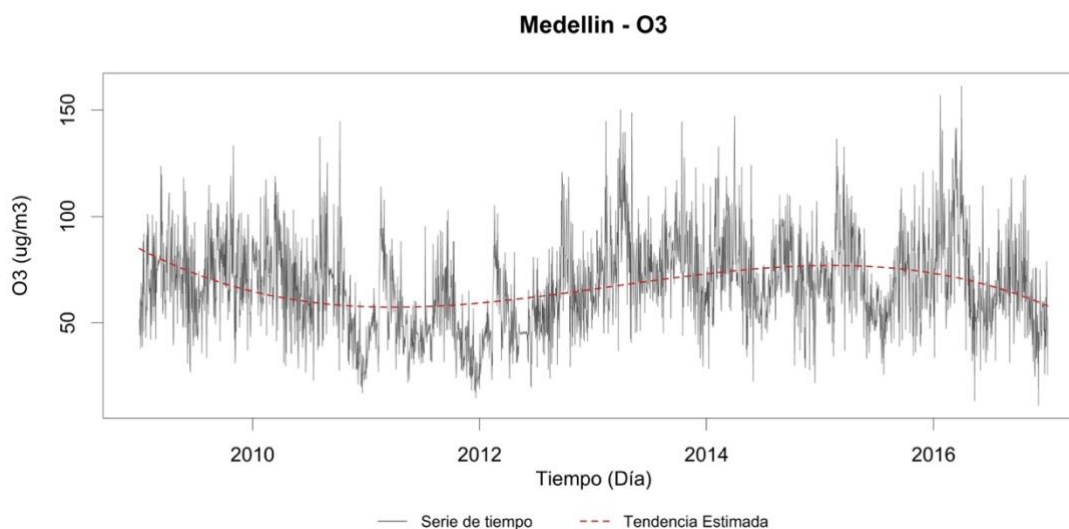


Figura 150. Modelo de tendencia cúbico ajustado para la serie diaria de O_3 del municipio de Medellín



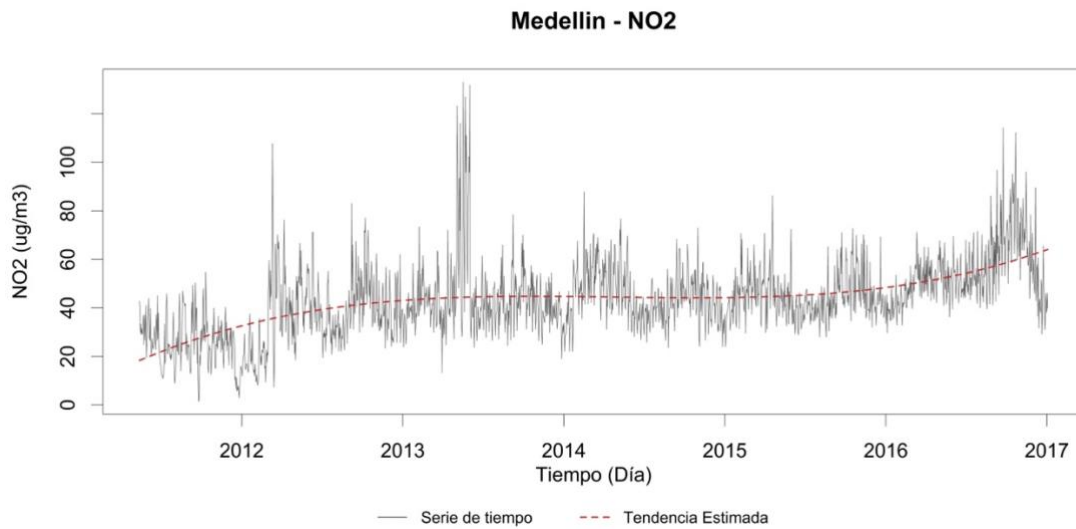


Figura 151. Modelo de tendencia cúbico ajustado para la serie diaria de NO₂ del municipio de Medellín

En general, para todas las series evaluadas en el municipio de Medellín (**Tabla 59**), se observa que se presentan años con tendencias significativas y otros años en los que no. Por ejemplo, para PM₁₀, 2 de los 9 años de registro (2011 y 2014) no presentan tendencias significativas, mientras que para la serie de PM_{2.5}, en sólo cuatro años se presentan tendencias significativas (2012, 2013, 2015 y 2016).





Tabla 59. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para los contaminantes del municipio de Medellín

Serie	Prueba Mann-Kendall	Año								
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
PM ₁₀	T	-0.2574	0.081	0.1012	0.065	-0.3067	-0.1082	-0.0381	0.0746	-0.1732
	Valor p	0	0.021	0.0039	0.0637	0	0.002	0.2776	0.0335	0
	Tendencia	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI
PM _{2.5}	T	-0.0344	-9.00E-04	0.0554	0.0402	0.1282	-0.2499	0.0344	-0.2955	-0.1174
	Valor p	0.3996	0.9798	0.1144	0.2515	3.00E-04	0	0.327	0	8.00E-04
	Tendencia	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	SI	SI
O ₃	τ	---	0.0352	-0.3269	-0.2078	0.2369	-0.0064	-0.1023	-0.0634	-0.3102
	Valor p	---	0.3153	0	0	0	0.8559	0.0035	0.0705	0
	Tendencia	---	NO	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI
NO	τ	---	---	---	---	0.3127	0.0914	0.1074	0.012	0.1926
	Valor p	---	---	---	---	0	0.0091	0.0022	0.7329	0
	Tendencia	---	---	---	---	SI	SI	SI	NO	SI
NO ₂	τ	---	---	---	-0.1464	0.2062	-0.0258	-0.1357	-0.0012	0.3196
	Valor p	---	---	---	9.00E-04	0	0.4615	1.00E-04	0.9729	0
	Tendencia	---	---	---	SI	SI	NO	SI	NO	SI
NOX	τ	---	---	---	---	0.3527	0.0683	0.0566	0.1291	0.154
	Valor p	---	---	---	---	0	0.0515	0.1067	2.00E-04	0
	Tendencia	---	---	---	---	SI	NO	NO	SI	SI

A pesar que los modelos ajustados son una aproximación a las tendencias de las series, éstos no son suficientes para representar las series de contaminantes del municipio de Medellín, debido a que los residuales no son ruido blanco (valor p de la prueba Ljung-Box menor que 0.05 -Tabla 59), por ende, es necesario evaluar la existencia de una componente estacional en las series.





