

SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES ENERO - MARZO 2023



Analizador automático de PM_{10} y $PM_{2.5}$ (nefelómetro) de la estación Liceo

***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 ₁₀ Y PM _{2.5}	9
3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales	9
3.2. Equipos manuales: Comparación preliminar con la norma anual.....	13
3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales.....	14
3.4. Índice de calidad del aire (ICA) para PM ₁₀ y PM _{2.5} en el SVCA de Manizales.....	17
4. RESULTADOS DE MONITOREO PARA GASES	19
4.1. Monitoreo de monóxido de carbono (CO)	19
4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO ₂).....	21
4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O ₃).....	23
4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O ₃ , SO ₂ y CO en el SVCA de Manizales.....	27
5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS	28
5.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz	28
6. REFERENCIAS	29

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

En la actualidad, la contaminación atmosférica corresponde 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 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 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 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, 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"	155
		PM _{2.5} – Manual ^a	Corpocaldas	2009	Operación óptima.		
		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.

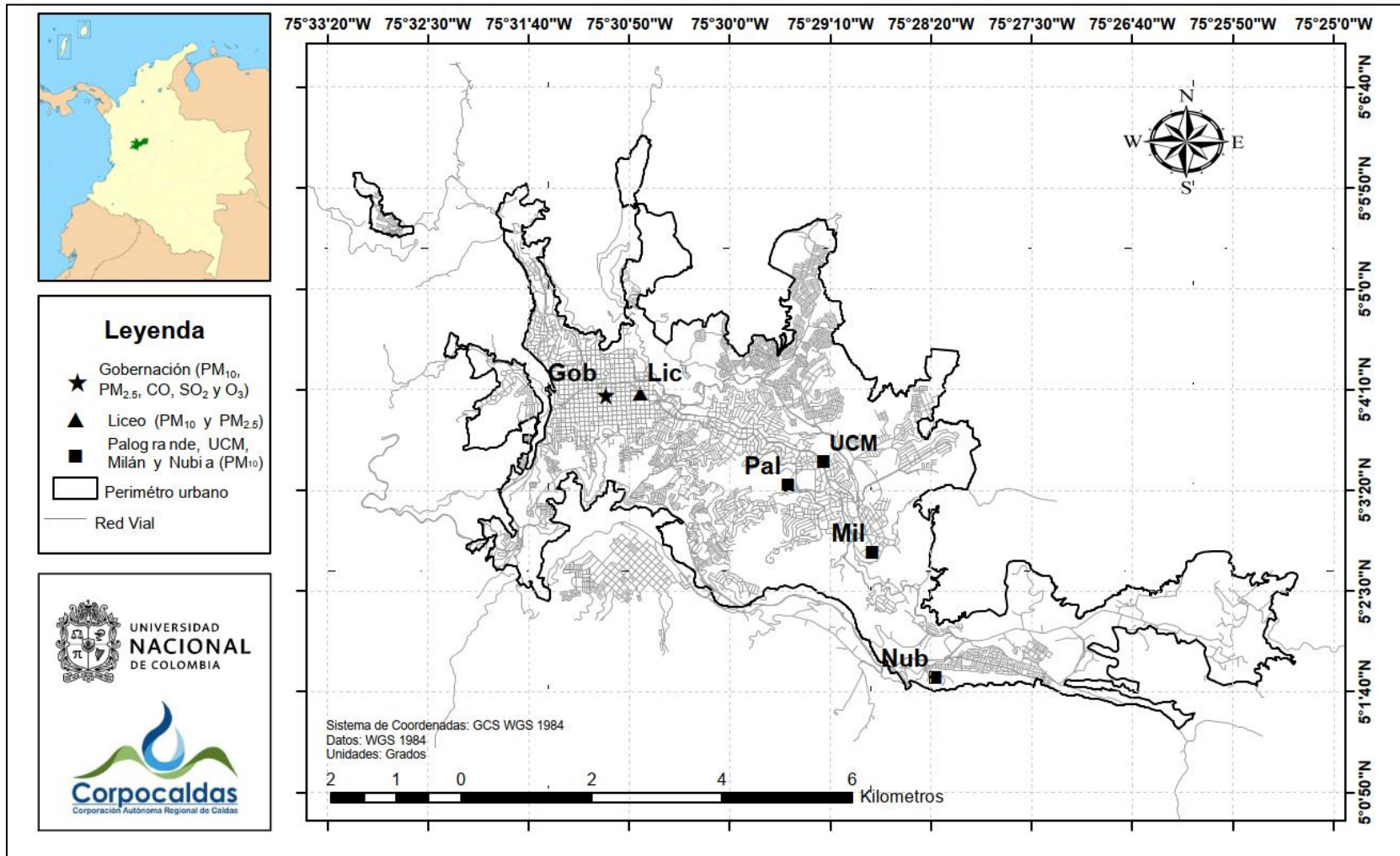


Figura 1. Mapa con ubicación de las estaciones de calidad del aire pertenecientes al SVCA de Manizales para el período de análisis

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 el año 2023. Las estaciones meteorológicas corresponden a Hospital de Caldas, Liceo, Posgrados, Milán planta Niza y 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.

