

# SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



## BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES AÑO 2022



*Cabina de gases ( $O_3$ ,  $SO_2$  y  $CO$ ) de la estación Gobernación*

**\*Angel David Gálvez Serna, \*Erika Marcela Trejos Zapata,  
\*Carlos Mario González Duque, \*\*Mauricio Velasco García**

# TABLA DE CONTENIDO

1.	EL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE (SVCA) DE MANIZALES.....	2
2.	ANÁLISIS METEOROLÓGICO .....	5
3.	RESULTADOS DE MONITOREO PARA PM <sub>10</sub> Y PM <sub>2.5</sub> .....	10
3.1.	<i>Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales.....</i>	10
3.2.	<i>Equipos manuales: Comparación preliminar con la norma anual.....</i>	15
3.3.	<i>Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales.....</i>	16
3.4.	<i>Índice de calidad del aire (ICA) para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el SVCA de Manizales .....</i>	20
4.	RESULTADOS DE MONITOREO PARA GASES .....	25
4.1.	<i>Monitoreo de monóxido de carbono (CO).....</i>	25
4.2.	<i>Monitoreo de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).....</i>	27
4.3.	<i>Monitoreo de ozono troposférico (O<sub>3</sub>).....</i>	29
4.4.	<i>Índices de calidad del aire (ICA) para O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> y CO en el SVCA de Manizales.....</i>	33
5.	ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS .....	34
5.1.	<i>Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz.....</i>	34
5.2.	<i>Resultados de monitoreo de material particulado para los días sin carro y motocicleta del 2022</i>	35
5.2.1.	<i>Material particulado - Equipos manuales .....</i>	36
5.2.2.	<i>Material particulado - Equipos automáticos.....</i>	37
6.	REFERENCIAS.....	40

## 1. EL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE (SVCA) DE MANIZALES

En la actualidad, la contaminación atmosférica corresponde al cuarto factor de riesgo para la salud humana, después de fumar, la hipertensión y la diabetes (Our World in data, 2020). Durante la última década, 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 urbanas se destacan el material particulado (PM, por sus siglas en inglés), el cual puede ser clasificado de acuerdo con el diámetro de las partículas. Las fracciones más comunes monitoreadas en sistemas de vigilancia son: Partículas suspendidas totales (PST), partículas con diámetro menor o igual a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ) y partículas con diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros ( $PM_{2.5}$ ); conocidas también como fracción fina respirable. Además, contaminantes gaseosos como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y ozono troposférico ( $O_3$ ) generan impactos negativos sobre el recurso aire en ecosistemas naturales y centros urbanos (OMS, 2018).

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, es un insumo para establecer medidas de prevención donde la calidad del aire pueda generar posibles riesgos para la salud. Los datos obtenidos por el SVCA de Manizales alimentan las bases de datos del CDIAC (Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas) y el subsistema de Información sobre la Calidad del Aire –(SISAIRE) del IDEAM. El CDIAC, por medio de la página web <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/indicadores/public/searchAirMenu>, 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.

Para el 2022 en la ciudad de Manizales se cuenta con un SVCA conformado por nueve (9) equipos para el monitoreo de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ : Seis (6) equipos manuales de  $PM_{10}$ , un (1) equipo manual de  $PM_{2.5}$  y dos (2) equipos automáticos (nefelómetros) que miden simultáneamente  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Además, el SVCA de Manizales cuenta con una (1) estación automática para el monitoreo de los gases ozono troposférico ( $O_3$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y monóxido de carbono (CO).

El seguimiento de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se realiza mediante técnicas de monitoreo activas; en el caso de los equipos manuales se obtienen registros promedio diario de la concentración en aire ambiente de dichos contaminantes (muestras de 24 horas cada tres días). Por otra parte, tanto los equipos automáticos de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , como el seguimiento de gases ( $O_3$ ,  $SO_2$  y CO) permiten la obtención de registros cincominutales, a partir de los cuales se obtienen valores 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: *Resolución 2254 de 2017* (MADS, 2017).

Actualmente el SVCA de Manizales es operado 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 Tabla 1 presenta las características

principales de cada estación perteneciente al SVCA de Manizales y la Figura 1 muestra la ubicación espacial de las estaciones de monitoreo sobre el área urbana de la ciudad.

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

Estación (Abreviatura)	Características y fuentes de contaminantes*	Equipos	Propietario	Año de inicio operación óptima	Estado actual y operación durante 2022	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación (Gov)	CU, SC – MTV, MAI	PM <sub>10</sub> – Manual <sup>a</sup>	Corpocaldas	2009	Operación óptima.	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2155
		PM <sub>2.5</sub> - Manual <sup>a</sup>	Corpocaldas	2009	Operación óptima.		
		SO <sub>2</sub> - Automático	UN	2019	Operación óptima. Presentó fallas entre: 13/05/2022 al 01/08/2022, 16/08/2022 al 22/08/2022.		
		O <sub>3</sub> - Automático	UN	2018	Operación óptima. Presentó fallas entre: 30/06/2022 al 04/07/2022, 09/07/2022 al 13/07/2022, 16/08/2022 al 20/09/2022.		
		CO - Automático	Corpocaldas	2018	Operación óptima. Presentó fallas entre: 17/08/2022 al 17/10/2022		
		PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> - Automático <sup>b</sup>	Corpocaldas	2019	Operación óptima.		
Palogrande (Pal)	ZC, SR – MTV, SAI	PM <sub>10</sub> - Manual <sup>c</sup>	UN	2009	Operación óptima.	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
Nubia (Nub)	ZSE, SR – MTV, MAI	PM <sub>10</sub> - Manual <sup>c</sup>	UN	2017	Operación óptima.	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo (Lic)	CU, SC – ATV, PAI	PM <sub>10</sub> - Manual <sup>c</sup>	Corpocaldas	2010	Operación óptima.	N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58"	2156
		PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> - Automático <sup>b</sup>	Corpocaldas	2019	Operación óptima.		
Milán (Mil)	ZC, SR – MTV, AAI	PM <sub>10</sub> - Manual <sup>c</sup>	Corpocaldas	2012	Operación óptima.	N 5° 2' 48.5" W 75° 28' 48.68"	2188
Católica (UCM)	CU, SC – ATV, SAI	PM <sub>10</sub> - Manual <sup>c</sup>	Corpocaldas - UCM	2021 (mayo)	Operación óptima.	N 5° 3'34.13" W 75°29'13.63"	2091

**a** - Equipo de bajo volumen (Low-Vol)

**b** - Equipo automático – nefelómetro (técnica fotométrica)

**c** - Equipo de alto volumen (Hi-Vol).

\*Características:

**SR:** Sector residencial

**CU:** Centro urbano

\*Fuentes de contaminación:

**ATV:** Alto tráfico vehicular

**AAI:** Alta actividad industrial

**AZI:** Adyacente a zona industrial

**SC:** Sector comercial

**ZC:** Zona central

**MTV:** Moderado tráfico vehicular

**MAI:** Moderada actividad industrial

**SAI:** Sin actividad industrial.

**ZSE:** Zona sureste

**ZI:** Zona industrial

**BTV:** Bajo tráfico vehicular

**PAI:** Pequeña actividad industrial

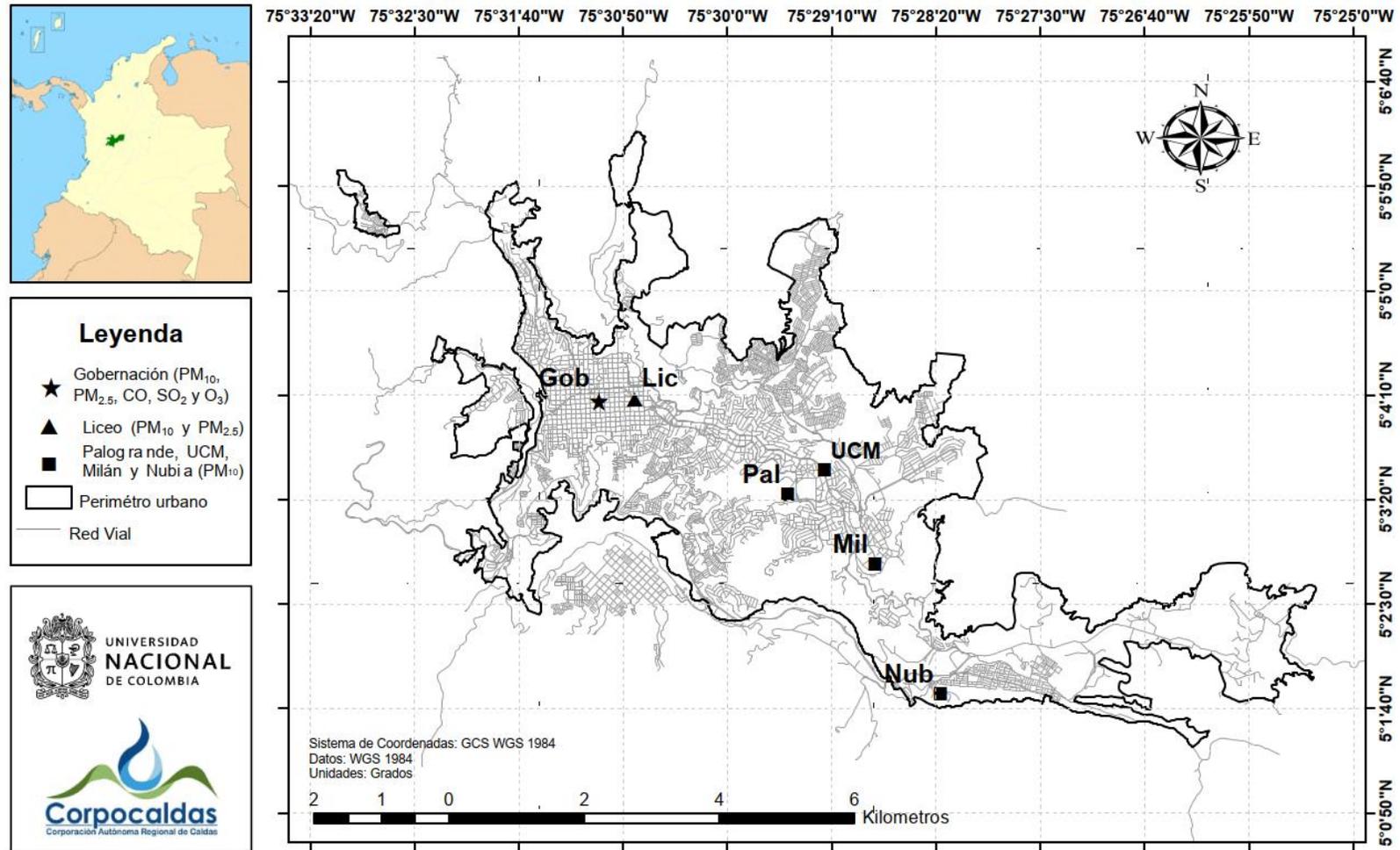


Figura 1. Mapa con ubicación de las estaciones de calidad del aire pertenecientes al SVCA de Manizales para el período de análisis

## 2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

Las condiciones climáticas juegan un papel importante en la dinámica de los contaminantes en el aire. Por ejemplo, contaminantes secundarios como el ozono troposférico ( $O_3$ ), dependen de las reacciones en presencia de radiación solar para formarse en el aire, a partir de contaminantes primarios (COV y  $NO_x$ ) emitidos directamente por fuentes antropogénicas y naturales. Por su parte, el aumento de la humedad relativa se asocia al aumento en la humedad de las partículas, por lo tanto, el aumento de su peso, lo cual influye en la velocidad de caída de las partículas suspendidas y en la disminución de fenómenos de resuspensión de partículas (Loosmore y Cederwall, 2004).

La precipitación propicia fenómenos de lavado atmosférico, arrastrando hacia el suelo el material particulado del aire, en un fenómeno que se conoce como *scavenging* (Akyüz y Cabuk, 2009). Finalmente, la velocidad del viento influye en la concentración de contaminantes de forma inversa, puesto que a mayor velocidad del viento la dispersión de los contaminantes en dirección horizontal será mayor y su concentración en la atmósfera en cercanías de la fuente disminuirá.

La Tabla 2 presenta los consolidados mensuales de las variables meteorológicas en las estaciones más próximas a las estaciones de calidad del aire durante el año 2022. Las estaciones meteorológicas corresponden a Hospital de Caldas, Liceo, Posgrados, Milán planta Niza y La Nubia. Con la información obtenida en estas estaciones, se estiman las concentraciones a condiciones estándar ( $25^{\circ}C$  y 1 atm) obtenidas por los equipos del SVCA de Manizales. De manera alternativa la Figura 2 y la Figura 3 presentan el comportamiento promedio mensual de algunas variables meteorológicas de las estaciones mencionadas. Se aprecia que el comportamiento de las variables a lo largo de la ciudad es estable.

Durante el período de análisis, se destaca que el año 2022 se caracterizó por presentar altas precipitaciones comparado con el año 2021 debido a la influencia del fenómeno de La Niña. La estación Hospital de Caldas ubicada en centro geográfico de la ciudad registró una precipitación anual de 1912 mm en el año 2022, mientras que en el año 2021 se registró 1650 mm. Al comparar los valores de las estaciones en el año 2022 se observa que Liceo obtuvo el mayor registro con 324 mm durante el mes de octubre, por su parte La Nubia registró el menor valor con 74.2 mm de lluvia durante mayo.

Para el caso de la temperatura ambiente, se observa un comportamiento homogéneo en la ciudad obteniéndose registros entre  $15.5$  y  $17.7^{\circ}C$ ; donde los meses de junio y mayo tuvieron la menor y mayor temperatura promedio respectivamente. Para la radiación solar se identifica un comportamiento inverso a la precipitación con promedios mensuales de hasta  $296.2 W/m^2$  en La Nubia durante enero. Por su parte la humedad relativa se relacionó de forma directa con las precipitaciones y de manera inversa con la temperatura y radiación solar, obteniéndose la mayor humedad relativa promedio mensual durante junio con un valor de 92.5 % en la estación Hospital de Caldas.

Se destaca además que la ciudad cuenta con patrones de viento estables, identificados por el fenómeno de valle-montaña y montaña-valle, con velocidades de viento bajas que limitan la dispersión horizontal de los contaminantes. La Figura 4 presenta las rosas de viento promedio diarias observadas a lo largo de la ciudad para el período de análisis.

