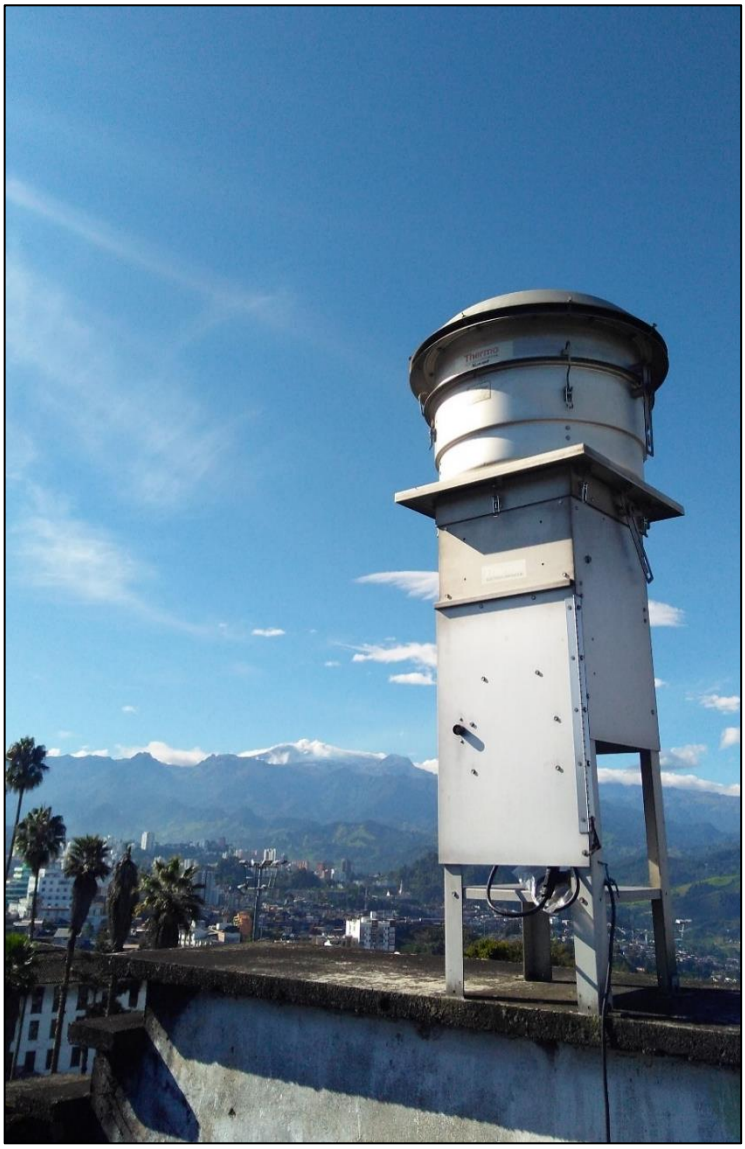
SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS

Corpocaldas

Corporación Autónoma Regional de Caldas

BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES AÑO 2023



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

Estación Liceo PM_{10} - Equipo Hi-Vol Manual
Terraza Instituto Educativo Liceo Isabel La Católica
Centro / Manizales

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Corpocaldas Corporación Autónoma Regional de Caldas

*Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

**Subdirección de Evaluación y Seguimiento Ambiental CORPOCALDAS

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_{10} Y $PM_{2.5}$.....10

3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales 10
3.2. Equipos manuales: Comparación con la norma anual.....15
3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales 16
3.4. Índice de calidad del aire (ICA) para PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el SVCA de Manizales.....19

4. RESULTADOS DE MONITOREO PARA GASES.....25

4.1. Monitoreo de monóxido de carbono (CO).....25
4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO_2) 27
4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O_3).....29
4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O_3, SO_2 y CO en el SVCA de Manizales 32

5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS 34

5.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz 34
5.2. Resultados de monitoreo de material particulado para los días sin carro y motocicleta del 2023 35
5.2.1. Material particulado – Equipos manuales.....36
5.2.2. Material particulado – Equipos automáticos.....37

6. REFERENCIAS.....39

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

Para el 2019 la contaminación atmosférica correspondió al tercer factor de riesgo para la salud humana, después de la hipertensión y fumar (Our World in data, 2021). 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 actualmente son: 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 cómo 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 mitigar la contaminación en 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 2023 en la ciudad de Manizales se contó 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 $PM_{2.5}$ (el equipo está fuera de operación desde diciembre de 2023 por fallas técnicas) 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, se cuenta con equipos automáticos para el seguimiento de PM_{10} y $PM_{2.5}$, así como los gases (O_3, SO_2 y CO), monitoreo que permite 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, entre otros, 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 2023	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación (Gob)	CU, SC – MTV, MAI	PM_{10} – Manual [a]	Corpocaldas	2009	Operación óptima.	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2155
		$PM_{2.5}$ - Manual [a]	Corpocaldas	2009	Operación detenida en diciembre por fallas del equipo		
		SO_2 - Automático	UN	2019	Operación óptima.		
		O_3 - Automático	UN	2018	Operación óptima.		
		CO - Automático	Corpocaldas	2018	Operación óptima.		
		PM_{10} y $PM_{2.5}$ - Automático [b]	Corpocaldas	2019	Operación óptima.		
Palogrande (Pal)	ZC, SR – MTV, SAI	PM_{10} - Manual [c]	UN	2009	Operación óptima.	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
Nubia (Nub)	ZSE, SR – MTV, MAI	PM_{10} - Manual [c]	UN	2017	Operación óptima.	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo (Lic)	CU, SC – ATV, PAI	PM_{10} - Manual [c]	Corpocaldas	2010	Operación óptima.	N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58"	2156
		PM_{10} y $PM_{2.5}$ - Automático [b]	Corpocaldas	2019	Operación óptima.		
Milán (Mil)	ZC, SR – MTV, AAI	PM_{10} - Manual [c]	Corpocaldas	2012	Operación óptima.	N 5° 2' 48.5" W 75° 28' 48.68"	2188
Católica (UCM)	CU, SC – ATV, SAI	PM_{10} - Manual [c]	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* ***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.*

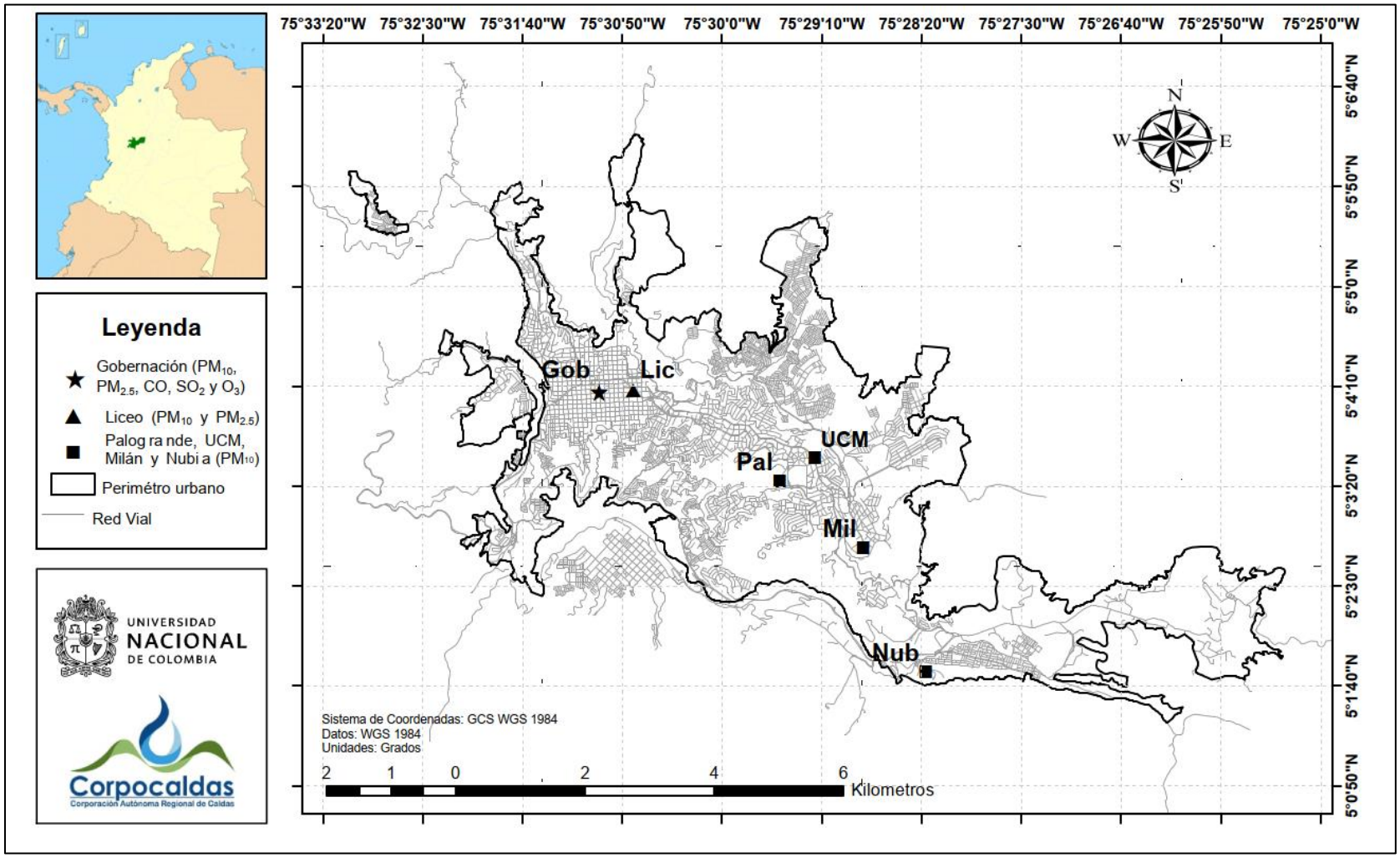


Figura 1. Mapa con ubicación de las estaciones de calidad del aire pertenecientes al SVCA de Manizales

2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

Las condiciones climáticas juegan un papel importante en el transporte, acumulación y transformación de contaminantes en el aire. Algunos ejemplos de variables meteorológicas como los vientos y la radiación solar afectan los niveles y el destino de contaminantes atmosféricos primarios y secundarios. El ozono troposférico (O_3) es un claro caso de un contaminante que depende 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. De otra parte, la humedad relativa, propicia un incremento 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 (Loosmore y Cederwall, 2004).

Otro ejemplo se da en variables como la precipitación, la cual 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 influencia de los vientos en la dispersión de contaminantes (a escala local, regional y sinóptica), que 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. A partir de las consideraciones descritas, se destaca la importancia de estudiar la calidad del aire teniendo en cuenta el comportamiento meteorológico.

La Tabla 2 presenta los consolidados mensuales de las variables meteorológicas en las estaciones próximas a las estaciones de calidad del aire durante lo corrido del 2023. Las estaciones meteorológicas corresponden a Gobernación, Liceo, Posgrados, Milán planta Niza y Nubia. Con la información obtenida en estas estaciones, se estiman las concentraciones a condiciones estándar (25°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.

Durante el período de análisis, se observa que el comportamiento de las variables a lo largo de la ciudad es estable. Se evidencia el patrón bimodal de lluvias característico en la ciudad, donde marzo – mayo y octubre – diciembre se caracterizan por ser temporadas de altas precipitaciones, mientras que enero y junio marcan el comienzo de la temporada de bajas precipitaciones, no obstante, es importante resaltar la ocurrencia del fenómeno del niño en el país. La estación Gobernación registró la mayor precipitación mensual con un acumulado de 358.4 mm en marzo, mientras que La Nubia registró el menor registro mensual con 17.6 mm en julio. Para la radiación solar se identifica un comportamiento inverso a la precipitación con promedios mensuales por encima de 215 W/m^2 en toda la ciudad, y máximos mensuales de hasta 333.2 W/m^2 como en Nubia durante febrero.

Para el caso de la temperatura ambiente, se observa un comportamiento homogéneo en la ciudad obteniéndose registros entre 15.9 en enero y 19.8 °C en septiembre; observándose además un aumento progresivo de las temperaturas promedio en la ciudad ocasionado por el fenómeno del niño. 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 marzo con un valor de 91.2 % en la estación Nubia y mínimos mensuales de 63% durante agosto.

Se destaca además que la ciudad cuenta con patrones de viento estables, identificados por el fenómeno orográfico 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 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/m²]
Gobernación							
Enero	16.1	1.04	248.0	586.8	82.7	176.4	297.2
Febrero	17.3	1.13	260.2	586.1	79.4	101.6	333.9
Marzo	16.1	0.99	245.8	587.1	86.9	358.4	240.3
Abril	17.0	1.00	262.2	586.9	84.5	179.4	287.8
Mayo	17.9	0.95	258.3	587.1	83.4	207.6	289.6
Junio	18.0	0.90	274.2	587.2	80.5	58.0	290.0
Julio	18.2	0.92	270.8	587.2	79.6	58.4	300.3
Agosto	18.1	0.93	257.8	587.2	78.3	70.4	311.7
Septiembre	18.5	1.08	245.1	586.6	77.1	30.0	285.8
Octubre	---	---	---	---	---	---	---
Noviembre	---	---	---	---	---	---	---
Diciembre	---	---	---	---	---	---	---
Liceo							
Enero	16.1	0.53	260.2	589.8	75.6	144.2	246.7
Febrero	17.3	0.49	311.1	588.6	70.5	85.6	274.1
Marzo	15.8	0.55	220.7	590.4	80.3	235.4	208.7
Abril	16.9	0.44	302.8	589.3	77.1	159.0	254.8
Mayo	17.8	0.50	316.3	589.3	75.8	164.0	258.0
Junio	18.1	0.52	---*	589.3	71.8	42.8	273.4
Julio	18.7	0.56	316.2	589.3	63.0	40.8	286.5
Agosto	18.5	0.68	289.1	589.3	66.4	70.4	301.8
Septiembre	18.6	0.74	257.0	588.8	68.3	35.6	288.7
Octubre	17.2	0.42	181.1	598.6	76.4	104	206.3
Noviembre	17.6	0.16	232.1	588.7	72.6	14.6	270.7
Diciembre	17.9	0.36	173.3	587.9	69.8	85.0	219.6
Posgrados							
Enero	15.9	0.32	342.3	594.7	86.2	127.0	262.2
Febrero	17.2	0.39	340.8	593.4	83.3	70.2	300.2
Marzo	16.2	0.19	350.8	594.8	89.3	227.2	218.1
Abril	17.0	0.19	345.5	593.9	86.8	126.8	274.4
Mayo	17.8	0.11	350.1	593.9	86.3	119.0	265.6