4.4.9.2 Estacionalidad

En las series de PM₁₀ y PM_{2.5} (**Figura 152 y Figura 153**), se observan picos marcados en los meses marzo–abril. Esto, a diferencia de los contaminantes evaluados en los otros municipios, muestra un comportamiento monomodal estacional asociado a una de las épocas lluviosas de la región.

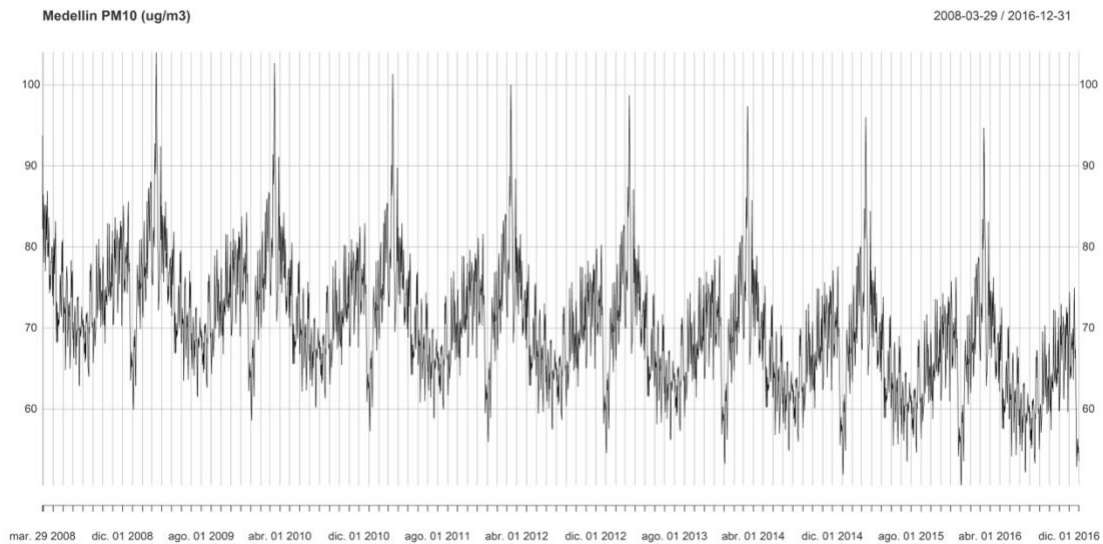


Figura 152. Estacionalidad de la serie de PM₁₀ del municipio de Medellín

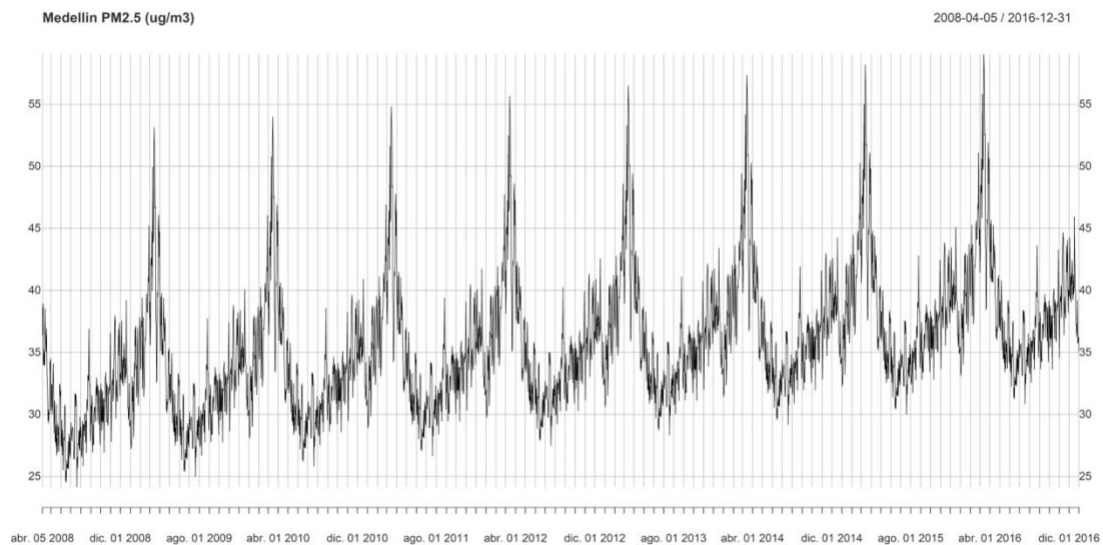


Figura 153. Estacionalidad de la serie de PM_{2.5} del municipio de Medellín





Contrario a lo anterior, para las series de O_3 , NO, NO_2 y NO_x (**Figura 154**, **Figura 155**, **Figura 156** y **Figura 157**) se presenta una estacionalidad bimodal en el año, correspondiente a los periodos marzo-mayo y noviembre-diciembre, asociada a las épocas de lluvia de la región.

