

BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE EN MANIZALES PERÍODO ENERO - MARZO DE 2019

Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Subdirección de Evaluación y Seguimiento Ambiental CORPOCALDAS.

Camilo Zapata Mora^a, Angel David Gálvez Serna^a, Carlos Mario González Duque^a, Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga^a, Mauricio Velasco García^b

^a Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GTAIHA), Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Departamento de Ingeniería Química.

^b Corporación Autónoma Regional de Caldas, Corpocaldas.

1. RESUMEN

Se presentan en este informe los resultados del monitoreo de contaminantes atmosféricos realizado en Manizales durante el periodo de enero a marzo de 2019. Se realizó el seguimiento de material particulado (PM_{10} , $PM_{2.5}$) y los gases ozono troposférico (O_3) y monóxido de carbono (CO). Se muestran las gráficas resumen obtenidas y tablas de estadísticos básicos (promedio, mínimo, máximo y desviación estándar). Asimismo, se muestran los resultados obtenidos para los índices de calidad del aire.

2. EL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE EN MANIZALES

El crecimiento poblacional y las actividades industriales han incrementado considerablemente las emisiones de contaminantes y sus niveles en aire ambiente. Entre los contaminantes de interés en zonas urbanizadas se destacan el material particulado (PM), además de gases como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), ozono troposférico (O_3). Estos contaminantes generan impactos sobre el recurso aire en ecosistemas naturales y centros urbanos.

El seguimiento a los fenómenos de contaminación del aire en Manizales y la información entregada por el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), es un sustento para tomar acciones que permitan controlar aquellas zonas donde se superen las normas de calidad del aire, además un insumo para establecer medidas de prevención donde la calidad del aire sea catalogada como perjudicial para la salud. Los datos obtenidos en la red de monitoreo de calidad del aire alimentan las bases de datos del CDIAC (Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas) y el SISAIRE del IDEAM. El CDIAC, por medio de la página web <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/indicadores/public/index>, pone a disposición de la comunidad información meteorológica, de calidad del aire, sismos y aguas subterráneas de la ciudad de Manizales y el Departamento de Caldas.

Actualmente en la ciudad de Manizales se cuenta con un SVCA conformado por 6 equipos para el monitoreo de material particulado (5 de PM_{10} , 1 de $PM_{2.5}$), aplicando técnicas de monitoreo activo. El SVCA de Manizales también cuenta con una estación automática para el monitoreo de los gases SO_2 , O_3 y CO. Esta red es operada actualmente por el Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GTAIHA) de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, en convenio con la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS). La Figura 1 muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo sobre el área urbana de la ciudad y la Tabla 1 presenta las características principales de cada estación.

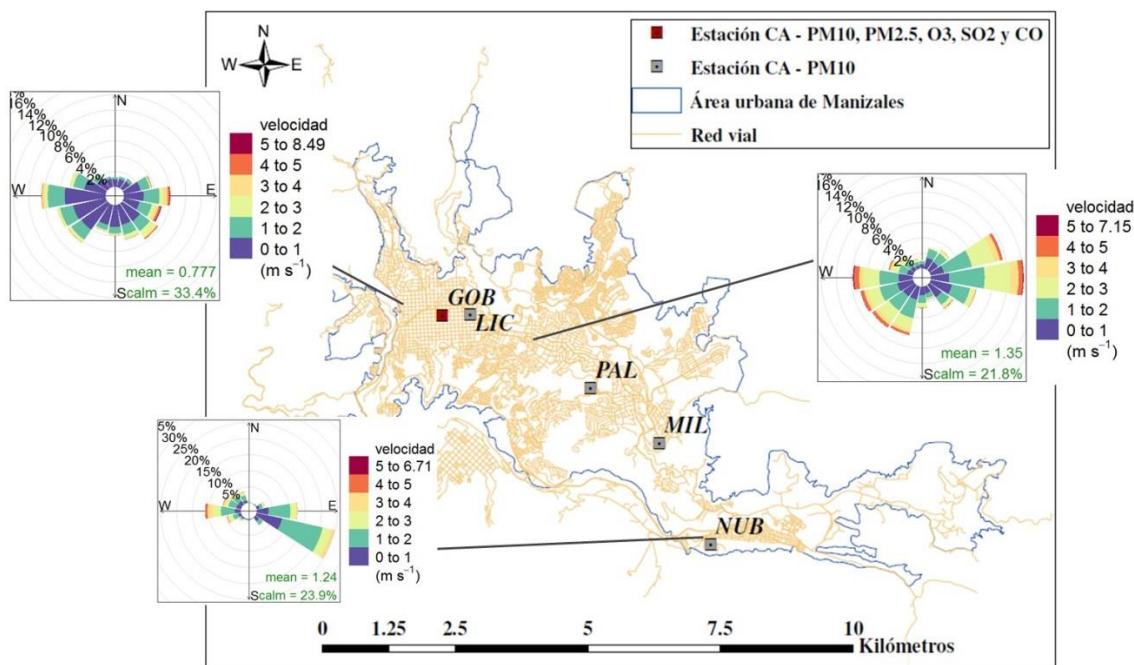


Figura 1. Mapa de Manizales con ubicación de las estaciones de calidad del aire y rosas de viento de estaciones meteorológicas representativas para el periodo enero-marzo del 2019.

Tabla 1. Características de las estaciones de calidad del aire de Manizales

Estación – Contaminante	Características y fuentes de contaminantes*	Año Instalación	Año de óptima operación – histórico	Estado actual	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación - PM ₁₀		2009	2009	Operación óptima.		
Gobernación - PM _{2.5}		2009	2009	Operación óptima.		
Gobernación - SO ₂	CU, SC – MTV, PAI	2014	Desde el 2016 se presentan fallas de estabilización.	Se encuentra en revisión externa.	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2155
Gobernación - O ₃		2014	Salió de operación durante los años 2016-2017 por fallas.	Operación óptima.		
Gobernación – CO		2014	2018 – Presentó múltiples fallas durante sus primeros años.	Operación óptima.		
Palogrande - PM ₁₀	ZC, SR - ATV, SAI	2009	2009	Operación óptima.	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
La Nubia - PM ₁₀	ZSE, SR - BTV, AZI	2009	2017 – En la red.	Operación óptima.	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo - PM ₁₀	CU, SC - ATV, PAI	2000	2010 – En la red.	Operación óptima.	N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58"	2156
Milán - PM ₁₀	ZC, SR - MAI, MTV	2012	2012	Operación óptima.	N 5° 2' 48.5" W 75° 28' 48.68"	2188

*Características: **SR:** Sector residencial, **SC:** Sector comercial, **ZSE:** Zona sureste, **CU:** Centro urbano, **ZC:** Zona central, **ZI:** Zona industrial. Fuentes de contaminación: **ATV:** Alto tráfico vehicular, **MTV:** Moderado tráfico vehicular, **BTV:** Bajo

tráfico vehicular **AAI**: Alta actividad industrial, **MAI**: Moderada actividad industrial, **PAI**: Pequeña actividad industrial, **AZI**: Adyacente a zona industrial, **SAI**: Sin actividad industrial.

El seguimiento de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) en Manizales se realiza mediante técnicas de monitoreo activas que permiten la obtención de registros promedio diario de la concentración en aire ambiente de dichos contaminantes (muestras de 24 horas cada tres días). Por otra parte, el seguimiento de gases (O_3 y CO) realizado actualmente en la estación automática de calidad del aire Gobernación (GOB), permite la obtención de registros cinco minutales, a partir de los cuales se obtienen registros promedio horario (media aritmética) y registros promedio octohorario (media móvil a partir de registros horarios). Todos los registros obtenidos de partículas y gases en aire ambiente son útiles para comparar los límites máximos permisibles definidos en la normativa colombiana, actualmente la Resolución 2254 de 2017 (MADS, 2017).

3. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

La Tabla 2 presenta los consolidados meteorológicos de la estación Hospital de Caldas de la ciudad de Manizales para los meses de enero, febrero y marzo de 2019, así como los promedios consolidados para el periodo de enero a marzo de los años 2018 y 2019. Se observa que los niveles de precipitación han aumentado a lo largo del año 2019: 103 mm en enero, 172 mm en febrero y 239 mm en marzo. También se identifica que la temperatura ha decrecido en este periodo 0.3°C y la humedad ha aumentado 8%. Comparando los primeros 3 meses de año 2018 con los del 2019 se observa un aumento de 0.7°C del año 2018 al 2019, así como un aumento considerable en la precipitación (106 mm más en 2019). Las otras variables permanecen casi invariables.

