BOLETIN DE CALIDAD DEL AIRE DE MANIZALES
AÑO 2017

Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Subdirección de Evaluación y Seguimiento Ambiental CORPOCALDAS.

Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga[a], Camilo Zapata Mora[a], Carlos Alberto Giraldo Villa[a], Carlos Mario González Duque[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] *Profesional especializado, Corpocaldas.*

1. Introducción y aspectos metodológicos

El crecimiento poblacional y las actividades industriales han incrementado considerablemente las emisiones de contaminantes, entre los cuales se destacan gases como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), ozono troposférico (O_3); además del material particulado (PM), contaminante de especial interés en centros urbanos debido a su relación con enfermedades como asma, bronquitis crónica, infartos no letales. Estos contaminantes generan impactos sobre el recurso aire en ecosistemas naturales y centros urbanos.

Actualmente en la ciudad de Manizales se cuenta con un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire conformado por 8 equipos para el monitoreo de material particulado, aplicando técnicas de monitoreo activo (5 de PM_{10}, 1 de $PM_{2.5}$ y 2 de PST). Este monitoreo se basa en el método gravimétrico, que consiste en filtrar el aire ambiente sobre un filtro de micro cuarzo (PM_{10}) o fibra de vidrio (PST), donde las partículas son retenidas. Posteriormente las muestras son desecadas en condiciones controladas y pesadas para determinar la cantidad de partículas que se encuentran en el aire. La Tabla 1 muestra las características de las estaciones de monitoreo de calidad del aire.

La red de monitoreo de calidad del aire de Manizales también cuenta con una estación automática para el monitoreo de los gases SO_2, O_3 y CO. Durante el año 2017 la estación estuvo en proceso de mantenimiento y trazabilidad, sólo se reportaron datos de O_3 a partir de mes de diciembre de 2017.

El seguimiento a los fenómenos de contaminación del aire en Manizales y la información entregada por la red de vigilancia, es un sustento para tomar acciones que permitan controlar aquellas zonas donde se superen las normas de calidad del aire, además un insumo para 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***, pone a disposición de la comunidad información meteorológica y de calidad del aire de la ciudad de Manizales y el Departamento de Caldas.

Este boletín presenta los resultados obtenidos durante el seguimiento de niveles de concentración de los contaminantes monitoreados en la red de calidad del aire de la ciudad de Manizales, para el año 2017. 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, con el apoyo de la Autoridad Ambiental (CORPOCALDAS). Durante el periodo mencionado se realizó el seguimiento de los contaminantes: Partículas Suspendidas Totales (PST) y partículas respirables con diámetros menores a 10 µm (PM_{10}), cuyas fuentes se asocian al tráfico vehicular (emisiones y polvo en resuspensión), emisiones industriales y fenómenos naturales como las emisiones de ceniza del

volcán nevado del Ruíz. También se reportan las concentraciones de Ozono troposférico durante el mes de diciembre de 2017.

Tabla 1. Estaciones de calidad del aire de Manizales

Estación - Contaminante	Características - Fuentes de contaminantes	Año Instalación	Operación en año 2017	Latitud	Longitud	Altitud msnm
Gobernación - PM_{10}	CU, SC – MTV, PAI	2009	Mar. - Dic.	N 5° 4' 6.53"	W 75° 31' 1.54"	2125
Gobernación - $PM_{2.5}$		2009	No operó			
Gobernación - SO_2		2014	No operó			
Gobernación - O_3		2014	Dic.			
Gobernación - CO		2014	No operó			
Palogrande - PM_{10}	ZC, SR - ATV, SAI	2009	Feb. - Dic.	N 5° 3' 22.4"	W 75° 29' 31.3"	2154
La Nubia - PM_{10}	ZSE, SR - BTV, AZI	2009	Feb. - Dic.	N 5° 1' 47.0"	W 75° 28' 18"	2091
Liceo - PM_{10}	CU, SC - ATV, PAI	2000	Ene. - Dic.	N 5° 4' 5.01"	W 75° 30' 37.58"	2156
Liceo - PST		2000	Jul. - Dic.			
Milán - PM_{10}	ZC, SR - MAI, MTV	2012	Ene. - Dic.	N 5° 2' 48.5"	W 75° 28' 48.68"	2188
Maltería - PST	ZI, SR - AAI, MTV	1997	Feb. - Dic.	N 5° 2' 21.95"	W 75° 25' 41.36"	2343