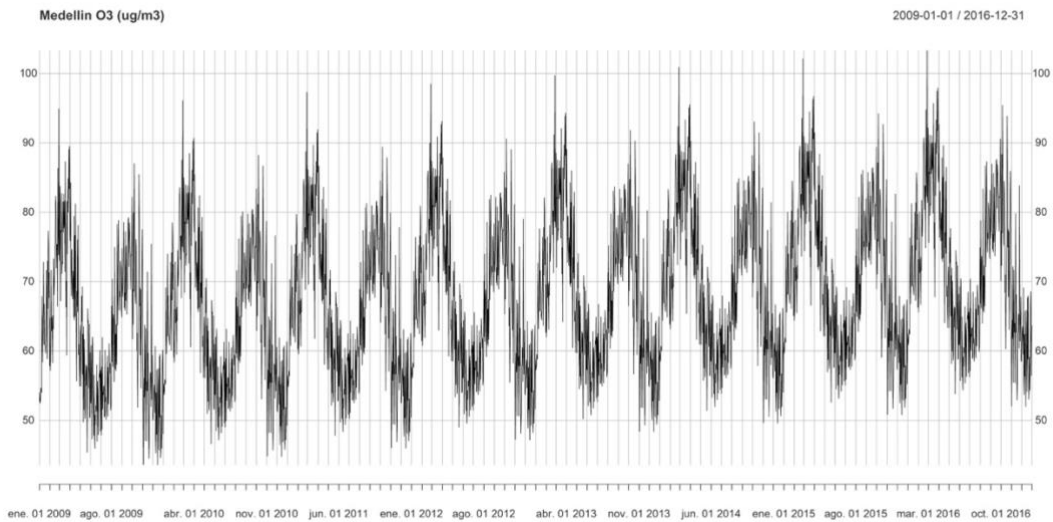


Figura 154. Estacionalidad de la serie de O_3 del municipio de Medellín

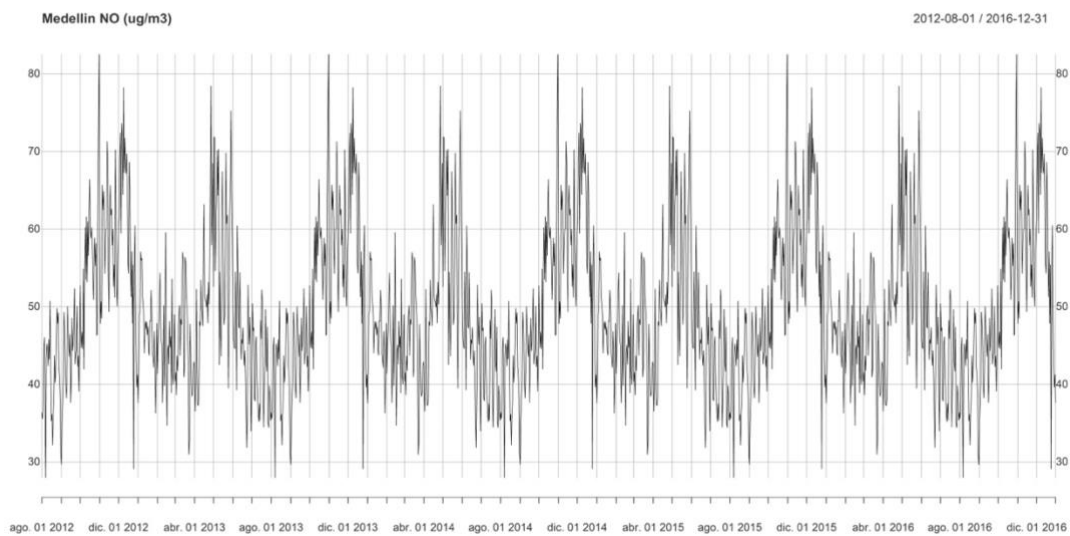


Figura 155. Estacionalidad de la serie de NO del municipio de Medellín



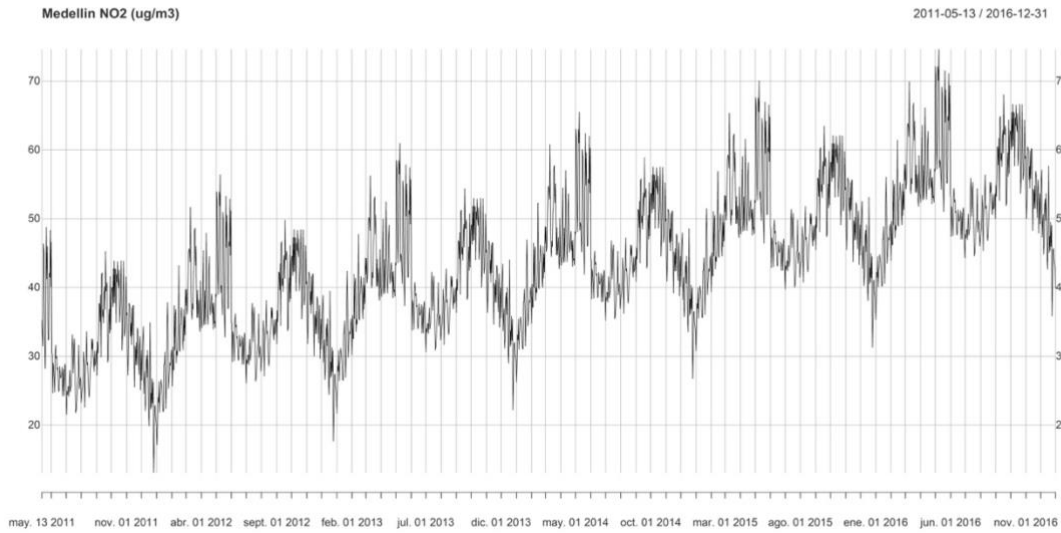


Figura 156. Estacionalidad de la serie de NO₂ del municipio de Medellín

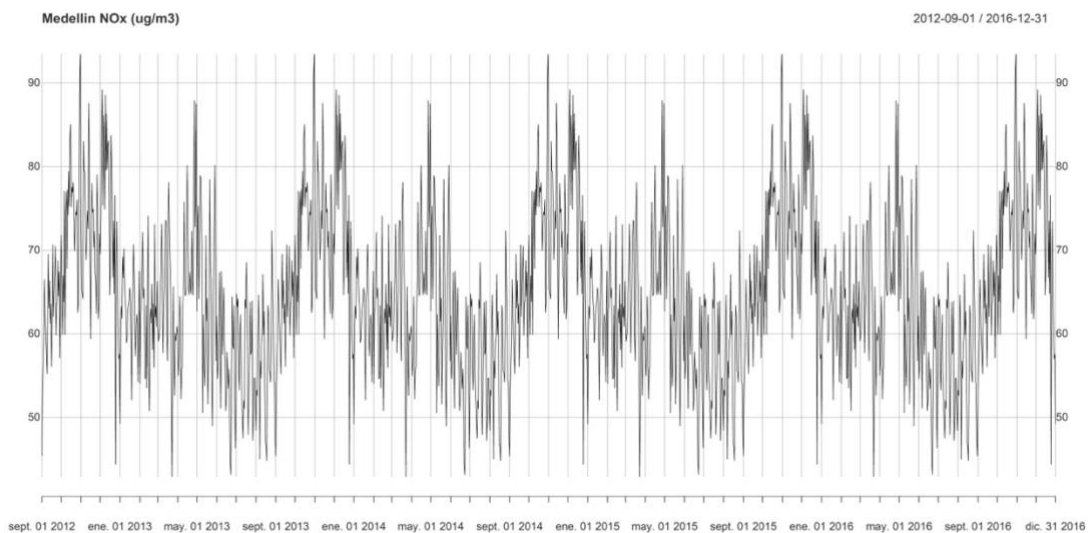


Figura 157. Estacionalidad de la serie de NO_x del municipio de Medellín

Al evaluar el error y ajuste de estos modelos estacionales, se encuentra que ninguno de los residuales cumple con el supuesto de ruido blanco (**Tabla 60**), por ende, estos modelos no son suficientes para modelar las series evaluadas.