Las condiciones climáticas juegan un papel importante en la dinámica de los contaminantes en el aire. Existen contaminantes secundarios como el Ozono (O_3) que dependen de la radiación directa del sol para formarse en el aire a partir de contaminantes primarios, emitidos directamente por fuentes antropogénicas y naturales. La humedad en el aire y la lluvia también tiene una influencia importante en la contaminación, especialmente con el material particulado suspendido, el aumento de la humedad relativa se asocia al aumento en la humedad de las partículas, por consiguiente, el aumento de peso, lo cual influye en la velocidad de caída de las partículas suspendidas y en la disminución de partículas re-suspendidas (Loosmore y Cederwall, 2004). En el mismo sentido, la precipitación hace un lavado de la atmósfera, arrastrando hacia el suelo el material particulado del aire, este fenómeno se conoce como Scavenging (Akyüz y Cabuk, 2009). Finalmente la velocidad del viento influencia la concentración de contaminantes de forma inversa, ya que a mayor velocidad del viento la dispersión de los contaminantes será mayor y su concentración en la atmósfera disminuirá.

Tabla 2. Estadísticos para las variables de la estación meteorológica Hospital de Caldas

Periodo	Temperatura del aire [$^{\circ}\text{C}$]	Humedad relativa [%]	Velocidad de Viento [m/s]	Presión atmosférica [mm Hg]	Precipitación acumulada** [mm]	Radiación Solar W/m ²
2019 (Ene)	18.5	76.4	1.4	595	103	297
2019 (Feb)	18.4	82.2	1.3	595	172	236
2019 (Mar)	18.2	82.7	1.3	595	239	242
2018 (Ene - Mar)	17.7	80.5	1.3	595	409	252
2019 (Ene - Mar)	18.4	80.3	1.3	595	515	259

*Correspondiente al promedio entre el 1 de enero y el 31 de marzo de 2017, 2018 y 2019 respectivamente

**Para el caso de precipitación corresponde a la sumatoria mensual y diaria respectivamente

4. RESULTADOS MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO: PM₁₀ Y PM_{2.5}

ANÁLISIS DE PROMEDIOS DIARIOS PARA EL PERÍODO ENERO - MARZO DEL AÑO 2019

En la Tabla 3 se presentan los estadísticos descriptivos para las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} obtenidas durante el periodo de análisis (enero-marzo de 2019). Se muestra el promedio aritmético con su respectiva incertidumbre asociada, desviación estándar, concentración mínima, concentración máxima, el percentil 95 y el número de datos obtenidos. Los cálculos y gráficos fueron realizados con el software R y su librería de análisis para datos de calidad del aire, Openair.

Los resultados de la Tabla 3 muestran como la estación Liceo registró los valores más altos de PM₁₀, con un promedio aritmético de 33 µg/m³ (desv. std = 8.7 µg/m³) seguida por la estación Milán con un promedio aritmético de 31 µg/m³ (desv. std = 8.3 µg/m³). Mayores niveles de contaminación en la estación del Liceo pueden estar influenciados por el tráfico vehicular característico de esta zona, con un flujo importante de buses y camiones que tienen un uso en 100% de diésel como combustible, lo cual está asociado a la emisión del contaminante PM₁₀. A pesar de que la flota de buses y camiones corresponde al 3.2% del total de vehículos de la ciudad, este tipo de vehículos que hace uso de diésel como combustible, son responsables del 47% (362 ton/año) y 25% (192 ton/año) respectivamente del total de emisiones de PM₁₀ producto de la actividad de la flota vehicular en la ciudad (González y colaboradores, 2017).

Por otra parte, en Milán la influencia de la actividad industrial y el tráfico vehicular presentado en este sector, principalmente por la Avenida Kevin Ángel, caracterizado por alto flujo de vehículos particulares, así como de buses y camiones, estos últimos tienen especial importancia en la zona por la actividad industrial del sector. Dicha actividad industrial también tiene incidencia en los niveles de PM₁₀ obtenidos. Cabe resaltar que el 75% de los datos para las estaciones de Liceo y Milán fueron superiores a los 32 y 33 µg/m³ respectivamente. Con respecto a las estaciones Nubia, Gobernación y Palogrande, se observó que en general estas estaciones registraron las menores concentraciones de PM₁₀ durante el periodo evaluado, con promedios de 23 µg/m³ en Nubia (desv. std = 6.6 µg/m³), 22 µg/m³ en Gobernación (desv. std = 5.6 µg/m³), y 22 µg/m³ en Palogrande (desv. std = 6.2 µg/m³); siendo además la estación de Nubia la que registró la mínima concentración en toda la red con un valor 9 µg/m³ el jueves 10 de enero. Este día se registraron concentraciones bajas en todas las estaciones; 11 µg/m³ (Palogrande) y 18 µg/m³ (Liceo). Esto coincidió con las Ferias de Manizales, a pesar de que la ciudad es visitada por miles de turistas, las dinámicas de movilidad cambian durante estos días de fiestas lo que pudo influir en la disminución de este contaminante. Sin embargo, se asocian estos bajos valores principalmente a eventos de lluvias presentadas los días 9 y 10 de enero después de un periodo de sequía de 20 días. La atmósfera es lavada y las partículas suspendidas en el aire son llevadas a tierra con el agua, este fenómeno es conocido como Scavenging.

Se identificó un aumento progresivo de las concentraciones en todas las estaciones durante los meses de febrero y marzo con respecto al mes de enero. Durante el mes de marzo se presentó un aumento con respecto al promedio de los 3 primeros meses de 2019 de 12 % para la Nubia, 12% Palogrande, 11% Milán, 11% Liceo y 19% Gobernación. Considerando las emergencia por mala calidad del aire presentadas durante los meses de febrero y marzo en las ciudades de Bogotá y Medellín; y analizando los valores registrados para estaciones de la ciudad de Medellín, se identifica que la emergencia ambiental presentada el fin de semana del 17 de marzo, coincide con las altas concentraciones registradas en Manizales el domingo 17 de marzo (más altas registradas para un domingo en 2019). Esto indica que los niveles altos de contaminación durante el mes de marzo pueden ser causa de un fenómeno meteorológico regional con posible influencia de emisiones globales y de dinámica atmosférica.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio de PM₁₀ y PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) monitoreado en Manizales, durante el periodo enero – marzo del año 2019.

Estadístico*		Año 2019				Estadístico*		Año 2019			
		Ene.	Feb.	Mar.	Total			Ene.	Feb.	Mar.	Total
Gobernación PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)						Milán PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)					
Promedio ± incertidumbre**		20 ± 1.19	20 ± 1.63	27 ± 1.19	22 ± 1.33	Promedio ± incertidumbre**		28 ± 0.02	32 ± 0.01	35 ± 0.03	31 ± 0.02
Desviación Estándar		6	4.5	3.1	5.6	Desviación Estándar		8.3	9	6.2	8.3
Min. – Max.		10 - 28	13 - 29	22 - 31	10 - 31	Min. – Max.		17 - 40	14 - 45	24 - 43	14 - 45
Percentil 95%		28	27	31	30	Percentil 95%		39	42	42	42
Nº Datos		10	10	9	29	Nº Datos		10	10	9	29
Liceo PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)						Nubia PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)					
Promedio ± incertidumbre**		30 ± 0.01	33 ± 0.04	37 ± 0.01	33 ± 0.01	Promedio ± incertidumbre**		19 ± 0.03	25 ± 0.01	26 ± 0.03	23 ± 0.03
Desviación Estándar		6.9	9	9.4	8.7	Desviación Estándar		6	6.9	5.1	6.6
Min. – Max.		18 - 40	17 - 41	23 - 55	17 - 55	Min. – Max.		9 - 28	15 - 35	16 - 33	9 - 35
Percentil 95%		38	41	50	42	Percentil 95%		27	35	32	34
Nº Datos		9	8	8	25	Nº Datos		10	10	9	29
Palogrande PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)						Gobernación PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)					
Promedio ± incertidumbre**		19 ± 0.02	24 ± 0.02	25 ± 0.02	22 ± 0.02	Promedio ± incertidumbre**		13 ± 1.36	13 ± 1.93	19 ± 1.36	15 ± 1.55
Desviación Estándar		5.2	6.8	5.5	6.2	Desviación Estándar		4.7	2.9	3.2	4.5
Min. – Max.		11 - 25	14 - 33	18 - 33	11 - 33	Min. – Max.		7 - 20	8 - 18	14 - 22	7 - 22
Percentil 95%		25	32	32	32	Nº Datos		10	10	9	28
Nº Datos		10	10	9	29						

*Estadísticos calculados a partir de los registros de concentración promedio diarios

** Fuentes de incertidumbre están relacionadas principalmente con los procedimientos de determinación del peso del filtro y medición del flujo de la bomba. Se incluyen además incertidumbres asociadas a la determinación de temperatura ambiente y presión atmosférica, variables necesarias para estimar el flujo durante el día de monitoreo y para reportar las concentraciones de contaminantes a condiciones estándar.