Durante el período de análisis, se observa que el comportamiento de las variables a lo largo de la ciudad es estable. Se destaca en el primer trimestre del año un patrón característico en la ciudad, donde enero – febrero se caracterizan por ser una temporada de bajas precipitaciones, mientras que marzo marca el comienzo de la temporada de altas de precipitaciones en esta región del país. La estación Hospital de Caldas ubicada en centro geográfico de la ciudad registró una precipitación de 427.8 mm en el primer trimestre del 2023, mientras que la estación Liceo registró 465.2 mm. Comparativamente, en el año 2022 en el mismo periodo se registró una precipitación de 586.6 mm en la estación Liceo. Al comparar los valores de las estaciones se observa que Milán obtuvo el mayor registro con 308.4 mm durante el mes de marzo, por su parte Nubia registró el menor valor con 63.2 mm de lluvia durante febrero.

Para el caso de la temperatura ambiente, se observa un comportamiento homogéneo en la ciudad obteniéndose registros entre 15.9 y $18.4^{\circ}C$; donde los meses de marzo y febrero 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 $337.4 W/m^2$ en Nubia durante febrero.

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.

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 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/m²]	Max. Rad. solar [W/m²]
Hospital de Caldas								
Enero	16.2	1.6	219.9	596.0	87.1	123.2	270.7	998
Febrero	17.3	1.6	195.3	594.5	84.8	77.6	293.3	995
Marzo	16.0	1.6	193.5	596.6	90.7	227.0	213.4	998
Liceo								
Enero	16.1	1.3	168.3	589.8	75.6	144.2	256.2	997
Febrero	17.3	1.4	171.1	588.6	70.5	85.6	278.8	998
Marzo	15.9	1.2	123.3	590.4	80.4	235.4	214.4	998
Posgrados								
Enero	16.0	1.2	262.0	594.8	86.3	127.0	271.3	998
Febrero	17.2	1.2	241.8	593.3	83.3	70.2	305.4	993
Marzo	16.2	1.2	226.4	594.8	89.3	227.2	223.8	997
Milán planta Niza								
Enero	17.0	0.9	118.3	584.3	74.3	157.2	288.8	998
Febrero	18.4	1.0	109.3	582.9	76.2	78.6	307.4	998
Marzo	17.0	1.0	139.4	584.6	69.1	308.4	222.0	995
La Nubia								
Enero	16.7	1.3	232.9	596.9	87.6	111.0	307.8	995
Febrero	17.8	1.4	208.1	595.7	84.9	63.2	337.4	998
Marzo	16.9	1.3	217.7	596.9	91.2	282.9	253.2	998