**Tabla 2. Estadísticos promedio mensuales para las variables meteorológicas de estaciones próximas a las estaciones de calidad del aire durante el período de análisis**

Mes	Temperatura del Aire [°C]	Velocidad de Viento [m/s]	Dirección Viento [°]	Presión Atmosférica [mm Hg]	Humedad Relativa [%]	Precipitación Acumulada [mm]	Radiación Solar* [W/m <sup>2</sup> ]	Max. Rad. solar [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Hospital de Caldas</b>								
Enero	17.3	1.8	216.3	595.3	87.9	141.0	260.5	1210
Febrero	17.1	1.9	239.1	595.1	88.1	97.8	257.0	1230
Marzo	17.1	1.7	185.9	595.3	90.0	262.6	236.2	1320
Abril	17.4	1.8	125.1	595.1	90.5	175.6	238.3	998
Mayo	17.6	1.7	214.9	595.7	90.5	110.4	214.3	997
Junio	16.4	1.9	119.9	596.5	92.5	184.4	189.3	986
Julio	17.4	1.7	129.4	595.6	90.4	140.8	219.8	997
Agosto	17.3	1.8	144.9	595.6	89.1	132.8	223.7	998
Septiembre	17.1	1.7	197.1	595.8	89.5	119.4	227.3	997
Octubre	16.4	1.6	--	596.0	90.1	246.2	240.8	998
Noviembre	16.2	1.5	--	596.0	89.9	144.8	250.7	998
Diciembre	16.4	1.5	--	595.3	88.2	156.2	270.5	998
<b>Liceo</b>								
Enero	16.6	1.3	289.9	589.5	76.9	215.6	255.2	1120
Febrero	16.5	1.4	311.0	589.3	74.5	105.2	248.6	1140
Marzo	16.4	1.4	228.6	589.4	78.7	306.6	237.3	1240
Abril	16.6	1.4	214.5	589.2	80.8	177.2	240.6	997
Mayo	16.9	1.3	190.1	589.9	79.2	93.4	219.7	998
Junio	15.5	1.1	192.2	590.6	82.7	174.0	202.7	998
Julio	16.7	1.2	201.0	590.4	78.4	135.0	222.8	998
Agosto	16.6	1.2	354.0	590.4	76.3	153.6	229.7	998
Septiembre	16.4	1.3	190.0	590.6	78.7	152.4	238.6	998
Octubre	16.2	1.3	--	590.0	80.3	324.0	242.9	998
Noviembre	15.9	1.3	--	589.9	80.6	199.4	232.2	974
Diciembre	15.8	1.2	--	589.2	79.5	181.4	239.7	983
<b>Posgrados</b>								
Enero	16.5	1.1	332.2	594.4	84.3	105.2	265.9	1120
Febrero	16.4	1.2	339.1	594.1	84.4	93.8	245.6	1302
Marzo	16.4	1.1	338.0	594.3	86.5	226.4	244.1	1280
Abril	16.6	1.1	347.3	594.1	87.4	152.8	252.9	998
Mayo	16.9	1.0	342.6	594.7	87.1	91.0	227.4	998
Junio	15.6	1.1	354.3	595.5	89.5	167.2	198.1	993
Julio	16.7	1.1	40.7	595.2	86.8	120.6	244.8	997
Agosto	16.5	1.1	7.7	595.3	86.2	115.8	247.7	998
Septiembre	16.3	1.2	341.1	595.5	87.0	116.2	247.1	998
Octubre	16.2	1.2	--	594.8	88.6	213.4	250.0	998

Mes	Temperatura del Aire [°C]	Velocidad de Viento [m/s]	Dirección Viento [°]	Presión Atmosférica [mm Hg]	Humedad Relativa [%]	Precipitación Acumulada [mm]	Radiación Solar* [W/m <sup>2</sup> ]	Max. Rad. solar [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Noviembre</b>	16.0	1.2	--	594.8	89.0	163.4	246.9	995
<b>Diciembre</b>	16.1	1.2	--	594.0	87.3	146.0	274.6	998
<b>Milán planta Niza</b>								
<b>Enero</b>	17.5	1.2	314.9	584.1	76.3	124.4	257.6	1234
<b>Febrero</b>	17.3	1.2	320.9	583.8	75.9	189.6	248.0	1040
<b>Marzo</b>	17.2	1.2	301.4	584.2	75.1	298.4	233.7	1103
<b>Abril</b>	17.5	1.0	348.1	583.8	75.4	213.2	252.3	998
<b>Mayo</b>	17.6	1.0	277.3	584.7	74.5	112.8	233.2	995
<b>Junio</b>	16.2	0.9	82.7	585.4	73.2	200.0	202.8	997
<b>Julio</b>	17.5	1.0	344.7	585.1	73.1	133.4	239.1	998
<b>Agosto</b>	17.4	1.0	353.5	585.1	74.1	125.8	234.6	998
<b>Septiembre</b>	17.1	1.0	351.7	585.3	73.7	113.2	245.2	998
<b>Octubre</b>	16.9	0.8	--	584.6	73.7	266.4	238.5	998
<b>Noviembre</b>	16.7	0.8	--	584.6	73.7	214.4	245.7	997
<b>Diciembre</b>	17.1	0.9	--	583.7	75.5	160.8	266.9	998
<b>La Nubia</b>								
<b>Enero</b>	17.3	1.4	237.8	596.6	86.3	109.8	296.2	998
<b>Febrero</b>	17.1	1.4	199.3	596.3	86.4	105.0	284.3	991
<b>Marzo</b>	17.2	1.3	231.2	596.3	88.7	197.0	257.4	997
<b>Abril</b>	17.4	1.3	227.8	596.3	89.3	147.8	276.5	998
<b>Mayo</b>	17.7	1.3	207.9	596.8	88.4	74.2	258.1	986
<b>Junio</b>	16.6	1.2	254.2	597.6	91.4	133.0	217.3	991
<b>Julio</b>	17.6	1.2	98.3	597.3	88.3	101.6	252.4	993
<b>Agosto</b>	17.4	1.2	86.5	597.4	87.2	101.0	260.5	998
<b>Septiembre</b>	17.2	1.3	308.2	597.6	87.7	79.8	262.3	998
<b>Octubre</b>	17.0	1.3	--	596.9	89.9	179.6	266.9	998
<b>Noviembre</b>	16.9	2.6	--	596.6	91.1	202.8	259.4	998
<b>Diciembre</b>	16.8	2.8	--	596.3	89.5	189.0	286.9	998

\*-- Ausencia de datos

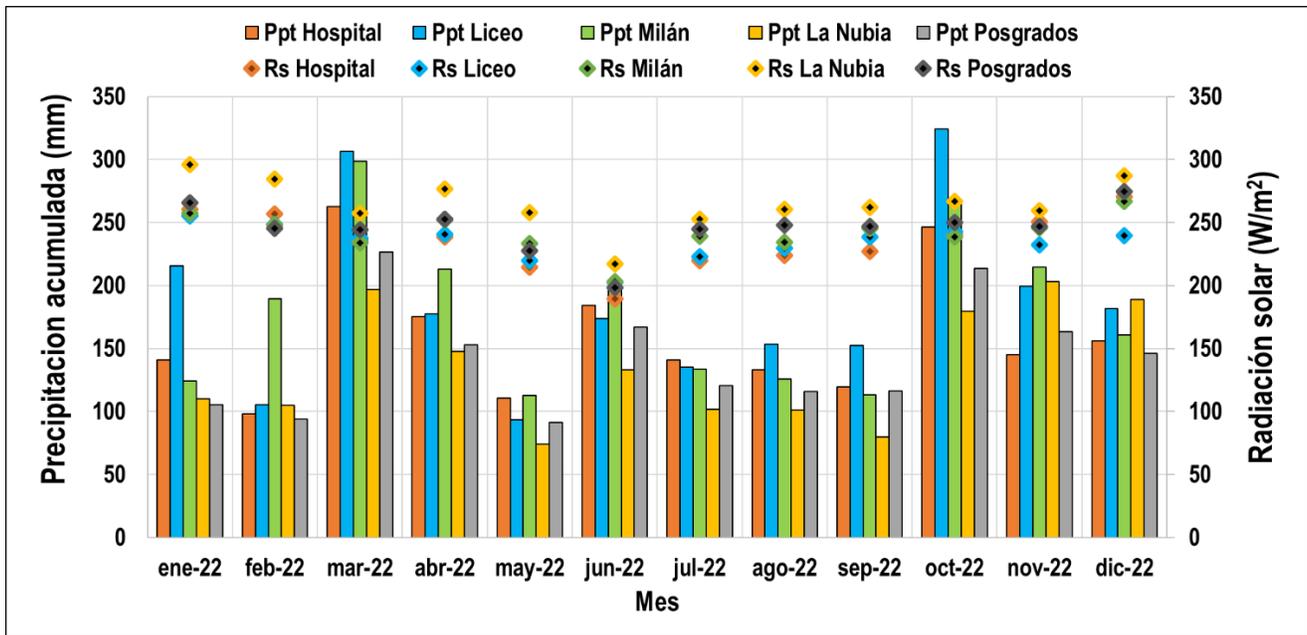


Figura 2. Promedios mensuales de precipitación acumulada (Ppt) y radiación solar (Rs) durante el período de análisis

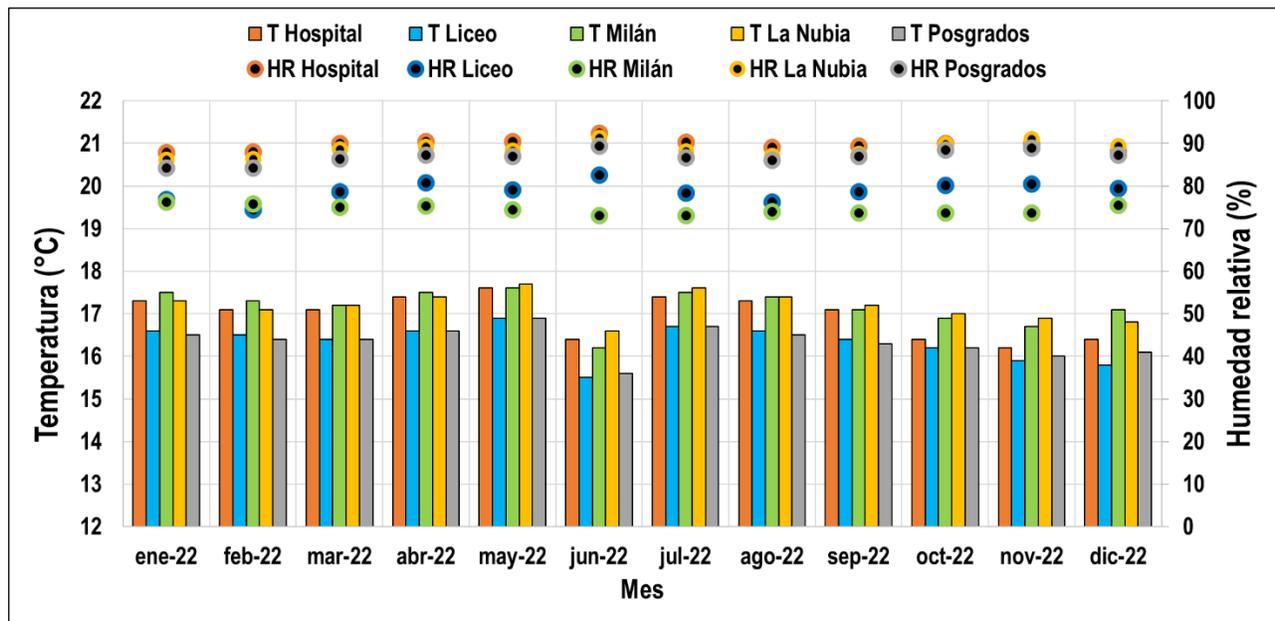


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire (T) y humedad relativa (HR) durante el período de análisis

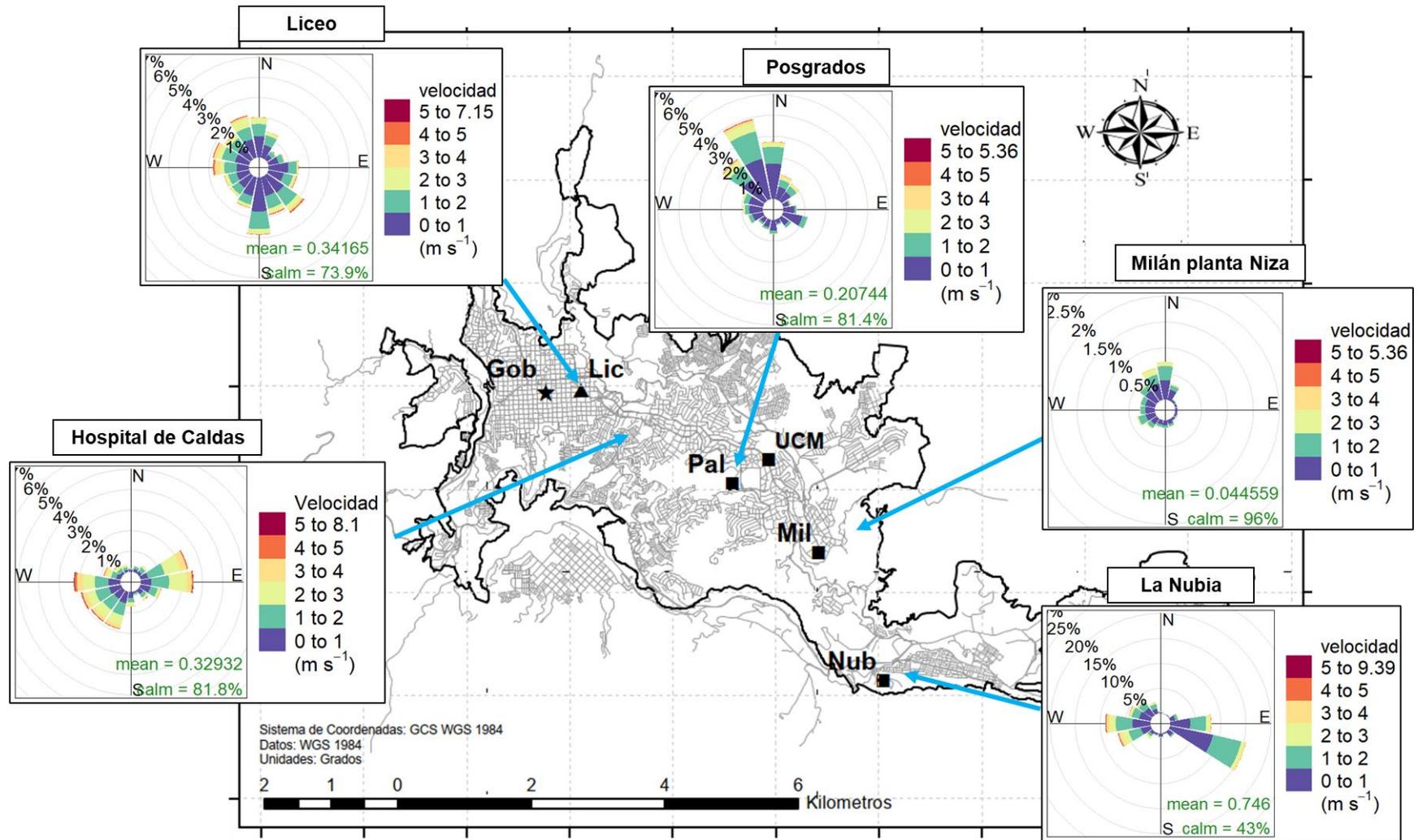


Figura 4. Rosas de viento en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el período de análisis

## 3. RESULTADOS DE MONITOREO PARA PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

### 3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales

La Tabla 3 presenta los estadísticos descriptivos mensuales para las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> – Manuales obtenidas durante el 2022 (enero – diciembre). Se muestra el promedio aritmético con su respectiva incertidumbre asociada, mediana, desviación estándar, concentración mínima, concentración máxima, el percentil 95, el número de datos obtenidos mensualmente y su porcentaje de datos válidos. Los cálculos y gráficos fueron realizados con el software R y su librería de análisis para datos de calidad del aire “Openair” (Carslaw y Ropkins, 2015).

Los resultados indican que, durante el año 2022, las estaciones de Milán y Liceo registraron las concentraciones promedio más altas de PM<sub>10</sub> en la ciudad con valores de  $30 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $27 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente; seguidos por Gobernación con  $22 \pm 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Católica y Palogrande con  $19 \pm 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $19 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente; por último, Nubia con  $17 \pm 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Se destaca que este patrón en los niveles de concentración se ha mantenido relativamente constante de acuerdo con los registros del SVCA en los años 2018 al 2021, los cuales registraron los valores más altos de PM<sub>10</sub> en Milán y Liceo con promedios mensuales por encima de  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y los menores registros fueron obtenidos en Nubia y Palogrande con promedios alrededor de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Cabe resaltar que el 90% de los meses monitoreados en las estaciones cumplieron con el porcentaje de datos válidos del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial establecido en 75%, perdiéndose pocas o ninguna muestra durante los meses del presente año, indicando la relevancia por número de datos en los resultados (MAVDT, 2010).