Mes	Temperatura del Aire [°C]	Velocidad de Viento [m/s]	Dirección Viento [°]	Presión Atmosférica [mm Hg]	Humedad Relativa [%]	Precipitación Acumulada [mm]	Radiación Solar* [W/m²]
Espacio en blanco							
Junio	17.9	0.10	350.4	593.9	83.4	29.8	280.8
Julio	18.1	0.06	345.4	594.5	82.2	33.4	271.5
Agosto	18.0	0.05	354.8	594.5	80.2	49.6	293.1
Septiembre	18.2	0.09	326.7	593.9	79.0	50.6	330.2
Octubre	16.8	0.02	343.4	594.5	87.6	213.4	240.5
Noviembre	17.5	0.12	310.8	593.6	86.8	179.6	286.1
Diciembre	17.9	0.03	311.0	593.3	84.9	86.0	318.0
Milán planta Niza							
Enero	17.0	0.07	347.7	584.4	74.3	157.2	277.9
Febrero	18.4	0.06	330.2	582.9	76.2	78.6	302.0
Marzo	17.0	0.04	303.7	584.7	69.1	308.4	215.4
Abril	17.8	0.03	345.6	584.0	71.0	135.8	257.8
Mayo	18.7	0.02	336.4	583.8	73.0	141.6	254.0
Junio	19.2	0.03	317.4	583.6	74.3	33.4	269.6
Julio	19.3	0.03	290.6	583.6	74	30.2	256.6
Agosto	19.4	---	---	583.4	84.2	68.6	---
Septiembre	19.8	---	---	582.8	95.1	41.2	---
Octubre	18.3	---	32.4	593.8	75.0	241.8	---
Noviembre	18.8	0.95	32.3	593.2	75.3	198.8	262.2
Diciembre	19.2	---	---	592.8	73.7	121.8	324.2
La Nubia							
Enero	16.7	0.88	172.1	597.0	87.6	111.0	298.3
Febrero	17.8	0.88	182.7	595.7	84.9	63.2	333.2
Marzo	16.9	0.65	243.4	597.0	91.2	282.8	248.0
Abril	17.7	0.75	217.4	596.2	88.7	97.4	290.5
Mayo	18.5	0.80	183.9	596.1	88.1	71.4	288.0
Junio	18.6	0.83	163.7	596.2	85.5	24.0	288.1
Julio	18.7	0.84	189.2	596.2	84.6	17.6	284.4
Agosto	18.5	0.89	187.1	596.3	83.6	77.2	302.9
Septiembre	18.7	1.88	39.8	595.7	83.7	34.4	325.1
Octubre	17.6	---	32.8	593.7	94.4	173.8	---
Noviembre	18.2	1.1	157.4	595.7	88.4	102.8	---
Diciembre	18.5	1.1	145.3	595.4	86.7	57.4	---

* ---: Indica ausencia de datos, para algunos casos se cuenta con un número bajo de datos para estimación de promedios adecuadamente, es decir, días de monitoreo menor a 15 días para un mes. En el caso de Gobernación, se presentó un problema en el sistema de comunicación de datos entre octubre y diciembre.

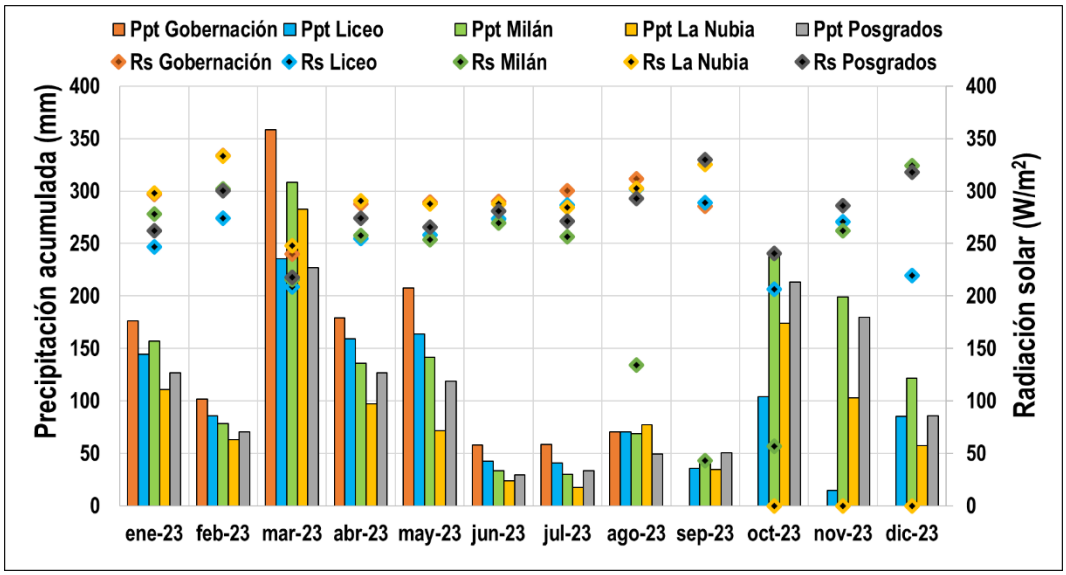


Figura 2. Precipitación mensual acumulada (Ppt) y promedio mensual de radiación solar (Rs) durante el período de análisis

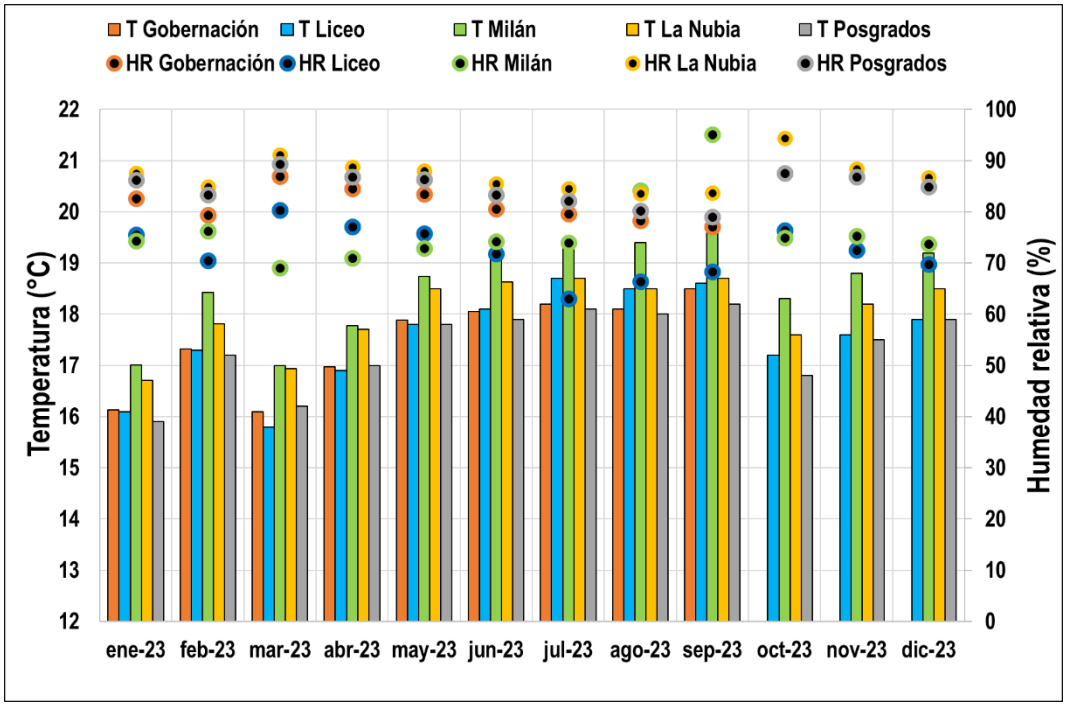


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire (T) y humedad relativa (HR) durante el período de análisis

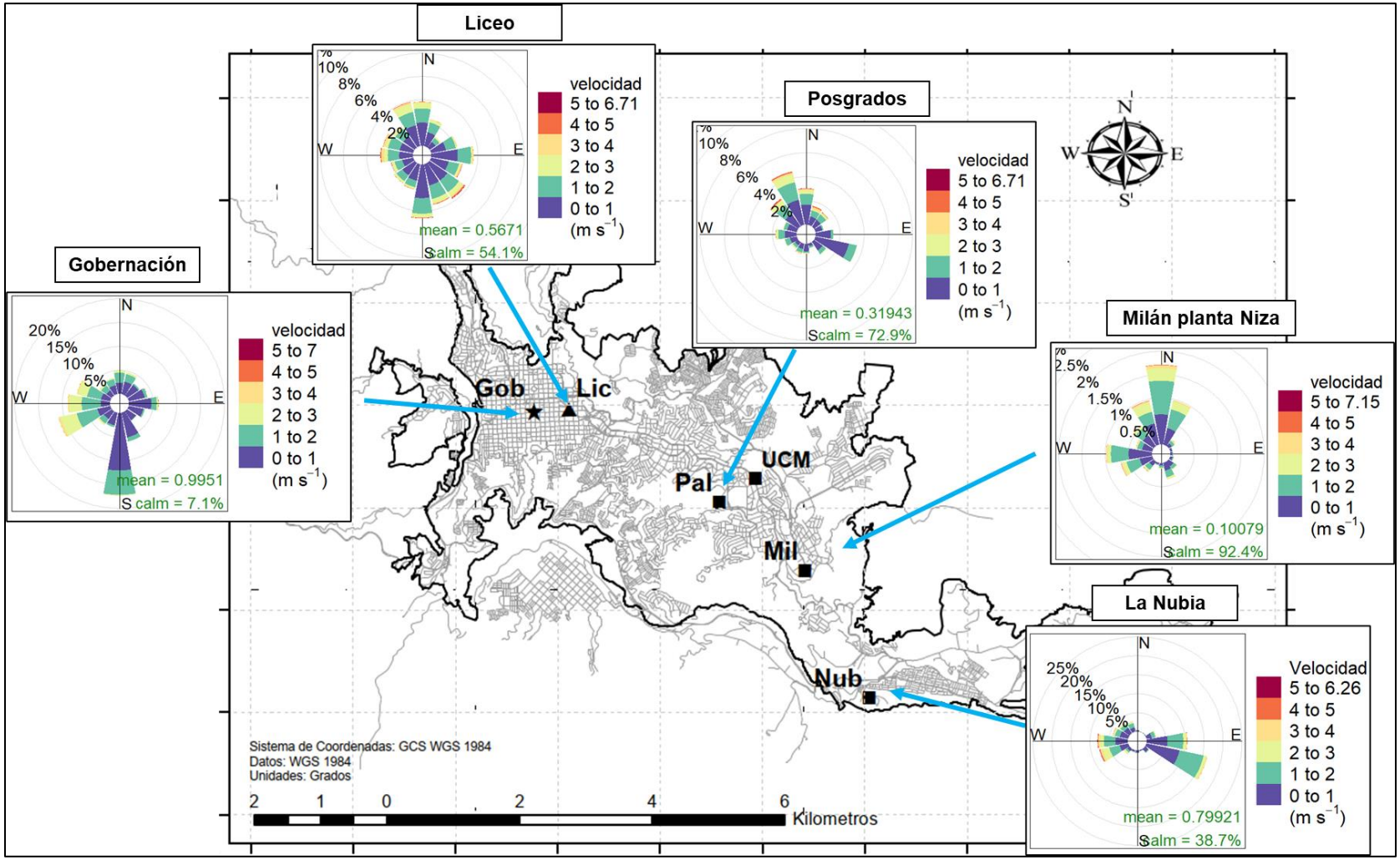


Figura 4. Rosas de viento en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el período de análisis

3. RESULTADOS DE MONITOREO PARA PM_{10} y $PM_{2.5}$

3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales

La Tabla 3 presenta los estadísticos descriptivos mensuales para las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Manuales obtenidos durante el 2023. Se presenta 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, para el 2023, las estaciones de Milán y Liceo registraron las concentraciones promedio anuales más altas de PM_{10} con valores de 33 ± 1.76 µg/m^3 y 30 ± 1.41 µg/m^3 respectivamente; seguidos por, Católica con 20 ± 1.52 µg/m^3, Nubia con 20 ± 0.86 µg/m^3, Palogrande con 19 ± 0.93 µg/m^3, por último, Gobernación con 17 ± 1.62 µg/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 2022, registrando los valores más altos de PM_{10} en Milán y Liceo con promedios mensuales por encima de 30 µg/m^3. Cabe resaltar que el 95% de los meses monitoreados las estaciones cumplieron con el porcentaje de datos válidos establecido en 75%, según el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica (MAVDT, 2010), perdiéndose pocas o ninguna muestra durante los meses del presente año.

Se identificó que Milán presentó los mayores niveles de concentración de PM_{10} con el mayor promedio aritmético mensual reportado en febrero con 40 ± 0.52 µg/m^3 (desv. std = 9 µg/m^3), y un máximo diario de 53 µg/m^3 el martes 28 de febrero. 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 Gobernación presentó los menores niveles de concentración con promedios mensuales mínimos en julio y agosto ambos con un valor de 14 µg/m^3 ± 1.12 µg/m^3 (desv. std = 4 µg/m^3), valores que se pueden relacionar con los fenómenos de precipitación en la ciudad. Al comparar los registros con el mismo periodo del año 2022, no se observó un cambio significativo en los promedios mensuales con variaciones que no superaron el 18%.