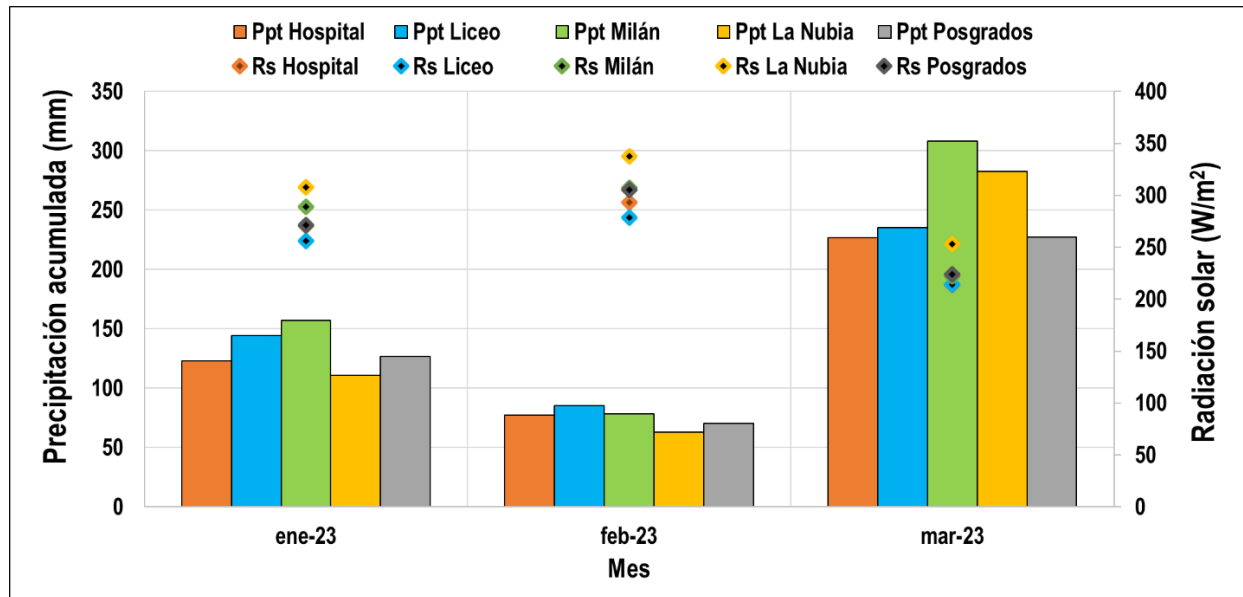


Figura 2. Precipitación mensual acumulada (Ppt) y promedio mensual de radiación solar (Rs) durante el período de análisis

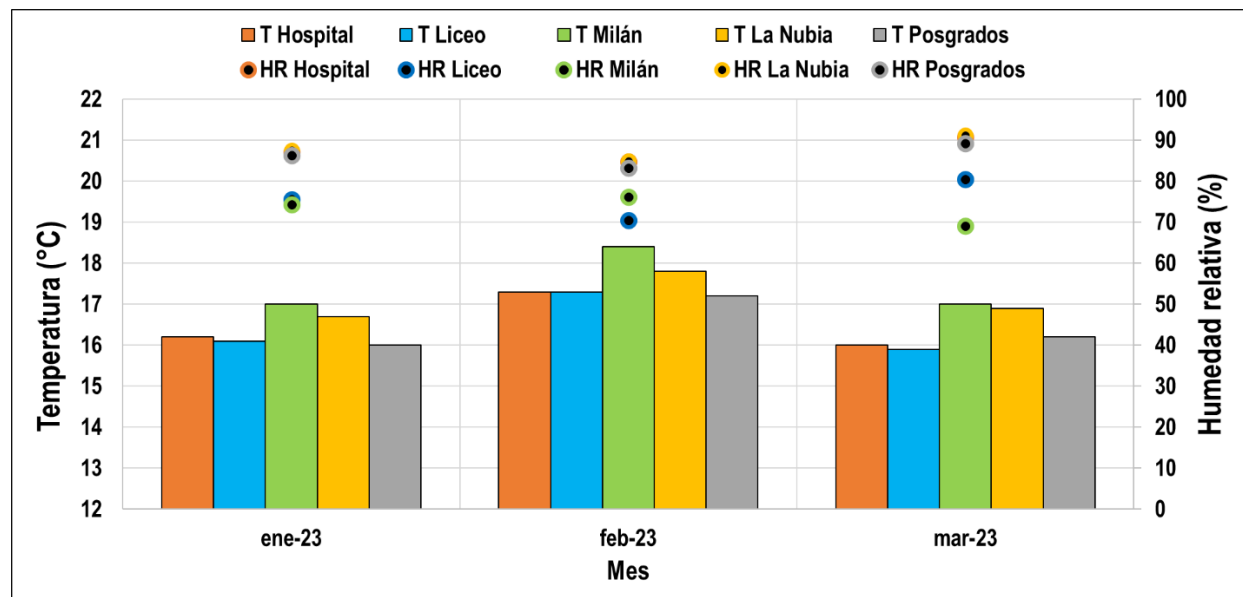


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire (T) y humedad relativa (HR) durante el período de análisis