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.*

2. Ubicación de las estaciones

La Figura 1 presenta la ubicación de las estaciones de la Red de Calidad del Aire en Manizales, incluyendo la rosa vientos generada durante el periodo evaluado para tres estaciones representativas en la ciudad y cercanas a las estaciones de calidad del aire. Manizales se caracteriza por vientos de baja velocidad, alrededor de 1 m/s en promedio. Considerando la topografía de la zona, los vientos están asociados principalmente al fenómeno valle-montaña, donde durante el día los vientos ascienden hacia la parte alta de la Cordillera Central y en la noche se invierte este comportamiento con un descenso de las masas de aire. Este comportamiento se demuestra con direcciones predominantes de vientos que provienen principalmente del oriente y suroriente, y en menor proporción vientos provenientes del occidente y noroccidente.

3. Resultados de estadísticos descriptivos y distribución temporal del PM_{10} y PST durante el año 2017

En la Tabla 2 se presentan los estadísticos descriptivos para las concentraciones de PM_{10} y PST obtenidas durante año 2017. Se muestra el promedio aritmético, desviación estándar, concentración mínima, concentración máxima, el percentil 95 y el porcentaje 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.

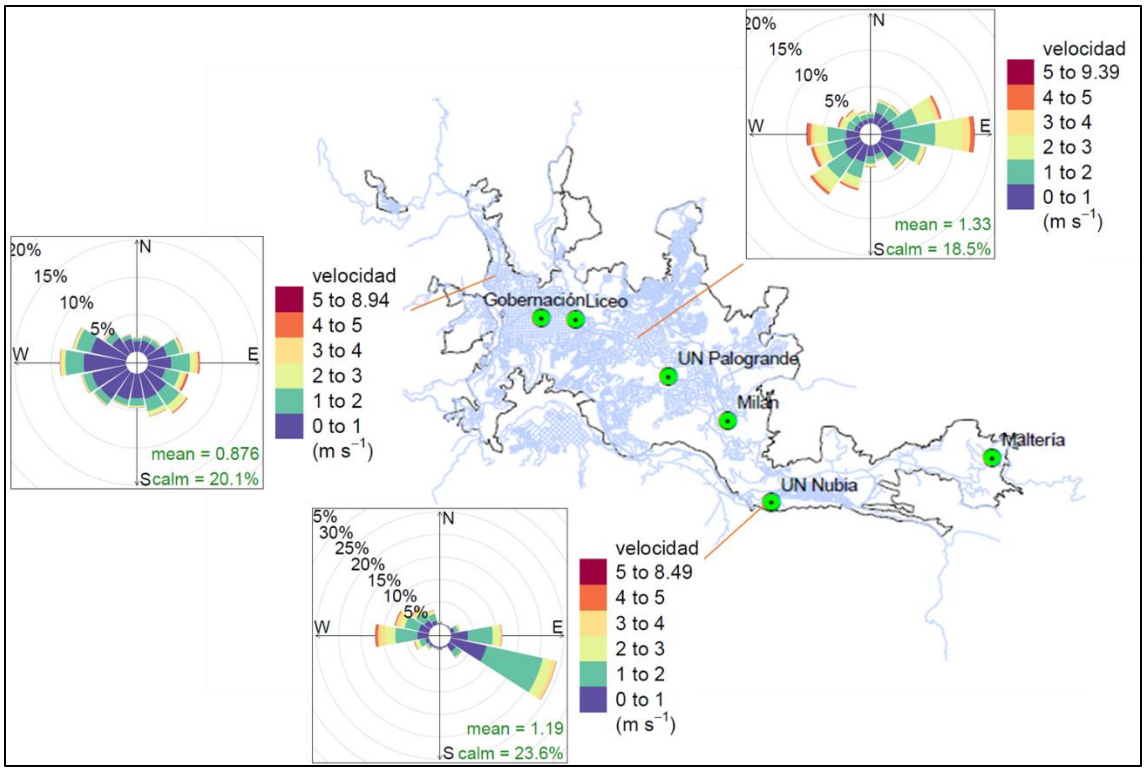


Figura 1. Mapa de Manizales con ubicación de las estaciones de calidad del aire y rosas de viento de estaciones meteorológicas representativas para el año 2017.