Si se comparan los promedios obtenidos para el periodo analizado del presente año con el mismo periodo para años anteriores, se observa una disminución en el promedio trimestral del 24% para Liceo y 9% para Gobernación respecto al año 2018, mientras las demás estaciones se mantienen entre el 3% y 4% de variación promedio. De otra parte, respecto al primer trimestre del año 2017 se evidenció una disminución en 15% para Liceo y Milán y una variación de 4% a 5% para el resto de estaciones. Con esta información se puede inferir que los promedios de contaminación por material particulado se han visto mitigados durante los dos (2) años transcurridos por posibles cambios en las tecnologías de la flota vehicular de ciudad (González y colaboradores, 2017), influenciando así la disminución progresiva observada en los promedios de PM₁₀ en la ciudad. Se destaca que en el primer trimestre del año 2019 (515 mm) la precipitación (lluvias) fue 21% mayor que en 2018 (409 mm). Lo que también pudo influir en la limpieza de la atmósfera en la ciudad a causa del fenómeno de Scavenging.

En lo que respecta al monitoreo de PM_{2.5}, el perfil es similar a lo presentado en la estación gobernación de PM₁₀, con un promedio de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, un mínimo de 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y máximos de 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenidos a mediados del mes de marzo (11 y 14 de marzo), en estas fechas se dio lugar a actividades volcánicas reportadas. Sin embargo, no se descarta la posible influencia por aumento del tráfico vehicular para esta estación en particular. Finalmente, se identificó un

aumento del 46% de la concentración durante el mes de marzo con respecto a los meses de enero y febrero de 2019; y un aumento del promedio trimestral en un 9% respecto al año 2018, en donde se destaca que el mes con mayor aumento significativo respecto al 2018 fue febrero con un crecimiento del 31% para el promedio mensual.

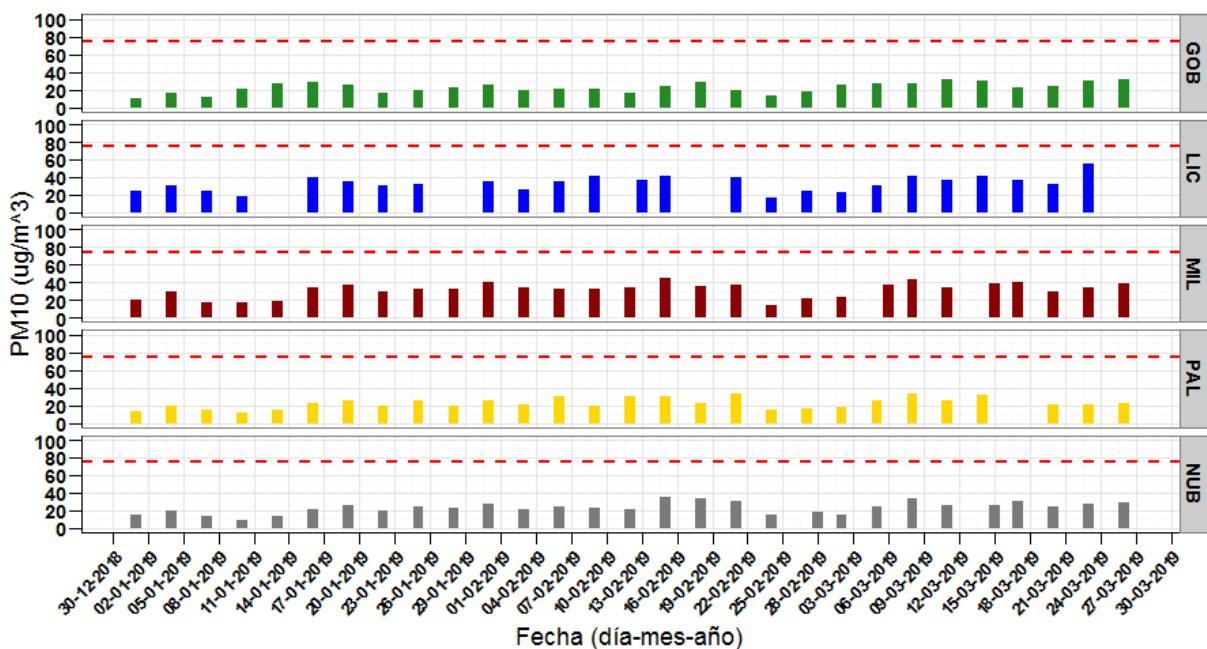


Figura 2. Evolución temporal de concentraciones de PM₁₀ diario durante el periodo enero – marzo del año 2019 en el SVCA de Manizales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM₁₀ establecido en la Resolución 2254 de 2017.

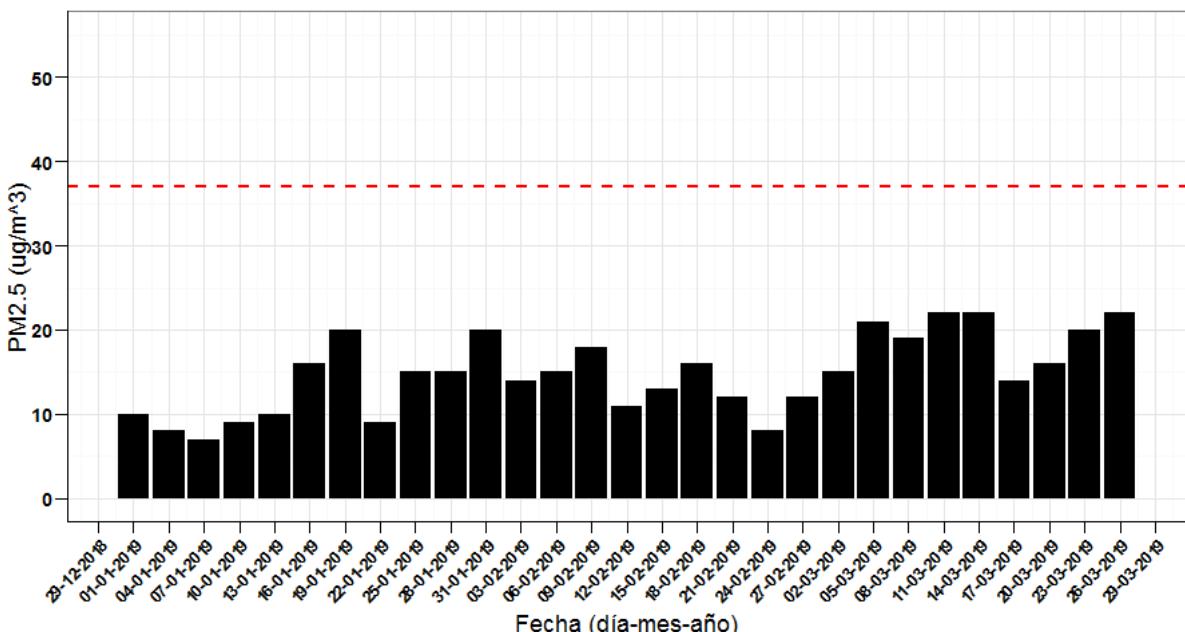


Figura 3. Evolución temporal de concentraciones de PM_{2.5} diario durante el periodo enero – marzo del año 2019 en el SVCA de Manizales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM_{2.5} establecido en la Resolución 2254 de 2017.

De manera complementaria se presentan las Figuras de evolución temporal de concentraciones diarias presentadas para PM₁₀ (Figura 2) y PM_{2.5} (Figura 3), se destaca que en ninguna de las estaciones de monitoreo se superó el límite máximo diario para material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) establecido en la Resolución 2254 de 2017 (MADS, 2017).

ANÁLISIS DE PROMEDIOS PARA EL PERÍODO DE ANÁLISIS Y COMPARACIÓN PRELIMINAR CON NORMA ANUAL

Se realizó un ejercicio de comparación del promedio aritmético obtenido para las concentraciones de PM₁₀ (Figura 4) y PM_{2.5} (Figura 5) para el periodo completo de análisis (enero – marzo de 2019). Lo anterior con el fin de analizar de forma preliminar las diferencias respecto a los límites normativos anuales establecidos en la Resolución 2254 de 2017 para PM₁₀ (50 µg/m³) y PM_{2.5} (25 µg/m³). En ninguna de las estaciones se ha superado la norma anual colombiana. Sin embargo, es importante destacar que en el caso de PM₁₀, los promedios obtenidos en todas las estaciones superan la recomendación propuesta por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 20 µg/m³ para promedio anual. Lo mismo sucedió con el PM_{2.5}, para el cual se supera la recomendación de promedio anual de la OMS establecida en 10 µg/m³.