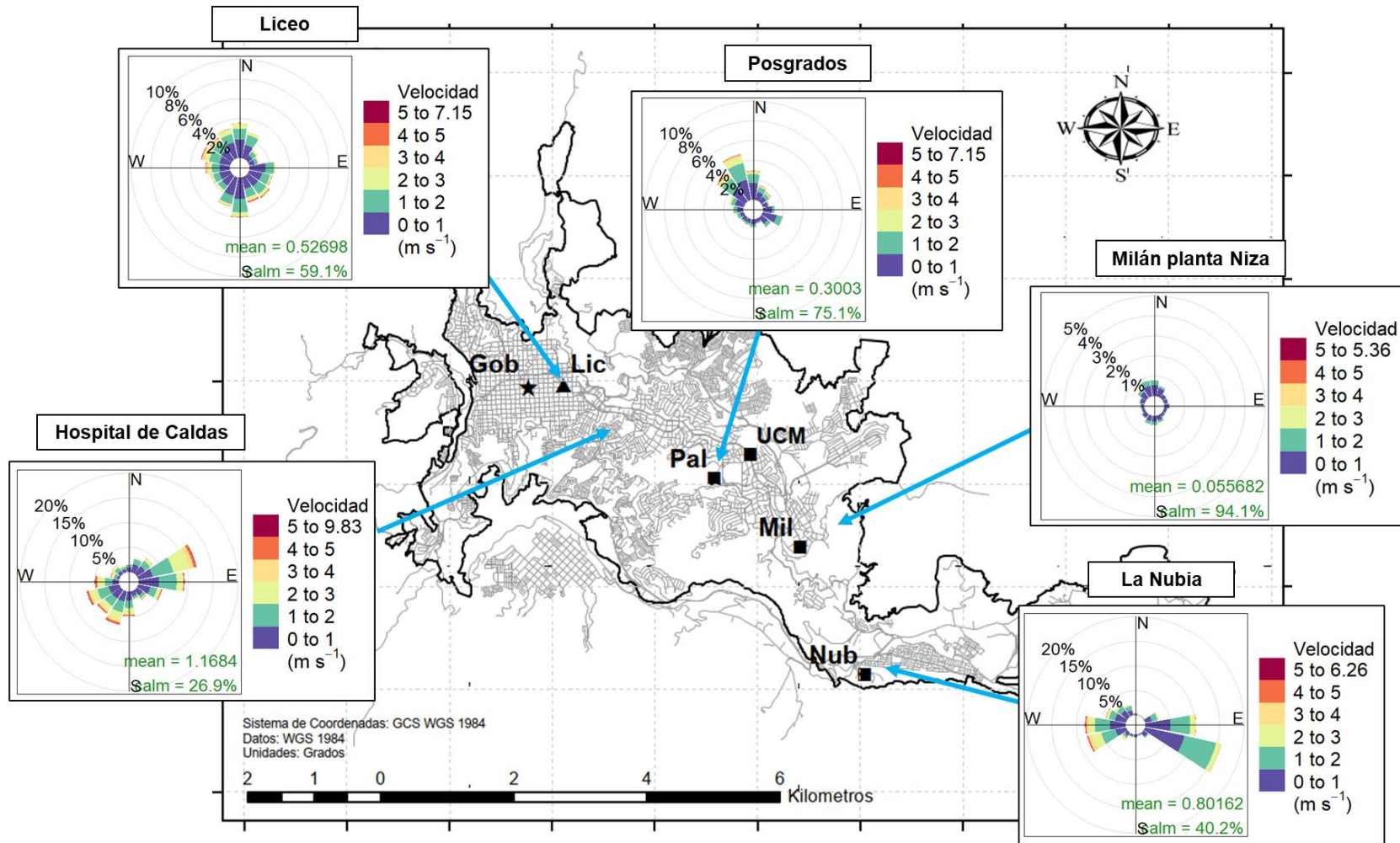


Figura 4. Rosas de viento en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el período de análisis

3. RESULTADOS DE MONITOREO PARA PM₁₀ 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 PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales obtenidas durante el 2023 (enero – marzo). 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, en el primer trimestre del 2023, las estaciones de Milán y Liceo registraron las concentraciones promedio más altas de PM₁₀ con valores de $35 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $30 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente; seguidos por Palogrande con $22 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Católica con $22 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, La Nubia con $21 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y por último Gobernación, con $19 \pm 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 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 2022, registrando los valores más altos de PM₁₀ en Milán y Liceo con promedios mensuales por encima de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 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 (MAVDT, 2010).