Los resultados muestran como la estación Liceo registró los valores más altos de PM_{10}, con un promedio aritmético de 34 µg/m^3 seguida por la estación Milán con un promedio aritmético para el periodo analizado de 30 µg/m^3. Estas estaciones son las que presentan la mayor variabilidad, como lo muestran sus desviaciones estándar de 9.3 µg/m^3 (Liceo) y 8.5 µg/m^3 (Milán). Mayores niveles de contaminación en la estación del Liceo pueden estar influenciados por el tráfico vehicular característico de esta zona. De otra parte, en Milán la influencia de la actividad industrial y el tráfico vehicular presentado en este sector, sugiere también su incidencia en los niveles de PM_{10} obtenidos. Con respecto a las estaciones Gobernación, Nubia y Palogrande, se observó que en general estas estaciones registraron las menores concentraciones de PM_{10} durante el periodo evaluado, con promedios de 26 µg/m^3, 23 µg/m^3, 21 µg/m^3 respectivamente.

La información de la Tabla 2 se complementa con las Figuras 2 y 3. En la Figura 2 se muestran los diagramas de cajas generados para cada una de las estaciones durante el año 2017. Este diagrama muestra los percentiles 25, 50 y 75 en el interior de las cajas y los límites mínimo y máximo del conjunto de datos por fuera de las cajas. Se observa la diferencia entre las mayores concentraciones obtenidas en Liceo y Milán con respecto a aquellas obtenidas en las estaciones Palogrande, Nubia y Gobernación.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos mensuales para estaciones de PM_{10} y PST.

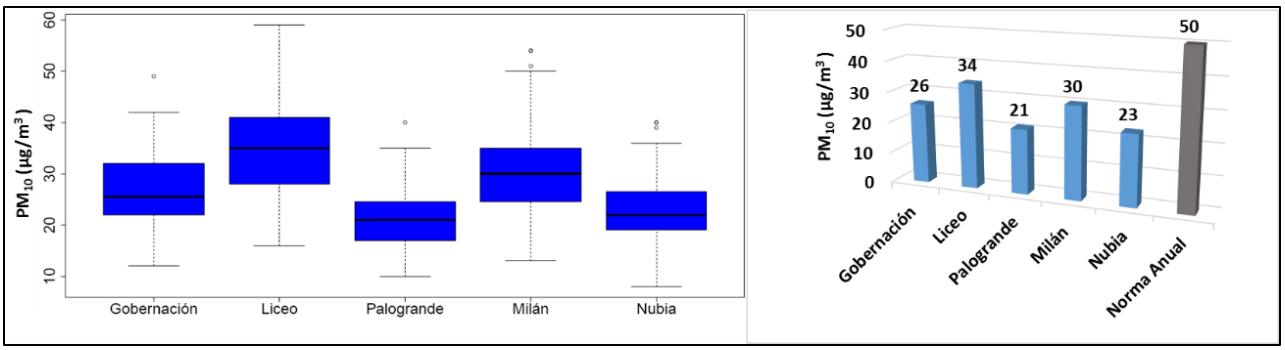
Estadístico	Mes												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
	Gobernación PM_{10} (µg/m³ estándar)												
Promedio[a]	--	--	22	22	21	26	31	28	24	32	29	26	26
Desviación Estándar	--	--	3.3	5.7	4.4	5.7	4.7	7.2	3.9	2.4	11.3	10.8	7.3
Min. – Max.	--	--	17 - 26	13 - 30	16 - 29	19 - 36	22 - 36	17 - 38	17 - 30	29 - 36	14 - 49	12 - 41	12 – 49
Percentil 95%	--	--	25	28	25	35	36	38	29	36	46.2	39.4	37
% Datos válidos	NM	NM	60%	60%	90%	100%	82%	90%	100%	90 %	90 %	90%	72%
	Liceo PM_{10} (µg/m³ estándar)												
Promedio[a]	30	40	40	37	31	29	34	33	36	34	35	33	34
Desviación Estándar	9.4	7.9	13.2	8.2	9.7	10.1	6.6	9.8	8.3	10.2	9.9	7.7	9.3
Min. – Max.	23 - 44	26 - 53	23 - 59	19 - 37	18 - 47	18 - 41	24 - 44	20 - 45	22 - 45	16 – 46	18 - 50	17 - 46	16 – 59
Percentil 95%	41.6	51	57.5	37	35	40	42.8	45	44	45	47	43.3	47.2
% Datos válidos	40%	90%	70%	50%	80%	50%	82%	100%	100%	100%	100%	100%	80%
	Palogrande PM_{10} (µg/m³ estándar)												
Promedio[a]	--	29	16	26	20	23	20	20	21	20	21	19	21
Desviación Estándar	--	9.1	3.8	8.9	3.7	6.9	4.6	6.8	3.2	6.3	3.8	7.0	6.3
Min. – Max.	--	16 - 40	11 - 21	11 - 35	13 - 25	13 - 33	16 - 30	13 - 32	15 - 26	11 – 30	17 - 27	10 - 28	10 – 40
Percentil 95%	--	38.4	20.4	35	22	32	27	30	27	27.8	26	27	32
% Datos válidos	NM	50%	40%	80%	90%	64%	100%	100%	100%	100%	60%	100%	73%
	Milán PM_{10} (µg/m³ estándar)												
Promedio[a]	31	39	34	--	30	30	34	35	32	27	25	22	30
Desviación Estándar	12.5	10.2	16	--	7.6	5.6	7.3	3.9	6.9	6.2	4.6	5.6	8.5
Min. – Max.	21 - 45	26 - 54	13 - 54	--	19 - 45	23 - 39	24 - 50	28 - 39	21 - 40	16 – 39	16 - 31	16 - 34	13 - 54
Percentil 95%	43.2	52.8	51.4	--	34	38	46	39	40	35.8	30.5	31.3	45
% Datos válidos	30%	90%	50%	0%	100%	100%	100%	78%	100%	100%	100%	100%	80%