Tabla 60. Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Medellín

Contaminante	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	13.551	2.20E-16
PM _{2.5}	8.728	2.20E-16
NO	20.447	2.20E-16
NO ₂	17.436	2.20E-16
NOX	12.684	2.20E-16

4.4.10 Sabaneta

4.4.10.1 Tendencia

Al evaluar el valor p de la prueba Mann-Kendall, se observa que, para para PM₁₀, hay suficiente evidencia que soporta la existencia de una tendencia monótonica decreciente estadísticamente significativa (**Tabla 61**). Entre los cuatro modelos utilizados para representar dicha componente, se encontró el mejor ajuste con el modelo cuadrático. El comportamiento de la tendencia gráficamente (**Figura 158**), muestra una pendiente decreciente hasta el año 2014; año en el que comienza un crecimiento leve de la tendencia.

Tabla 61. Prueba Mann-Kendall y modelo de tendencia ajustado a las series del municipio de Sabaneta

Contaminante	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Modelo ajustado	LogBIC	RMSE	Valor p Ljung-Box
PM ₁₀	-0.1773	0	Cuadrático	4.674	10.314	2.20E-16



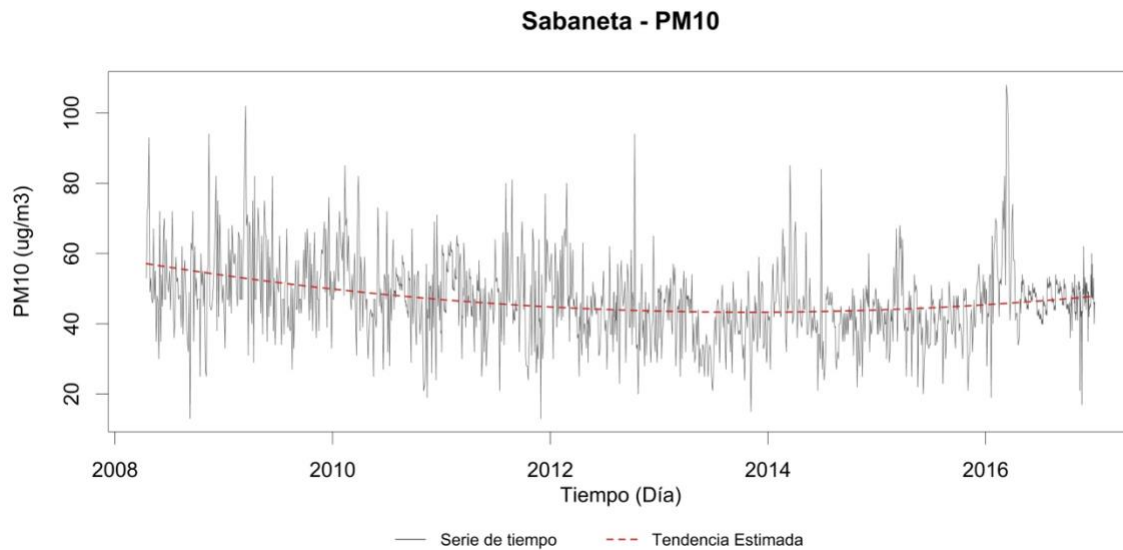


Figura 158. Modelo de tendencia cuadrático ajustado para la serie diaria de PM₁₀ del municipio de Sabaneta

Para la serie de PM₁₀, se encuentra que para todos los años las tendencias son decrecientes y significativas, excepto para los años 2008 y 2015 (**Tabla 62**). A pesar que el modelo cuadrático presenta una leve pendiente positiva a partir del año 2014, la prueba Mann-Kendall arroja resultados diferentes. Esto indica que la exploración gráfica de una serie no es suficiente para probar o no la existencia de tendencias y otros comportamientos que se puedan presentar; es necesario aplicar pruebas estadísticas para corroborar las impresiones que se concluyen a partir del gráfico de la serie temporal.

Tabla 62. Resultados de la prueba Mann-Kendall aplicada para cada año, para PM₁₀ del municipio de Sabaneta

Año	PM ₁₀		
	τ de Mann-Kendall	Valor p Mann-Kendall	Tendencia
2008	-0.0236	0.5766	NO
2009	-0.0712	0.046	SI
2010	-0.2682	0	SI
2011	-0.1419	1.00E-04	SI
2012	-0.2081	0	SI
2013	-0.1227	6.00E-04	SI
2014	-0.1952	0	SI
2015	0.0233	0.5123	NO
2016	-0.1582	0	SI





A pesar que los modelos ajustados son una aproximación a las tendencias de las series, éstos no son suficientes para representar las series de contaminantes del municipio de Sabaneta, debido a que los residuales no son ruido blanco (valor p de la prueba Ljung-Box menor que 0.05 -**Tabla 54**), por ende, es necesario evaluar la existencia de una componente estacional en las series.

4.4.10.2 Estacionalidad

En la **Figura 159** se observa que el modelo estacional ajustado para la serie de PM₁₀ genera picos marcados en los meses marzo y abril. Esto, a diferencia de los contaminantes evaluados en los otros municipios, muestra un comportamiento monomodal estacional asociado a una de las épocas lluviosas de la región.

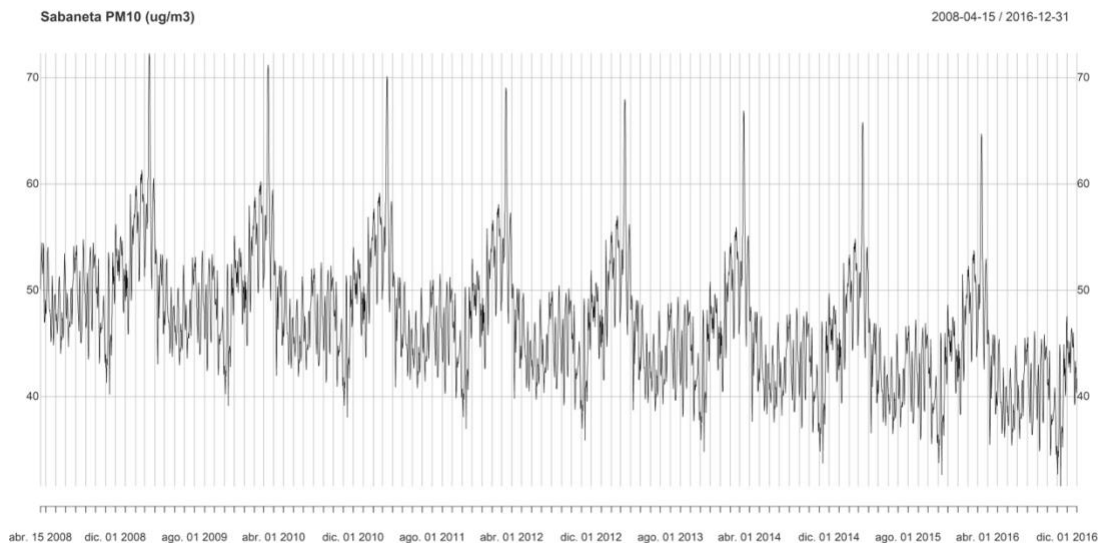


Figura 159. Estacionalidad de la serie de PM₁₀ del municipio de Sabaneta

Al evaluar el error y ajuste de estos modelos estacionales, se encuentra que ninguno de los residuales cumple con el supuesto de ruido blanco (**Tabla 63**), por ende, estos modelos no son suficientes para modelar las series evaluadas.