Se identificó que Milán presentó los mayores niveles de concentración de PM₁₀ con el mayor promedio aritmético mensual reportado en febrero con $40 \pm 1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y un máximo diario de $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 Católica presentó los menores niveles de concentración con su menor promedio mensual en enero con un valor de $16 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) asociado posiblemente con una disminución de la actividad vehicular de la zona debido al periodo vacacional de los campus universitarios. 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 20%.

En lo referente al monitoreo de PM_{2.5} en la estación Gobernación, se registró un valor promedio de $13 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Enero y febrero presentaron el mayor y menor nivel de concentración, ambos con un promedio mensual de 11 y $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 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 el registro del primer trimestre de 2023 con el mismo periodo del año 2022 ($16 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se obtuvo una disminución de 19%.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales (µg/m³) durante el período de análisis

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	17	20	20	19
Mediana	16	23	18	18
Incertidumbre**	1.20	1.20	1.16	1.2
Desviación Estándar	4	6	8	6
Mínimo	14	8	12	8
Máximo	27	25	37	37
Percentil 95%	24	25	32	27
N° Datos - %DV***	10 - 100	10 - 100	10 - 100	30 – 100
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	27	32	30	30
Mediana	27	32	32	31
Incertidumbre	0.53	0.53	0.57	0.5
Desviación Estándar	5	7	10	8
Mínimo	22	18	16	16
Máximo	38	46	46	46
Percentil 95%	35	43	44	44
N° Datos - %DV	10 - 100	10 - 100	10 - 100	30 – 100
Palogrande PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	18	25	20	22
Mediana	18	27	16	21
Incertidumbre	0.53	0.53	1.06	0.7
Desviación Estándar	3	5	10	7
Mínimo	14	16	10	10
Máximo	22	35	37	37
Percentil 95%	21	32	35	34
N° Datos - %DV	10 - 100	10 - 100	9 - 90	29 - 97
 Espacio en blanco				

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Milán PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	28	40	34	35
Mediana	30	43	36	36
Incertidumbre	0.52	0.52	0.57	0.5
Desviación Estándar	8	9	10	10
Mínimo	13	22	18	13
Máximo	38	53	46	53
Percentil 95%	37	49	46	46
N° Datos - %DV	10 - 100	10 - 100	9 - 90	29 – 97
Nubia PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	18	24	21	21
Mediana	17	24	23	21
Incertidumbre	0.1	0.1	0.14	0.1
Desviación Estándar	4	6	9	7
Mínimo	12	17	9	9
Máximo	25	34	31	34
Percentil 95%	24	34	30	33
N° Datos - %DV	10 - 100	9 - 90	8 - 80	27 – 90
Católica PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	16	26	21	22
Mediana	17	27	23	19
Incertidumbre	0.8	1.1	0.7	0.9
Desviación Estándar	2	6	8	7
Mínimo	14	15	11	11
Máximo	19	35	34	35
Percentil 95%	19	34	33	34
N° Datos - %DV	10 - 100	10 - 100	9 - 90	29 - 97
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)				
Promedio	11	14	12	13
Mediana	11	15	11	12
Incertidumbre	1.17	1.17	1.40	1.2
Desviación Estándar	2	5	6	5
Mínimo	9	6	6	6
Máximo	15	23	27	27
Percentil 95%	14	20	23	21
N° Datos - %DV	10 - 100	10 - 100	10 - 100	30 – 100

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

*** %DV = Porcentaje de datos válidos.

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 $75 \mu g/m^3$ para PM_{10} y $37 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ (MADS, 2017).