En lo referente al monitoreo de $PM_{2.5}$ en la estación Gobernación, se registró un valor promedio de 12 ± 1.18 µg/m^3 (desv. std = 4 µg/m^3). Noviembre y febrero presentaron el menor y mayor nivel de concentración mensual, ambos con promedios de 9 y 14 µg/m^3 respectivamente; este último relacionado con bajas precipitaciones en el mes. Para el caso del máximo promedio diario, éste fue registrado el lunes 27 de marzo con un valor de 27 µg/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). Finalmente, se aclara que el equipo presentó fallas de operación a finales de noviembre imposibilitando obtener información de este contaminante en diciembre del 2023.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio mensuales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Manuales (µg/m³) durante el período de análisis

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Gobernación PM_{10} (µg/m³ estándar)													
Promedio	17	20	20	17	16	15	14	14	16	18	18	22	**17**
Mediana	16	23	18	16	17	15	13	14	16	18	16	18	**16**
Incertidumbre**	1.20	1.20	1.16	1.15	1.12	1.11	1.12	1.12	4.17	2.04	2.01	2.02	**1.62**
Desviación Estándar	4	6	8	5	4	3	4	4	3	6	9	10	**6**
Mínimo	14	8	12	11	7	10	9	7	11	8	9	12	**7**
Máximo	27	25	37	27	21	17	22	20	23	27	45	45	**45**
Percentil 95%	24	25	32	25	21	19	21	19	21	26	33	40	**27**
N° Datos - %DV***	10 - 100	10 - 100	10 - 100	10 - 100	11 - 100	10 - 100	11 - 100	10 - 100	10 - 100	9 - 90	11 - 100	8 – 80	**118 - 95**
Liceo PM_{10} (µg/m³ estándar)													
Promedio	27	32	30	29	29	28	28	27	33	33	31	31	**30**
Mediana	27	32	32	32	29	28	30	26	32	35	28	32	**30**
Incertidumbre	0.53	0.53	0.57	1.1	0.84	0.89	1.2	1.2	2.76	2.78	2.78	2.78	**1.41**
Desviación Estándar	5	7	10	10	6	3	4	5	5	9	6	7	**7**
Mínimo	22	18	16	14	19	21	22	20	25	18	25	22	**14**
Máximo	38	46	46	42	39	32	34	34	43	45	43	38	**46**
Percentil 95%	35	43	44	40	38	32	33	34	41	43	40	38	**42**
N° Datos - %DV	10 - 100	10 - 100	10 - 100	7 - 70	10 - 90	9 - 90	10 - 90	10 - 100	9 - 90	8 - 80	11 - 100	4 - 40	**106 - 86**
Palogrande PM_{10} (µg/m³ estándar)													
Promedio	18	25	20	19	18	16	18	15	21	22	20	18	**19**
Mediana	18	27	16	20	17	17	19	16	22	22	18	18	**18**
Incertidumbre	0.53	0.53	1.06	1.02	0.53	0.86	0.9	0.9	1.23	1.23	1.23	1.23	**0.93**
Desviación Estándar	3	5	10	5	4	3	5	2	5	6	6	4	**6**
Mínimo	14	16	10	9	12	9	10	9	15	13	14	12	**9**
Máximo	22	35	37	27	23	18	26	18	29	34	35	26	**37**
Percentil 95%	21	32	35	25	22	18	25	18	27	30	32	24	**29**
N° Datos - %DV	10 - 100	10 - 100	9 - 90	10 - 100	11 - 100	10 - 100	11 - 100	10 - 100	9 - 100	10 – 100	11 - 100	10 - 100	**119 - 97**
Milán PM_{10} (µg/m³ estándar)													
Promedio	28	40	34	32	34	30	33	33	38	37	30	18	**33**
Mediana	30	43	36	34	33	30	33	35	38	39	29	18	**34**
Incertidumbre	0.52	0.52	0.57	1.01	0.78	0.98	1.02	1.02	3.67	3.67	3.67	3.67	**1.76**
Desviación Estándar	8	9	10	8	6	6	3	7	6	9	5	4	**8**
Mínimo	13	22	18	18	25	18	27	16	28	17	24	12	**13**
Máximo	38	53	46	42	44	36	39	39	48	49	40	26	**53**
Percentil 95%	37	49	46	40	42	36	38	38	46	47	38	39	**45**
N° Datos - %DV	10 - 100	10 - 100	9 - 90	10 - 100	10 - 90	10 - 100	10 - 90	9 - 90	9 - 90	9 - 90	10 - 90	10 - 100	**114 - 93**

Espacio en blanco

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Nubia PM_{10} (µg/m³ estándar)													
Promedio	18	24	21	18	22	16	18	17	23	22	21	21	**20**
Mediana	17	24	23	19	22	16	17	17	23	21	21	21	**19**
Incertidumbre	0.10	0.10	0.14	0.45	0.47	0.58	0.58	0.58	1.83	1.82	1.82	1.82	**0.86**
Desviación Estándar	4	6	9	4	6	3	4	3	4	5	4	4	**5**
Mínimo	12	17	9	10	15	13	14	12	17	14	15	13	**9**
Máximo	25	34	31	25	35	22	21	22	30	31	27	28	**35**
Percentil 95%	24	34	30	23	29	21	21	21	29	30	27	26	**29**
N° Datos - %DV	10 - 100	9 - 90	8 - 80	10 - 100	11 - 100	10 - 100	11 - 100	10 - 100	9 - 90	10 - 100	11 - 100	10 - 100	**117 - 95**
Católica PM_{10} (µg/m³ estándar)													
Promedio	16	26	21	21	19	17	18	17	23	19	19	19	**20**
Mediana	17	27	23	21	20	17	18	17	24	19	18	19	**19**
Incertidumbre	0.80	1.10	0.70	0.89	1.01	0.98	0.94	0.94	2.58	2.79	2.79	2.79	**1.52**
Desviación Estándar	2	6	8	5	3	3	4	3	4	6	5	5	**5**
Mínimo	14	15	11	13	11	10	12	10	16	13	11	11	**10**
Máximo	19	35	34	30	23	21	27	22	29	29	26	27	**35**
Percentil 95%	19	34	33	27	22	20	24	21	28	28	25	26	**29**
N° Datos - %DV	10 - 100	10 - 100	9 - 90	10 - 100	10 - 90	10 - 100	11 - 100	10 - 100	8 - 80	10 - 100	11 - 100	10 - 100	**117 - 95**
Gobernación $PM_{2.5}$ (µg/m³ estándar)													
Promedio	11	14	12	13	12	11	11	10	12	13	9	---	**12**
Mediana	11	15	11	14	12	11	10	10	11	12	9	--	**11**
Incertidumbre	1.17	1.17	1.40	1.21	1.02	1.14	---****	---	---	---	---	--	**1.18**
Desviación Estándar	2	5	6	4	3	2	3	3	2	4	3	--	**4**
Mínimo	9	6	6	5	6	8	6	4	9	7	4	--	**4**
Máximo	15	23	27	19	15	15	16	13	17	20	13	--	**27**
Percentil 95%	14	20	23	19	15	14	15	13	16	19	12	--	**18**
N° Datos - %DV	10 - 100	10 - 100	10 - 100	10 - 100	11 - 100	10 - 100	11 - 100	10 - 100	10 - 100	9 - 90	8 - 70	--	**107 - 86**

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

*** Fuentes de incertidumbre: 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 volumétrico durante el día de monitoreo y para reportar las concentraciones de contaminantes a condiciones estándar.*

**** %DV = Porcentaje de datos válidos.*

***** ---: Indica ausencia de datos. Para el caso del equipo de $PM_{2.5}$ – Manual, se presentan fallas que impiden la verificación metrológica adecuada*

Adicionalmente, se presentan las figuras de evolución temporal de concentraciones diarias obtenidas para PM_{10} (Figura 5) y $PM_{2.5}$ (Figura 6). Se destaca que en ninguna de las estaciones de monitoreo se superó el límite máximo diario para material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) establecido en la Resolución 2254 de 2017 de 75 µg/m³ para PM_{10} y 37 µg/m³ para $PM_{2.5}$ (MADS, 2017).

Por último, la Figura 7 presenta la variación promedio de concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – 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 Gobernación, Liceo y Milán. En el caso de las estaciones Palogrande, Católica y Nubia ubicadas en campus universitarios, se observan mayores niveles de concentración los martes y viernes.

Figura 5. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{10} – Manuales durante el período de análisis

La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM_{10} establecido en la Resolución 2254 de 2017: 75 µg/m³

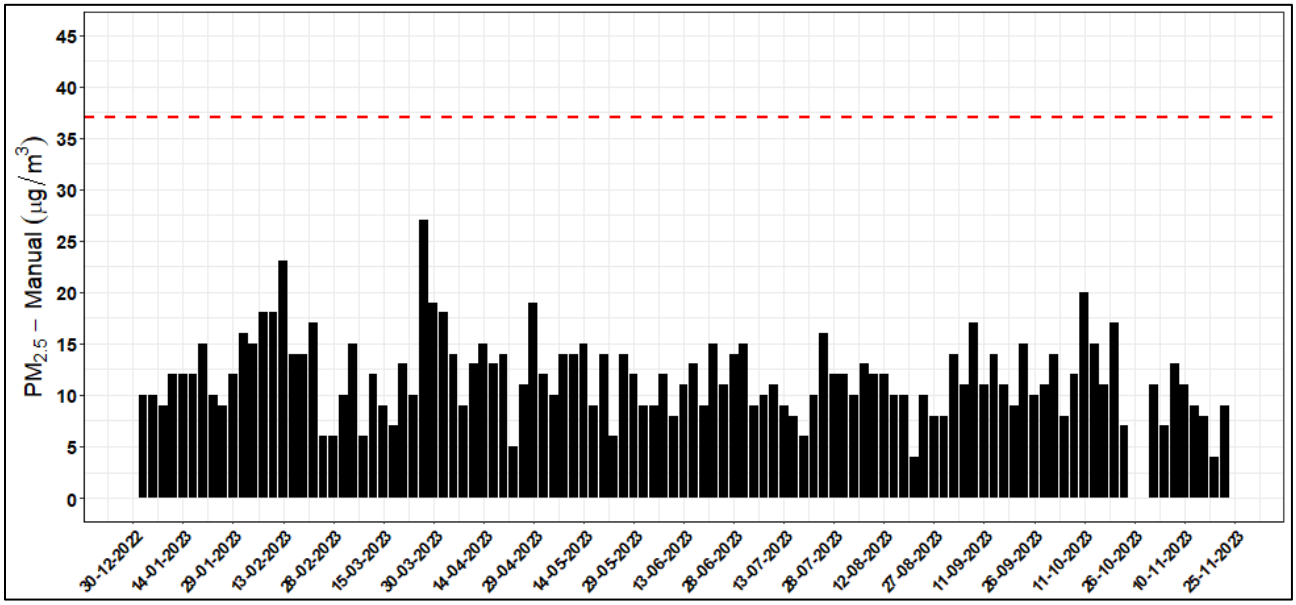


Figura 6. Evolución temporal de concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ – Manual durante el período de análisis

La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de $PM_{2.5}$ establecido en la Resolución 2254 de 2017: 37 µg/m³

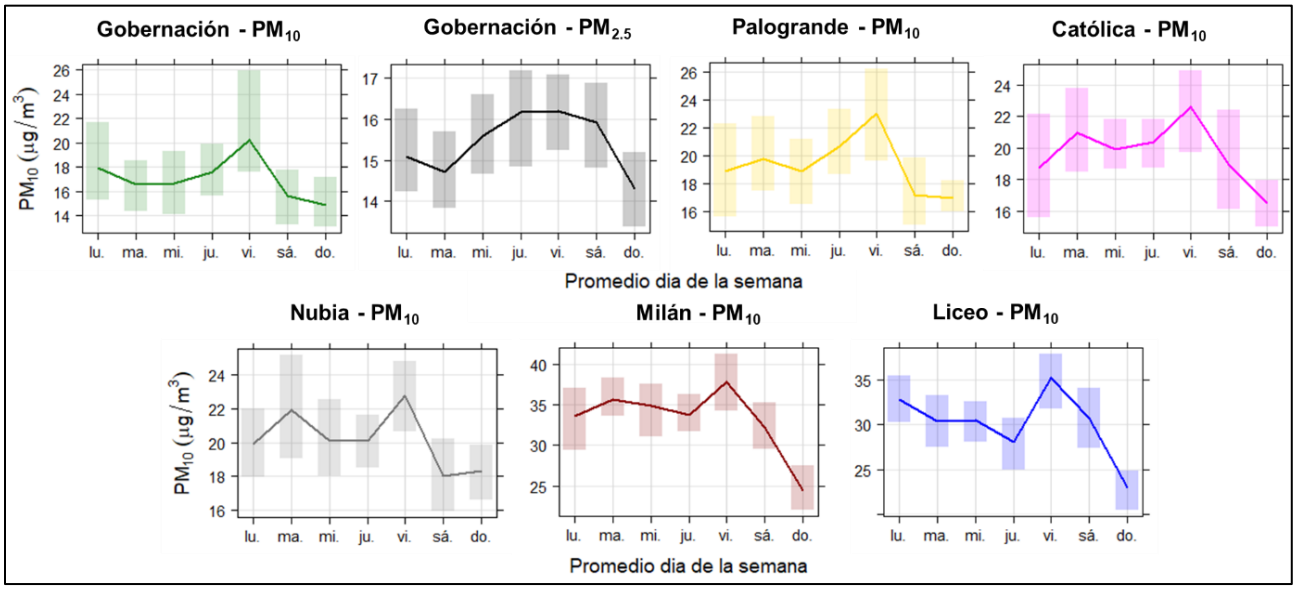


Figura 7. Variación promedio de concentraciones por días de la semana para PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Manuales durante el período de análisis

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

3.2. Equipos manuales: Comparación 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 establecido en la Resolución 2254 de 2017 para PM_{10} (50 µg/m^3) y $PM_{2.5}$ (25 µg/m^3). Se destaca que ninguna de las estaciones superó la normativa anual colombiana. Es importante resaltar 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 µg/m^3 para PM_{10} y 5 µg/m^3 para $PM_{2.5}$ (OMS, 2022).