Tabla 63. Error cuadrático medio (RMSE) y valor p de la prueba Ljung-Box para el modelo estacional ajustado a las series del municipio de Sabaneta

Contaminante		
PM ₁₀	10.04518	2.20E-16

5 ARIMA

Siguiendo los lineamientos de la modelación ARIMA, se construyeron 43 modelos con la metodología diseñada para tal fin. No obstante, exceptuando la serie temporal del ozono para los municipios de Itagüí y La Estrella, las demás no ajustan conveniente según los supuestos de la metodología de Box-Jenkins. En el **ANEXO B**, se exponen como sustentación, las series analizadas para los 10 municipios, donde se pueden observar los problemas de incumplimiento de los supuestos.

En el O₃ para Itagüí, se observa un modelo con una componente autorregresiva (p) de orden 2, lo que implica que el valor presente de la serie se explica a partir de hasta 2 periodos inmediatamente anteriores. El valor 1 de la componente de integración (d) indica el número de diferenciaciones necesarias para que las series sean estacionarias, es decir, para que no tenga cambios en la media ni en la varianza en el tiempo. La componente de media móvil (q) de orden 1 indica que una perturbación permanece por hasta 1 periodos en el sistema (**Tabla 64**).

Por otro lado, el modelo establecido para la serie de O₃ de La Estrella se diferencia del anterior debido a que la componente autorregresiva (p) es de orden 0, es decir que el valor presente de la serie no se explica a partir de periodos inmediatamente anteriores.

Tabla 64. Modelo ARIMA para O₃ de los municipios Itagüí y La Estrella, y resultados del análisis de residuales

Contaminante	ARIMA(p,d,q)	RMSE	ACF Residuales	Ljung-Box Valor p	Shapiro-Wilk Valor p
O ₃ - Itagüí	ARIMA(2,1,1)	20.58963	SI	0.8855	0.3884
O ₃ – La Estrella	ARIMA(0,1,1)	15.96343	SI	0.441	0.223

Al evaluar los supuestos de los residuales de las series de O₃ (**Error! Reference source not found.** y **Figura 160**), se observa que a diferentes rezagos, todos los valores de los coeficientes de autocorrelación estimados se encuentran por dentro de las bandas de no significación estadística (línea horizontal), lo cual cumple el supuesto de no correlación en los residuos. Además, en la prueba de Ljung-Box el valor p fue





mayor que 0.05, implicando que los coeficientes de autocorrelación son cero y al evaluar el valor p de la prueba de Shapiro-Wilk, el supuesto de normalidad de los residuos se cumple para ambas series de O_3 .

Por lo anterior, de los modelos ARIMA propuestos para las series de contaminantes de los municipios del Valle de Aburrá, sólo los correspondientes al O_3 de Itagüí y La Estrella satisfacen los contrastes de diagnóstico, indicando que dichos modelos recogen la estructura de las series de manera eficiente.

La Estrella O_3 - Residuales

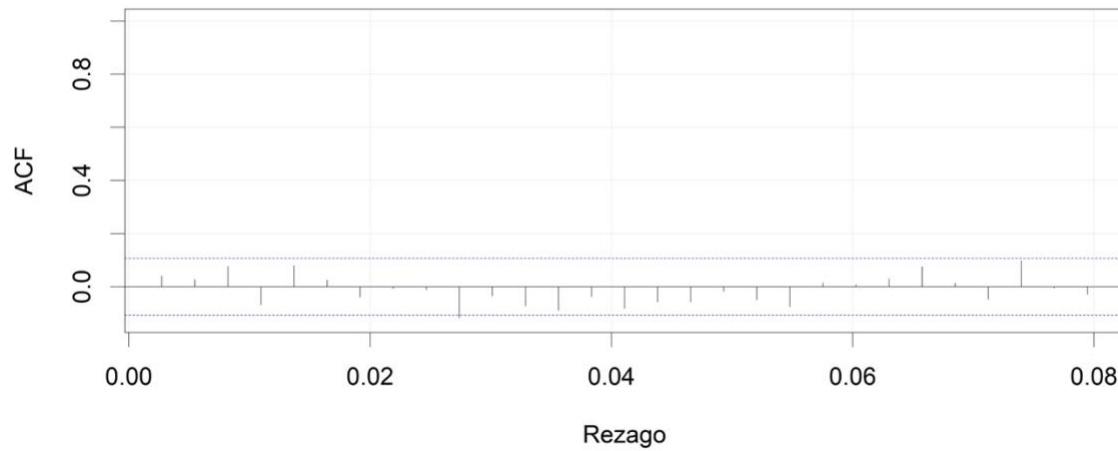


Figura 160. Autocorrelograma simple de los residuales del modelo ARIMA(0,1,1) para la serie de O_3 del municipio de La Estrella





6 CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

El Valle de Aburrá está caracterizado por ser un valle estrecho densamente urbanizado. La topografía de la zona da lugar a condiciones de inversión térmica lo que implica estabilidad en la atmósfera e inhibe los procesos de mezcla en la vertical (41,42). Por esta razón, se presentan problemas de contaminación atmosférica en ciertos periodos del año, en donde las condiciones meteorológicas y la estacionalidad climática de la región propician eventos de inversión persistentes en el tiempo.

Para todos los contaminantes se presentan excedencias a la norma establecida en las Guías de la OMS(34), debido a que éstas son más restrictivas, exceptuando el umbral para O_3 . Sin embargo, al evaluar los umbrales de la normativa colombiana de calidad del aire (33), no siempre se presentan incumplimientos del umbral. Para la mayoría de los municipios, se presentó el mayor número de excedencias para PM_{10} en el año 2009, con un nuevo incremento en el año 2016. Por otro lado, para $PM_{2.5}$ y O_3 se presentaron las máximas excedencias en el año 2016. Estos resultados revelan un aumento del número de días de excedencias para ambas normas, en los últimos años del periodo de medición evaluado, indicando que, en los últimos años se han presentado condiciones propicias para que, en algunos días del año, las concentraciones de los contaminantes superaran el límite máximo permisible establecido tanto en la normativa colombiana, como en las Guías de la OMS.