Estadístico	Mes												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
	Nubia PM_{10} (µg/m³ estándar)												
Promedio[a]	--	*22*	*17*	*19*	*19*	*24*	*21*	*22*	*25*	*26*	*21*	*20*	*23*
Desviación Estándar	--	*8*	*5.7*	*9.2*	*6.6*	*5.8*	*3.6*	*7.3*	*4.9*	*6.2*	*5.6*	*7.6*	*6.5*
Min. – Max.	--	*10 - 29*	*13 - 21*	*19 – 40*	*8 - 27*	*17 - 32*	*18 - 30*	*14 - 40*	*19 - 31*	*15 - 36*	*11 - 27*	*8 - 28*	*8 – 40*
Percentil 95%	--	*29*	*20.6*	*40*	*23*	*31*	*27*	*34*	*31*	*34*	*26.5*	*27.6*	*31*
% Datos válidos	*NM*	*50%*	*50%*	*80%*	*80%*	*90%*	*100%*	*100%*	*100%*	*100%*	*100%*	*90%*	*76%*
	Maltería PST (µg/m³ estándar)												
Promedio[b]	--	*74*	*71*	*70*	*60*	*70*	*70*	*78*	*76*	*81*	*63*	*58*	*69*
Desviación Estándar	--	*11*	*20.5*	*20.7*	*13.2*	*9.2*	*13.6*	*24*	*13.8*	*9.1*	*23.6*	*15.2*	*17.1*
Min. – Max.	--	*57 - 85*	*46 - 02*	*47 - 106*	*42 - 78*	*55 - 88*	*56 - 101*	*57 - 133*	*59 - 108*	*70 – 100*	*46 - 126*	*39 - 85*	*39 - 133*
Percentil 95%	--	*84.2*	*98.4*	*99*	*76*	*83*	*96*	*120*	*99*	*95.2*	*107.5*	*80.9*	*101*
% Datos válidos	*NM*	*60%*	*70%*	*70%*	*100%*	*100%*	*100%*	*89%*	*100%*	*90%*	*100%*	*100%*	*82%*
	Liceo PST (µg/m³ estándar)												
Promedio[b]	--	--	--	--	--	--	*49*	*47*	*55*	*48*	*41*	*39*	*47*
Desviación Estándar	--	--	--	--	--	--	*10.4*	*11.4*	*10.5*	*19.2*	*16.2*	*13.8*	*14.3*
Min. – Max.	--	--	--	--	--	--	*33 - 66*	*35 - 63*	*37 - 69*	*22 - 75*	*29 - 72*	*26 - 66*	*22 - 75*
Percentil 95%	--	--	--	--	--	--	*64*	*62*	*69*	*71.8*	*69.3*	*60*	*68*
% Datos válidos	*NM*	*NM*	*NM*	*NM*	*NM*	*NM*	*82%*	*100%*	*90%*	*100%*	*100%*	*60%*	*45%*