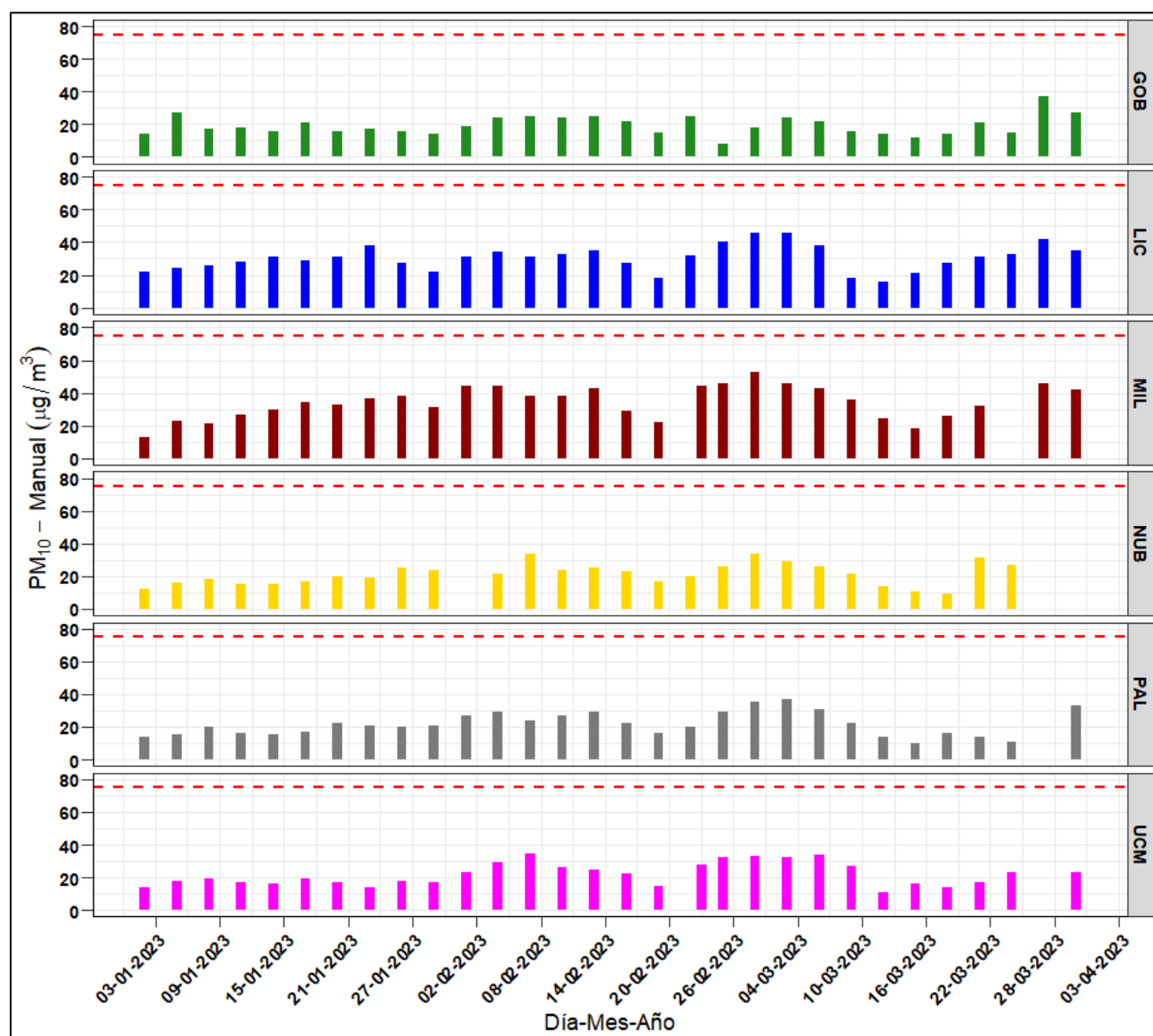


Figura 5. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{10} – Manuales durante el período de análisis