Aunque se presente un mayor número de excedencias en los últimos años del periodo evaluado, esto no necesariamente implica que la serie evaluada tiene una tendencia creciente, ya que dichos valores representan el número de días que los niveles de un contaminante sobrepasa los límites máximos permisibles. Por ende, estos resultados pueden estar relacionados con el hecho de que los picos de contaminantes que se han presentado desde el año 2014 se hacen cada vez más intensos, en términos de que éstas concentraciones cada vez son mayores, sin embargo, el comportamiento general de la serie se mantiene.

Entre los municipios que componen en Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Medellín presentó el mayor número de excedencias a la norma nacional para los contaminantes PM_{10} , $PM_{2.5}$ y O_3 , seguido por Itagüí y los municipios ubicados al sur del Valle de Aburrá, por el contrario, los municipios con menores excedencias fueron Copacabana, Girardota y Barbosa; ubicados al norte del Valle. Esto puede estar relacionado con la presencia de industrias en los municipios, además de los patrones de viento, los cuales presentan un viento predominante con dirección norte-sur.

Por la naturaleza del fenómeno analizado, se puede observar que, al evaluar las tendencias en toda la serie, éstas pueden ser o no significativas; sin embargo, al evaluar las series en tramos anuales los resultados no necesariamente son similares en comparación con la serie en todo el periodo de medición. Para todos los municipios, exceptuando Sabaneta, las series de PM_{10} presentaron una tendencia a la disminución en todo el periodo comprendido entre los años 2008 y 2016. En donde la mayoría presentaron la mayor concentración promedio anual en 2008-2009, posiblemente relacionados con la presencia y transición de ENSO- Oscilación del Sur- frío (La Niña) a cálido (El Niño), respectivamente (43,44).





Para $PM_{2.5}$ se encontró para la mayoría de los municipios, tendencias crecientes, con un valor promedio máximo en el año 2016. Los niveles de este contaminante se han incrementado, especialmente desde el año 2014, debido principalmente a la ocurrencia de eventos de alerta generados principalmente en los meses marzo y abril, relacionados al régimen bimodal de lluvias en Colombia (45), asociado al movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical, el cual propicia dos épocas lluviosas en los meses marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre. Durante los meses con altas precipitaciones se incrementan las condiciones que favorecen una atmósfera estable en el Valle de Aburrá, lo que limita la dispersión de contaminantes en la atmósfera, y como consecuencia, se incrementan las concentraciones de los mismos (42).

Para ozono, las tendencias fueron decrecientes para los municipios Bello, Girardota y La Estrella, siendo creciente para el resto. Se presentaron picos principalmente en el año 2013, además, al evaluar la estacionalidad de la serie se encontraron aumentos bimodales en las concentraciones promedio mensuales de las series en los meses marzo-abril y septiembre-octubre. Se podría decir que dichos eventos se encuentran relacionados a la estacionalidad de las lluvias en Colombia, sin embargo, al ser el ozono un contaminante fotoquímico, su formación depende de la radiación solar. En esta época del año, la radiación solar incidente disminuye debido a la alta nubosidad, por esta razón, los picos estacionales del ozono pueden ser producto de una fuente antropogénica que emite directamente el ozono o por altas concentraciones en hidrocarburos, dióxidos de nitrógeno, los cuales son precursores de éste contaminante (46–48).

El aumento en las concentraciones de ozono puede estar relacionado al incremento estacional de las concentraciones de NO_2 , además de la tendencia creciente presente para todos los municipios, exceptuando Envigado y La Estrella. La principal fuente de emisión de los compuestos de nitrógeno es el parque automotor, además los niveles se encuentran relacionados con las condiciones meteorológicas de la región (49), lo cual se evidencia con el hecho de que los picos estacionales se presentan en los meses marzo-abril y septiembre-octubre, periodo asociado con alta pluviosidad y condiciones de estabilidad. Sin embargo, a pesar de que se presenten incrementos en las concentraciones, dichos niveles no exceden el límite diario máximo permisible establecido en la normativa colombiana para este contaminante.

Para NO_x se presentan tendencias crecientes para todos los municipios, excepto Envigado y La Estrella. Se puede observar que presenta el mismo comportamiento que el NO_2 , esto puede estar relacionado con el hecho de que este contaminante está compuesto por los distintos óxidos de nitrógeno presentes en la atmósfera (49), lo que implicaría que depende más de los niveles de NO_2 que de cualquier otro compuesto.

Para NO se presentan tendencias crecientes para los municipios de Bello y Girardota y decreciente para Envigado y se observa una estacionalidad bimodal en los meses marzo-abril y septiembre-octubre, periodo asociado con alta pluviosidad y condiciones de estabilidad. El NO rompe las moléculas de ozono (46), lo que puede influenciar las tendencias decrecientes para el O_3 en los municipios de Bello y Girardota, ya que, este compuesto de nitrógeno tiene tendencias crecientes en dichos municipios.

En diferentes estudios realizados con el fin de encontrar la influencia que el ENSO puede tener sobre los niveles de determinados contaminantes, se ha encontrado una relación significativa (41,50–52). En el estudio realizado por Zapata et al. (2015), se encontró que, en el Valle de Aburrá, en condiciones de La Niña los valores de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el período 2007-2013 fueron ligeramente más altos que en El Niño y las condiciones normales; debido a la resuspensión de material particulado durante períodos cortos de baja pluviosidad después de altas precipitaciones, donde hay un lavado de





dicho contaminante. Además, en condiciones de El Niño, para PM_{10} los valores de las concentraciones son ligeramente más altos que en condiciones normales, ya que, durante los momentos de baja pluviosidad, no se presenta depositación húmeda, el cual es un método natural de remoción de los contaminantes. Por otro lado, se encontró que, en condiciones de La Niña, en comparación a las condiciones normales, los niveles de $PM_{2.5}$ son aproximadamente un 5% más bajos debido al lavado el contaminante por la presencia de la alta pluviosidad (41).

Wie & Moon (2017) encontraron una relación positiva entre los niveles de PM_{10} y el índice ENSO El Niño y negativa con La Niña, en la Península de Corea. La variación de PM_{10} presentó una relación negativa con la precipitación relacionada con el ENSO, lo que indica que a mayor la cantidad de agua precipitada, menores son los niveles del contaminante. Por lo tanto, se concluyó que incrementos en las concentraciones de este contaminante, podrían ser condicionados por la fase ENSO (50).