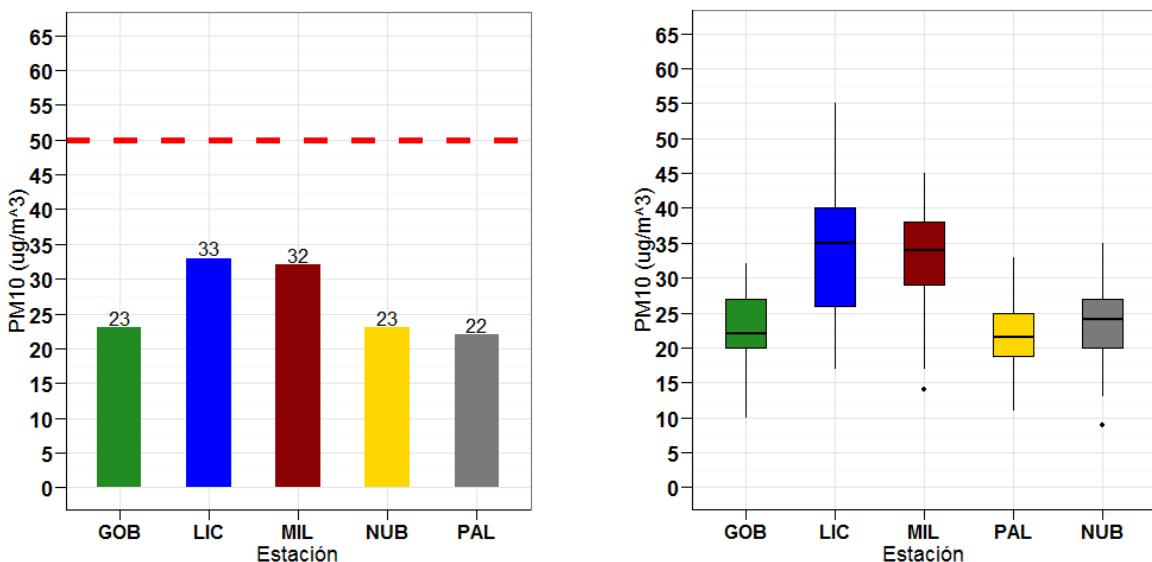


Figura 4. Diagrama de cajas (derecha) y concentración promedio de estaciones de PM₁₀ (izquierda) entre enero – marzo del 2019. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS.

En la Figura 6 se presenta la variación promedio de concentraciones de PM₁₀ (Figura 6a) y PM_{2.5} (Figura 6b) por días de la semana en las estaciones de la ciudad. En ésta se ratifica que las menores concentraciones se obtienen los fines de semana (específicamente los días domingo) demostrando así la influencia de las emisiones por tráfico vehicular en las cercanías de las zonas de monitoreo. En las estaciones Liceo y Gobernación, los días lunes presentan una concentración media menor a las registradas en los demás días laborales, comportamiento que se asocia al efecto de un remanente de atmósfera limpia producto de la disminución de concentración obtenida durante el domingo.

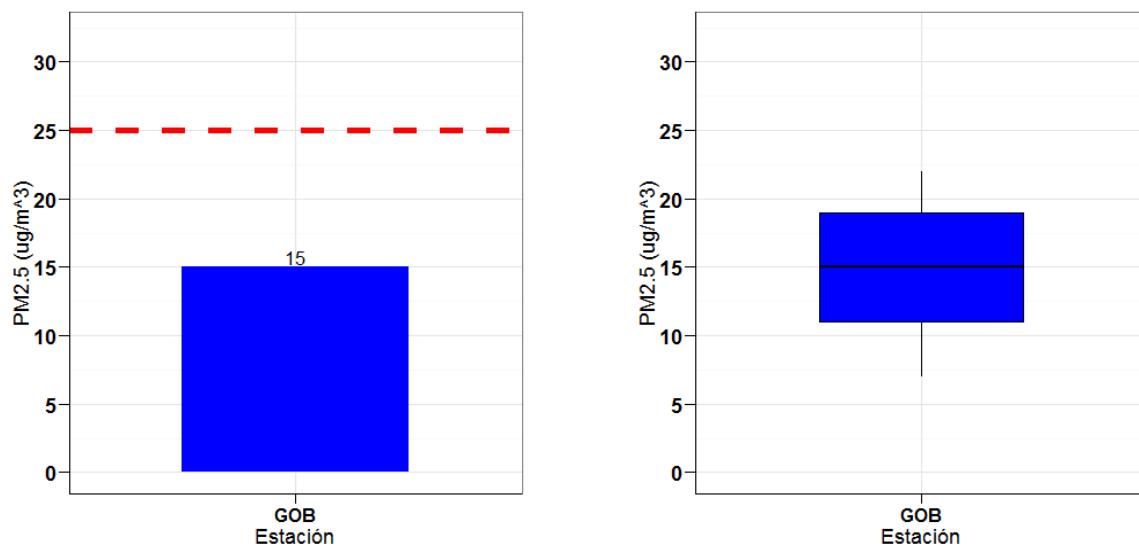


Figura 5. Diagrama de cajas (derecha) y concentración promedio de estaciones de PM_{2.5} (izquierda) entre enero – marzo del 2019. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS.

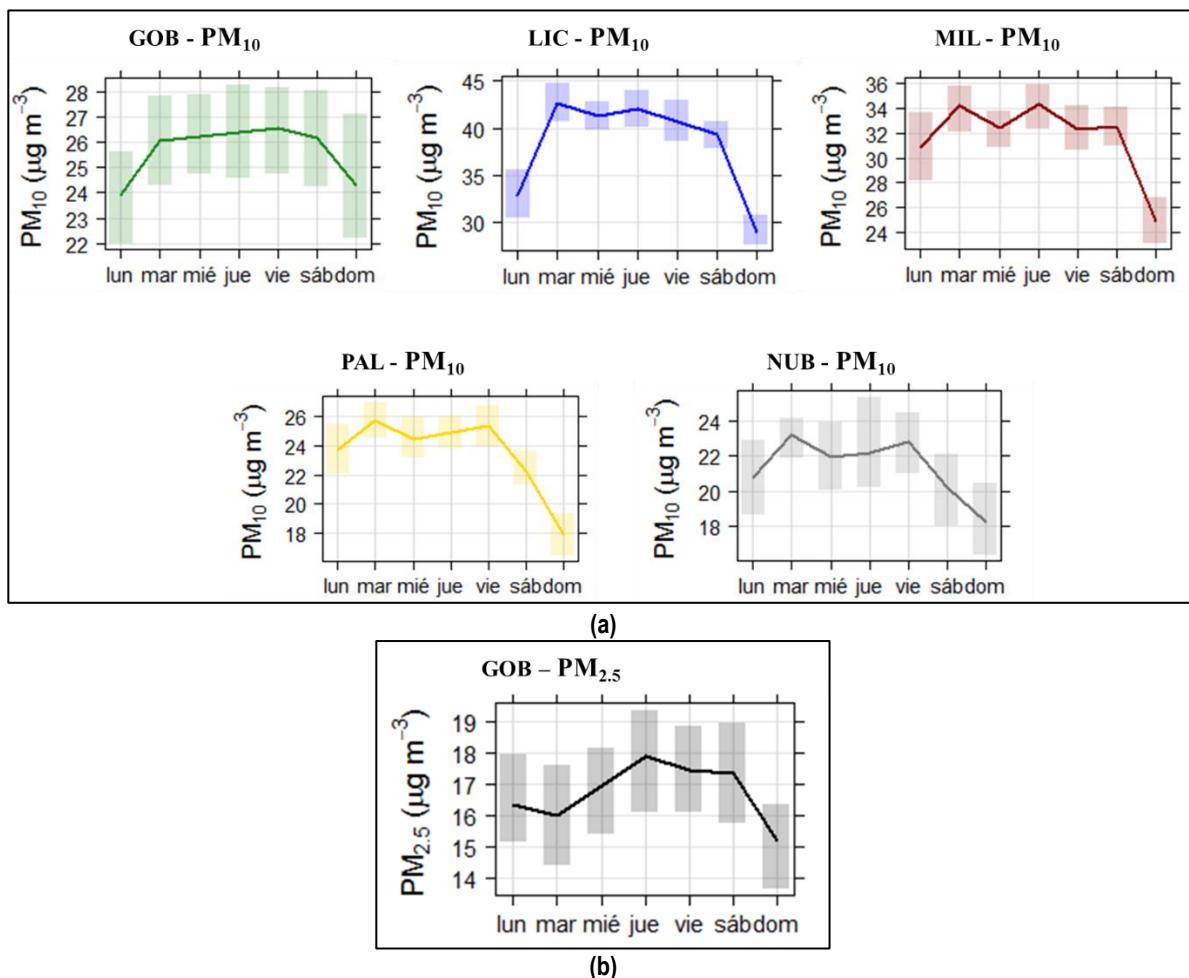


Figura 6. Variación por días de la semana de concentraciones de material particulado en periodo de enero – marzo de 2019 para a) PM₁₀. b) PM_{2.5}. La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROMEDIOS PARA PM₁₀ Y PM_{2.5} EN LA ESTACION GOBERNACIÓN