Se identificó que Milán presentó los mayores niveles de concentración de PM<sub>10</sub> con el mayor promedio aritmético mensual reportado en marzo de  $38 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (desv. std =  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), con un máximo diario de  $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el martes 29 de marzo, un registro atípico posiblemente influenciado por la contaminación regional ocasionada por las quemadas del nororiente del país. Se recalca además que esta estación es categorizada en el tipo de estación “Industrial” y con influencia de tráfico vehicular pesado. De otra parte, la estación Nubia presentó los menores niveles de concentración con su menor registro mensual de junio con un valor de  $13 \pm 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (desv. std =  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

De manera general, se ha identificado que las estaciones Milán, Liceo y en menor medida Gobernación y Católica, se encuentran influenciadas por tráfico vehicular (representado por un flujo importante de buses y camiones de carga principalmente en Liceo y Milán respectivamente). De acuerdo con la actualización del inventario de emisiones de la ciudad año base 2017 (IEA-2017), estas categorías poseen especial importancia ya que, a pesar de que su flota corresponde al 3.2% del total de vehículos de la ciudad, estos vehículos emplean diésel como combustible y son responsables del 56% (351.2 ton/año) y 24% (151.9 ton/año) del total de emisiones de PM<sub>10</sub> respectivamente (Unal - Corpocaldas, 2019a). De otra parte, las áreas de influencia de las estaciones Nubia y Palogrande se encuentran dominadas dinámicas de movilidad moderadas cuya influencia está predominantemente asociada con la presencialidad en los campus universitarios; asimismo, otros fenómenos que favorecen la reducción de las concentraciones pueden deberse al efecto de las zonas verdes en los alrededores de los campus.

**Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio mensuales de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> – Manuales (µg/m<sup>3</sup>) durante el período de análisis**

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
<b>Gobernación PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>													
Promedio	19	24	30	24	23	21	25	21	18	18	18	22	<b>22</b>
Mediana	20	23	31	22	25	22	24	20	19	18	18	24	<b>21</b>
Incertidumbre**	1.1	1.2	0.9	0.8	1.1	0.9	0.9	1.1	1.0	1.0	0.8	1.1	<b>1.0</b>
Desviación Estándar	4	6	5	9	11	3	6	5	7	3	3	5	<b>7</b>
Mínimo	12	17	16	11	9	18	17	11	10	14	13	14	<b>9</b>
Máximo	23	35	39	45	44	25	35	28	30	24	25	28	<b>45</b>
Percentil 95%	22	33	38	39	42	25	33	28	28	23	23	27	<b>35</b>
N° Datos - %DV***	9 – 80	9 – 100	10 – 100	10 – 100	11 – 100	10 – 100	9 – 90	11 – 100	10 – 100	11 – 100	10 – 100	10 – 100	<b>119 – 96</b>
<b>Liceo PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>													
Promedio	24	29	29	24	28	23	28	30	29	29	29	31	<b>27</b>
Mediana	25	27	32	22	28	23	28	29	30	30	31	35	<b>28</b>
Incertidumbre	0.9	0.9	1.0	0.9	0.8	1	1.1	0.8	0.9	1.2	1.0	0.8	<b>0.9</b>
Desviación Estándar	5	8	6	9	11	6	6	6	9	4	5	9	<b>7</b>
Mínimo	14	16	18	14	7	12	18	18	17	21	20	16	<b>7</b>
Máximo	30	41	38	44	46	33	37	43	46	34	36	43	<b>46</b>
Percentil 95%	30	40	37	39	44	31	35	39	42	33	35	43	<b>42</b>
N° Datos - %DV	10 – 90	9 – 100	7 – 70	9 – 90	9 – 90	10 – 100	10 – 100	11 – 100	10 – 100	10 – 90	9 – 90	10 – 100	<b>114 – 93</b>
<b>Palogrande PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>													
Promedio	18	18	22	18	19	16	19	20	20	20	16	20	<b>18</b>
Mediana	20	19	22	18	18	16	19	20	19	19	15	19	<b>19</b>
Incertidumbre	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1	0.9	1.1	0.8	0.8	1.2	0.9	<b>0.9</b>
Desviación Estándar	3	6	5	3	5	4	4	4	4	5	3	5	<b>4</b>
Mínimo	12	11	12	14	14	10	12	15	15	15	12	13	<b>10</b>
Máximo	21	27	29	22	30	20	23	26	26	33	21	31	<b>33</b>
Percentil 95%	21	26	28	22	25	20	22	47	26	29	21	30	<b>27</b>
N° Datos - %DV	11 – 100	9 – 100	10 – 100	9 – 90	10 – 100	8 – 80	9 – 90	9 – 80	10 – 100	9 – 81	9 – 90	10 – 100	<b>113 – 92</b>
<b>Milán PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>													
Promedio	32	35	38	30	28	23	30	34	32	27	27	33	<b>30</b>
Mediana	32	34	36	28	26	22	32	33	33	27	26	31	<b>30</b>
Incertidumbre	1.0	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	1.1	0.9	1.0	1.0	0.9	<b>0.9</b>
Desviación Estándar	3	5	6	6	7	6	6	8	7	5	5	10	<b>7</b>
Mínimo	25	27	24	22	20	15	19	25	21	20	21	22	<b>15</b>
Máximo	37	43	63	44	38	30	36	51	44	36	38	56	<b>63</b>
Percentil 95%	36	42	55	40	37	29	36	47	41	23	21	34	<b>25</b>
N° Datos - %DV	9 – 80	8 – 90	9 – 90	9 – 90	9 – 90	8 – 80	8 – 80	9 – 80	10 – 100	10 – 90	8 – 80	10 – 100	<b>107 – 87</b>

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
<b>Nubia PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>													
Promedio	17	18	21	18	17	13	18	16	18	18	17	21	17
Mediana	17	17	20	18	15	14	18	16	18	18	17	19	18
Incertidumbre	0.9	1.1	0.9	1.1	0.9	0.8	0.9	1.1	0.9	0.9	1.1	0.8	1.0
Desviación Estándar	3	4	4	2	4	2	7	3	2	2	3	7	4
Mínimo	12	12	13	14	12	9	10	12	16	15	14	13	9
Máximo	21	28	35	21	25	16	33	20	21	23	22	36	36
Percentil 95%	21	26	31	20	23	16	28	20	20	36	35	51	44
N° Datos - %DV	7 – 63	9 – 100	10 – 100	9 – 90	10 – 100	8 – 80	8 – 80	9 – 80	10 – 100	10 – 90	8 – 80	10 – 100	108 – 88
<b>Católica PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>													
Promedio	18	22	22	18	21	15	18	18	21	19	20	20	19
Mediana	20	22	23	18	17	15	18	19	20	20	20	20	20
Incertidumbre	0.9	0.9	1.0	0.9	1	1.1	0.9	1.1	0.8	1.2	1.0	1.0	1.0
Desviación Estándar	3	4	4	4	8	4	5	3	4	3	4	5	4
Mínimo	12	17	12	13	12	9	13	14	14	12	14	14	9
Máximo	23	29	29	27	38	21	24	22	28	23	28	31	38
Percentil 95%	22	28	27	25	34	20	24	21	27	22	27	28	28
N° Datos - %DV	11 – 100	9 – 100	10 – 100	9 – 90	10 – 100	8 – 80	9 – 90	9 – 80	10 – 100	9 – 81	9 – 90	10 – 100	113 – 92
<b>Gobernación PM<sub>2.5</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>													
Promedio	12	17	18	14	12	16	18	13	14	11	12	13	14
Mediana	13	15	17	15	11	17	20	13	13	11	12	14	14
Incertidumbre	1.1	1.0	1.2	1.2	1.1	1.1	0.8	0.9	1.1	0.8	1.2	0.9	1.0
Desviación Estándar	3	4	4	4	5	3	7	4	5	2	4	3	4
Mínimo	6	10	11	9	6	11	8	9	9	8	7	8	6
Máximo	17	25	25	19	21	20	31	22	22	15	19	16	31
Percentil 95%	16	23	24	19	21	20	28	19	21	14	17	16	22
N° Datos - %DV	11 – 100	9 – 100	10 – 100	10 – 100	11 – 100	10 – 100	10 – 100	10 – 90	10 – 100	11 – 100	10 – 100	10 – 100	122 – 99

\* 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

\*\*\* %DV = Porcentaje de datos validos

En lo referente al monitoreo de PM<sub>2.5</sub> en la estación Gobernación, se registró un valor promedio de 14 ± 1.0 µg/m<sup>3</sup> (desv. std = 4 µg/m<sup>3</sup>). Marzo y julio presentaron los mayores niveles de concentración, ambos con un promedio mensual de 18 µg/m<sup>3</sup>; mientras que octubre presentó el menor valor promedio mensual con 11 µg/m<sup>3</sup>, este último relacionado con altas precipitaciones en el mes.

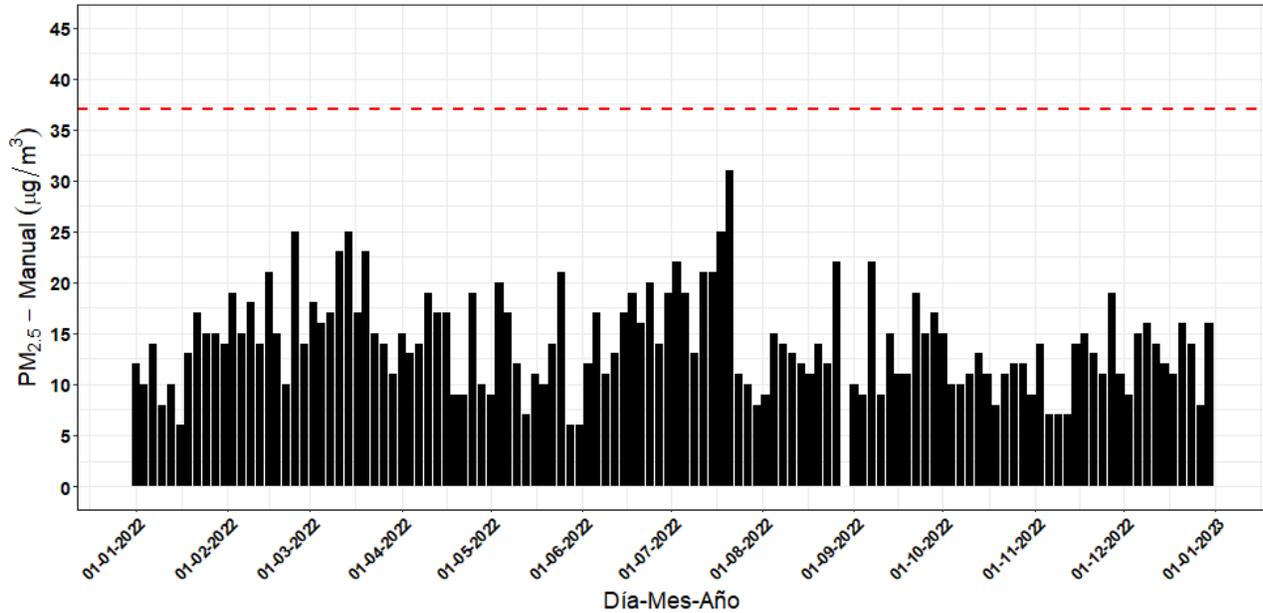
Para el caso del máximo promedio diario, éste fue registrado el jueves 21 de julio con un valor de 31  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , siendo probablemente influenciado por la alta actividad volcánica registrada en este mes con emisiones de ceniza durante esta semana (Ver sección 5.1). Al comparar los registros del 2022 con respecto al 2021 y 2020, no se observó un cambio significativo en los promedios mensuales con variaciones que no superaron el 10%.

Adicionalmente, se presentan las figuras de evolución temporal de concentraciones diarias obtenidas para  $\text{PM}_{10}$  (Figura 5) y  $\text{PM}_{2.5}$  (Figura 6). Se destaca que en ninguna de las estaciones de monitoreo se superó el límite máximo diario para material particulado ( $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ ) establecido en la Resolución 2254 de 2017 de 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$  y 37  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{2.5}$  (MADS, 2017).



**Figura 5. Evolución temporal de concentraciones diarias de  $\text{PM}_{10}$  – Manuales durante el período de análisis**

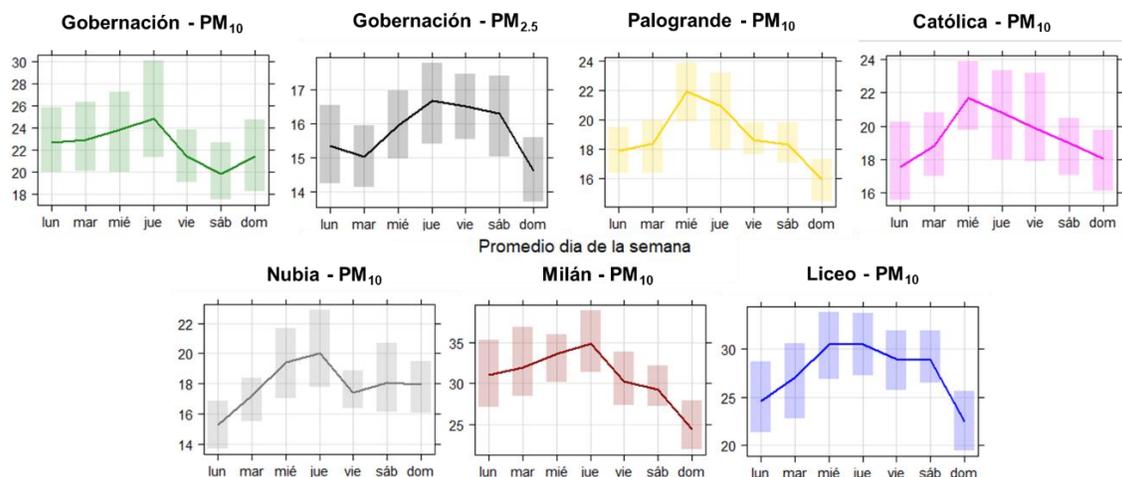
La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de  $\text{PM}_{10}$  establecido en la Resolución 2254 de 2017: 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



**Figura 6. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM<sub>2.5</sub> – Manual durante el período de análisis**

La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM<sub>2.5</sub> establecido en la Resolución 2254 de 2017: 37 µg/m<sup>3</sup>

La Figura 7 presenta la variación promedio de concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> – Manuales por días de la semana en las estaciones de la ciudad. Se puede observar que, en general, las mayores disminuciones en las concentraciones se obtienen los días domingo, principalmente en estaciones con influencia de tráfico vehicular en cercanías de las zonas de monitoreo. Este fenómeno fue más evidente en las estaciones Liceo, Milán, Palogrande y Católica. En el caso de las estaciones ubicadas en campus universitarios, se observan mayores niveles de concentración durante los miércoles y jueves.