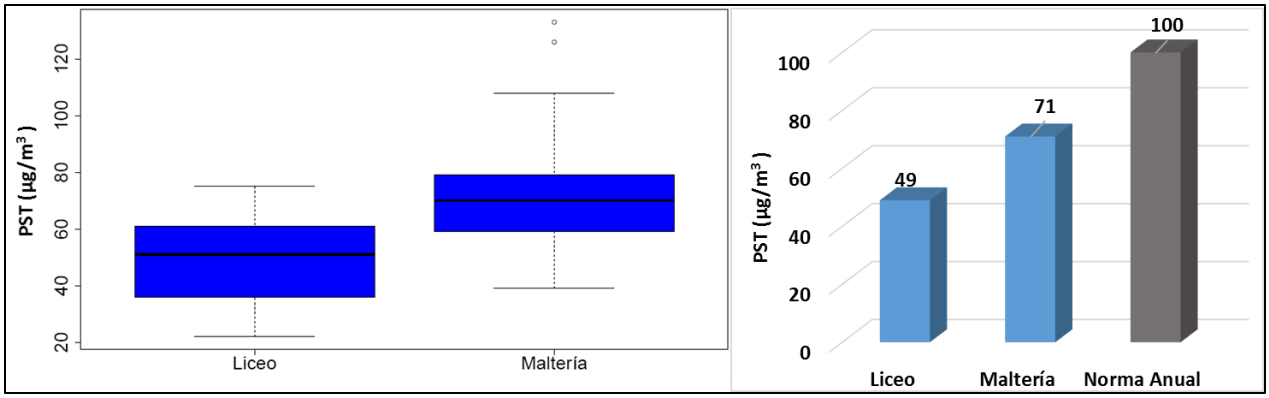
[a]Para PM_{10} se calcula el promedio aritmético
[b]Para PST se calcula el promedio geométrico
NM: No monitoreó el equipo durante ese periodo.

Con el fin de comparar el límite máximo permisible anual definido en la Resolución 2254 de 2017, se muestran en la Figura 2 (derecha) gráficos de barras donde se comparan los promedios totales obtenidos durante el periodo evaluado con el límite anual colombiano. En ninguna de las estaciones se ha superado la norma anual establecida en 50 µg/m^3 para PM_{10} El contaminante PST se compara con la Resolución 610 de 2010 (100 µg/m^3 para PST), ya que en la nueva normativa no se incluye dicho contamínate. Asimismo, los límites máximos diarios no fueron superados en ninguna de las estaciones, como se observa en la Figura 3, que presenta la evolución de las concentraciones diarias obtenidas durante año 2017, comparados con el límite máximo permisible diario definido en la Resolución 2254 de 2017 para PM_{10} (100 µg/m^3). Este mismo comportamiento se obtuvo en la estación Maltería para concentración de PST. Esta zona se caracteriza por un flujo constante de vehículos pesados y la concentración de gran parte de la actividad industrial de la ciudad; sin embargo, en esta zona los niveles promedio geométrico de PST estuvieron por debajo del límite máximo diario de 300 µg/m^3.

Con el fin de identificar tendencias en la concentración del contaminante, se presenta en la Figura 4 los promedios de concentración por días de la semana. En toda las estaciones de monitoreo de PM_{10} y PST se evidencia un descenso en la concentración de PM_{10} los fines de semana, siendo el domingo el día de menor concentración. También se observa que en las estaciones Nubia y Malteria se presenta un descenso en la concentración de PM menos pronunciado, lo que ratifica la influencia del tráfico vehicular en dichos niveles.



(a)



(b)

Figura 2. Diagrama de cajas y concentración promedio del año 2017, comparado con norma anual en las estaciones de monitoreo. a) Concentraciones promedio aritmético PM_{10}. b) Concentraciones promedio geométrico PST.