Singh & Palazoglu (2012) evaluaron la influencia de la variabilidad climática generada por la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y El Niño Oscilación del Sur (ENSO) sobre los niveles de ozono en verano y $PM_{2.5}$ en invierno, en 6 regiones de Estados Unidos. Durante el verano, a lo largo de la costa oeste, existe una mayor probabilidad de presentar altos niveles de ozono durante los eventos cálidos del ENSO. Durante el invierno, se presentan bajas probabilidades de excedencias de la norma durante eventos ENSO fríos sin un cambio significativos bajo eventos ENSO cálidos. Este estudio sugiere que la variabilidad climática caracterizada por las oscilaciones en el Pacífico, tiene una influencia significativa y variada en las condiciones regionales que conducen a altos niveles de contaminación en las regiones estudiadas (51).

Por otro lado, en el estudio realizado por Lanzaco et al. (2017), se encontró que, para la ciudad de Córdoba, Argentina, en condiciones de ENSO El Niño, el cual conduce a clima frío y húmedo en esta región, más que un aumento o disminución significativa en las concentraciones de $PM_{2.5}$, se presentaron cambios en la composición química del contaminante en comparación con el régimen ENSO La Niña, el cual implica condiciones secas y cálidas (52).

Al analizar los resultados del análisis de series de tiempo ARIMA, altos valores de la componente autorregresiva pueden estar relacionados con la naturaleza física de la variable, la cual depende de las condiciones meteorológicas que propicien una buena dispersión del contaminante en la atmósfera. En momentos de estabilidad, la dinámica atmosférica cerca de la superficie terrestre se encuentra limitada y, por ende, la velocidad del viento, la cual es uno de los principales motores de la dilución de los compuestos en el fluido en cuestión, es muy baja o casi nula. Al presentarse esta situación, los contaminantes se mantienen en la atmósfera sin disminuir paulatinamente su concentración, sin embargo, las emisiones antropogénicas, ya sean de fuentes fijas o móviles, siguen presentes, incrementando dichos niveles. Por esta razón, un nivel registrado por una estación de monitoreo puede estar influenciado no sólo por las emisiones, sino por la concentración en el ambiente del mismo contaminante.

Debido a la naturaleza de los contaminantes atmosféricos, se dificulta encontrar un modelo tal que permita representarlos con un buen ajuste desde un punto de vista estadístico. Esto puede estar relacionado con la variabilidad que se presenta en estas series temporales, para las cuales, su predicción se complica.





7 REFERENCIAS

1. Romero Placeres M, Diego Olite F, Álvarez Toste M. Revista cubana de higiene y epidemiología. [Internet]. Vol. 44, Revista Cubana de Higiene y Epidemiología. Editorial Ciencias Médicas; 2006 [cited 2017 Dec 1]. 0-0 p. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032006000200008
2. Consejo Nacional de Política Económica y Social. Documento CONPES 3344-Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la Contaminación del Aire. 2005;1–30. Available from: www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2005/Conpes_3344_2005.pdf
3. Organización Panamericana de la Salud. Evaluación de los efectos de la Contaminación del Aire en la Salud de América Latina y el Caribe [Internet]. 2005. Available from: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsea/fulltext/contaminacion/contaminacion.pdf>
4. University College London Universidad de los Andes. Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia [Internet]. 2013 [cited 2017 Jan 1]. Available from: <https://prosperityfund.uniandes.edu.co/site/wp-content/uploads/Caracterización-de-la-contaminación-atmosférica-en-Colombia.pdf>
5. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Clasificación Estaciones de Monitoreo de Calidad de Aire. 2014;(256):11.
6. Universidad EAFIT. Desarrollo de adelantos científicos y tecnológicos para la operación de las redes de monitoreo ambiental (SIATA) del Valle de Aburrá como instrumento para el conocimiento, manejo y reducción de emergencias y desastres. Informe Mensual contrato CD554 de 2. 2016;
7. Junger WL, Ponce de Leon A. Imputation of missing data in time series for air pollutants. Atmos Environ [Internet]. 2015;102:96–104. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.049>
8. Franco García A. No Title [Internet]. [cited 2017 Oct 3]. Available from: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/ajuste/interpol_matlab.html
9. Gómez-Carracedo MP, Andrade JM, López-Mahía P, Muniategui S, Prada D. A practical comparison of single and multiple imputation methods to handle complex missing data in air quality datasets. Chemom Intell Lab Syst [Internet]. 2014;134:23–33. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemolab.2014.02.007>
10. Otero García D. Imputación de datos faltantes en un sistema de información sobre conductas de riesgo. 2011.
11. Junninen H, Niska H, Tuppurainen K, Ruuskanen J, Kolehmainen M. Methods for imputation of missing values in air quality data sets. Atmos Environ. 2004;38(18):2895–907.
12. Zainuri NA, Jemain AA, Muda N. A comparison of various imputation methods for missing values in air quality data. Sains Malaysiana. 2015;44(3):449–56.
13. Enders CK. Applied missing data analysis [Internet]. Guilford Press; 2010 [cited 2017 Dec 1]. 377 p. Available from: <https://www.guilford.com/books/Applied-Missing-Data-Analysis/Craig-Enders/9781606236390>
14. Kenward MG. The handling of missing data in clinical trials. 2013;3:241–50.
15. Aguirre Jaime A, Armando J. Introducción al tratamiento de series temporales: aplicación a las ciencias de la salud [Internet]. Ediciones Diaz de Santos; 1994 [cited 2017 Dec 1]. Available from: https://www.mendeley.com/research-papers/introducción-al-tratamiento-series-temporales-aplicación-las-ciencias-la-salud/?utm_source=desktop&utm_medium=1.17.11&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7B95b54d1a-614d-3086-8678-50be2bd94e21%7D