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

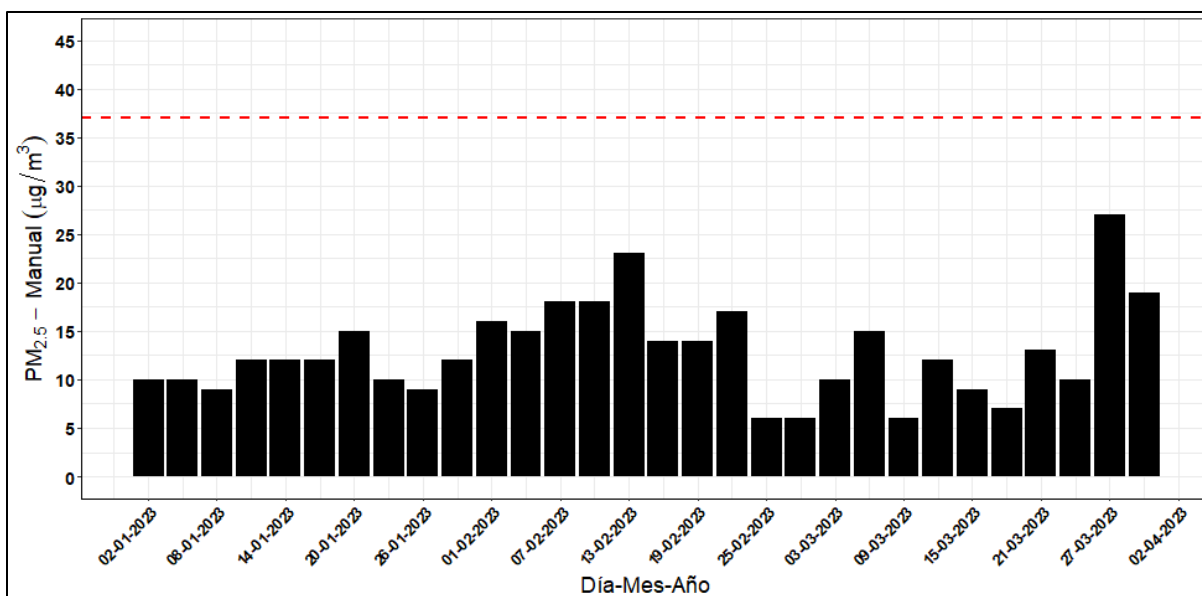


Figura 6. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{2.5} – Manual durante el período de análisis

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

La Figura 7 presenta la variación promedio de concentraciones de PM₁₀ 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 Católica y Nubia ubicadas en campus universitarios, se observan mayores niveles de concentración los martes.

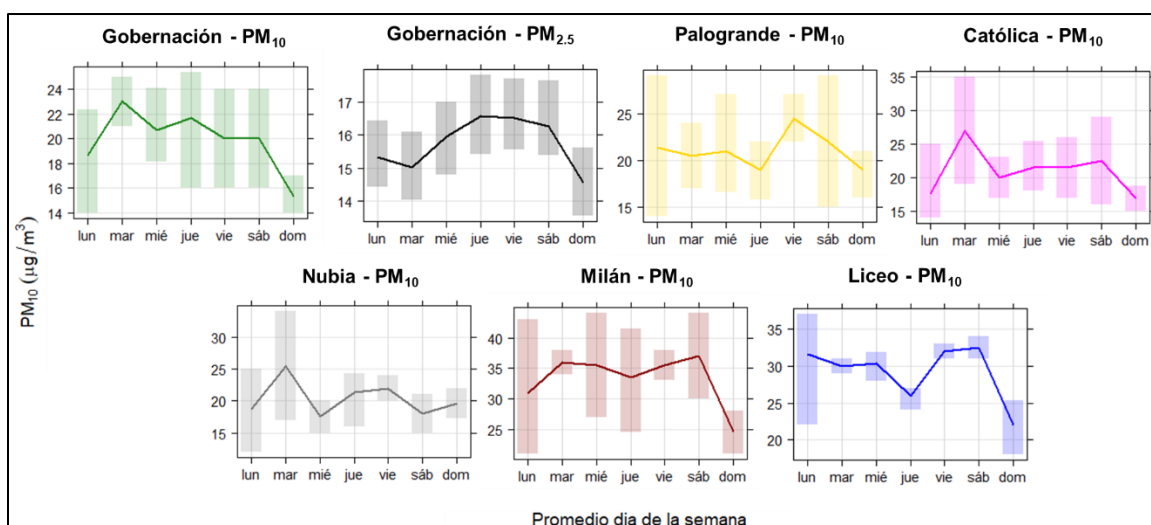


Figura 7. Variación promedio de concentraciones por días de la semana para PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales durante el período de análisis

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

3.2. Equipos manuales: Comparación preliminar con la norma anual

En la Figura 8 se presenta la comparación del promedio aritmético obtenido a la fecha 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} ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $PM_{2.5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Se observó que, de manera preliminar, 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).