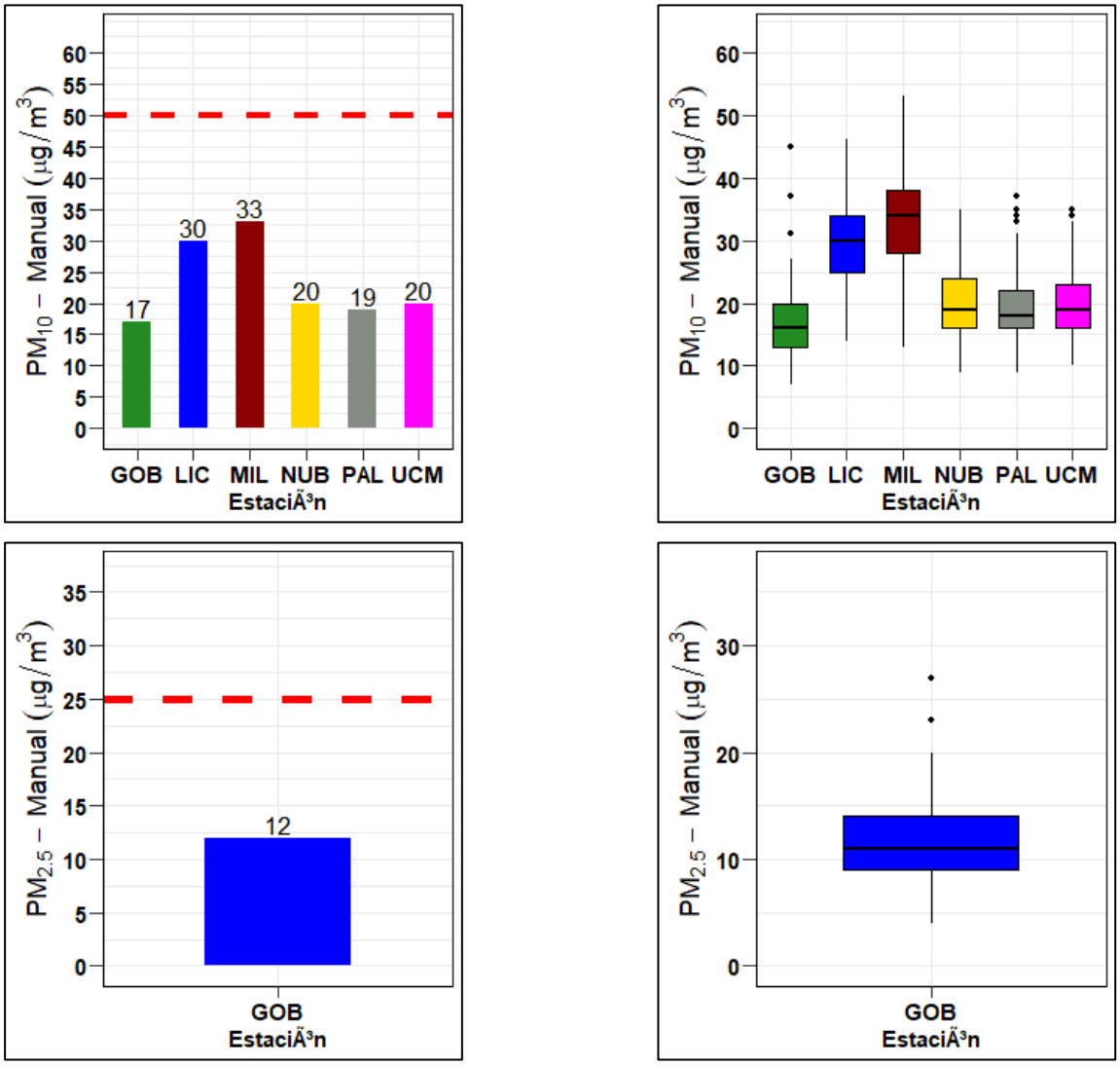


Figura 8. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Manuales durante el período de análisis

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

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

La Tabla 4 presenta los estadísticos descriptivos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos en las estaciones Gobernación y Liceo durante 2023. Se observó que las concentraciones promedio (medianas[1]) de Gobernación para PM_{10} y $PM_{2.5}$ se encontraron alrededor de los 26.8 µg/m^3 (desv. std = 10.1 µg/m^3) y 13.4 µg/m^3 (desv. std = 4.0 µg/m^3) respectivamente. De otra parte, las concentraciones promedio medianas de Liceo para PM_{10} y $PM_{2.5}$ se encontraron alrededor de los 29.8 µg/m^3 (desv. std = 8.4 µg/m^3) y 16.1 µg/m^3 (desv. std = 4.4 µg/m^3) 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, los máximos registros obtenidos en la estación Gobernación para PM_{10} y $PM_{2.5}$ fueron de 65.7 µg/m^3 y 28.1 µg/m^3 respectivamente, ambos obtenidos en el mes de febrero, un patrón similar al presentado en los equipos manuales en donde febrero presentó los registros más altos. En el caso de Liceo para PM_{10} y $PM_{2.5}$ se obtuvieron en el mes de septiembre y diciembre con concentraciones de 54.2 µg/m^3 y 31.2 µg/m^3. Estos resultados se relacionan a días con ausencias de precipitaciones y su recurrencia entre 4 y 7 días consecutivos.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio mensuales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automático (µg/m^3) durante el período de análisis

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Gobernación PM_{10} (µg/m^3 estándar)													
Promedio	29.8	41.2	28.5	24.7	19.9	29.6	28.6	27.4	19.9	29.7	29.7	26.9	**27.9**
Mediana	26.2	39.9	27.6	23.2	19.2	29.9	27.9	25.0	18.1	28.7	30.1	24.6	**26.8**
Desv. Est.	13.7	10.8	7.5	8.3	5.7	9.3	3.0	7.0	5.8	7.3	9.9	9.8	**10.1**
Min.	8.6	20.9	15.6	11.5	9.4	15.9	18.7	16.5	12.5	15.9	15.9	8.6	**8.6**
Max.	53.7	65.7	45	47.3	31.2	45.3	46.5	46.0	37.2	45.8	55.2	44.0	**65.7**
Percentil 95	47.9	61.6	42.2	35.9	27.7	44.5	39.9	41.2	32.9	43.8	48.3	43.7	**45.9**
N° Datos	31	28	31	30	31	29	28	31	30	31	30	31	**358**
Liceo PM_{10} (µg/m^3 estándar)													
Promedio	27.5	36.4	29.3	29.9	31.2	28.5	27.5	27.4	29.4	31.6	27.5	19.0	**29.9**
Mediana	27.3	36.9	27.3	30.8	31.9	28.3	27.0	25.0	29.4	33.7	26.2	18.4	**29.8**
Desv. Est.	5.6	4.5	8.6	8.8	8.2	5.4	4.7	7.0	12.5	10.5	7.5	8.7	**8.4**
Min.	15.7	21.4	15.9	15.5	18.3	19.5	18.2	16.5	12.5	13.7	14.7	8.4	**12.5**
Max.	37.8	50.6	49.7	46.1	49.5	38.2	35.9	46.0	54.7	54.2	41.6	31.2	**54.7**
Percentil 95	35.6	46.1	43.5	41.7	45.2	36.8	34.1	41.2	45.8	50.1	39.6	48.5	**43.5**
N° Datos	31	28	31	30	31	30	28	31	30	31	30	30	**361**

Espacio en blanco

[1] 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.

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Gobernación $PM_{2.5}$ (µg/m³ estándar)													
Promedio	14.4	20.3	15.3	14.2	13.5	13.0	12.9	15.2	13.6	12.1	12.3	15.0	**14.1**
Mediana	15.3	20.5	15.2	14.2	13.3	12.9	12.3	15.3	13.6	12.2	11.5	15.4	**13.4**
Desv. Est.	3.7	4.1	4.8	4.1	3.3	2.5	6.7	2.1	1.8	3.1	3.4	4.5	**4.0**
Min.	6.6	12.2	8.2	6.4	6.8	5.6	6.4	10.1	9.4	5.8	5.0	5.8	**5.0**
Max.	19.1	28.1	26.7	23.2	19.3	18.1	20.7	18.5	16.9	18.5	19.3	25.5	**28.1**
Percentil 95	18.9	26.1	24.1	19.8	18.5	16.5	18.8	18.1	16.6	17.5	17.6	22.8	**21.8**
N° Datos	31	28	31	30	31	29	28	31	30	31	31	31	**358**
Liceo $PM_{2.5}$ (µg/m³ estándar)													
Promedio	16.3	22.6	17.2	16.4	15.7	14.6	15.5	15.2	15.9	14.7	15.2	19.0	**16.4**
Mediana	15.6	23.4	16.7	16.9	15.2	14.6	15.1	15.3	16.7	14.9	15.0	18.4	**16.1**
Desv. Est.	4.1	6.8	5.8	4.4	3.5	2.6	2.9	2.1	3.4	3.5	4.0	5.2	**4.4**
Min.	8.6	13.2	8.3	8.2	8.6	7.2	8.2	10.1	9.4	6.9	7.7	8.4	**6.9**
Max.	22.7	30.1	29.7	23.6	23.2	18.3	22.1	18.5	21.1	21.4	23.4	31.2	**31.2**
Percentil 95	22.2	29.1	28.3	22.1	21.6	18.2	20.1	18.1	20.9	20.7	21.6	27.3	**24.4**
N° Datos	31	28	31	30	31	30	28	31	30	31	30	30	**361**

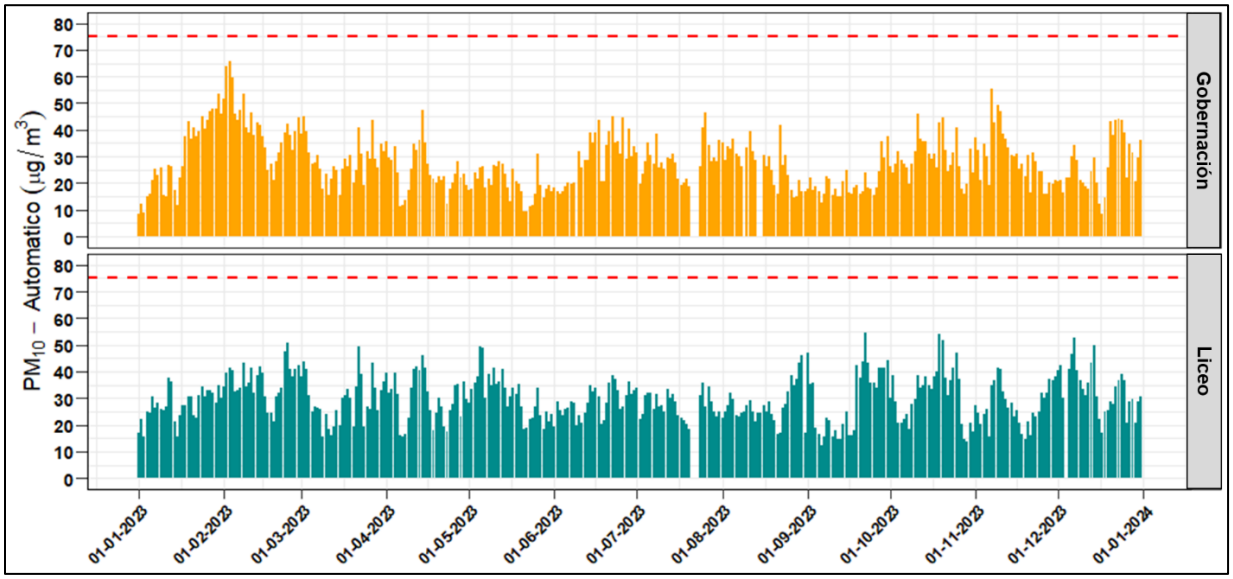
** A partir de datos promedio diarios del equipo*

La Figura 9 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos PM_{10} y $PM_{2.5}$ – 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_{10} y $PM_{2.5}$, no fue superado ningún día del año.

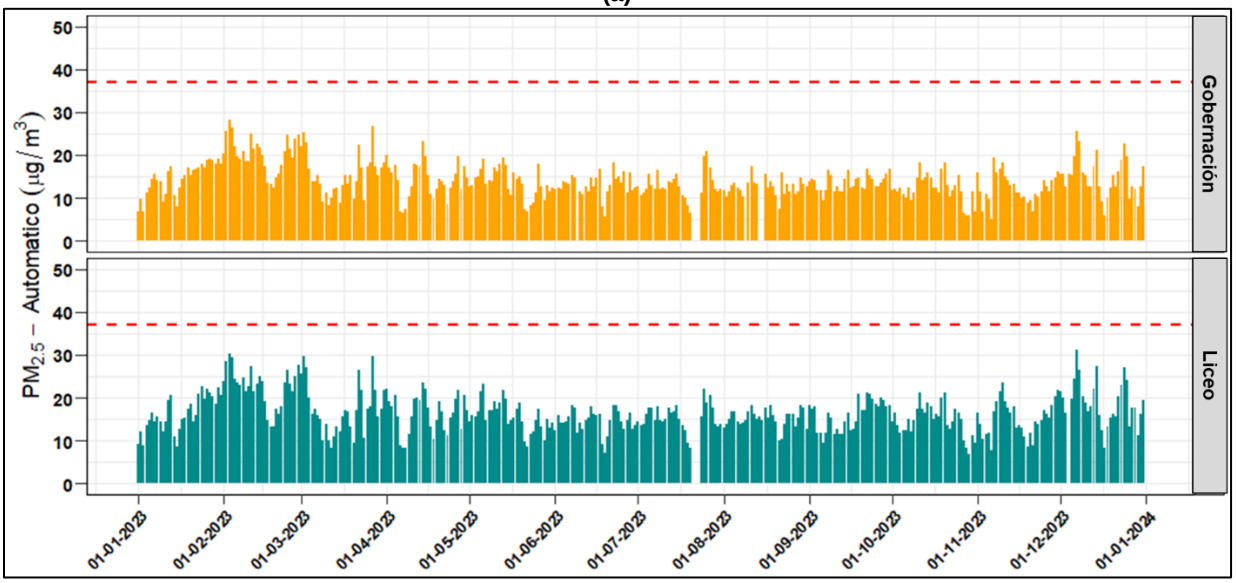
Adicionalmente, la Figura 10 presenta la evolución promedio horaria, por día de la semana y mensual de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ – Automáticas en las estaciones Gobernación y Liceo. Se evidencia como los máximos de concentración horaria se presentan en las horas de alto flujo vehicular 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/m³ para PM_{10} y 15 µg/m³ para $PM_{2.5}$. 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 1000 W/m² 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).

En cuanto al 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 contaminantes. Los promedios mensuales muestran máximos de concentraciones en ambas estaciones y contaminantes para el mes de febrero como se ha mencionado anteriormente, se destaca además un mínimo de concentración promedio mensual de PM_{10} en Gobernación obtenido en el mes de mayo, debido a la primera temporada de altas precipitaciones de marzo a mayo de la ciudad (ver Tabla 2).