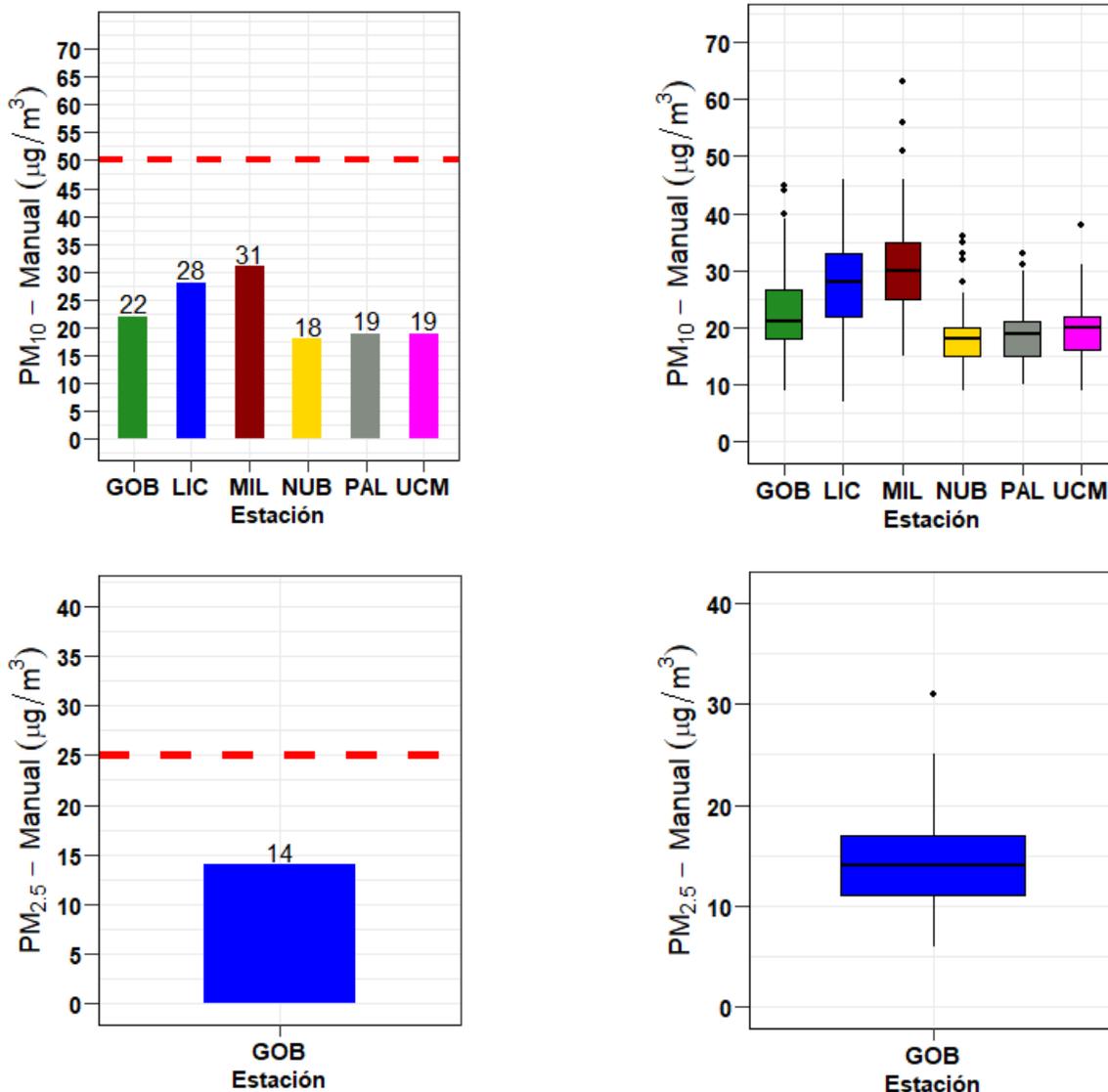


**Figura 7. Variación promedio de concentraciones por días de la semana para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> – Manuales durante el período de análisis**

La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

### 3.2. Equipos manuales: Comparación preliminar con la norma anual

En la Figura 8 se presenta la comparación del promedio aritmético obtenido para las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  con el límite normativo anual para el 2022 establecido en la Resolución 2254 de 2017 para  $PM_{10}$  ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y  $PM_{2.5}$  ( $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Se observó que ninguna de las estaciones superó la normativa anual colombiana. Finalmente, es importante destacar que los promedios obtenidos en Manizales para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en todas las estaciones, estuvieron por encima de las recomendaciones recientes en términos de promedio anual propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{10}$  y  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{2.5}$  (OMS, 2022).



**Figura 8. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  – Manuales durante el período de análisis**

La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 del MADS:  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $PM_{10}$ ) y  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $PM_{2.5}$ )

### 3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales

La Tabla 4 y Tabla 5 presenta los estadísticos descriptivos comparativos de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> – Automáticos en las estaciones Gobernación y Liceo durante el 2022. Se observó que las concentraciones promedio (medianas<sup>1</sup>) de Gobernación para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> se encontraron alrededor de los 24.2 µg/m<sup>3</sup> (desv. std = 7.9 µg/m<sup>3</sup>) y 14.3 µg/m<sup>3</sup> (desv. std = 3.7 µg/m<sup>3</sup>) respectivamente. De otra parte, las concentraciones promedio medianas de Liceo para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> se encontraron alrededor de los 28.1 µg/m<sup>3</sup> (desv. std = 7.8 µg/m<sup>3</sup>) y 15.9 µg/m<sup>3</sup> (desv. std = 3.7 µg/m<sup>3</sup>) respectivamente. Se destaca que, pese al sesgo estadístico de los datos, los promedios son cercanos a la mediana, indicando la variabilidad proporcional de las concentraciones en ambos contaminantes y ambas estaciones.

Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar un aumento alrededor del 50% durante los meses de agosto y septiembre, registrándose concentraciones de PM<sub>10</sub> mensuales máximos de 35 µg/m<sup>3</sup> en Gobernación y 34 µg/m<sup>3</sup> en Liceo. Se destacan los máximos de promedio diario obtenidos para PM<sub>10</sub> de 53.8 µg/m<sup>3</sup> en Gobernación y 56.4 µg/m<sup>3</sup> en Liceo, ambos durante septiembre, mes de menores precipitaciones y alta actividad volcánica (ver secciones 2 y 5.1). De forma similar, para PM<sub>2.5</sub> los registros máximos diarios fueron de 26.9 µg/m<sup>3</sup> en Gobernación y 32.2 µg/m<sup>3</sup> en Liceo, ambos registros en septiembre.

**Tabla 4. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio mensuales de PM<sub>10</sub> – Automático (µg/m<sup>3</sup>) durante el período de análisis**

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
<b>Gobernación PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>													
Promedio	23.1	23.2	21.3	20.2	25.3	22.2	23.3	34.5	35.0	25.7	23.8	22.8	<b>25.1</b>
Mediana	22.9	22.9	22.6	19.9	22.7	22.6	23.2	32.3	34.9	25.5	22.4	23.1	<b>24.2</b>
Desv. Est.	4.3	5.4	5.8	5.2	10.3	7.1	5.6	6.8	8.0	5.9	6.2	5.8	<b>7.9</b>
Min.	14.5	12.3	8.8	11.1	10	9.8	12.6	20.6	18.7	16.6	15.4	11.8	<b>8.8</b>
Max.	30.8	35.6	32.3	32.7	50.6	36.3	38.5	49.3	53.8	38.7	38.8	32.2	<b>53.9</b>
Percentil 95	29.2	31.4	29.9	29.5	43.6	34.7	32.8	43.3	45.5	37.3	35.9	31.6	<b>40.8</b>
N° Datos	31	28	31	29	31	30	31	31	30	28	30	31	<b>361</b>
<b>Liceo PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>													
Promedio	29.4	25.3	25.4	28.4	32.7	28.7	26.1	33.3	34.0	26.4	24.9	34.8	<b>29.1</b>
Mediana	28.7	23.8	26.2	29.5	32.4	28.0	25.3	33.5	35.0	25.9	26	35.2	<b>28.1</b>
Desv. Est.	7.5	5.8	6.1	6.8	7.4	7.0	5.5	7.8	8.0	5.2	6.1	9.1	<b>7.8</b>
Min.	18	12.4	10.2	17.6	20.7	17.1	17.3	18.5	19.5	18.2	13.6	17.6	<b>10.2</b>
Max.	47.4	40.1	36.4	43.9	51.1	40.8	41.2	50.5	56.4	37.7	34	54.4	<b>56.4</b>
Percentil 95	44.8	35.2	34.5	39.4	42.9	39.9	37.6	44.9	46.0	34.5	33.8	49.4	<b>42.3</b>
N° Datos	31	28	31	30	22	30	31	31	30	31	30	31	<b>354</b>

\* Estadísticos estimados a partir de datos promedio diarios del equipo.

<sup>1</sup> Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

**Tabla 5. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio mensuales de PM<sub>2,5</sub> – Automático (µg/m<sup>3</sup>) durante el período análisis**

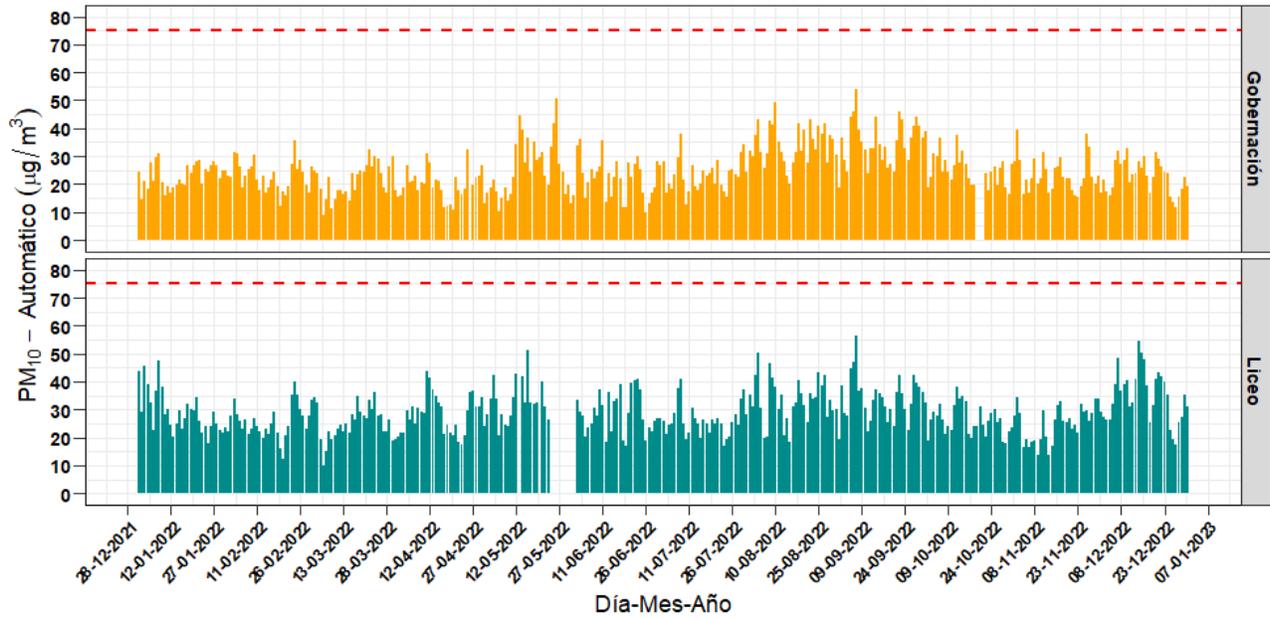
Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
<b>Gobernación PM<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>													
Promedio	15.9	16.4	14.9	13.3	13.6	11.9	13.5	16.2	15.0	13.1	13.4	15.5	<b>14.5</b>
Mediana	15.9	15.8	14.2	13.3	13.6	11.6	13.5	16.0	15.4	12.6	12.9	16.1	<b>14.3</b>
Desv. Est.	3.2	3.9	3.9	3.9	3.6	3.5	2.8	3.4	3.9	2.9	3.3	3.5	<b>3.7</b>
Min.	9.7	9.1	5.7	6.8	6.8	6.1	8.8	9.4	8.0	7.5	7.8	9.1	<b>5.7</b>
Max.	21.9	25.2	22.2	22.8	22.0	18.3	21.5	24.0	26.9	18.9	20.1	20.8	<b>26.9</b>
Percentil 95	20.1	23.7	21.1	19.2	20.5	17.4	17.4	21.5	22.5	18.6	18.6	20.4	<b>20.4</b>
N° Datos	31	28	31	29	31	30	31	31	30	28	30	31	<b>361</b>
<b>Liceo PM<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>													
Promedio	16.6	17.4	16.2	15.3	15.6	13.0	15.2	17.3	17.4	15.2	14.7	18.2	<b>16.1</b>
Mediana	17.2	16.8	15.7	15.1	15.7	13.4	15.1	17.2	16.9	15	14.5	19.2	<b>15.9</b>
Desv. Est.	3.2	3.8	4.1	3.8	3.2	3.0	2.9	3.8	4.6	3.2	3.6	4.2	<b>3.7</b>
Min.	10.2	8.5	6.0	8.9	10.8	7.6	10.0	9.6	10.0	9.6	8.8	11.5	<b>6</b>
Max.	22.3	25.8	24.3	24.5	22.6	18.4	23.9	25.6	32.3	21.1	21.3	25.2	<b>32.3</b>
Percentil 95	21.5	24	22.9	21.4	21.4	17.0	19.9	22.9	25.7	20.8	21.1	23.6	<b>22.5</b>
N° Datos	31	28	31	30	22	30	21	31	30	31	30	31	<b>354</b>

\* Estadísticos estimados a partir de datos promedio diarios del equipo.

La Figura 9 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> – Automáticos (promedio diario) durante el período de análisis en las estaciones Gobernación y Liceo. Se puede observar un comportamiento estable y correlacionado con las temporadas de bajas y altas precipitaciones de la ciudad (ver sección 2). Además, se observa que el límite máximo permisible de la normativa colombiana para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>, no fue superado ningún día del año.

Adicionalmente, la Figura 10 presenta la evolución promedio horaria y por día de la semana de las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> – Automáticas en las estaciones Gobernación y Liceo. Se evidencia como los máximos de concentración horaria se presentan en las horas de alto flujo vehicular de la ciudad (entre las 6 am a 8 am y las 6 pm a 8:00 pm aproximadamente). Lo anterior coincide con lo determinado en el último Plan de Movilidad de Manizales del año 2017 (Steer Davies Gleave, 2017); el cual indicó que en la ciudad se presentan tres horas pico de flujo vehicular, la hora pico de inicio de la mañana (entre las 6:30 am y 7:30 am); la hora pico del medio día (11:45 am a 12:45 pm y 01:30 pm a 02:30 pm) y una hora pico al final de la tarde (05:30 pm a 06:30 pm).