Actualmente, en la estación Gobernación se encuentran juntos los equipos de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, esto permite analizar la distribución en tamaño de las partículas inferiores a 10 µm de diámetro. Se considera partículas gruesas a aquellas con un diámetro aerodinámico entre 2.5 y 10 µm; las partículas finas tienen diámetro menor que 2.5 µm. Es importante observar que el PM_{2.5} es una parte del PM₁₀. En la Figura 7 se presentan las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} obtenidas en la estación Gobernación en lo corrido del año 2019. Además, se representa la resta de estas dos variables. Se identifica que en todos los casos la concentración de PM_{2.5} es menor que la de PM₁₀, resultado coherente y que coincide con lo descrito anteriormente.

Respecto a la distribución de tamaño de las partículas con diámetro aerodinámico inferior a 10 µm, se observa que en la mayoría de los casos la concentración de PM_{2.5} (partículas finas) representa más de la mitad de la concentración de PM₁₀. Esto nos indica que en la mayoría de los casos más del 60% del PM₁₀ corresponde a la fracción fina o PM_{2.5}, por lo tanto, el porcentaje restante (resta) se refiere a la fracción de partículas con un diámetro entre 10 µm y 2.5 µm (partículas o fracción gruesa).

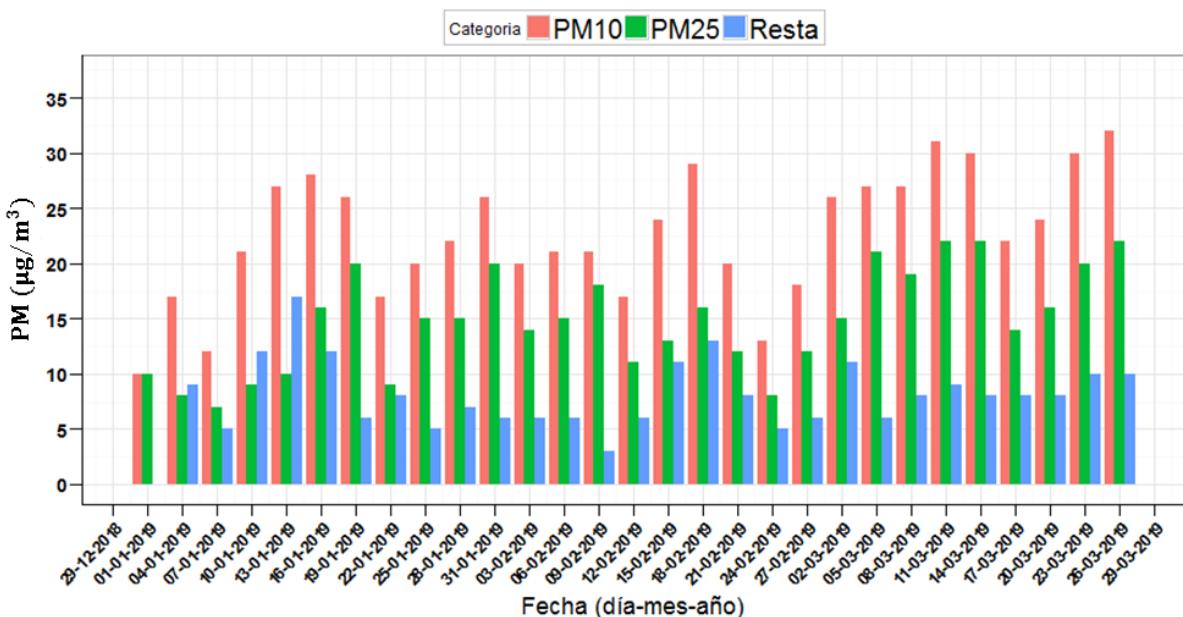


Figura 7. Relación por resta de material particulado PM₁₀ - PM_{2.5} en estación Gobernación de Caldas durante el periodo de enero – marzo de 2019

5. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE, ICA, PARA PM₁₀ Y PM_{2.5} EN EL SVCA DE MANIZALES

La Figura 8 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM. El ICA representa mediante un indicador de color, el estado de la calidad del aire de acuerdo a la concentración de material particulado y su posible afectación a la salud. Para el cálculo de este indicador (ICA) se utiliza la metodología propuesta por la resolución 2254 de 2017 (capítulo IV artículo 18 al 21) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS 2017). Se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en la mayoría de las estaciones de PM₁₀, sólo en Liceo se presentó un (1) día con calidad de aire moderada el 23 de marzo, mientras la estación de PM_{2.5} presentó calidad del aire moderada para el 65% de los días medidos, al ser esta una fracción del PM más pequeña, se recalca

la importancia de continuar con medidas que permitan el mejoramiento de estas concentraciones en aire ambiente, ya que su afectación a la salud es mayor que el PM₁₀.

	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
Rango PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0 - 54	55 - 154	155 - 254	255 - 354	355 - 424	425 - 504
Rango PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0-12	13-37	38-55	56-150	151-250	251-500

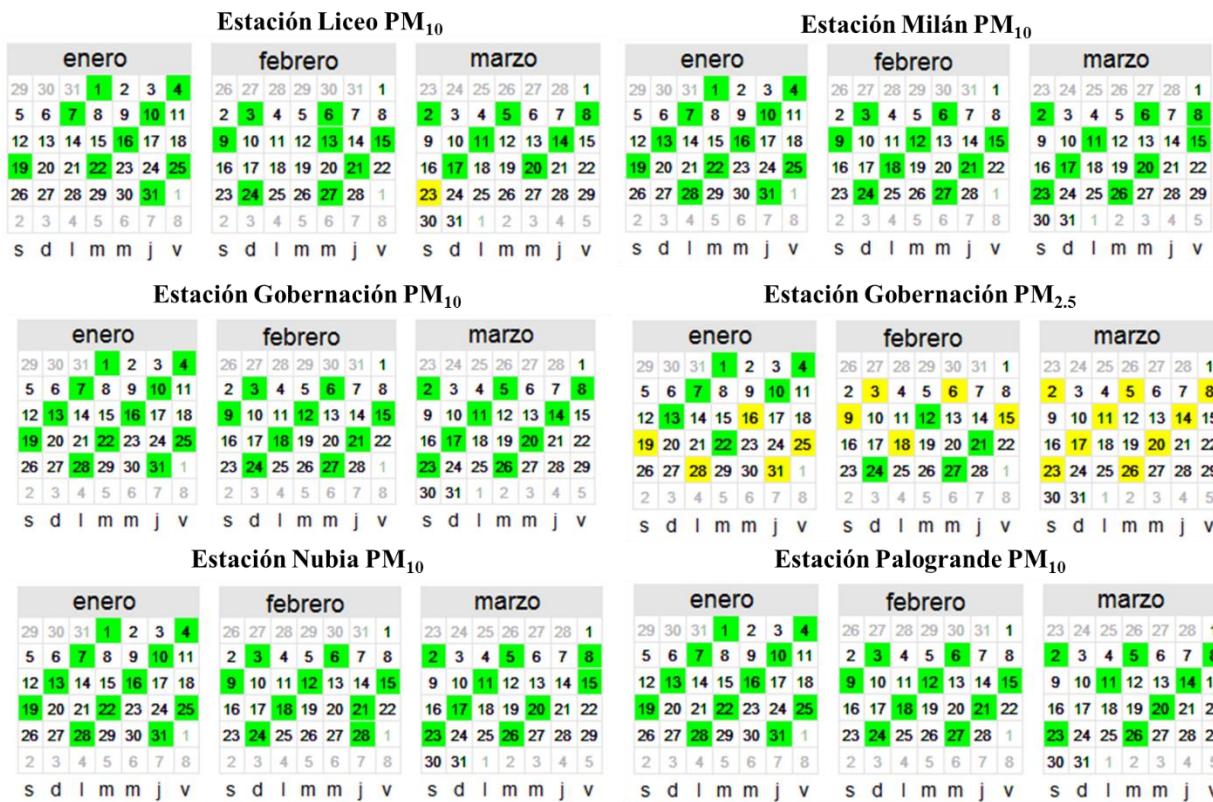


Figura 8. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2,5} en Manizales durante el periodo enero – marzo del año 2019.
Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS.