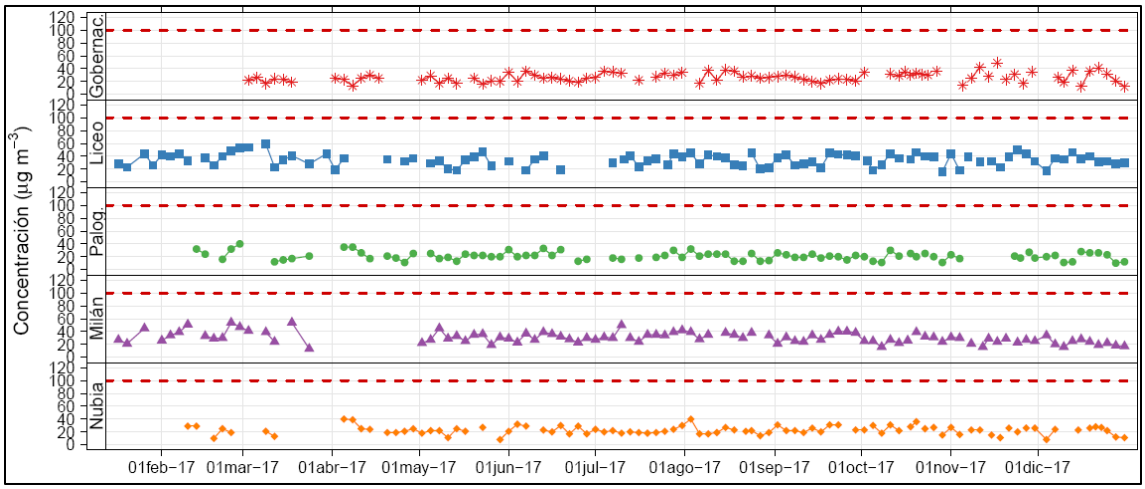


Figura 3. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{10} durante el año 2017. El límite máximo permisible diario (100 µg/m³) según la Resolución 2254 de 2017 se muestra en la línea punteada roja.

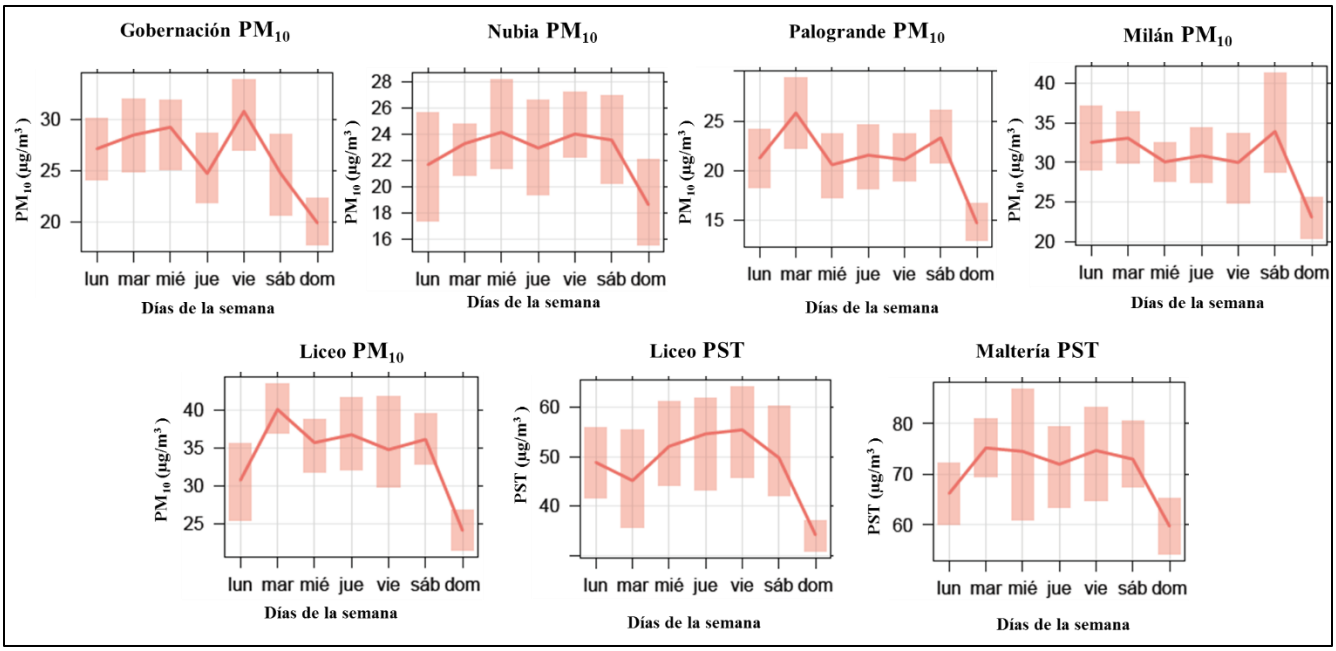


Figura 4. Promedios de concentraciones de PM_{10} por día de la semana durante el año 2017. Las barras indican el intervalo de datos (min.-max.) y la línea la evolución de la concentración media.

4. Índice de Calidad del Aire ICA para PM_{10} en Manizales

La Figura 5 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM_{10}. 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. Se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en la mayoría de las estaciones, sólo en Liceo se presentó 1 día con calidad de aire moderada durante el mes de marzo. El ICA se calcula siguiendo la metodología propuesta en el Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).