Éstos máximos de concentración horaria en ambas estaciones registraron valores superiores a los 35 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub> y 19 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>2,5</sub>. Para el caso particular del medio día, no se observan estos picos de concentración debido a las dinámicas de las masas de aire en la ciudad, que, al calentarse por acción de la radiación solar, cuyo valor máximo supera los 800 W/m<sup>2</sup> entre las 11 am y 1 pm; ganan flotabilidad y ascienden en la atmósfera. Este comportamiento es favorecido además por el aumento en la altura de la capa de mezcla, dando lugar a una mayor dispersión de los contaminantes emitidos (Cuesta y colaboradores, 2020),



(a)

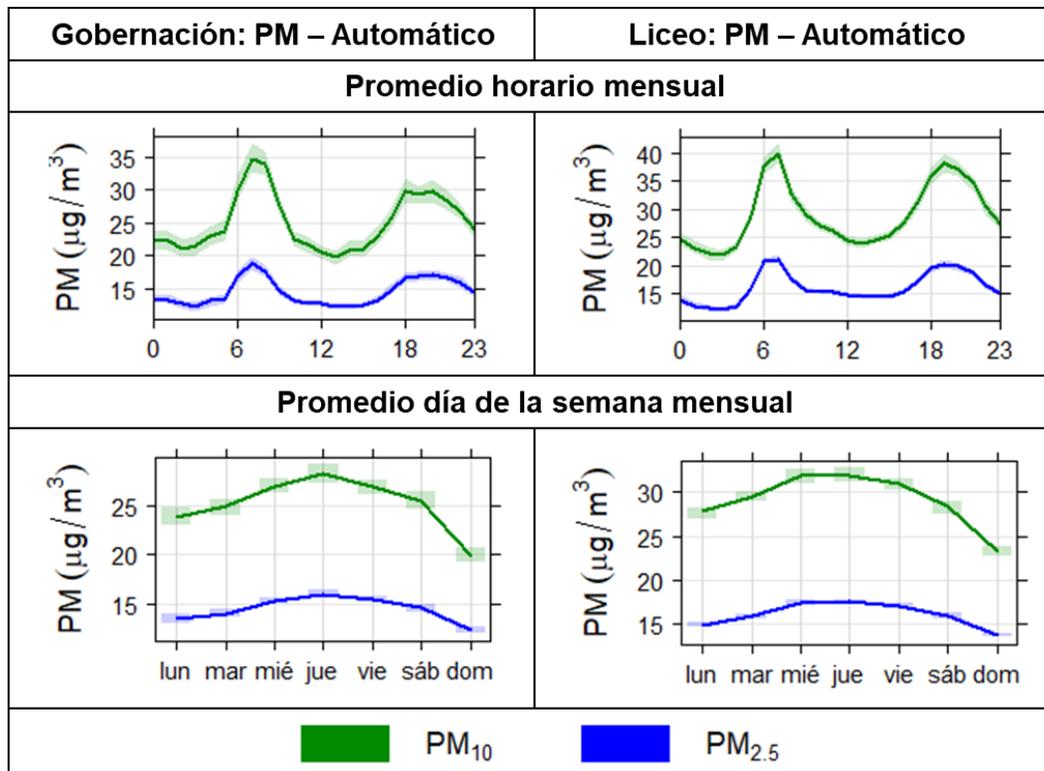


(b)

**Figura 9. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> – Automáticos durante el año 2022: (a) PM<sub>10</sub> (b) PM<sub>2,5</sub>**

La línea punteada roja hace referencia a los límites máximos diarios permisibles definidos en la Res, 2254 de 2017 del MADS: 75 µg/m<sup>3</sup> (PM<sub>10</sub>) y 37 µg/m<sup>3</sup> (PM<sub>2,5</sub>)

Finalmente, en la Figura 10 se presenta el perfil promedio para los días de la semana, se observa un patrón similar a los datos de los equipos manuales, en donde se presenta una disminución del promedio diario para ambas estaciones durante el domingo, con una reducción aproximada del 25% respecto al promedio semanal para ambas estaciones y para ambos contaminantes. Se destaca que, para el caso de los sábados, no se presenta una reducción significativa en los valores promedio diarios comparados con el promedio semanal, indicando que este día se comporta como un día laboral en la ciudad.



**Figura 10. Promedio horario y semanal de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> – Automáticos durante el período de análisis. Gobernación (izquierda) y Liceo (derecha)**

La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

### **3.4. Índice de calidad del aire (ICA) para $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ en el SVCA de Manizales**

Las Figuras 11-15 presentan los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM – Manuales y Automáticos. El ICA representa mediante un indicador de color, el estado de la calidad del aire de acuerdo con la concentración de material particulado y su posible afectación a la salud. Para el cálculo de este indicador se utiliza la metodología propuesta por la resolución 2254 de 2017 (capítulo IV artículos 18 al 21) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS 2017).

En lo que respecta a la concentración de  $PM_{10}$  – Manual, se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en las seis estaciones de monitoreo para todos los días analizados, registrándose únicamente un día (29/03/2022) con calidad del aire en estado Moderado en la estación Milán, estación caracterizada por su clasificación industrial y además predominar tráfico vehicular pesado a diésel. Para el caso de  $PM_{2.5}$  – Manual en la estación Gobernación, un 60% de los días analizados presentaron ICA en estado moderado, un porcentaje igual con respecto al año 2021.

Por otro lado, las concentraciones de  $PM_{10}$  – Automático presentaron calidad del aire en estado bueno en todos los días en la estación Gobernación. En la estación Liceo se presentaron dos clasificaciones en estado moderado los días 07 de septiembre y 14 de diciembre, donde este último correspondió a un evento de notable caída de ceniza volcánica. Para el caso de  $PM_{2.5}$  – Automático, en ambas estaciones se tuvo un porcentaje entre 70% y 85% de los días con ICA en estado moderado en la estación Gobernación y Liceo respectivamente.

Se destacan, algunos registros que pudieron ser influenciados por la alta actividad del volcán Nevado del Ruiz principalmente durante los meses de febrero, marzo, septiembre, octubre y diciembre; meses que registraron altas emisiones con columnas de gases superiores a los 1800 m de altura desde la boca del volcán y direcciones de viento predominantes en dirección al centro urbano de Manizales (ver sección 5.1).

El  $PM_{2.5}$  al ser una fracción del PM más pequeña, posee mayor afectación en la salud humana, por lo tanto, se destaca la importancia de continuar con medidas que permitan identificar escenarios de riesgo para la ciudadanía e implementar estrategias de mitigación de emisiones de este contaminante en la ciudad.

	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
Rango PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	0 - 54	55 - 154	155 - 254	255 - 354	355 - 424	425 - 504

### Estación Gobernación PM<sub>10</sub>



### Estación Liceo PM<sub>10</sub>



### Estación Milán PM<sub>10</sub>



**Figura 11. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM<sub>10</sub> – Manual en las estaciones: Gobernación, Liceo y Milán del SVCA de Manizales durante el período de análisis**  
*Cálculo según lineamientos de la resolución 2254 de 2017 del MADS*

	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
Rango PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	0 - 54	55 - 154	155 - 254	255 - 354	355 - 424	425 - 504

### Estación Palogrande PM<sub>10</sub>



### Estación Nubia PM<sub>10</sub>



### Estación UCM PM<sub>10</sub>



**Figura 12. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM<sub>10</sub> – Manual en las estaciones: Palogrande, Nubia y Católica del SVCA de Manizales durante el período de análisis**

*Cálculo según lineamientos de la resolución 2254 de 2017 del MADS*

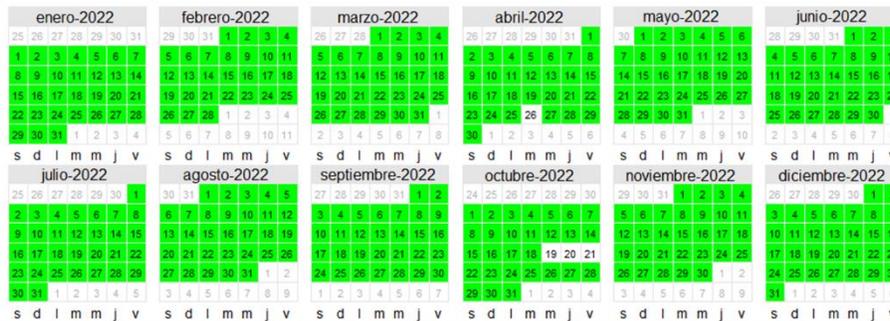
	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
Rango PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	0-12	13-37	38-55	56-150	151-250	251-500



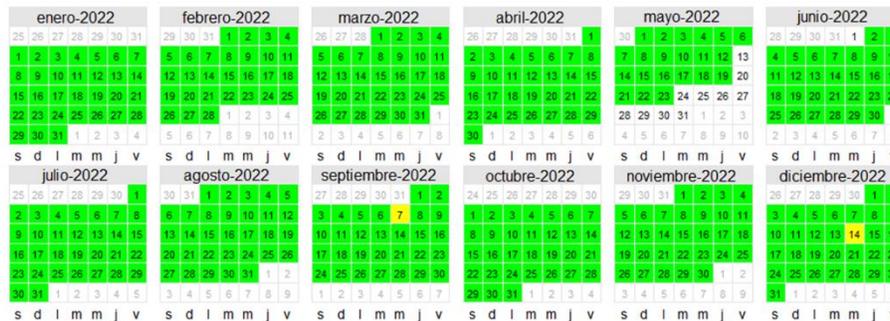
**Figura 13. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM<sub>2,5</sub> – Manual en las estaciones del SVCA de Manizales durante el período de análisis**  
Cálculo según lineamientos de la resolución 2254 de 2017 del MADS

	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
Rango PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	0 - 54	55 - 154	155 - 254	255 - 354	355 - 424	425 - 504

**Gobernación PM<sub>10</sub> – Automático**



**Liceo PM<sub>10</sub> – Automático**



**Figura 14. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM<sub>10</sub> – Automático en las estaciones: Gobernación y Liceo durante el período de análisis**  
Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
Rango PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	0 - 54	55 - 154	155 - 254	255 - 354	355 - 424	425 - 504

### Gobernación PM<sub>2.5</sub> – Automático



### Liceo PM<sub>2.5</sub> – Automático



Figura 15. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM<sub>2.5</sub> – Automático en las estaciones: Gobernación y Liceo durante el período de análisis  
Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

## 4. RESULTADOS DE MONITOREO PARA GASES

### 4.1. Monitoreo de monóxido de carbono (CO)

La Tabla 6 presenta los estadísticos descriptivos para las concentraciones promedio horarias de CO, durante el año 2022 las concentraciones promedio medianas<sup>2</sup> se encontraron alrededor de 853.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (desv. std. = 474.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Al comparar los registros de la mediana del 2022 con respecto al año 2021 (869,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), se observó una disminución del 2%, una variación no significativa para este contaminante. El CO es mayoritariamente dominado por la combustión de gasolina proveniente de motocicletas y vehículos particulares, categorías vehiculares que aportan cerca del 41% (11599 ton/año) y 38% (10653 ton/año) respectivamente a la emisión de este contaminante (Unal – Corpocaldas, 2020; Unal - Corpocaldas, 2019).

Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana tiende a ser menor que los promedios aritméticos, indicando la variabilidad de las concentraciones de este contaminante en la ciudad. Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que diciembre presentó el mayor registro con un valor de 1056.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , indicando un posible aumento en la presencia de vehículos particulares en inmediaciones de la estación debido a las festividades de fin de año.

De manera complementaria, la Figura 16 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de CO durante el periodo de análisis. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cincominutales del equipo según lo estipulado por el “Manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire” del MADVT (MAVDT, 2010). Se resalta que la concentración de CO, tanto horaria como octohoraria, no ha superado el límite máximo establecido en la Resolución 2254 de 2017 (5000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para promedio octohorario y 35000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para promedio horario).

Adicionalmente, la Figura 17 presenta la variación promedio horario, mensual y por día de la semana. Se observa que los máximos horarios de concentración ocurren en las horas pico de tráfico vehicular (al inicio y final de la jornada laboral) alrededor de las 7 am y las 6 pm, con promedios horarios entre 1500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 1600  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. De otra parte, se observan mínimos alrededor de los 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en horas de la madrugada (entre la 3 y 5 am, hora de menor actividad vehicular). Estos resultados son congruentes con el último plan de movilidad de Manizales, donde se indica que en la ciudad se presentan tres horas pico de flujo vehicular: la hora pico de inicio de la mañana (entre las 6:30 am y 7:30 am), la hora pico del medio día (11:45 am a 12:45 pm y 01:30 pm a 02:30 pm) y una hora pico al final de la tarde (05:30 pm a 06:30 pm) (Steer Davies Gleave, 2017).

<sup>2</sup> Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

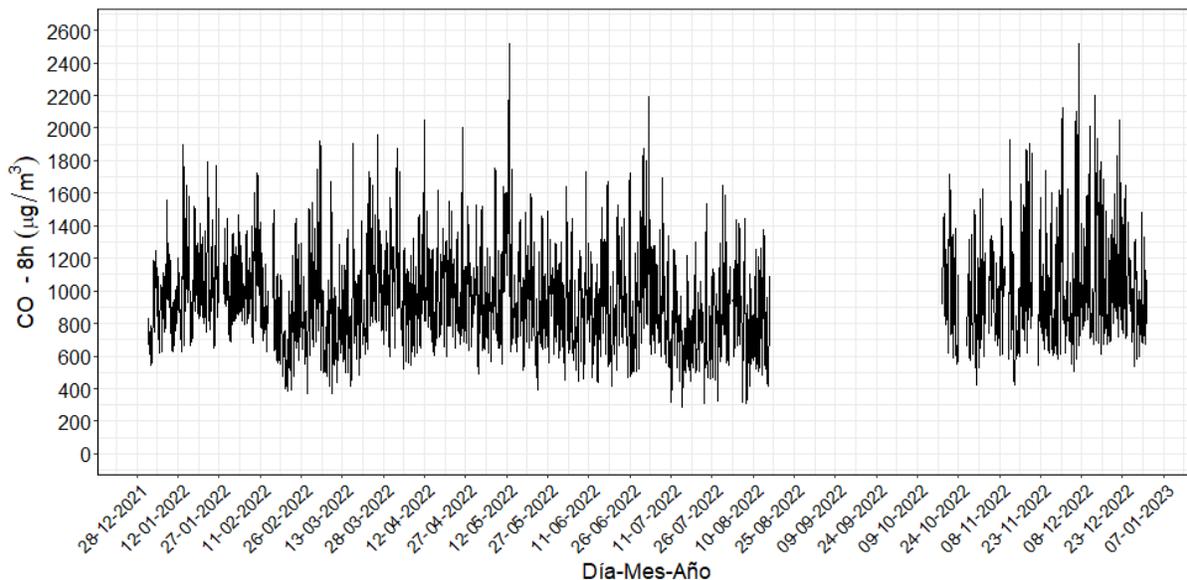
**Tabla 6. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el período de análisis**

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct	Nov.	Dic.	Total
Promedio	1021.9	935.5	958.9	1027.5	996.5	920.1	855.9	849.1	-***	1001.2	1025.4	1056.4	<b>972.2</b>
Mediana	918.6	827.5	821.3	917.2	881.6	817.5	728.6	728.6	-	890.4	868.4	897.2	<b>853.1</b>
Incertidumbre**	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	-	1.3	1.3	1.3	<b>1.3</b>
Desv. Est.	401.7	442.1	494.3	449.7	454.3	446.5	459.0	471.9	-	474.3	515.9	552.9	<b>474.9</b>
Min.	464.6	272.6	246.1	384.8	265.1	225	196.7	238.4	-	280.1	365.9	348.2	<b>196.7</b>
Max.	2870.9	3162.6	2983.9	3572.9	3188.2	3530.2	3667.9	2466.2	-	2737.6	3283.3	3805.7	<b>3805.7</b>
Percentil 95	1913.0	1764.5	1995.3	1832.7	1854.4	1777.5	1732.4	1874.8	-	1945.5	2128.9	2198.5	<b>1928.2</b>
N° Datos	682	613	720	720	741	720	743	313	-	264	624	744	<b>6979</b>

\* Estadísticos estimados a partir de datos promedios horarios del equipo.

\*\* Unidades: ppm, Las fuentes de incertidumbre están relacionadas principalmente con los procedimientos de calibración multipunto realizados con empresa externa: Comparación con patrones de referencia, desempeño por repetibilidad y resolución del instrumento.