(a)



(b)

Figura 9. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos durante el año 2023: (a) PM_{10} (b) $PM_{2.5}$

La línea punteada roja hace referencia a los límites máximos diarios permisibles definidos en la Res, 2254 de 2017 del MADS: 75 µg/m³ (PM_{10}) y 37 µg/m³ ($PM_{2,5}$)

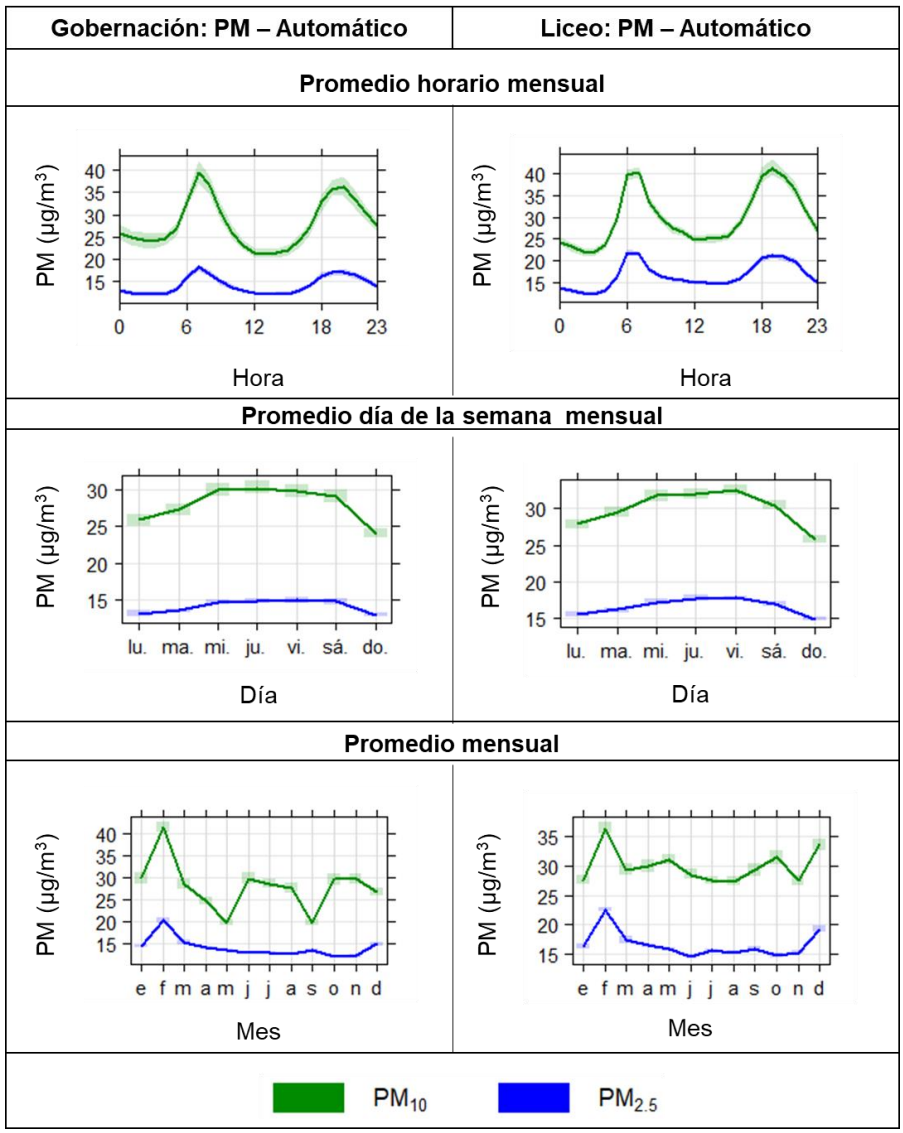


Figura 10. Promedio horario, semanal y mensual de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos durante el período de análisis. Gobernación (izquierda) y Liceo (derecha)

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

De la Figura 12 a la Figura 15 se 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. Mientras que en el caso de $PM_{2.5}$

– Manual en la estación Gobernación, un 42% de los días analizados presentaron ICA en estado moderado, un 40% menor con respecto al mismo periodo del año 2022 (tercer trimestre, $PM_{2.5}$ – Manual 70% ICA moderado).

Por otro lado, las concentraciones de PM_{10} – Automático presentaron calidad del aire en estado bueno entre 98% y 99 % del total de días. En la estación Liceo se presentó el día 22 de septiembre un estado de calidad del aire moderado. Mientras que en Gobernación en estado moderado se presentaron tres días consecutivos del 2 al 4 de febrero, así como también el día 7 de noviembre. Para el caso de $PM_{2.5}$ – Automático, en ambas estaciones se tuvo un porcentaje entre 61% y 82% de los días con ICA en estado moderado en la estación Gobernación y Liceo respectivamente.

Se destaca que algunos registros pudieron ser influenciados por la alta actividad del volcán Nevado del Ruiz principalmente durante febrero y marzo, meses que registraron emisiones con columnas de gases superiores a los 1800 m de altura desde la boca del volcán y direcciones de viento predominantes en dirección a Manizales (ver sección 5.1). Adicionalmente, las bajas precipitaciones acumuladas para febrero potencian el efecto de contaminación por material particulado en la ciudad.

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.

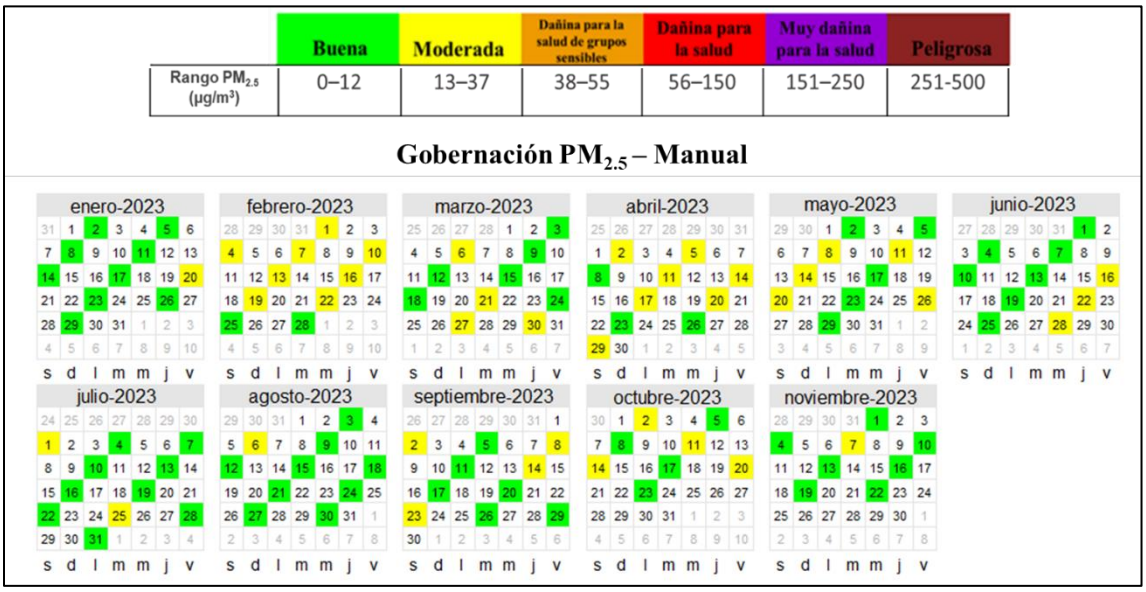


Figura 11. Índice de Calidad del Aire (ICA) para Gobernación $PM_{2.5}$ – Manual del SVCA de Manizales durante el período de análisis

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_{10} ($\mu g/m^3$)	0 - 54	55 - 154	155 - 254	255 - 354	355 - 424	425 - 504

Estación Gobernación PM_{10}

Estación Liceo PM_{10}

Estación Milán PM_{10}

Figura 12. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{10} – 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_{10} ($\mu g/m^3$)	0 - 54	55 - 154	155 - 254	255 - 354	355 - 424	425 - 504

Estación Palogrande PM_{10}

Estación Nubia PM_{10}

Estación UCM PM_{10}

Figura 13. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{10}– 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

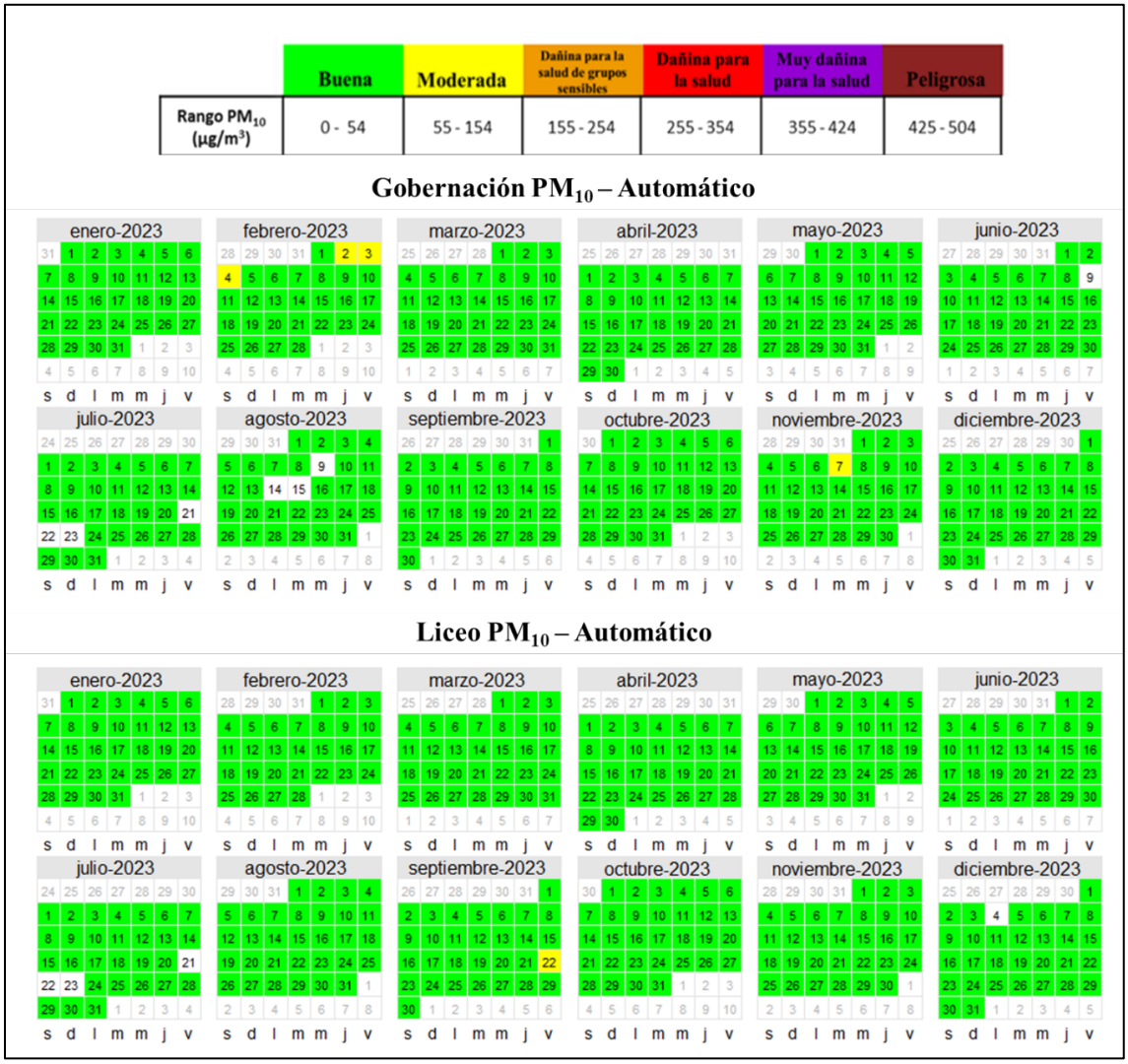


Figura 14. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{10} – Automático en las estaciones: Gobernación y Liceo durante el período de análisis

Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

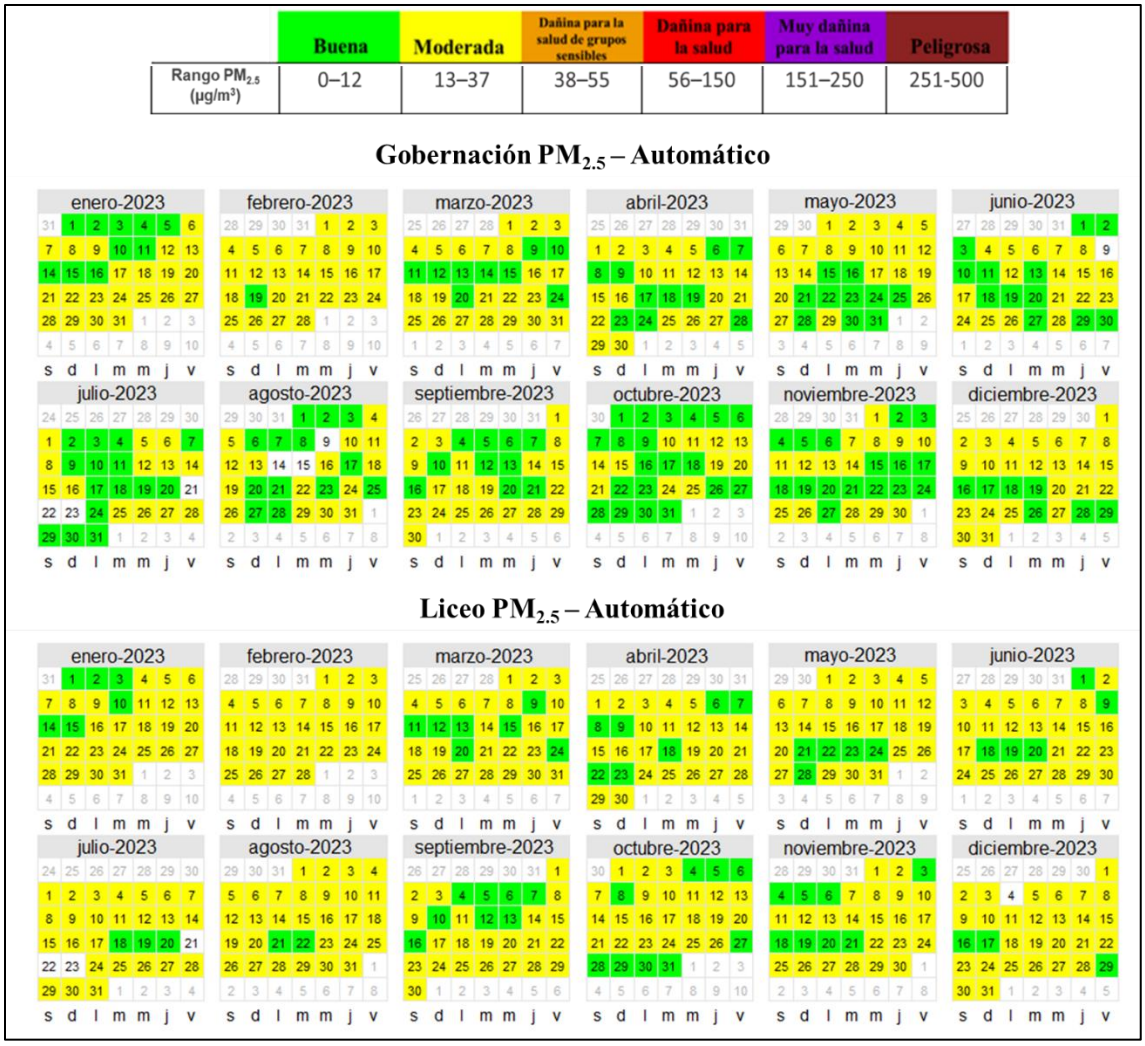


Figura 15. Índice de Calidad del Aire (ICA) para $PM_{2.5}$ – Automático en las estaciones: Gobernación y Liceo durante el período de análisis

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 5 presenta los estadísticos descriptivos para las concentraciones promedio horarias de CO, para el año 2023 las concentraciones promedio medianas[2] se encontraron alrededor de 726.7 µg/m^3 (desv. std. = 541.4 µg/m^3). Al comparar los registros de la mediana del 2023 con respecto al año 2022 (853.1 µg/m^3), se observó una disminución del 17%, que se relaciona a posibles cambios en las dinámicas de fuentes antrópicas. 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, según la última actualización del inventario de emisiones atmosféricas de la ciudad al año 2017 (Unal – Corpocaldas, 2020; Unal - Corpocaldas, 2019).

Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana es 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 enero presentó el mayor registro con un valor de 1101.6 µg/m^3, atribuido a un posible aumento en la presencia de vehículos particulares en inmediaciones de la estación, influenciado, por ejemplo, por las festividades de las ferias de Manizales.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de CO (µg/m^3) durante el período de análisis

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Promedio	1101.6	959.9	867.8	682.3	1030.6	732.1	710.4	748.9	821.7	783.8	989.6	971.4	876.8
Mediana	1101.6	748.3	703	560.9	806.5	599.5	581.4	615.1	681.6	909.8	856.9	842.2	726.7
Incertidumbre**	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Desv. Est.	678.1	627.3	591.7	455.8	721.4	439.7	440.0	427.2	430.6	481.1	456.9	433.9	541.4
Min.	178.1	209.2	162.4	65.5	177.7	170.1	159.6	228.9	292.6	316.4	380.0	392.4	65.5
Max.	3816.8	4200	4243.2	3737.1	4224.5	2940.2	2962.1	2955.4	3367.8	4139.1	3338.3	3274.7	4243.2
Percentil 95	2584.3	2175.2	1935.1	1572.9	2569.4	1688.3	1597.0	1601.3	1670.29	1854.6	1909.5	1866.6	1940.7
N° Datos	743	671	744	720	728	719	744	744	720	705	720	744	8702

** 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.*

De manera complementaria, la Figura 16 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de CO 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).

[2] 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.

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 µg/m^3 para promedio octohorario y 35000 µg/m^3 para promedio horario).

Adicionalmente, la Figura 17 presenta la variación promedio horaria 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 1400 µg/m^3 y 1600 µg/m^3 respectivamente. De otra parte, se observan mínimos alrededor de los 400 µg/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).

Al comparar el promedio entre los días de semana, se observa un patrón estable con valores promedio entre 700 y 950 µg/m^3 y, una concentración mínima los domingos (día con la menor actividad vehicular de la ciudad) con un valor promedio cercano a los 700 µg/m^3. Esta disminución de alrededor del 20% en comparación con el promedio semanal, indica la contribución de las fuentes móviles en las concentraciones de CO observadas.

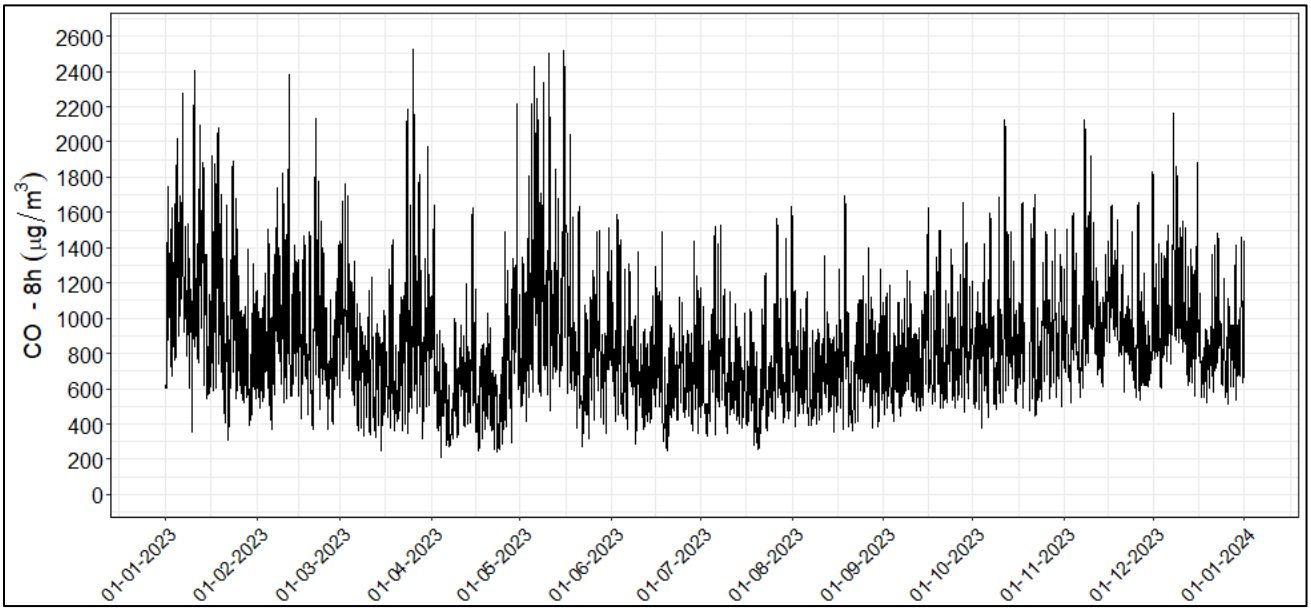


Figura 16. Evolución temporal de concentraciones promedio octohoraria de CO durante el período de análisis

El nivel máximo permisible octohorario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a 5000 µg/m^3 no fue superado en ningún día

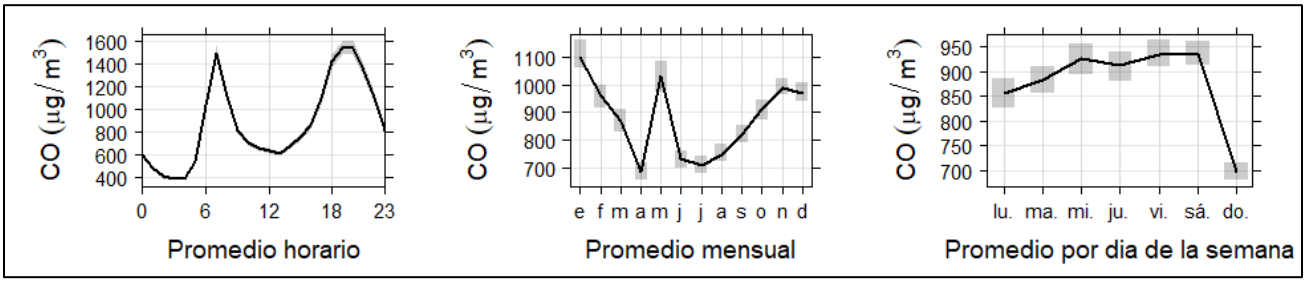


Figura 17. Variación promedio de CO horario (izquierda), mensual (centro) y por día de la semana (derecha) durante el perío de análisis

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

4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO_2)

La Tabla 6 presenta los estadísticos descriptivos para el SO_2 durante el período de análisis. Se observa que durante el año 2023 las concentraciones promedio medianas[3] se encontraron alrededor de 4.0 µg/m^3 (desv. std. = 2.7 µg/m^3), con un mínimo y máximo valor horario registrado de 0.9 y 57.7 µg/m^3 ambos obtenidos en noviembre y septiembre. Por su parte, al comparar el registro de la mediana en mención con respecto al año 2022 (5.4 µg/m^3), se observó una disminución del 35%, debido a cambios en las dinámicas de las fuentes antrópicas en la ciudad. Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana tiende a ser menor que el promedio, indicando la variabilidad de las concentraciones de este contaminante en la ciudad.

Se destaca que a pesar de que en el primer semestre del 2023 específicamente en el mes de abril se presentó un mayor nivel de actividad volcánica relacionada a emisión de ceniza y gases del Nevado del Ruiz (periodo que tuvo cambio de estado de alerta de amarillo a naranja) no se identificaron aumentos en las concentraciones de SO_2. Esto debido que las medidas corresponden a un valor de concentración en aire ambiente, son producto de la dinámica de fuentes de emisión antrópicas (vehículos, industrias, entre otros), y fuentes naturales (por ejemplo, las emisiones del volcán Nevado del Ruiz); sumado a otros factores de tipo meteorológico que dominan la dispersión del contaminante en la atmósfera (como, por ejemplo, velocidad y dirección del viento).

De manera complementaria, la Figura 18 presenta la evolución de concentraciones horarias de 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 (MAVDT, 2010). Se destaca que todos los registros están dentro de los límites máximos permitidos por la normatividad vigente (100 µg/m^3 para 1 hora).

[3] 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 SO_2 (µg/m^3) durante el período de análisis

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Promedio	5.4	5.5	4.2	4.2	4.7	4.7	3.5	4.1	6.1	4.8	3.5	4.1	**4.6**
Mediana	4.9	4.6	3.6	3.8	4.1	4.0	3.2	3.6	5.0	4.3	3.1	3.2	**4.0**
Incertidumbre**	1.5	1.5	1.5	1.5	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	2.0	2.0	2.0	**1.71**
Desv. Est.	1.7	2.6	1.9	2.0	2.1	2.6	1.5	1.8	4.5	2.8	1.6	3.8	**2.7**
Min.	2.7	2.2	1.6	1.4	1.5	1.8	1.3	1.4	2.5	1.2	0.9	1.3	**0.9**
Max.	16.7	21.1	12.9	22.3	23.3	24.1	10.8	15.3	57.7	30.5	11.3	51.4	**57.7**
Percentil 95	8.9	10.4	8.3	8.1	8.5	8.9	6.6	7.5	11.2	9.2	6.7	7.8	**8.5**
N° Datos	648	671	744	720	736	719	744	744	720	705	720	743	**8614**

** 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.*

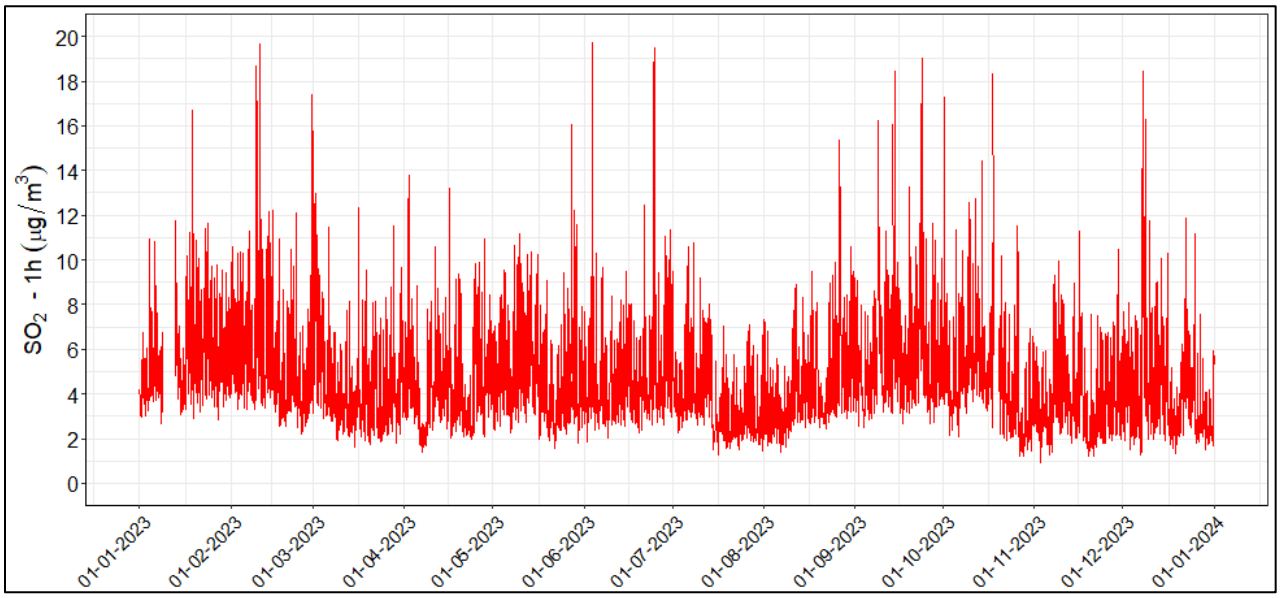


Figura 18. Evolución temporal de concentraciones promedio horario de SO_2 durante el período de análisis

El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a 100 µg/m^3 no fue superado en ningún día

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 5.5 µg/m^3 y 7 µg/m^3 respectivamente. Asimismo, se observan mínimos alrededor de los 1.5 µg/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 jueves y sábados con un valor alrededor de 4.8 µg/m^3 y mínimos promedio los domingos alrededor de los 4.1 µg/m^3 relacionados a la actividad de las fuentes móviles en ruta de la ciudad.