	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
Rango PM_{10} ($\mu g/m^3$)	0 - 54	55 - 154	155 - 254	255 - 354	355 - 424	425 - 504

Estación Liceo PM_{10}

Estación Palogrande PM_{10}

Estación Gobernación PM_{10}

Estación Milán PM_{10}

Estación Nubia PM_{10}

Figura 5. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{10} durante el año 2017.

5. Resultados de estadísticos descriptivos y distribución temporal del Ozono durante el mes de diciembre del año 2017

El monitoreo activo de los gases contaminantes del aire SO_2, O_3 y CO, se realiza en Manizales en la estación Gobernación. Para el mes de diciembre de 2017 se incorporan los datos de ozono troposférico para el análisis. Los demás equipos se encuentran en proceso de reparación y mantenimiento. La Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece el nivel máximo permisible para el gas Ozono (O_3) en 100 ($\mu g/m^3$), para un periodo de exposición de 8 horas. La Figura 6 muestra la variación del promedio móvil de 8 horas de la concentración de O_3 durante el mes de diciembre de 2017, comparado con nivel máximo permisible de la normativa colombiana. Se destaca que no se supera el límite máximo permisible en ningún registro.

Se observa que los datos presentan un perfil diurno coherente para este tipo de contaminante, con mayores concentraciones en horas de alta radiación solar y un descenso en horas de la noche. La variación promedio diaria presentada en la Figura 7 muestra que los picos máximos en las concentraciones del contaminante, con valores entre 40 $\mu g/m^3$ y 54 $\mu g/m^3$, ocurren al mediodía, hora

en la que se presentan los mayores niveles de radiación, el comportamiento se repite para todos los días de la semana.

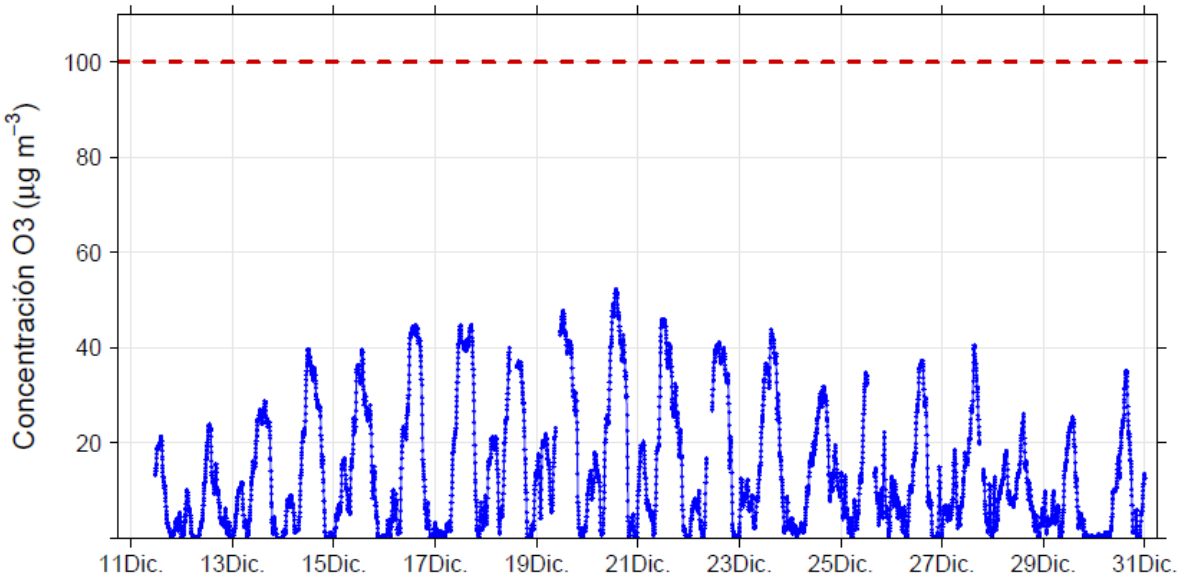


Figura 6. Variación de las concentraciones de ozono troposférico (O3) en la estación Gobernación, comparación con nivel máximo permisible de la Resolución 2254 de 2017. Promedio 8 horas O_3-azul y Norma 8 horas. Res. 2254-rojo.