\*\*\* Numero de datos no validos (<30% del mes) o ausencia de datos ocasionado por fallas de medición.

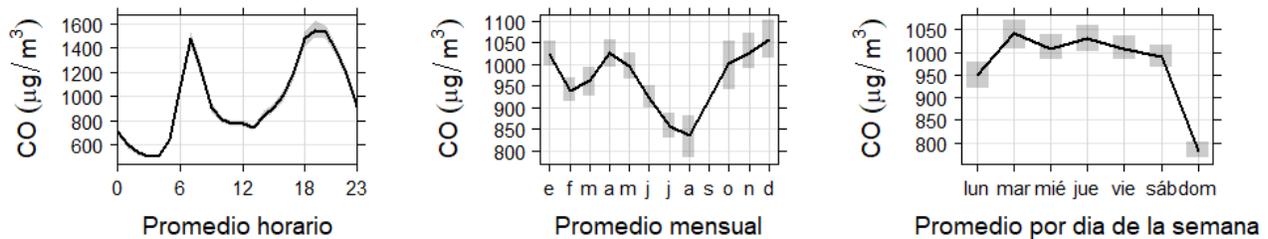


**Figura 16. Evolución temporal de concentraciones promedio octohoraria de CO durante el período de análisis**

El nivel máximo permisible octohorario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a  $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  no fue superado en ningún día

Para el caso de la hora pico del medio día se registran concentraciones alrededor de los  $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , valor relacionado directamente con las dinámicas que se presentan en la atmósfera de la ciudad. Debido a la presencia de radiación solar se incrementa la temperatura de las masas de aire y aumenta la flotabilidad de estas; consecuentemente, se genera la elevación de la capa de mezcla generando una mayor dispersión de los contaminantes en la atmósfera, además de la intensificación de los procesos de reacción química que generan contaminantes secundarios como el ozono troposférico ( $\text{O}_3$ ) (Cuesta y otros, 2020).

Al comparar el promedio entre los días de semana, se observa un patrón estable con valores promedio alrededor de los 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y una concentración mínima los domingos (día con la menor actividad económica de la ciudad) con un valor promedio cercano a los 800  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esta disminución cercana al 20% en comparación con el promedio semanal, indica la representatividad del aporte de las fuentes móviles en las concentraciones de CO observadas.



**Figura 17. Variación promedio de CO horario (izquierda), mensual (centro) y por día de la semana (derecha) durante el período de análisis**

La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

#### 4.2. Monitoreo de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ )

La Tabla 7 presenta los estadísticos descriptivos para el  $\text{SO}_2$  durante el período de análisis. Se observa que durante el año 2022 las concentraciones promedio medianas<sup>3</sup> se encontraron alrededor de 5.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (desv. std. = 1.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), con un máximo valor horario registrado de 23.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  obtenido en octubre, registro atribuible a la actividad volcánica durante este mes (ver sección 5.1). Al comparar el registro de la mediana en mención con respecto al año 2021 (5.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), se observó un aumento del 1%, indicando una variabilidad no significativa en la ciudad para este contaminante. En Manizales, las fuentes móviles en ruta han sido identificadas como fuentes de aporte de este contaminante en la ciudad y similarmente al CO, se ha identificado su relación con las fuentes primarias de emisión en la estación Gobernación (Unal – Corpocaldas, 2020; Unal - Corpocaldas, 2019).

Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana tiende a ser menor que los promedios, indicando la variabilidad de las concentraciones de este contaminante en la ciudad. Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que durante septiembre se presentó el mayor registro con un valor promedio de 8.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mes con alta influencia de emisiones del volcán Nevado del Ruiz, donde se registraron emisiones de la columna de gases con alturas superiores a los 2000 m (SGC, 2020).

De manera complementaria, la Figura 18 presenta la evolución de concentraciones horarias de  $\text{SO}_2$  durante el período de análisis. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cincominutales del equipo según lo estipulado por el “Manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire” del MADVT

<sup>3</sup> Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

(MAVDT, 2010). Se destaca que todos los registros están dentro de los límites permitidos por la normatividad vigente ( $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para 1 hora).

**Tabla 7. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el período de análisis**

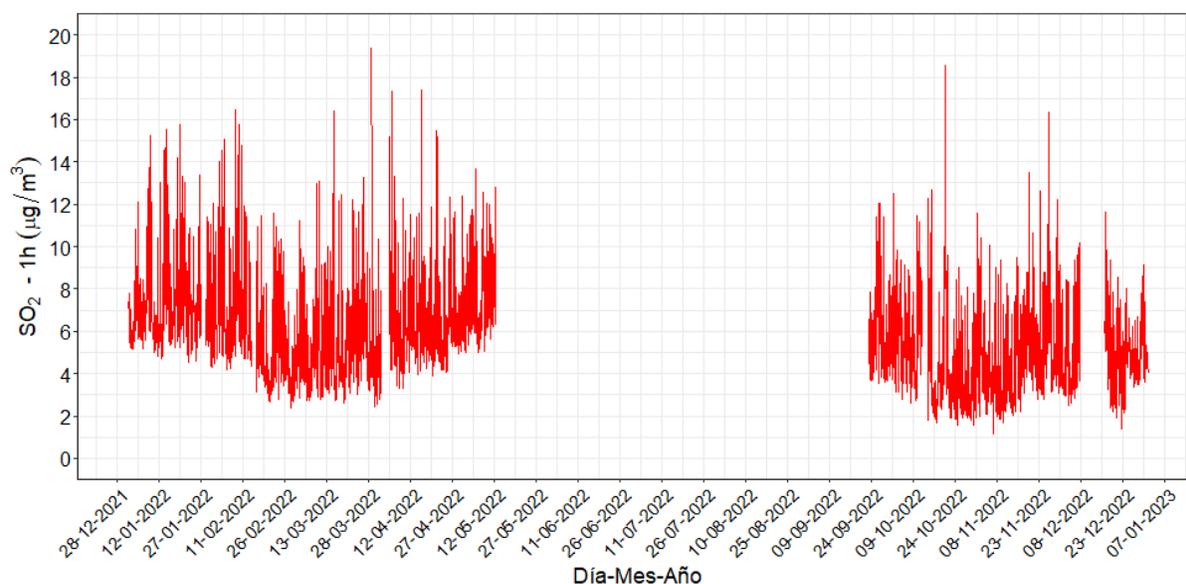
Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Promedio	7,2	6,0	5,4	6,5	7,5	-****	-	-****	8,3	4,6	4,8	4,8	5,7
Mediana	6,6	5,5	4,8	6,0	7,0	-	-	-	7,7	3,9	4,3	4,5	5,4
Incertidumbre**	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	-	-	-	2,1	1,5	1,5	1,5	1,7
Desv. Est.	1,9	2,3	2,3	2,1	1,8	-	-	-	1,8	2,5	2,1	1,7	2,4
Min.	4,3	2,4	2,4	2,8	4,9	-	-	-	6,1	1,5	1,2	1,4	1,2
Max.	15,7	16,4	22,1	17,3	13,6	-	-	-	14,6	23,7	16,3	11,6	23,7
Percentil 95	11,2	10,9	9,4	10,3	11,0	-	-	-	12,0	9	8,9	8,1	10,1
N° Datos	682	613	720	651	276	-	-	-	190	697	720	531	5152

\* Estadísticos estimados a partir de datos promedios horarios del equipo.

\*\* Unidades: ppb, Las fuentes de incertidumbre están relacionadas principalmente con los procedimientos de calibración multipunto realizados con empresa externa: Comparación con patrones de referencia, desempeño por repetibilidad y resolución del instrumento.

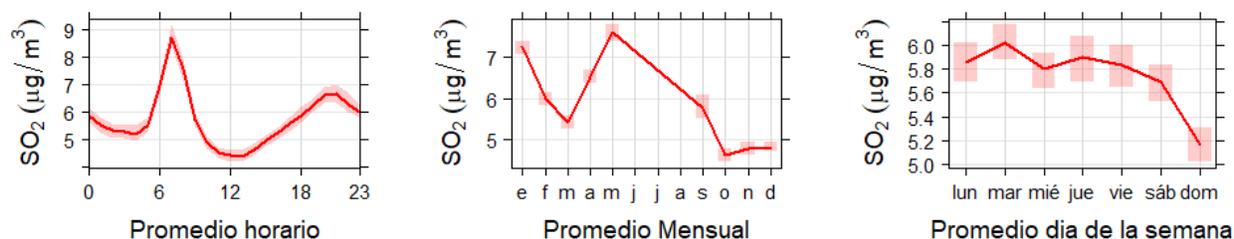
\*\*\* Numero de datos no validos (<30% del mes) o ausencia de datos ocasionado por fallas de medición.

Adicionalmente, la Figura 19 presenta la variación promedio horaria, mensual y por día de la semana. Se observa un comportamiento horario similar al CO con valores máximos de concentración cercanos a las horas pico de tráfico vehicular al inicio y fin de la jornada laboral, alrededor de las 7 am y las 8 pm, con promedios horarios alrededor de  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Asimismo, se observan mínimos alrededor de los  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  al medio día (entre las 11 am y 1 pm). Al comparar el promedio por día de la semana, se observa un comportamiento con máximos de concentración los martes con un valor medio alrededor de los  $6.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y mínimos promedio los domingos alrededor de los  $5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  relacionados a la actividad de las fuentes móviles en ruta de la ciudad.



**Figura 18. Evolución temporal de concentraciones promedio horario de  $\text{SO}_2$  durante el período de análisis**

El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  no fue superado en ningún día



**Figura 19. Variación promedio de SO<sub>2</sub> horario (izquierda), mensual (centro) y por día de la semana (derecha) durante el período de análisis**  
 La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

### 4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O<sub>3</sub>)

La Tabla 8 presenta los estadísticos descriptivos para O<sub>3</sub> durante el periodo de análisis, así como la subclasificación entre las concentraciones del día (diurno) y la noche (nocturno). Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana tiende a ser menor que los promedios, indicando la variabilidad de las concentraciones de este contaminante en la ciudad. Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que durante noviembre se presentó el menor registro con un valor de  $21.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y durante septiembre se registró el mayor promedio mensual con un valor  $33.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Las concentraciones promedio medianas<sup>4</sup> para el 2022, se encontraron alrededor de  $23,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el día completo,  $36.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para la jornada diurna y  $15.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para la jornada nocturna. Al comparar los registros de la mediana diaria de lo corrido del 2022 con respecto al año 2021 ( $30.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). se observó una disminución del 23%, indicando un posible cambio en la emisión de precursores de O<sub>3</sub>, un comportamiento relacionado, por ejemplo, con la presencia de vehículos diésel en inmediaciones de la estación que generan contaminantes como los óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>.

La Figura 20 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de O<sub>3</sub> durante el período de análisis, El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cincominutales del equipo según lo estipulado por el “Manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire” del MADVT (MAVDT, 2010). Se resalta que las concentraciones octohorarias de O<sub>3</sub> se encontraron por debajo de los límites permitidos por la normatividad vigente ( $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para promedios de 8 horas).

Para poder explicar el comportamiento de este contaminante, se resalta que el O<sub>3</sub> es un contaminante secundario que es formado en la atmósfera debido a las reacciones fotoquímicas en presencia de contaminantes primarios conocidos como precursores. Los principales precursores del O<sub>3</sub> son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>, que representa las especies NO y NO<sub>2</sub>) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs). En la ciudad de Manizales ambos precursores son dominados por emisiones vehiculares (Unal - Corpocaldas,

<sup>4</sup> Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

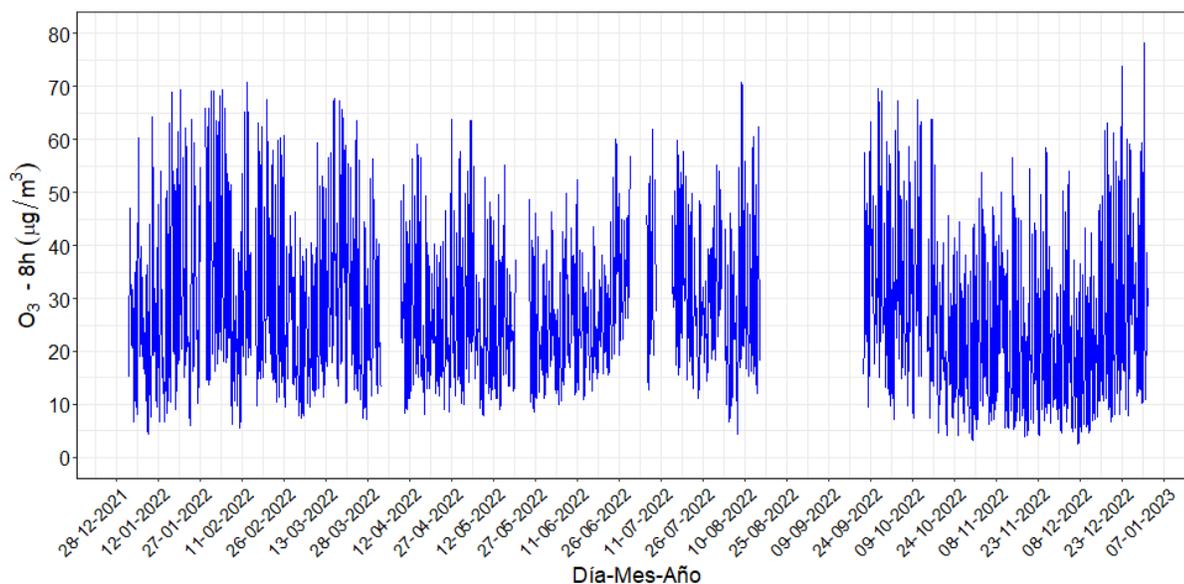
2020). La formación de O<sub>3</sub> depende directamente de la relación entre COVs/NO<sub>x</sub> y la habilidad oxidativa de la atmósfera, que depende de la presencia de radicales hidroxilos (OH·) en el ambiente.

**Tabla 8. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de O<sub>3</sub> (µg/m<sup>3</sup>) durante el período de análisis y su comparativo entre periodos del día**

Periodo	Estadísticos	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total	
<b>Diario (0:00 a 23:59)</b>	Promedio	28.8	30.9	28.7	26.1	25.3	27.5	31.4	29.0	33.4	25.4	21.6	25.4	27.3	
	Mediana	23.2	25.7	23.9	21.0	21.4	25.2	28.6	25.4	30.6	20.7	15.9	19.8	23.1	
	Incertidumbre**	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.9	1.9	1.1	1.1	1.1	1.2
	Min.	2.0	1.5	1.5	1.8	6.5	8.0	8.2	3.2	3.2	1.7	1.1	1.3	1.1	1.1
	Max.	81.1	87.4	84.6	78.1	70.9	70.5	72.4	77.7	89.1	83.7	73.8	84.4	89.2	
	Percentil 95	68.6	72.6	63.4	59.7	56.8	52.0	59.9	64.2	74.9	63.5	55.4	64.7	63.1	
	N° Datos	682	613	720	552	620	688	498	313	240	697	720	744	7159	
<b>Diurno (6:00 a 17:59)</b>	Promedio diurno	39.0	42.3	38.4	35.8	34.4	33.8	40.2	40.2	44.0	35.9	32	37.4	37.3	
	Mediana diurna	38.1	42.6	38.6	35.4	34.7	33.2	40.6	41.9	43.5	35.7	31.9	38.1	36.9	
	Desv. Est.	21.6	22.0	19.7	17.6	15.7	13.5	15.3	18.8	22.7	19.7	17.5	20.9	19.1	
	Max.	81.1	87.4	84.6	78.1	70.9	70.5	72.4	77.7	89.1	83.7	73.8	84.4	89.2	
	N° Datos	343	306	360	276	307	346	250	156	120	348	360	372	3580	
<b>Nocturno (18:00 a 5:59)</b>	Promedio nocturno	18.4	19.5	18.9	16.4	16.4	21.0	22.6	17.8	22.8	14.9	11.2	13.5	17.4	
	Mediana nocturna	16.6	16.6	16.1	15.9	14.5	19.1	21.9	16.4	20.1	12.1	15.3	11.3	15.4	
	Desv. Est.	11.7	11.3	11.5	7.9	7.7	8.8	8.2	10.7	12.8	10.6	7.9	9.7	10.5	
	Max.	66.7	56.8	57.7	44.9	44.6	48.4	50.5	45.5	52.3	49.7	46.3	47.4	66.7	
	N° Datos	339	307	360	276	313	342	248	157	120	349	360	372	3579	

\* Estadísticos estimados a partir de datos promedios horarios del equipo.