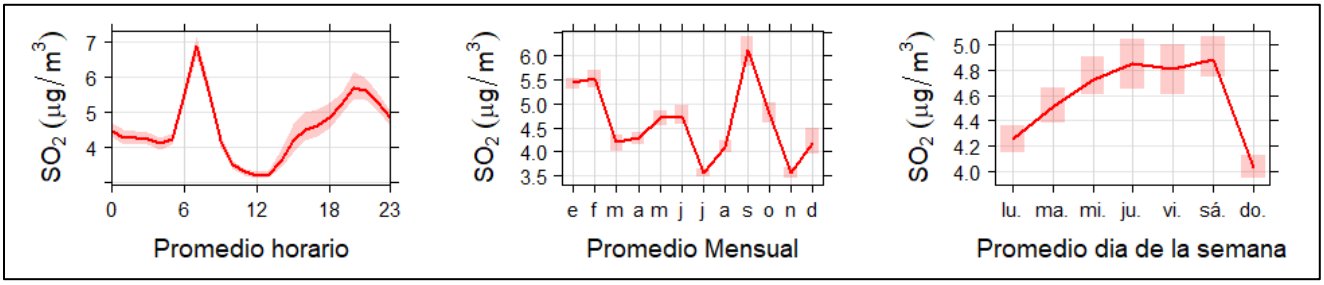


Figura 19. Variación promedio de SO_2 horario (izquierda), mensual (centro) y por día de la semana (derecha) durante el período de análisis

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

4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O_3)

La Tabla 7 presenta los estadísticos descriptivos para O_3 durante el periodo de análisis, así como la subclasificación entre las concentraciones del día (diurno) y la noche (nocturno). Las concentraciones promedio medianas[4] del 2023, se encontraron en 25.1 µg/m^3 para el día completo, 41.1 µg/m^3 para la jornada diurna y 16.5 µg/m^3 para la jornada nocturna. Al comparar los registros de la mediana diaria con respecto al 2022 (23.1 µg/m^3), se observó un aumento del 8%, indicando un posible cambio en la emisión de precursores de O_3.

Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana tiende a ser menor que el promedio, indicando la variabilidad de las concentraciones de este contaminante en la ciudad. Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que durante junio se presentó el menor registro con un valor de 22.9 µg/m^3 y durante septiembre se registró el mayor promedio mensual con un valor 38.9 µg/m^3.

La Figura 20 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de O_3 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_3 se encontraron por debajo de los límites permitidos por la normatividad vigente (100 µg/m^3 para promedios de 8 horas).

Para poder explicar el comportamiento de este contaminante, se resalta que el O_3 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_3 son los óxidos de nitrógeno (NO_X, que representa las especies NO y NO_2) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs). En la ciudad de Manizales ambos precursores son dominados por emisiones vehiculares (Unal - Corpocaldas, 2020). La formación de O_3 depende directamente de la relación entre COVs/NO_x y la habilidad oxidativa de la atmósfera, que depende de la presencia de radicales hidroxilos (OH·) en el ambiente.

[4] 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 7. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de O_3 (µg/m^3) 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
Diario (0:00 a 23:59)	Promedio	27.3	32.3	26.1	29.0	24.5	22.9	26.6	31.7	38.9	30.6	30.5	34.9	**29.6**
	Mediana	22.7	26.3	20.9	25.1	18.7	19.1	23.5	27.7	36.1	27.3	25.4	29.3	**25.1**
	Incertidumbre**	1.1	1.1	1.1	1.1	2.8	2.8	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	**1.4**
	Min.	1.6	1.8	1.5	1.7	0.4	1.8	1.5	1.9	3.2	2.3	4.5	4.8	**1.0**
	Max.	91.3	92.3	84.5	77.5	88.7	61.8	74.2	84.9	90.7	83.9	82.1	94.3	**94.3**
	Percentil 95	68.4	76.1	65.2	64.8	64.7	52.0	59.8	69.4	77.0	65.4	69.7	80.1	**69.7**
	N° Datos	743	671	744	720	733	719	744	744	720	705	720	744	**8707**
Diurno (6:00 a 17:59)	Promedio diurno	38.5	45.5	35.8	39.9	34.9	32.4	36.8	42.5	52.3	39.9	42.3	48.1	**40.7**
	Mediana diurna	38.3	47.8	34.9	42.6	33.9	33.2	39.0	44.3	56.2	39.5	43.4	49.0	**41.1**
	Desv. Est.	21.6	25.1	21.3	19.2	583.7	15.7	18.4	20.9	21.2	19.0	20.6	24.1	**21.5**
	Max.	91.3	92.3	84.5	77.5	88.7	61.8	74.2	84.9	90.7	83.9	82.1	94.3	**94.3**
	N° Datos	371	334	372	360	361	359	372	372	360	351	360	372	**4345**
Nocturno (18:00 a 5:59)	Promedio nocturno	16.1	19.1	16.3	18.1	14.4	13.3	16.4	20.9	25.6	21.3	18.6	21.8	**18.5**
	Mediana nocturna	13.5	16.3	14.1	16.3	12.1	12.1	15.5	19.5	24.8	19.9	17.4	20.1	**16.5**
	Desv. Est.	11.4	12.5	11.3	11.6	10.8	8.3	10.5	12.2	13.3	12.0	9.9	11.8	**11.9**
	Max.	54.7	57.4	58.9	60.5	50.8	36.9	56.8	60.6	56.3	73.0	57.4	59.4	**73.0**
	N° Datos	372	336	372	360	372	360	372	372	360	354	360	372	**4362**

** 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.*

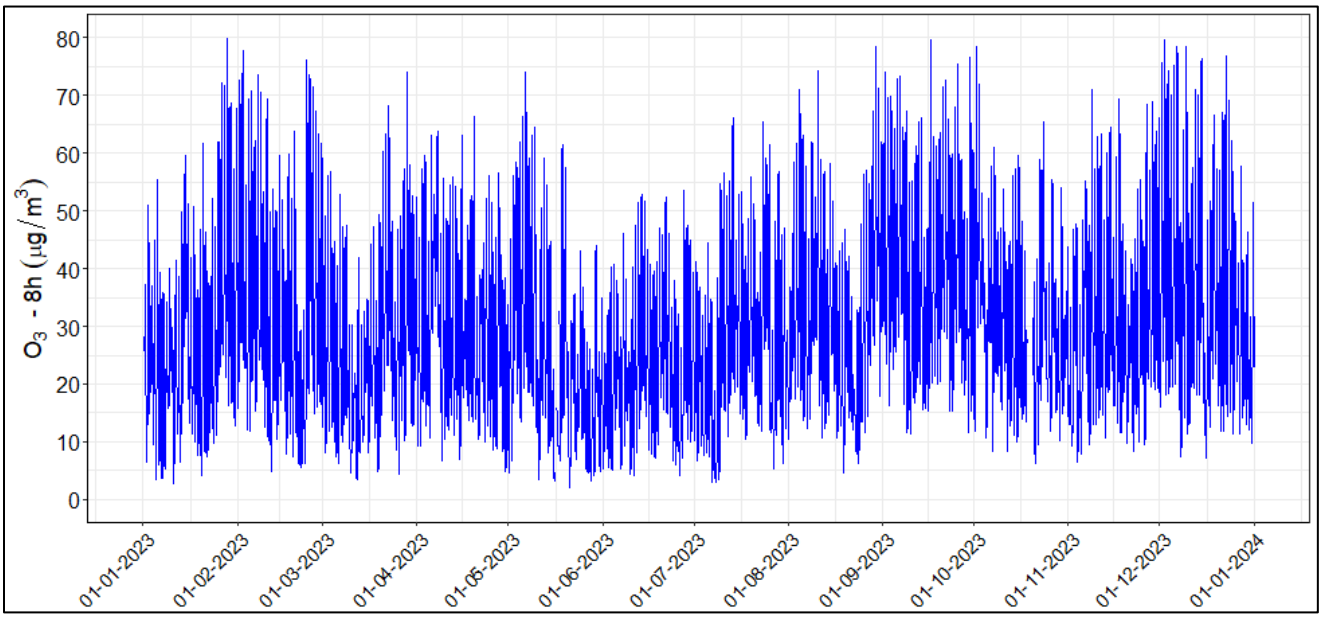


Figura 20. Evolución temporal de concentraciones promedio octohorario de O_3 durante el período de análisis

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

Bajo una relación mayor a 1 entre COVs/NO_x, los radicales hidroxilos (OH) reaccionarán mayoritariamente con los COVs para generar moléculas de agua, NO_2 y especies de aldehídos (ver reacciones 1, 2 y 3). Por otro lado, con una baja relación de COVs/NO_x las reacciones de NO_x serán predominantes (ver reacciones 3, 4, 5 y 6) y removerán los radicales OH del sistema, generando consumo de O_3 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_X se relaciona con una reducción en la actividad del tráfico vehicular. Este fenómeno altera las reacciones fotoquímicas induciendo una mayor generación de O_3, debido a que los radicales (OH·) tenderán hacia la reacción con COVs y favorecerán la producción neta de NO_2 (reacciones 1, 2 y 3),

Posteriormente, la fotólisis del NO_2 (reacción 4) favorecerá la generación de O_3 (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_3 durante la noche (reacción 7), generando así un remanente atmosférico de O_3 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_3, por consiguiente, una reducción de las concentraciones observadas. En este sentido se podría sugerir que las concentraciones de O_3 en la ciudad de Manizales se encuentran dominadas por la presencia de COVs en la atmósfera (Li, 201; Sengel y otros, 2020).

$$RH + OH\cdot \rightarrow R + H_2O \tag{1}$$

$$R + O_2 + M \rightarrow RO_2 + M \tag{2}$$

$$RO_2 + 2NO \rightarrow \mathrm{RCHO} + 2NO_2 + \mathrm{OH}\cdot \tag{3}$$

Dónde: R representa una cadena de hidrocarburos (Ej, Etano (C_2H_6) el grupo R representara la cadena C_2H_5); M representa cualquier mediador inerte que permita conservar el momento de la reacción (Ej, Nitrógeno).

$$NO_2 + hv\ (\lambda < 420\ nm) \rightarrow NO + O \tag{4}$$

$$NO_2 + O \rightarrow NO + O_2 \tag{5}$$

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 \tag{6}$$

$$NO_2 + OH\cdot \rightarrow \downarrow \mathrm{HN}O_3 \tag{7}$$

Dónde: $\boldsymbol{hv}$ 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 alrededor de 55 µg/m^3. Las concentraciones diurnas son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con una mediana diurna de 41.1 µg/m^3 y una nocturna de 16.1 µg/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 30 µg/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.

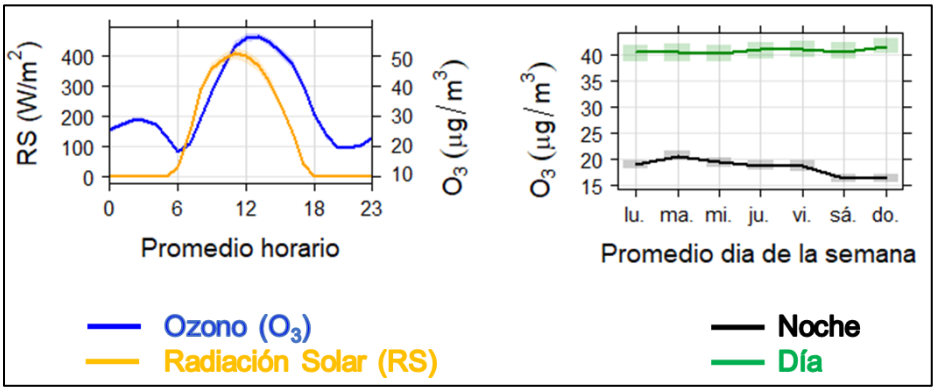


Figura 21. Variación promedio horaria de O_3 y Radiación solar
Se incluye además el comportamiento promedio semanal entre las horas diurnas y nocturnas durante período de análisis

4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O_3, SO_2 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_2 y O_3. 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 (capitulo IV articulo 18 al 21) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS 2017). Se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en lo que va del 2023 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 ($\mu g/m^3$)	0 – 5094	5095 – 10819	10820 – 14254	14255 – 17688	17689 – 34862	34863 – 57703
Rango O_3 ($\mu g/m^3$)	0 – 106	107 – 138	139 – 167	168 – 207	208 – 393	>394
Rango SO_2 ($\mu g/m^3$)	0 - 93	94 – 197	198 – 486	487 – 797	798 – 1583	1583 – 2629

Estación Gobernación CO (Octohorario)

Estación Gobernación SO_2 (horario)

Estación Gobernación O_3 (Octohorario)

Figura 22. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, SO_2 y O_3 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 2023 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_2. La Tabla 8 presenta un resumen con algunos de los días que tuvieron alturas significativas de la columna de gases emitidos (superiores a los 1300 metros). De estos días se destaca que el 61% de los reportes presentaron predominancia de vientos hacía el occidente y/o noroccidente, ubicación de Manizales, generando una posible afectación a la calidad del aire por esta fuente en la ciudad. Finalmente, cabe mencionar que, a pesar del cambio de estado naranja en la actividad volcánica entre abril y mayo, las concentraciones en la ciudad no se vieron afectadas de manera drástica, entre otros por el efecto favorable de las direcciones del viento.

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 14 de enero, cuyos registros de concentraciones diarias de SO_2 fueron de 9.3 µg/m^3, caso similar al ocurrido el día 08 de febrero que registró concentraciones de 53.6 µg/m^3 para PM_{10} y 8.8 µg/m^3 de SO_2.