6. RESULTADOS MONITOREO DE GASES

MONITOREO DE OZONO, O₃

Este contaminante secundario presenta un perfil diurno caracterizado por mayores niveles en periodos de mayor radiación solar (entre las 12 y 4 pm), comportamiento asociado a reacciones fotoquímicas de precursores de ozono (NO_x y COV). En la figura 9, Se observa que los datos presentan un perfil coherente para este tipo de contaminante, con promedios octohorarios de $14.7 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 16.7$, mínimos de $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y picos máximos por encima de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el cálculo de la variación de la concentración del ozono en periodos de 8 horas, se empleó la media móvil. Al compararlos valores de ozono octohorario con el límite máximo permisible ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), establecido en la Resolución 2254 de 2017, se observa que la norma de ozono no fue superada durante el periodo de monitoreo, ver (Figura 9b).

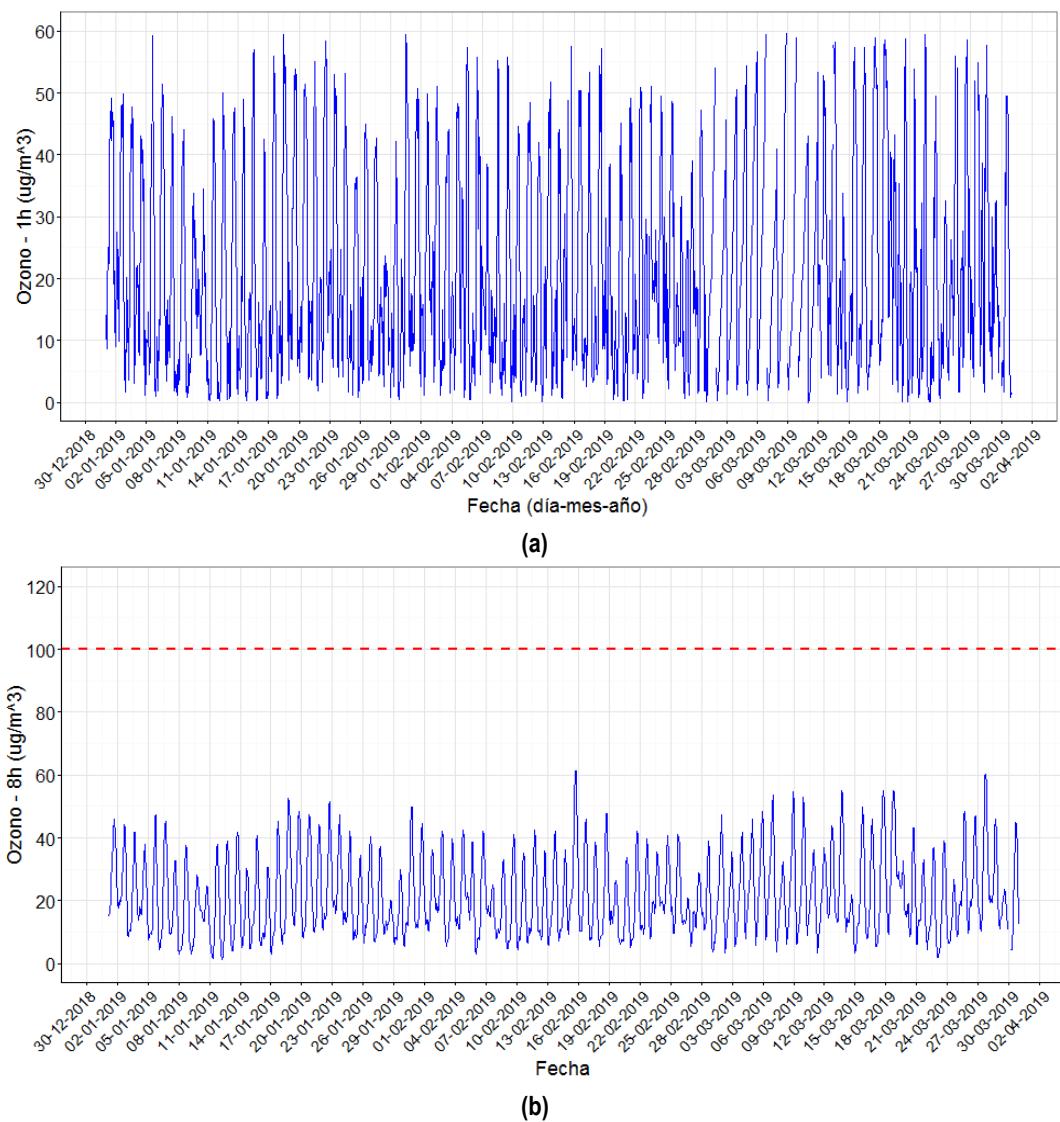


Figura 9. Variación de concentración de ozono troposférico entre enero – marzo del 2019. a) Promedio horario. b) Promedio octohorario. La línea punteada roja representa el límite máximo permisible establecido en la Res. 2254 de 2017 de MADS.

De manera alternativa se presenta en la Figura 10 el resumen de la variación promedio horaria, semanal y mensual para todos los datos y su comportamiento durante el día (diurno entre las 6 am y 6 pm) y la noche (nocturno entre las 6 pm y 6 am). Así pues, se observa que los picos máximos en las concentraciones de ozono ocurren durante las 11:30 am y 3:00 pm del día, alcanzando una concentración cercana a los $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que para el periodo nocturno esta concentración disminuye en más del doble y se presenta un pico entre la 1:00 am y 3:00 am con valores cercanos a los $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en donde se sugiere además un arrastre de este contaminante de las partes altas de la cordillera que han perdurado en el ambiente y son traídos a la ciudad debido a los perfiles de dirección de viento que presenta la ciudad.

Se identificó que las concentraciones durante el día son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con un promedio diurno de $29.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y uno nocturno de $13.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se evidencia que los promedios durante la noche no presentan relación con los días de la semana, esto se asocia a que en la noche no existe radiación solar y por tanto

no hay generación de ozono indicando que el ozono registrado es un remanente del generado durante el día que permaneció en la atmósfera y presenta un comportamiento estable, o en su defecto la acumulación de sus precursores como los NO_x que tienen un tiempo de vida en la atmósfera aproximado de 24 horas, este último es un posible indicador de los picos observados en horas de la madrugada. De otra parte, los promedios diurnos presentan variación en los diferentes días de la semana, esto se asocia principalmente a la variación en la radiación solar, es decir, las condiciones meteorológicas de la zona en que se encuentra la estación. Lo anterior indica una relación fuerte con las condiciones meteorológicas del sector, en especial con el nivel de radiación presentado durante el día.