\*\* Unidades: ppb, Las fuentes de incertidumbre están relacionadas principalmente con los procedimientos de calibración multipunto realizados con empresa externa: Comparación con patrones de referencia, desempeño por repetibilidad y resolución del instrumento.



**Figura 20. Evolución temporal de concentraciones promedio octohorario de O<sub>3</sub> durante el período de análisis**

El nivel máximo permisible octohorario de la Res, 2254 de 2017 equivalente a 100 µg/m<sup>3</sup> no fue superado

Bajo una relación mayor a 1 entre COVs/NO<sub>x</sub>, los radicales hidroxilos (OH) reaccionarán mayoritariamente con los COVs para generar moléculas de agua, NO<sub>2</sub> y especies de aldehídos (ver reacciones 1, 2 y 3). Por otro lado, con una baja relación de COVs/NO<sub>x</sub> las reacciones de NO<sub>x</sub> serán predominantes (ver reacciones 3, 4, 5 y 6) y removerán los radicales OH del sistema, generando consumo de O<sub>3</sub> mediante la reacción de titulación (ver reacción 6); para finalmente inducir la producción de especies como ácido nítrico que posteriormente precipitan en forma seca o húmeda (Sengel y otros, 2020; Fabián y Dameris, 2014).

En general, la disminución de emisiones de precursores como los NO<sub>x</sub> se relaciona con una reducción en la actividad del tráfico vehicular. Este fenómeno altera las reacciones fotoquímicas induciendo una mayor generación de O<sub>3</sub>, debido a que los radicales (OH·) tenderán hacia la reacción con COVs y favorecerán la producción neta de NO<sub>2</sub> (reacciones 1, 2 y 3),

Posteriormente, la fotólisis del NO<sub>2</sub> (reacción 4) favorecerá la generación de O<sub>3</sub> (Ver reacción de titulación (6)) y el equilibrio será desplazado hacia el lado izquierdo de la reacción, este fenómeno reducirá la habilidad oxidativa de la atmósfera y por ende disminuirá el consumo de O<sub>3</sub> durante la noche (reacción 7), generando así un remanente atmosférico de O<sub>3</sub> que puede aumentar los niveles de concentración para el día siguiente (Sengel y colaboradores, 2020).

A medida que aumenta la generación de precursores en la atmósfera, se presenta una competencia por el consumo de radicales hidroxilos (OH) presentes en el ambiente y la reacción de titulación (reacción 6) es desplazada hacia un mayor consumo de O<sub>3</sub>, por consiguiente, una reducción de las concentraciones observadas. En este sentido se podría sugerir que las concentraciones de O<sub>3</sub> en la ciudad de Manizales se encuentran dominadas por la presencia de COVs en la atmósfera (Li, 201; Sengel y otros, 2020).



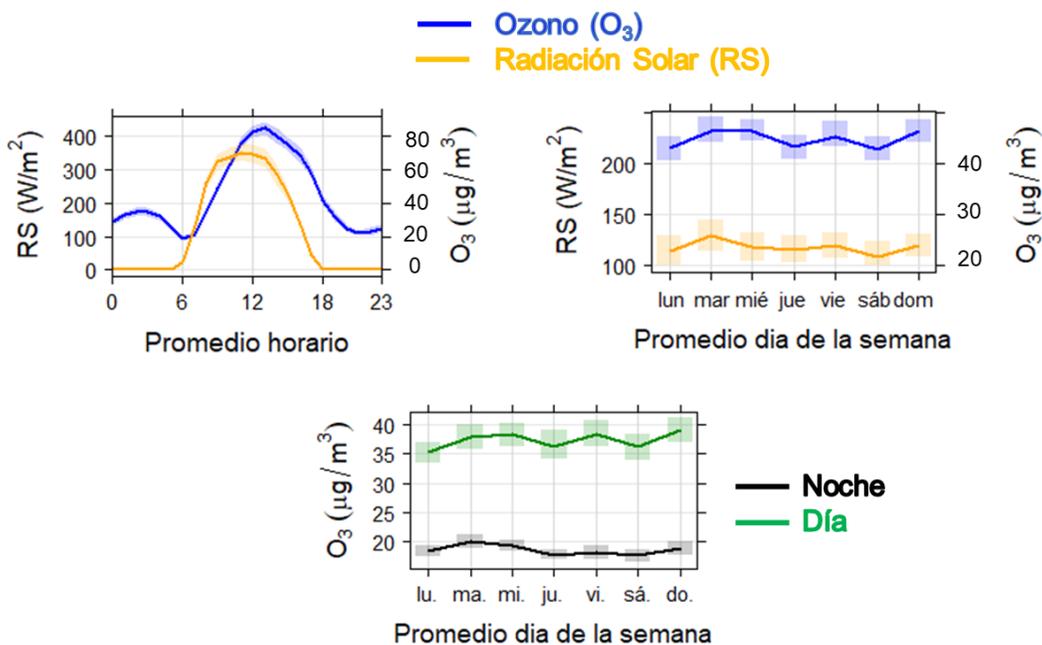
*Dónde: R representa una cadena de hidrocarburos (Ej, Etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) el grupo R representara la cadena C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>); M representa cualquier mediador inerte que permita conservar el momento de la reacción (Ej, Nitrógeno).*



*Dónde: hν representa la energía fotoquímica efecto de la radiación solar en su longitud de onda corta.*

La Figura 21 presenta el promedio horario y promedio día de la semana de la variación de  $O_3$  y radiación solar para el período de análisis. Adicionalmente, se presenta el comportamiento de estas variables durante el día (diurno, entre las 6 am y 6 pm) y la noche (nocturno, entre las 6 pm y 6 am), Se observa que se presentan los picos máximos en las concentraciones de ozono durante las 11:30 am y 3:00 pm del día, alcanzando concentraciones promedio cercanas a los  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Las concentraciones diurnas son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con una mediana diurna de  $37.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y una nocturna de  $17.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Para el período nocturno, se presenta un pico de ozono entre la 1:00 am y 3:00 am con valores cercanos a los  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , fenómeno relacionado posiblemente al transporte de  $O_3$  que es generado durante el día y posteriormente es transportado desde la parte alta de la cordillera hacia el centro urbano, debido a los patrones de circulación de vientos montaña - valle característicos de la ciudad. Adicionalmente, la ausencia de radiación solar disminuye la temperatura de las masas de aire y por ende la reducción en la flotabilidad, generando la disminución de la altura de la capa de mezcla. Este fenómeno impide la libre dispersión de contaminantes en la atmósfera. De otra parte, se evidencia que los promedios obtenidos no presentan una relación específica con los días de la semana laborales y no laborales.



**Figura 21. Variación promedio horaria y por día de la semana de  $O_3$  – Radiación solar. Se incluye además el comportamiento promedio semanal entre las horas diurnas y nocturnas durante período de análisis**

#### 4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> y CO en el SVCA de Manizales

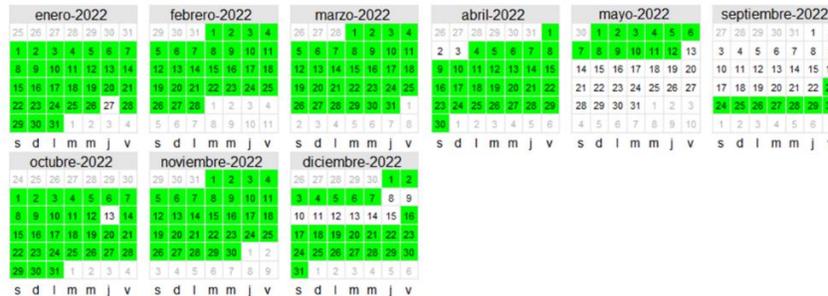
La Figura 22 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de CO, SO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>. El ICA representa mediante un indicador de color, el estado de la calidad del aire de acuerdo con la concentración de cada contaminante y su posible afectación a la salud. Para el cálculo de este indicador 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 año 2022 para los contaminantes mencionados.

	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
Rango CO (µg/m <sup>3</sup> )	0 - 5094	5095 - 10819	10820 - 14254	14255 - 17688	17689 - 34862	34863 - 57703
Rango O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	0 - 106	107 - 138	139 - 167	168 - 207	208 - 393	>394
Rango SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	0 - 93	94 - 197	198 - 486	487 - 797	798 - 1583	1583 - 2629

Estación Gobernación CO (Octohorario)



Estación Gobernación SO<sub>2</sub> (horario)



Estación Gobernación O<sub>3</sub> (Octohorario)



Figura 22. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, SO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> en Manizales durante el período de análisis

Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

## 5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS

### 5.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz

Durante el año 2022 se realizó un seguimiento de los diferentes reportes semanales que son generados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) a través de su plataforma en línea, permitiendo confirmar algunos días con actividad y emisiones atmosféricas de esta fuente puntual natural asociadas con ceniza volcánica y SO<sub>2</sub>. La Tabla 9 presenta un resumen con algunos de los días que tuvieron alturas significativas de la columna de gases emitidos (superiores a los 1400 metros). De estos días se destaca que el 80% de los reportes presentaron predominancia de vientos hacia el occidente y/o noroccidente, ubicación de Manizales, generando una posible afectación a la calidad del aire por esta fuente en la ciudad. El segundo semestre del año (julio a diciembre) fue el periodo con mayor actividad volcánica registrada, con valores de altura de gases por encima de 1700 m y un promedio por encima de 2000 m.

El efecto de esta columna de gases fue notorio para algunas concentraciones de cada mes bajo condiciones que favorecen el transporte a mesoescala de contaminantes, como sucedió por ejemplo el 03 de febrero, cuyos registros de concentraciones diarias de PM<sub>2,5</sub> y SO<sub>2</sub> fueron de 24.1 µg/m<sup>3</sup> y 8.8 µg/m<sup>3</sup> respectivamente, caso similar al ocurrido el día 11 de abril que registró concentraciones de 22.9 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>2,5</sub> y 7.1 µg/m<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub>.

**Tabla 9. Resumen de emisiones volcánicas significativas (altura de la columna de gases superiores a los 1400 m), con posible afectación en concentraciones diarias de PM<sub>2,5</sub> – Automático y SO<sub>2</sub> en la estación Gobernación (SGC, 2022)**

Fecha (dd-mm)	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento	PM <sub>2,5</sub> – Automático (µg/m <sup>3</sup> )	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
3-ene	1781	Suroriente	13.0	7.4
8-ene	1650	Suroriente	17.7	9.3
17-ene	1523	Suroriente - Nororiente	15.5	7.7
24-ene	2196	Occidente - Suroccidente	19.1	6.9
26-ene	1800	Suroriente - Oriente	19.3	7.3
3-feb	2518	Suroriente - Occidente	24.1	8.8
8-feb	2426	Noroccidente	15.6	4.1
19-feb	2094	Oriente	9.1	4.1
23-feb	2916	Variable	21.3	6.3
3-mar	1870	Occidente - Noroccidente	17.5	5.6
13-mar	2226	Nororiente - Suroriente	13.3	5.8
17-mar	2000	Occidente - Noroccidente	13.9	5
26-mar	1490	Occidente - Noroccidente	17.7	6.3
31-mar	2000	Nororiente - Noroccidente	16.8	6.1
11-abr	3258	Occidente	22.9	7.1
15-abr	2994	Occidente	17.4	8.4
24-abr	2333	Nororiente - Suroccidente	8.5	6.1
3-may	2126	Occidente - Suroccidente	12.5	7.9
9-may	2932	Noroccidente	9.7	7.7
10-may	3022	Noroccidente - Occidente	10.8	8.1
21-may	2164	Noroccidente	17.5	--*
22-may	2164	Occidente - Noroccidente	13.7	--
24-may	1887	Occidente - Noroccidente	15.7	--

Fecha (dd-mm)	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento	PM <sub>2.5</sub> – Automático (µg/m <sup>3</sup> )	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
6-jun	2000	Occidente - Noroccidente	9.4	--
10-jun	1800	Noroccidente	13.7	--
11-jun	1800	Occidente - Noroccidente	15.4	--
20-jun	2474	Occidente - Noroccidente	15.0	--
26-jun	2396	Occidente - Noroccidente	6.1	--
2-jul	1889	Occidente	15.6	--
7-jul	2212	Occidente	18.1	--
14-jul	1704	Occidente - Noroccidente	11.2	--
23-jul	2700	Occidente - Noroccidente	9.7	--
30-jul	2431	Occidente - Noroccidente	17.2	--
5-ago	2000	Occidente - Noroccidente	15.8	5.9
12-ago	2700	Occidente - Noroccidente	16.4	3.5
18-ago	3200	Occidente - Noroccidente - Suroccidente	19.4	--
25-ago	2000	Occidente - Noroccidente	19.5	--
2-sep	1900	Occidente - Noroccidente	14.3	--
10-sep	2400	Occidente - Noroccidente - Suroccidente	14.6	--
13-sep	2300	Occidente - Noroccidente	14.6	--
26-sep	2400	Occidente - Noroccidente	15.9	--
28-sep	2500	Norte - Noroccidente - Nororient	19.6	--
05-Oct	2900	Noroccidente - Suroccidente	15.4	4.9
13-Oct	2200	Noroccidente	16.0	--
22-Oct	2500	Noroccidente	12.4	2.8
31-Oct	1800	Suroccidente	11.7	5.9
04-Nov	2200	Noroccidente - Suroccidente	8.0	3.1
08-Nov	1800	Noroccidente - Suroccidente	11.7	3.5
16-Nov	1800	Noroccidente - Suroccidente	16.8	4.3
25-Nov	2000	Suroccidente	15.2	6.1
02-Dic	2900	Suroccidente	12.3	4.6
07-Dic	2000	Occidente	20.4	6.2
13-Dic	1700	Suroccidente - Noroccidente	16.2	--
21-Dic	2700	Suroccidente - Noroccidente	20.2	5.1
31-Dic	1700	Occidental	15.2	4.6

\*-- Ausencia de datos

## 5.2. Resultados de monitoreo de material particulado para los días sin carro y motocicleta del 2022

Se presentan en esta sección los resultados del monitoreo de material particulado realizado en Manizales durante las jornadas de día sin carro y motocicleta, llevados a cabo los días: 03 de junio (obligatorio), 22 de septiembre (voluntario) y 9 de noviembre (voluntario) de 2022. Estas actividades fueron realizadas en la jornada horaria entre las 6:00 a.m. y las 8:00 p.m. El seguimiento de material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) se realizó en todos los equipos del SVCA, tantos equipos manuales (muestreadores de partículas Hi-Vol y partisoles Low-Vol) como equipos automáticos (nefelómetros). Los resultados se muestran de forma comparativa analizando las diferencias entre las concentraciones promedio obtenidas en el día sin carro con las concentraciones promedio del año 2022 tomando como base comparativa la jornada horaria del día completo (entre las 12:00 a.m. y 11:59 p.m.).