Tabla 8. Resumen de emisiones volcánicas significativas (altura de la columna de gases superiores a los 1300 m), con posible afectación en concentraciones diarias de PM_{10} – Automático y SO_2 en la estación Gobernación (SGC, 2023)

Fecha (dd-mm)	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento *	PM_{10} – Automático (µg/m^3)	SO_2 (µg/m^3)
Alerta amarilla				
06-01	2900	Sur - Suroriente	21.1	6.3
14-01	1800	NorNoroccidente	17.3	9.3
22-01	1700	Suroccidente	37.3	7.1
01-02	1800	Noroccidente	51.7	7
08-02	3800	Occidente	53.6	8.8
15-02	1600	No predominante	37.4	6.1
06-03	2000	Noroccidente	27.6	3.7
11-03	3000	Suroccidente	15.6	4.7
20-03	2700	-- **	20.2	5.9
23-03	2100	--	30.9	6.3
31-03	1800	Noroccidente	32.1	5.1
Alerta naranja				
04-04	1500	Noroccidente	17.5	3.8
05-04	1700	Suroccidente	14.1	4.1
07-04	1500	Suroriente	6.4	1.9
08-04	1700	Oriente - Suroriente	7.3	3.1
09-04	1800	Oriente	10.3	4.3
10-04	2300	Norte - Nororiente	12.7	4.2
11-04	2500	Noroccidente	17.9	5.2
12-04	1800	Suroccidente - Noroccidente	17.5	5.2
13-04	1500	Suroccidente	17.3	3.8
15-04	1600	Noroccidente	19.6	4.1

Fecha (dd-mm)	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento *	PM_{10} – Automático (µg/m³)	SO_2 (µg/m³)
18-04	1800	--	9.7	4.2
19-04	1800	Suroriente	12.1	4.7
21-04	1800	--	13.9	2.9
24-04	2200	Noroccidente	12.5	4.3
25-04	2500	Noroccidente	13.7	5.4
26-04	1800	Suroccidente	15.7	5.6
02-05	3000	Noroccidente	13.1	4.4
06-05	1800	Occidente	18.9	4.7
10-05	2000	Noroccidente	17	6.4
12-05	1900	Oriente	17.9	4.9
23-05	1800	Nororiente	8.1	3.4
25-05	2800	Nororiente	11.1	4.3
Alerta amarilla				
04-07	2000	Noroccidente-Suroccidente	27.9	3.5
16-07	1500	Noroccidente, Occidente-Suroccidente	21.7	2.3
27-07	2300	Noroccidente, Occidente-Noroccidente	34.4	3.7
05-08	1400	Noroccidente, Occidente-Noroccidente	36.5	3.4
26-08	1300	Noroccidente, Occidente-Noroccidente, Suroccidente	17.6	7.5
29-08;04-09	1700	Occidente, Nor-Noroccidente	20.9-18.8	4.6-4.3
08-09	1000	Noroccidente, Occidente-Noroccidente	22.5	12.8
22-09	2600	Noroccidente	23.7	10.8
30-09	1400	Noroccidente, Occidente, Suroccidente	37.4	5.5
04-10	2000	Noroccidente	31.7	5.5
09-10	2000	Suroccidente	27.4	4.1
16-10	2000	Noroccidente	29.3	2.6
17-10	1600	Noroccidente, Nororiente	30.8	2.7
04-11	1800	Suroriente	34.8	3.2
13-11	2300	Noroccidente	33.3	3.1
16-11	1600	Suroccidente	31.1	5.1
27-11	1700	Suroccidente	15.9	5.8
15-12	2000	Noroccidente	20.2	3.9
22-12	1900	Noroccidente	43.8	5.2

* Corresponde a la dirección a la que se dirigió la columna de gases
**-- Ausencia de datos

5.2. *Resultados de monitoreo de material particulado para los días sin carro y motocicleta del 2023*

Se presentan en esta sección los resultados del monitoreo de material particulado realizado en Manizales durante el día voluntario sin carro y motocicleta, llevado a cabo los jueves 28 de septiembre de 2023 (voluntario) y 2 de noviembre de 2023 (obligatorio). Esta actividad se realizó en la jornada horaria entre las 6:00 a.m. y las 8:00 p.m. El seguimiento de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) se realizó en todos los equipos del SVCA, tantos equipos manuales (muestreadores de partículas Hi-Vol y partisol 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

2023 tomando como base comparativa la jornada horaria del día completo (entre las 12:00 a.m. y 11:59 p.m.).

Es importante aclarar que un análisis concluyente sobre el efecto en la reducción de la contaminación del aire por PM del día sin carro y motocicleta tal como está diseñado, requiere una revisión detallada del comportamiento de los días sin carro históricos realizados en Manizales y el efecto de otras variables de importancia como la precipitación.

5.2.1. Material particulado – Equipos manuales

En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos para las concentraciones promedio diarias de PM_{10} – Manuales del día voluntario y obligatorio sin carro y motocicleta y la base comparativa de enero a diciembre de 2023. Las concentraciones para el día voluntario sin carro se encontraron en un rango de 13 µg/m^3 (promedio registrado en Gobernación) y 39 µg/m^3 (promedio registrado en Liceo), mientras que en el día obligatorio sin carro se encontraron en un rango de 10 µg/m^3 (promedio registrado en Gobernación) y 25 µg/m^3 (promedio registrado en Liceo).

Al comparar los resultados con la concentración promedio del año 2023, se observó en el día voluntario sin carro, en la mayoría de las estaciones, un aumento en las concentraciones obtenidas con valores porcentuales de incremento entre el 5% (en la estación Nubia) y el 34% (valor de incremento porcentual máximo obtenido en Liceo). En el caso del día obligatorio sin carro, se obtuvieron disminuciones de concentración con valores porcentuales entre 10% (en la estación Nubia) y 41% (en la estación Gobernación). Estos resultados permiten inferir que los días voluntarios sin carro se comportan con un día normal en la ciudad en relación con el comportamiento del tráfico y su efecto en la contaminación del aire.

Es importante destacar que en los casos donde se obtuvieron valores porcentuales bajos tanto de aumento y/o reducción en la concentración ambiente para PM_{10}, estos pueden llegar a ser considerados poco representativos, ya que se encuentran dentro de la desviación estándar típica de los equipos en un rango de 3 a 8 µg/m^3 e incertidumbre de la medición de hasta 1.7 µg/m^3 (ver Tabla 3).

Tabla 9. Comparativo de las concentraciones promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Manual (µg/m^3) del día obligatorio sin carro y el periodo del año 2023

Estación	Día sin carro voluntario 28 de septiembre		Día sin carro obligatorio 02 de noviembre		Concentración promedio. Periodo base 2023
PM_{10} (ug/m^3 estándar)					
Milán	38	↑ 15%	-	-	33
Nubia	21	↑ 5%	18	↓ 10%	20
Palogrande	24	↑ 26%	20	↑ 5%	19
Católica	24	↑ 20%	16	↓ 20%	20
Gobernación	13	↓ 24%	10	↓ 41%	17
Liceo	39	↑ 34%	25	↓ 14%	29

*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 análisis.

5.2.2. Material particulado – Equipos automáticos

En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de las concentraciones promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos en las estaciones Gobernación y Liceo para el día voluntario y obligatorio sin carro y motocicleta, y su comparación con el año 2023. Las comparaciones obtenidas muestran que para el día voluntario, tanto en Gobernación como en Liceo, el contaminante PM_{10} presentó un incremento en la concentración registrada en comparación con el 2023, del 26% y 37% respectivamente. De manera similar en $PM_{2.5}$ se registró un incremento del 1% en Gobernación y del 17% en Liceo. En contraste, para el día obligatorio sin carro se presentaron para $PM_{2.5}$ disminuciones en las concentraciones del 20% en Gobernación y 17% en Liceo, al igual que para PM_{10} en Liceo del 19%. Caso contrario, para el día obligatorio sin carro en Gobernación se obtuvo un aumento en la concentración de PM_{10} del 16%.

En el día voluntario sin carro tanto en equipos manuales como automáticos no se observan disminuciones lo que permite inferir que son días con comportamientos de actividad vehicular normal.

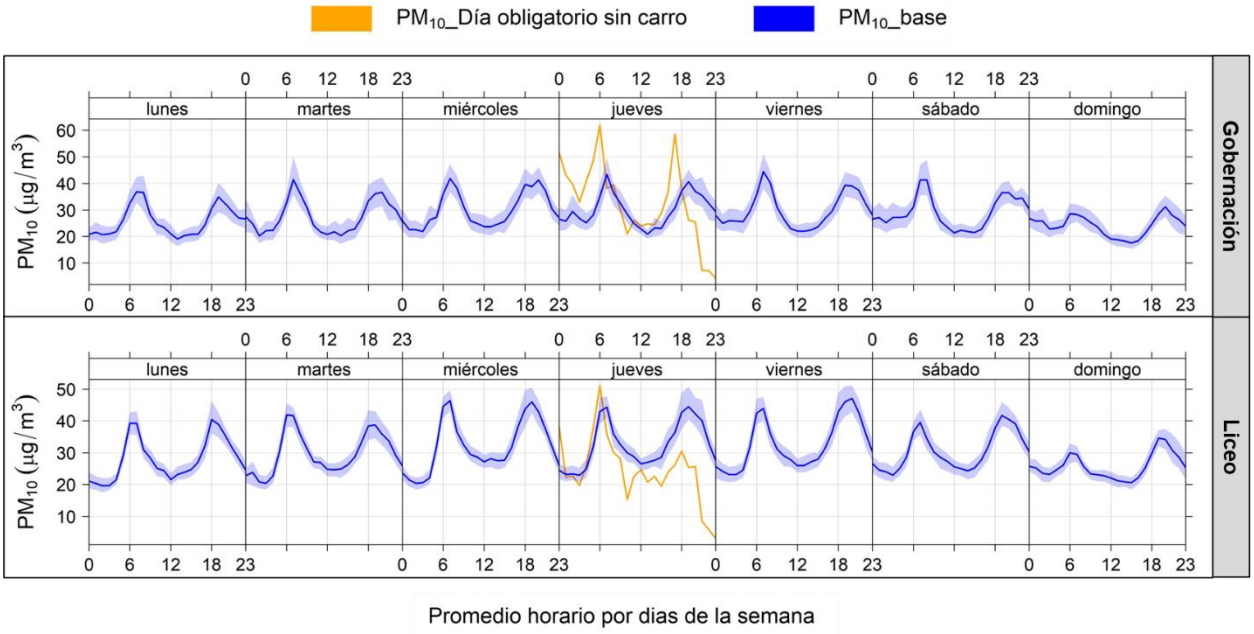
Las disminuciones tanto en PM_{10} como $PM_{2.5}$ obtenidos durante el día obligatorio sin carro se relacionan a las condiciones de estabilidad atmosférica sumado a la posible disminución de las emisiones relacionadas al tráfico vehicular en inmediaciones de las estaciones. Se destaca que el día anterior al día obligatorio sin carro se registró una alta precipitación de 33 mm (según registros de la estación Posgrados), las altas precipitaciones generan un efecto de lavado atmosférico y, en consecuencia, una disminución en la concentración de contaminantes como el material particulado.

En el caso de aumento de la concentración de PM_{10} en Gobernación en el día obligatorio sin carro se relaciona a posible influencia de emisiones de otras fuentes cercanas a la estación como industrias. Esta hipótesis se genera al observar la evolución del promedio horario del día obligatorio sin carro y su comparación con los promedios horarios obtenidos durante 2023 para diferentes días de la semana presentado en la Figura 23. Para el día obligatorio sin carro (jueves) se muestran picos en las horas de la madrugada, principalmente entre las 12:00 a.m. hasta las 06:00 a.m., debido posiblemente a actividad industrial que puede generar incrementos de concentración 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.

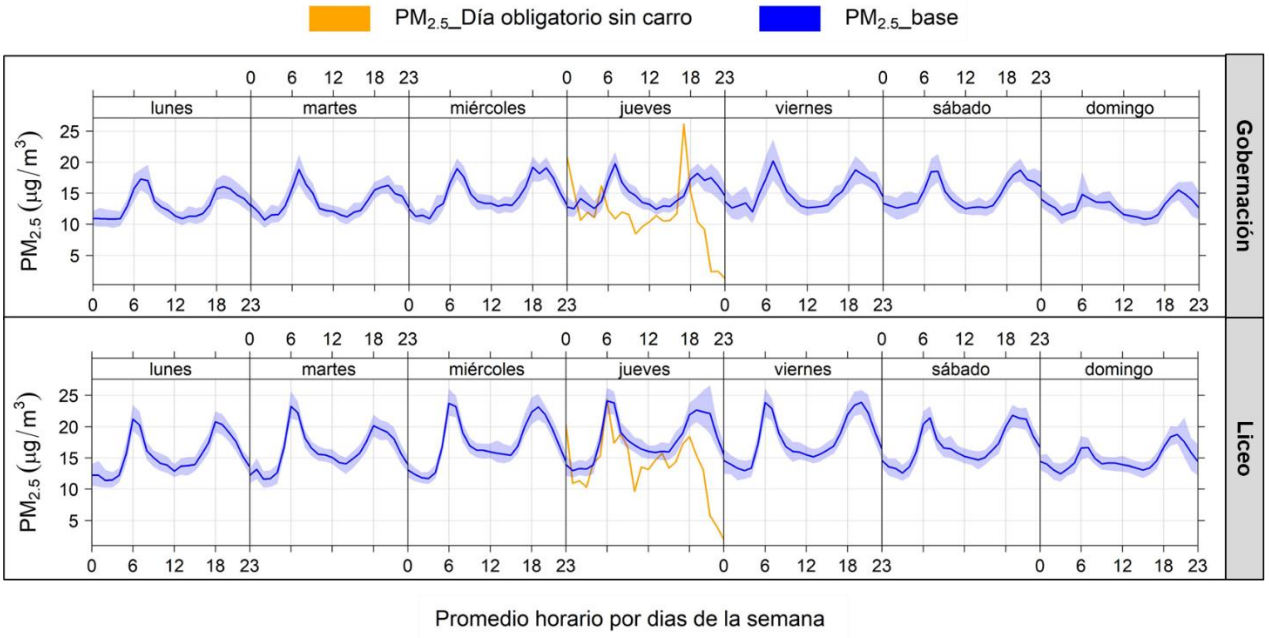
Tabla 10. Comparativo de las concentraciones promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automático ($\mu g/m^3$) del día voluntario sin carro y el periodo del año 2023

Estación	Día sin carro voluntario 28 de septiembre		Día sin carro obligatorio 02 de noviembre		Concentración promedio. Periodo base 2023
PM_{10} (ug/m^3 estándar)					
Gobernación	35.4	↑ 26%	32.4	↑ 16%	28.0
Liceo	41.0	↑ 37%	24.4	↓ 19%	30.0
$PM_{2.5}$ (ug/m^3 estándar)					
Gobernación	14.3	↑ 1%	11.3	↓ 20%	14.1
Liceo	19.3	↑ 17%	13.7	↓ 17%	16.5

*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 análisis.



(a)



(b)

Figura 23. Evolución temporal de concentraciones promedio horarias durante los días de la semana de en equipos automáticos durante 2023 y durante el día obligatorio sin carro y motocicleta del 2 de noviembre de 2023. (a) PM_{10} (b) $PM_{2.5}$

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_2 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: tesing 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 PM2,5/PM10 concentrations and particle-associated polycuclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric envieonmente of Zonguldak, *Journal of Hazardous Materials*, vol, 170, pp, 13-21,
- Organizacion 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
- Organizacion Mundial de la Salud – OMS, 2022, WHO global air quality guildelines, Particulate matter (PM2,5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide,
- Our World in Data, "Indoor Air Pollution" Hannah Ritchie and Max Roser, 2017, [En línea], Disponible en: https://ourworldindata.org/air-pollution, [Último acceso: 15/07/2023],
- Servicio geológico colombiano (SGC), 2023, 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://concejodemanizales,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
- 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