16. Moritz MS. Title Time Series Missing Value Imputation. R Packag version 25 [Internet]. 2017;1–28. Available from: <https://github.com/SteffenMoritz/imputeTS> Repository
17. Plaia A, Bondi AL. Single imputation method of missing values in environmental pollution data sets. *Atmos Environ*. 2006;40(38):7316–30.
18. Zhang G, Eddy BP, Y. MH. Forecasting with artificial neural networks:: The state of the art. 1998 [cited 2017 Dec 1]; Available from: https://www.mendeley.com/research-papers/forecasting-artificial-neural-networks-state-art-4/?utm_source=desktop&utm_medium=1.17.11&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7Bbbe405c8-af42-3dc1-b159-34658a980554%7D
19. Hornik K, Stinchcombe M, White H. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks* [Internet]. 1989 Jan [cited 2017 Dec 1];2(5):359–66. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0893608089900208>
20. Funahashi K-I. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. *Neural Networks* [Internet]. 1989 Jan 1 [cited 2017 Dec 1];2(3):183–92. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0893608089900038?via%3Dihub>
21. Ortiz DM, Villa FA, Velásquez JD. Una Comparación entre Estrategias Evolutivas y RPROP para la Estimación de Redes Neuronales. *Av en Sist e Informática* [Internet]. 2007 [cited 2017 Dec 1];4(2):135–44. Available from: https://www.mendeley.com/research-papers/una-comparación-entre-estrategias-evolutivas-y-rprop-para-la-estimación-redes-neuronales/?utm_source=desktop&utm_medium=1.17.11&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7B8ffcedea-a772-3f83-a9f2-69d99b992f43%7D
22. Engelbrecht A, Andries. *Computational Intelligence: An Introduction*. 2002 [cited 2017 Dec 6]; Available from: https://www.mendeley.com/research-papers/computational-intelligence-introduction-4/?utm_source=desktop&utm_medium=1.17.12&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7B06efe65d-cd8a-3f33-9fa5-be1114948191%7D
23. Sarle WS, S W. *Neural Networks and Statistical Models*. Proceedings of the Nineteenth Annual SAS Users Group International Conference, April, 1994. SAS Inst Inc [Internet]. 1994 [cited 2017 Dec 1]; Available from: https://www.mendeley.com/research-papers/neural-networks-statistical-models-proceedings-nineteenth-annual-sas-users-group-international-confe/?utm_source=desktop&utm_medium=1.17.11&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7Bbe19fc9b-4611-3777-966c-dcf857748a5a%7D
24. Hyndman RJ, Khandakar Y. Automatic Time Series Forecasting: The **forecast** Package for R. *J Stat Softw* [Internet]. 2008 [cited 2017 Dec 1];27(3). Available from: <http://www.jstatsoft.org/v27/i03/>
25. Daniel Vallero. *Fundamentals of Air Pollution*. Fourth edi. Elsevier, Academic Press; 2008. 967 p.
26. Van Drie JH. The Boltzmann/Shannon entropy as a measure of correlation. 2008;(2):1–5. Available from: <http://arxiv.org/abs/math-ph/0001024>
27. Hausser J, Strimmer K. Entropy inference and the James-Stein estimator, with application to nonlinear gene association networks. 2009;10:1469–84. Available from: <http://arxiv.org/abs/0811.3579>
28. Ledesma R. Introducción al Bootstrap. *Desarrollo de un ejemplo acompañado de software de aplicación*. *Tutor Quant Methods Psychol*. 2008;4(2):51–60.
29. Huffaker R, Bittelli M, Rosa R. *Nonlinear time series analysis with R*. 2017. 360 p.
30. Fitzmaurice GM. Non-linear mixed-effects models. In: *Longitudinal Data Analysis*. CRC Press; 2009. p. 107–41.
31. Box, G.E.P., Jenkins, G.M. and RGC. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 2015. 1-614 p.
32. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia. *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire-Manual de operacion de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. 2010. p. 142.





33. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia. Resolución No 610 de 2010: Por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006. República de Colombia. 2010. p. 1–8.
34. World Health Organization. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. 2005.
35. Nelson CR, Plosser CR. Trends and random walks in macroeconomic time series: Some evidence and implications. *J Monet Econ* [Internet]. 1982 Jan 1 [cited 2017 Dec 1];10(2):139–62. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304393282900125>
36. Enders W. *Applied Econometric Times Series*. [Internet]. John Wiley & Sons Inc, New York. 2008. 517 p. Available from: <http://books.google.com/books?id=uu-CngEACAAJ&pgis=1>
37. Valencia A, Lozano C, Moreno C. Modelo de promedios móviles para el pronóstico horario de potencia y energía eléctrica. *El Hombre y la Máquina*. 2007;96–105.
38. Box GEP, Jenkins GM, Reinsel GC. *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley; 2008. 746 p.
39. Aguirre JA. *Introducción al tratamiento de series temporales: Aplicación a las ciencias de la salud*. 1994.
40. Davidian M, Giltinan DM. Nonlinear models for repeated measurement data: An overview and update. *J Agric Biol Environ Stat* [Internet]. 2003 Dec [cited 2017 Dec 18];8(4):387–419. Available from: <http://link.springer.com/10.1198/1085711032697>
41. Zapata CE, Cano NA, Ramírez M, Rubiano C, Jiménez J. Influence of the extreme phases of the ENSO phenomenon (El Niño and La Niña) on air quality in the Metropolitan Area of the Aburrá Valley (Colombia). 2015;168:663–75. Available from: <http://library.witpress.com/viewpaper.asp?pcode=SD15-058-1>
42. Wallace JM, Hobbs P V. *Atmospheric Science. An Introductory Survey*. Second edi. Elsevier. 2006. 483 p.
43. Center NCP. NOAA's Climate Prediction Center.
44. Aristizábal GL. Aspectos De La Circulación Atmosférica De Gran Escala Sobre El Noroccidente De Suramérica Asociada Al Ciclo Enos 2009-2010 Y Sus Consecuencias En El Régimen De Precipitación En Colombia. Ideam. 2010;
45. Molano J, Batista JM. Calendario climatológico aeronáutico colombiano. *Boletín la Soc Gográfica Colomb*. 1997;24:1–9.
46. Guicherit R, Roemer M. Tropospheric ozone trends. *Chemosph - Glob Chang Sci*. 2000 Apr;2(2):167–83.
47. Saini R, Taneja A, Singh P. Surface ozone scenario and air quality in the north-central part of India. *J Environ Sci*. 2017 Sep;59:72–9.
48. Zhao Z, Wang Y. Influence of the West Pacific subtropical high on surface ozone daily variability in summertime over eastern China. *Atmos Environ*. 2017 Dec;170:197–204.
49. Richmond-Bryant J, Snyder MG, Owen RC, Kimbrough S. Factors associated with NO₂ and NO_X concentration gradients near a highway. *Atmos Environ*. 2017;
50. Wie J, Moon BK. ENSO-related PM₁₀ variability on the Korean Peninsula. *Atmos Environ*. 2017;167:426–33.
51. Singh A, Palazoglu A. Climatic variability and its influence on ozone and PM pollution in 6 non-attainment regions in the United States. *Atmos Environ*. 2012;51:212–24.
52. Lanzaco BL, Olcese LE, Querol X, Toselli BM. Analysis of PM_{2.5} in Córdoba, Argentina under the effects of the El Niño Southern Oscillation. *Atmos Environ*. 2017;171:49–58.