### 5.2.1. Material particulado - Equipos manuales

En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de las concentraciones promedio diarias de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  – Manuales del día sin carro y motocicleta y la base comparativa de 2022. Las concentraciones de  $PM_{10}$  para el día sin carro se encontraron en un rango de  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (promedio registrado en Nubia el 9 de noviembre) y  $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (promedio registrado en Milán el 22 de septiembre), mientras que las concentraciones promedio del año 2022 se encontraron entre  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (promedio registrado en Nubia) y  $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (promedio registrado en Milán). De lo anterior, se destaca que Nubia y Milán se mantiene como las estaciones de menor y mayor contaminación por material particulado relacionado directamente por el tipo de actividades desarrolladas en sus inmediaciones (ver Tabla 1).

Se observó que las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  obtenidas en el día sin carro y motocicleta del 3 de junio (día obligatorio) y 9 de noviembre (día voluntario) disminuyeron en todas las estaciones de monitoreo con respecto a la concentración promedio del año 2022, excepto en la estación Palogrande. Las disminuciones obtenidas se atribuyen en mayor medida a las altas precipitaciones ocurridas en dichos días y en menor medida a la disminución en la circulación de vehículos. Las precipitaciones ocurridas en los días citados fueron de 5.5 mm y 19.2 mm (según los registros de la estación Hospital de Caldas) respectivamente, estas estuvieron por encima del promedio diario del año 2022 (5.2 mm en esta misma estación). Como se ha mencionado anteriormente, las lluvias pueden generar un efecto de lavado atmosférico y, en consecuencia, una disminución en la concentración de contaminantes como el material particulado. En el caso del aumento obtenido en la estación Palogrande (6% el 3 de junio), este valor se encuentra dentro del rango de la desviación estándar típica de los equipos Hi-Vol (entre  $4$  a  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  - ver Tabla 3 para más información) por lo cual puede considerarse un resultado poco representativo.

Por el contrario, el día sin carro y motocicleta voluntario del 22 de septiembre presentó mayores concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  respecto al promedio del año 2022, si bien este día se registró una baja precipitación (2 mm - estación Hospital de Caldas) posiblemente se obtuvo una mayor circulación de vehículos de transporte público. Esto último, teniendo en cuenta que en dicho día las empresas de transporte público pueden poner en circulación un porcentaje mayor de la flota vehicular a la habitual para suplir la posible demanda del servicio, flota vehicular que utiliza predominantemente diésel como combustible y el cual tiene un aporte significativo (>50%) en contaminantes como  $PM_{10}$  y  $NO_x$  según lo reportado en el IEA-2017 (Unal – Corpocaldas, 2019a). Adicionalmente, al ser un día no obligatorio se observó que la actividad vehicular de particulares en la ciudad se mantuvo similar a los demás días.

**Tabla 10. Comparativo de las concentraciones promedio de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> – Manual (µg/m<sup>3</sup>) del día sin carro y su variación porcentual con respecto al año 2022**

Estación	Día sin carro obligatorio 03 – Jun		Día sin carro voluntario 22 – Sept		Día sin carro voluntario 9 – Nov		Concentración promedio año 2022
<b>PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>							
Gobernación	22	1.7%	25	11.9%	16	28.6%	22
Liceo	19	32.1%	36	29.4%	20	28.5%	28
Milán	27	12.6%	44	43.2%	24	22.4%	31
Nubia	16	11.0%	19	5.8%	14	22.2%	18
Palogrande	20	5.9%	26	38.1%	15	20.8%	19
Católica	18	7.6%	24	23.5%	18	7.6%	19
<b>PM<sub>2.5</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>							
Gobernación	12	15.1%	19	34.9%	7	50.6%	14

\*Los valores porcentuales denotados con la flecha verde o roja indican la reducción o aumento respectivamente de la concentración obtenida en el día sin carro en comparación con el periodo base de comparación.

### 5.2.2. Material particulado - Equipos automáticos

En la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos para las concentraciones promedio horarias de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> – Automáticos en las estaciones Gobernación y Liceo para los días sin carro y motocicleta, y su comparación con el año 2022. Las comparaciones obtenidas en la estación Gobernación muestran que tanto PM<sub>10</sub> como PM<sub>2.5</sub> presentaron incrementos en la concentración registrada para los días sin carro del 3 de junio y 22 de septiembre con valores porcentuales entre el 24.9 y 83.4 %, en comparación con el 2022. Los incrementos tanto en PM<sub>10</sub> como PM<sub>2.5</sub> obtenidos en Gobernación durante dichos días se relacionan posiblemente en mayor medida con la influencia de la actividad industrial que hay en inmediaciones de la estación, seguido al aumento de la flota de vehículos de transporte público que se requieren para suplir la demanda de transporte en la ciudad. De manera similar en el caso de la estación Liceo, se obtuvo un aumento en PM<sub>10</sub> (45%) y PM<sub>2.5</sub> (27%).

En la Figura 21 se presenta el perfil temporal de concentraciones promedio horarias para diferentes días de la semana obtenido durante 2022 y su comparación con el promedio horario del día obligatorio sin carro del 03 de junio. Se observan picos en las horas de la madrugada principalmente, debido posiblemente a actividad industrial que puede generar pulsos o incrementos de concentración súbitos que los nefelómetros detectan en intervalos incluso inferiores al promedio horario de monitoreo, algo que los equipos manuales pueden pasar por alto debido a la rapidez en el cambio de concentración en aire ambiente. Este comportamiento podría explicar las diferencias en el comportamiento de los equipos manuales en Gobernación en comparación con los equipos automáticos de PM.

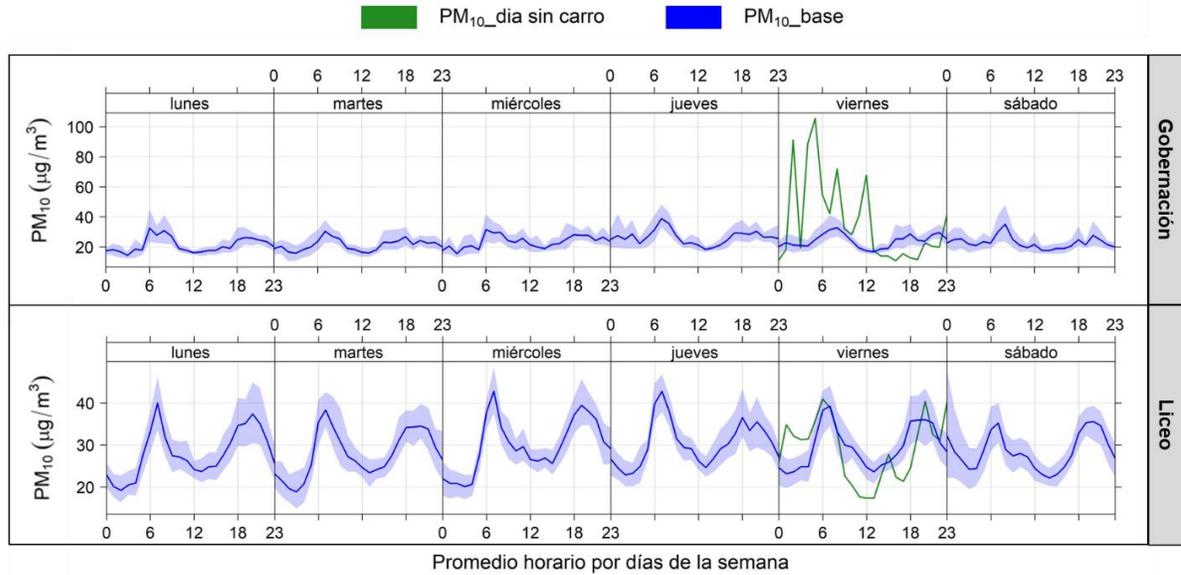
En el caso de Liceo en PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> para el día obligatorio del 03 de junio se observaron disminuciones alrededor del 0.3% y 21% respectivamente, en concordancia con el comportamiento registrado para la mayoría de los equipos manuales. Sin embargo, se destaca que la diferencia obtenida en el caso de Liceo se encuentra dentro de la desviación estándar típica del equipo reportada con un valor promedio para 2022 alrededor de 7.8 µg/m<sup>3</sup> y 3.7 µg/m<sup>3</sup> respectivamente (como fue descrito previamente en la Tabla 4 y Tabla 5); por lo tanto, su representatividad podría considerarse baja.

Las reducciones obtenidas en el día sin carro del 9 de noviembre tanto en los equipos manuales como los automáticos se relacionan en mayor medida a las precipitaciones presentadas, que registraron un valor acumulado diario de 1.8 mm, que al compararlos con el 03 de junio con 0 mm y el 22 de septiembre con 1.2 mm sugieren un efecto de lavado atmosférico en la ciudad. Es por esto por lo que el análisis en el efecto de la implementación de los días sin carro y motocicleta (obligatorio y/o voluntario) sobre el efecto en la reducción de la contaminación del aire por PM, requiere una revisión detallada no solo del comportamiento de los días sin carro históricos realizados en Manizales, sino también del efecto de otras variables de importancia como la precipitación.

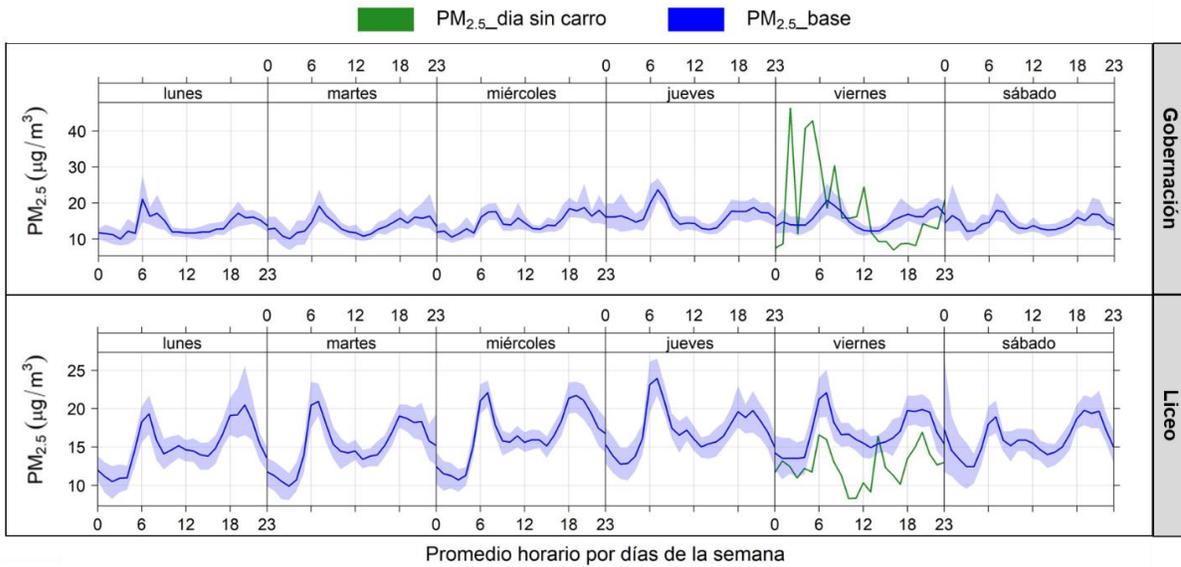
**Tabla 11. Concentraciones promedio de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> – Automático (µg/m<sup>3</sup>) de los días sin carro y su variación porcentual con respecto al año 2022**

Estación	Día sin carro obligatorio 03 – Jun		Día sin carro voluntario 22 – Sept		Día sin carro voluntario 9 – Nov		Concentración promedio año 2022
<b>PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>							
Gobernación	36.4	↑ 44.8%	46.1	↑ 83.4 %	25.2	↓ 19.4%	25.2
Liceo	29.0	→ 0.3 %	42.2	↑ 45.5%	29.1	↓ 52.5%	29.1
<b>PM<sub>2.5</sub> (µg/m<sup>3</sup> estándar)</b>							
Gobernación	18.1	↑ 24.9%	19.4	↑ 33.8 %	8.7	↓ 40.0%	14.5
Liceo	12.5	↓ 21.3%	20.4	↑ 27.3 %	8.6	↓ 46.5%	16.1

\*Los valores porcentuales denotados con la flecha verde indican reducción, naranja indican sin cambio o cambio poco significativo y roja indican aumento de la concentración obtenida en el día sin carro en comparación con el año 2022



(a)



(b)

**Figura 23. Evolución temporal de concentraciones promedio horaria de los días de la semana de los equipos PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> – Automáticos durante el año 2022 y su comparativo con el día sin carro obligatorio del 03 de junio: (a) PM<sub>10</sub> (b) PM<sub>2.5</sub>**

## 6. REFERENCIAS

- Carslaw, D,C, y Ropkins K., 2015, The openair manual – opensource tools for analysing air pollution data, Manual for version 1,1-4, King’s college London,
- Cuesta A., Wahl M., Acosta J., García J., Aristizábal B,H, 2020, Mixing layer height and slope wind oscillation: Factor that control ambient air SO<sub>2</sub> in a tropical mountain city, *Sustainable cities and society*, Vol 52, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101852>,
- G, Loosmore y R, Cederwall, 2004, 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
- 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,
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), 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,
- M, Akyüz y H, Cabuk, 2009, Meteorological variations of PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub> concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak, *Journal of Hazardous Materials*, vol, 170, pp, 13-21,
- Organización Mundial de la Salud – OMS, 2018, [En línea] Disponible en: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Organización Mundial de la Salud – OMS, 2022, WHO global air quality guidelines, Particulate matter (PM<sub>2,5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide,
- Our World in Data, “Indoor Air Pollution” Hannah Ritchie and Max Roser, 11 2019, [En línea], Disponible en: <https://ourworldindata.org/indoor-air-pollution>, [Último acceso: 23/10/2020],
- Servicio geológico colombiano (SGC), 2022, Boletín semanal de actividad del volcán Nevado del Ruiz, Manizales, Caldas, Dirección de geo amenazas,
- Steer Davies Gleave, (2017), Manizales plan maestro de movilidad, Manizales: Gaceta del concejo de Manizales, Recuperado el 06 de 17 de 2019, de <http://concejodemanzales.gov.co/wp-content/uploads/2018/06/GACETA-188-DE-2018-PLAN-MAESTRO-DE-MOVILIDAD-DEFINITIVA.pdf>
- Unal – Corpocaldas, 2019a, Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en la ciudad de Manizales año base 2017, Boletín de resultados, Disponible en: <http://cdiac,manizales,unal,edu,co/inicio/publicaciones.php>
- Unal – Corpocaldas, 2019b, Boletín CA Manizales año 2019, Disponible en: [http://cdiac,manizales,unal,edu,co/inicio/publicaciones/Bolet%C3%ADn\\_CA\\_Manizales\\_a%C3%B1o\\_2020.pdf](http://cdiac,manizales,unal,edu,co/inicio/publicaciones/Bolet%C3%ADn_CA_Manizales_a%C3%B1o_2020.pdf)
- Unal – Corpocaldas, 2020, Boletín CA Manizales año 2020, Disponible en: [https://cdiac,manizales,unal,edu,co/publicaciones/Boletin\\_calidad\\_aire\\_Manizales\\_a%C3%B1o\\_2019, pdf](https://cdiac,manizales,unal,edu,co/publicaciones/Boletin_calidad_aire_Manizales_a%C3%B1o_2019, pdf)