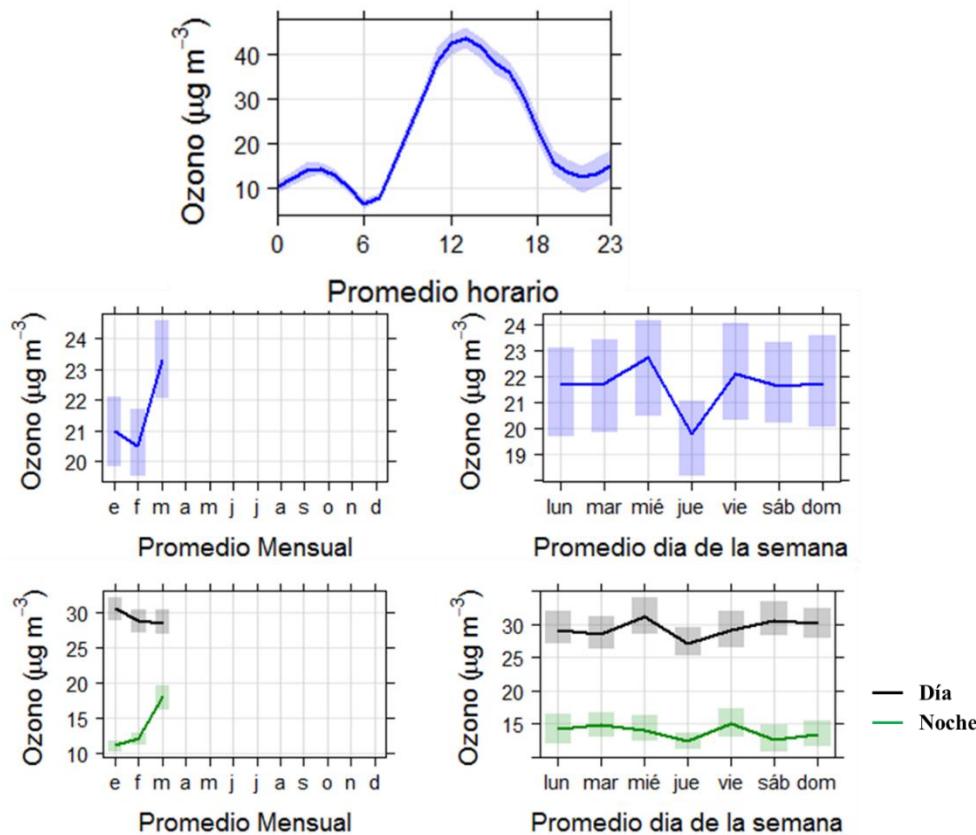


Figura 10. Variación promedio horario, semanal y mensual de ozono troposférico (Se incluye además el comportamiento promedio mensual y semanal entre las horas diurnas y nocturnas) entre enero – marzo del 2019 (O_3) en la estación Gobernación.

Adicionalmente se observó que la mayor concentración mensual de ozono fue registrada en el mes de marzo que tuvo un aumento aproximado del 8% respecto a los meses anteriores, presentando un comportamiento similar al caso del PM, por lo que no se descarta un posible episodio de contaminación por fenómenos regionales o de dinámica atmosférica globales. En la Tabla 2 se presenta el resumen de las variables meteorológicas con promedios mensuales del presente trimestre, en donde se puede observar que la precipitación ha ido aumentando a medida que avanza el año debido al régimen bimodal de lluvias de la región, no obstante no se observa una clara relación de la radiación solar con las concentraciones superiores observadas del ozono. Algunos autores como (Cortés, y otros, 2015) han estudiado las condiciones de estabilidad atmosférica en la ciudad de Manizales, basados en las categorías de Pasquill (A: Extremadamente inestable – F: extremadamente estable), que relaciona la capacidad de dispersión o dilución de los contaminantes en la atmósfera baja y se concluyó que la ciudad de Manizales corresponde a una categoría tipo C, caracterizada por radiaciones solares inferiores a 350 W/m² y velocidades de viento entre 0 y 0.8 m/s, categorización

que aplica para todos los casos del presente trimestre, por lo que no se descartan episodios de inestabilidad que se hayan modificado durante algunos días del mes de marzo debido a condiciones meteorológicas atípicas de tal manera que se influenciara el promedio mensual de este contaminante.

MONITOREO DE MONÓXIDO DE CARBONO, CO

La Figura 11 muestra los resultados del monitoreo de CO entre enero y marzo del año 2019. Se muestran los registros de concentración de CO horario (Figura 11a) y octohorario (Figura 11b). Se resalta que la concentración de CO, tanto horaria como octohorario, no se ha superado el límite promedio máximo establecido en la Resolución 2254 de 2017 (5000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio horario y 35000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio de 8 horas).

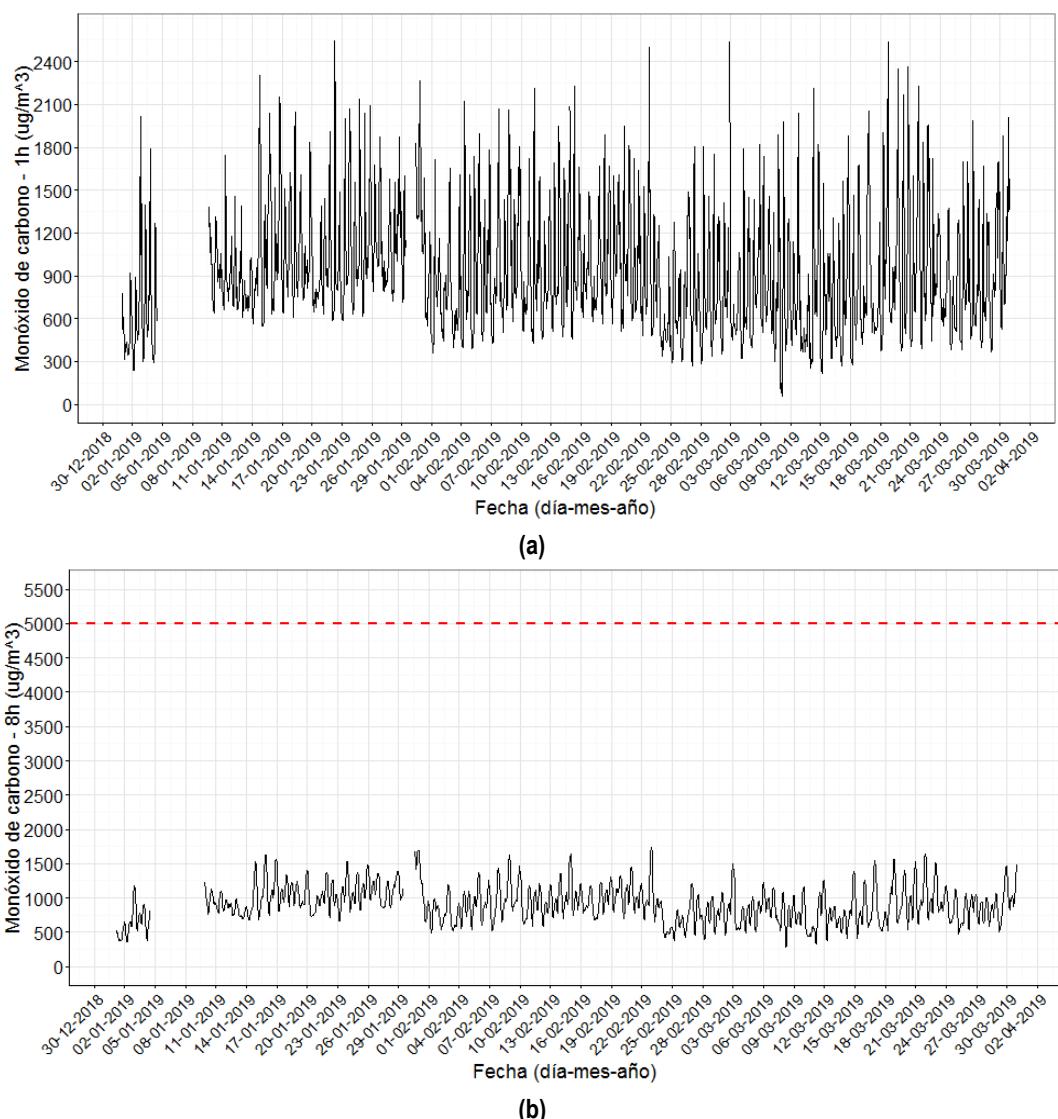


Figura 11. Variación de concentración de monóxido de carbono obtenida durante periodo enero – marzo del año 2019 en la estación Gobernación. a) Promedio horario. b) Promedio octohorario. La línea punteada roja representa el límite máximo permisible establecido en la Res. 2254 de 2017 de MADS.