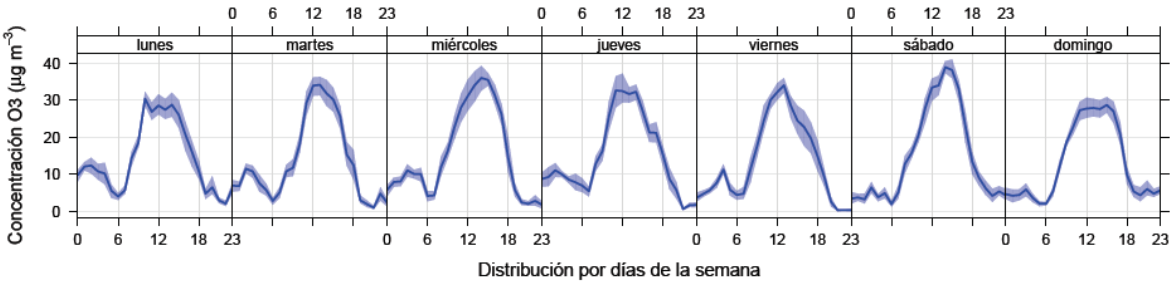


Figura 7. Variación horaria promedio diaria de ozono troposférico (O_3) en la estación Gobernación durante diciembre de 2017.

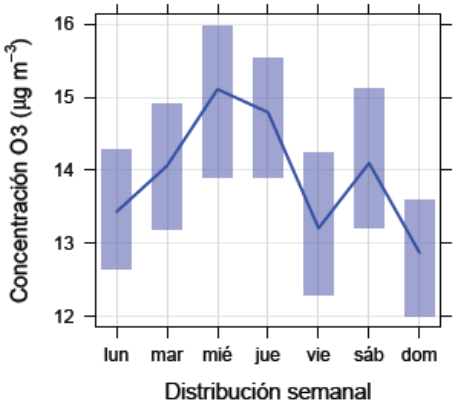


Figura 8. Variación promedio semanal de ozono troposférico (O_3) en la estación Gobernación durante diciembre de 2017.

Por otra parte, de la Figura 8 se destaca que los días de la semana que presentan menores picos de concentración son los domingos, además de concentraciones bajas a inicio de semana (lunes). Este comportamiento está asociado a un descenso de la actividad vehicular los fines de semana. También es de gran influencia la intensidad de la radiación solar en diferentes días, ya que el ozono se forma por reacciones fotoquímicas teniendo como principales precursores los óxidos de nitrógeno (provenientes principalmente de la combustión vehicular) y compuestos orgánicos volátiles (emitidos por la vegetación y emisiones evaporativas de combustibles como la gasolina principalmente).

6. Conclusiones

- Los mayores niveles de concentración de PM_{10} se obtuvieron en zonas con alta influencia de tráfico vehicular, como es el caso del sector Fundadores con la estación Liceo con la mayor concentración promedio de 34 µg/m^3 (desv.std. 9.3) > Milán 30 µg/m^3 (desv.std. 8.5) > Gobernación 26 µg/m^3 (desv.std. 7.3) > Nubia 23 µg/m^3 (desv.std. 6.5) >Palogrande 21 µg/m^3 (desv.std. 6.3). La contaminación se asocia principalmente a la influencia de emisiones por fuentes vehiculares, y en menor medida las emisiones industriales en la zona de Milán.

- En ninguna de las estaciones de monitoreo de PM_{10} se superaron los límites normativos para concentración diaria y anual colombiana establecida en la resolución 2254 de 2017. Sin embargo, todas las estaciones de monitoreo superan el valor promedio anual de 20 µg/m^3 para PM_{10} recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS). En las estaciones Liceo y Milán se superó en algunos días de los meses de febrero y marzo el valor recomendado por la OMS para promedio diario de PM_{10} (50 µg/m^3); con valores de 53 µg/m^3 (28/02/2017), 54 µg/m^3 (01/03/2017) y 59 µg/m^3 (09/03/2017) para Liceo y 51 µg/m^3 (10/02/2017) y 54 µg/m^3 (18/03/2017) para Milán. Sólo el registro del 9 de marzo en la estación Liceo tiene clasificación de calidad del aire moderada según el ICA, el resto de registro de todas las estaciones se clasifican con calidad del aire buena.

- Las concentraciones de ozono troposférico en la estación Gobernación se encuentran entre 0 µg/m^3 y 57 µg/m^3, lo que la ubica dentro de los límites permitidos por la normatividad vigente, se identifica la influencia directa de la radiación en el perfil diario de generación de dicho contaminante.