La variación promedio horaria, diaria y mensual presentada en la

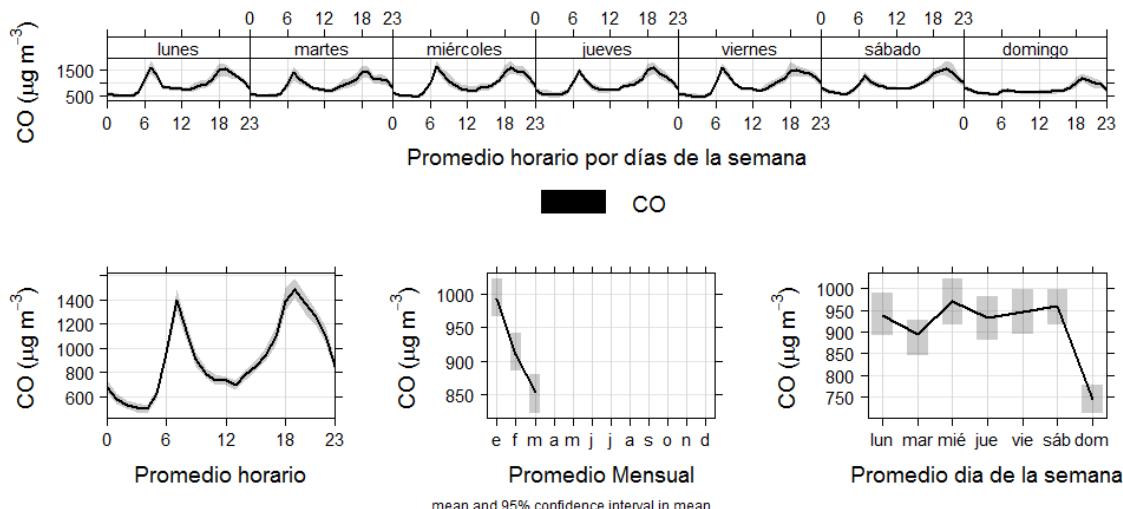


Figura 12 muestra que los picos máximos en las concentraciones del CO ocurren en las horas pico de tráfico vehicular al inicio y fin de la jornada laboral (alrededor de las 7am y las 6pm), donde se han observado promedios horarios de $914 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 416.9$, mínimos de $58.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ observados en horas de la madrugada (entre la 1 y 5 am, hora de menor actividad vehicular) y máximos de $1700 \mu\text{g}/\text{m}^3$, observados entre las 6 y 8 pm (hora pico de movilidad en la ciudad). Al comparar los días hábiles de la semana, no se halló ninguna relación directa entre los días hábiles, presentándose promedios horarios entre los 900 y $970 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, se destaca el comportamiento de los fines de semana (sábado y domingo), donde se observa que los días sábados se comportan como un día laboral, mientras que el domingo se presentan las menores concentraciones con promedios horarios de $750 \mu\text{g}/\text{m}^3$, es decir, una reducción del 18% para este contaminante. Este resultado es coherente ya que los vehículos a gasolina (principalmente motos y vehículo particular) son aportantes de cantidades importantes de CO a la atmósfera. Este aspecto quedó demostrado en el más reciente inventario de emisiones atmosféricas realizado en la ciudad para el año base 2014 (González y colaboradores, 2017), donde se estimó una contribución de 37444 ton/año de CO asociado a vehículos particulares y motos, lo que representa un aporte del 86% de la emisión de CO en toda la flota vehicular registrada a 2014 en Manizales.

Por lo anterior se explican los niveles de CO alcanzados y su concordancia con las dinámicas de movilidad de la ciudad. Finalmente si relacionamos las concentración observadas de CO mensuales con los promedios de las variables meteorológicas (Tabla 2) se observa una posible relación inversa con la cantidad de precipitación acumulada a lo largo del mes, ya que se obtuvieron las menores concentraciones durante el mes de marzo con promedios de $850 \mu\text{g}/\text{m}^3$ contra los $970 \mu\text{g}/\text{m}^3$ presentados en el mes de enero, es decir, una reducción de la concentración del 12%, indicando un posible fenómeno de lavado atmosférico para este tipo de contaminante.

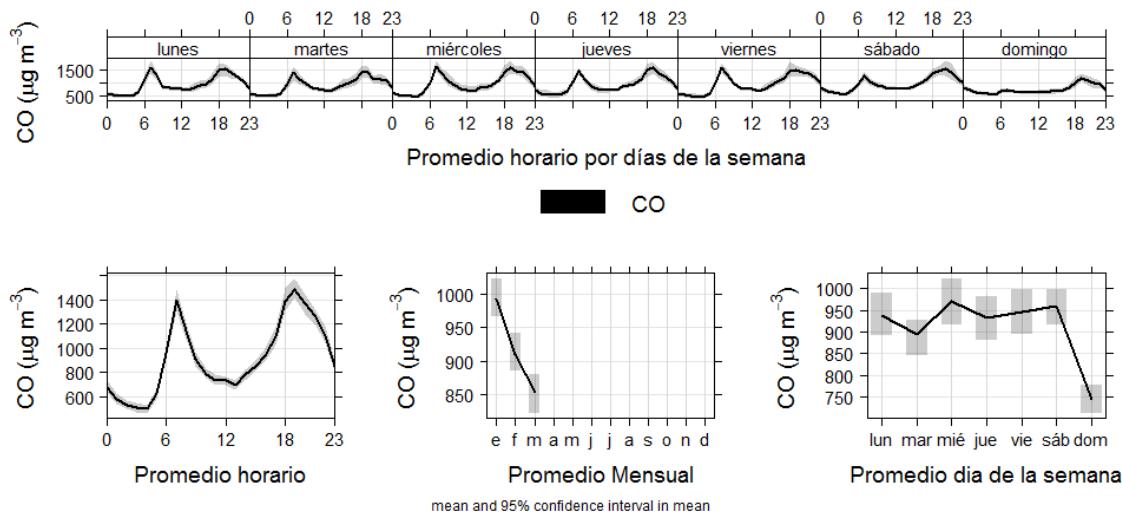


Figura 12. Variación promedio horaria, diaria y mensual de monóxido de carbono (CO) en la estación Gobernación entre enero – marzo del 2019.

7. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE, ICA, PARA PM_{10} Y $\text{PM}_{2.5}$ EN EL SVCA DE MANIZALES

La Figura 13 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de CO y O_3 . El ICA representa mediante un indicador de color, el estado de la calidad del aire de acuerdo a la concentración de material particulado y su posible afectación a la salud. Para el cálculo de este indicador (ICA) tanto en CO y O_3 se utiliza la metodología propuesta por la resolución 2254 de 2017 (capítulo IV artículo 18 al 21) del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS 2017). Se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena durante todo el periodo analizado para ambos contaminantes.

	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
Rango CO ($\mu\text{g/m}^3$)	0 – 5094	5095 – 10819	10820 – 14254	14255 – 17688	17689 – 34862	34863 – 57703
Rango O_3 ($\mu\text{g/m}^3$)	0 – 106	107 – 138	139 – 167	168 – 207	208 – 393	>394

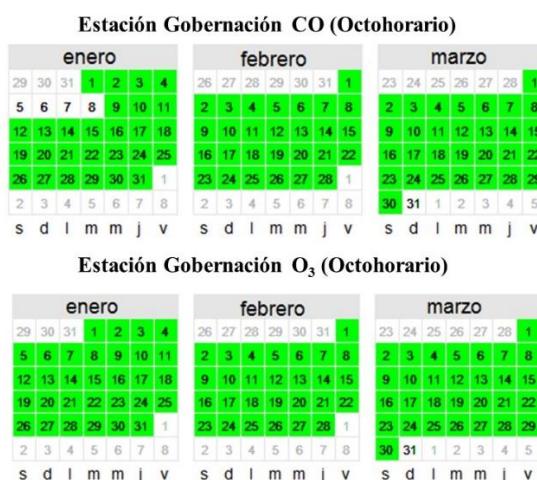


Figura 13. Índice de calidad del aire (ICA) para CO y O_3 en Manizales durante el periodo enero - marzo del año 2019.
Basado en la resolución 2254 de MADS.

8. REFERENCIAS

- Cortés, Johana, y otros. 2015. Análisis de datos de calidad del aire en la ciudad de Manizales utilizando Matlab y Operair. [aut. libro] Beatriz Aristizabal, y otros. *Entendimiento de fenómenos ambientales mediante análisis de datos*. Manizales : Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, 2015, págs. 73 - 108.
- Eurachem / CITAC, 2012. Quantifying uncertainty in analytical measurement. Third edition. QUAM:2012.P1
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2017. Resolución 2254 de 2017. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. Bogotá, D.C., Colombia.
- González, C.M., Gómez, C.D., Rojas, N.Y., Acevedo, H., Aristizábal, B.H., 2017. *Relative impact of on-road vehicular and point-source industrial emissions of air pollutants in a medium-sized Andean city*. *Atmospheric Environment* 152, 279-289. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.048>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2010. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Bogotá, D.C., Colombia.
- Servicio geológico colombiano (SGC), 2019. *Boletín semanal de actividad del volcán Nevado del Ruiz*. Manizales, Caldas. Dirección de geoamenazas.
- G. Loosmore y R. Cederwall, «*Precipitation scavenging of atmospheric aerosols for emergency response applications: testing an updated model with new real time data*,» *Atmospheric Environment*, vol. 38, pp. 993-1003, 2004.
- M. Akyüz y H. Cabuk, «*Meteorological variations of PM12.5/PM10 concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak*,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 170, pp. 13-21, 2009.