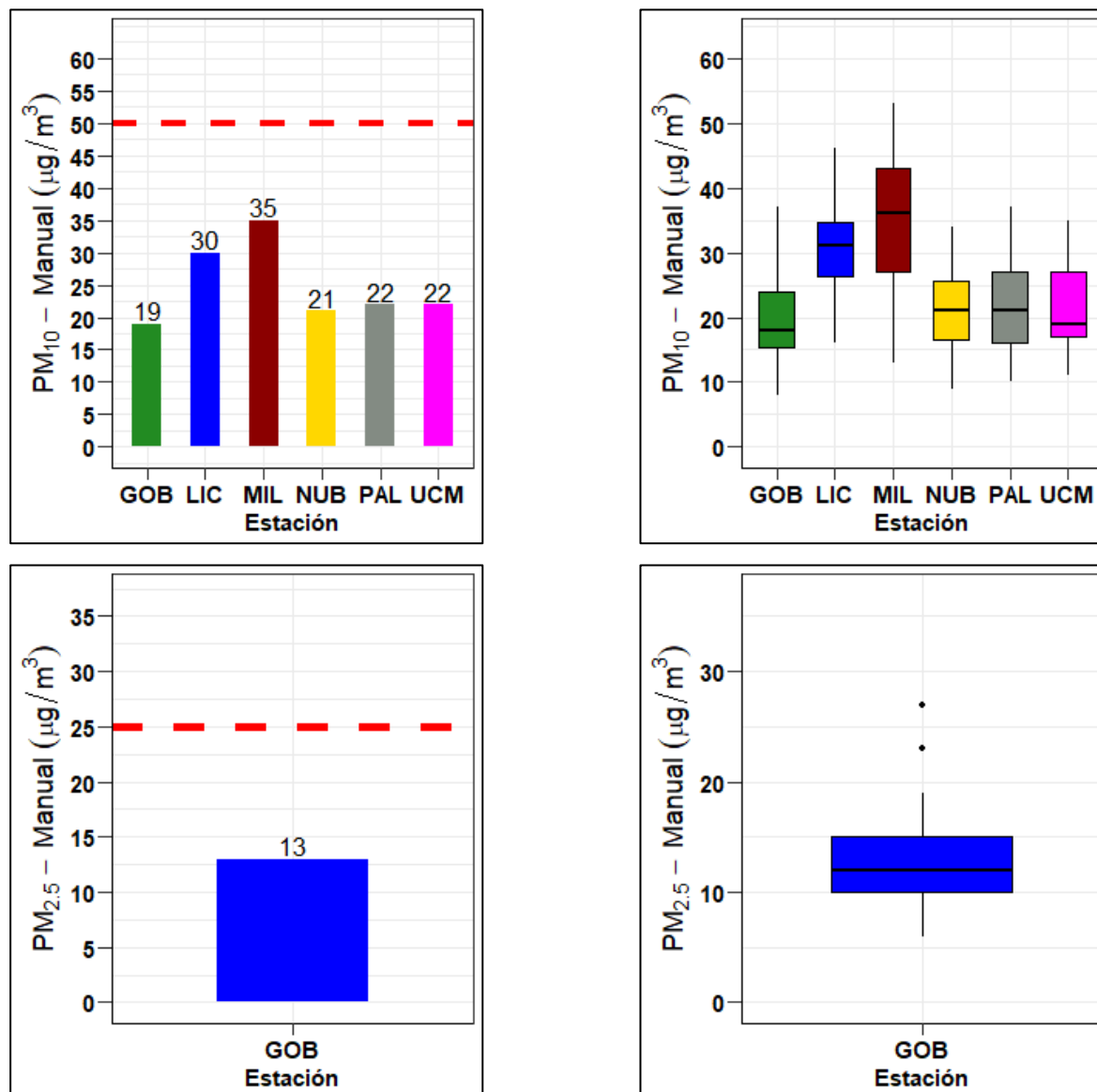


Figura 8. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Manuales durante el período de análisis

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 presenta los estadísticos descriptivos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos en las estaciones Gobernación y Liceo durante el primer trimestre de 2023 (enero – marzo). Se observó que las concentraciones promedio (medianas¹) de Gobernación para PM_{10} y $PM_{2.5}$ se encontraron alrededor de los $32.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $12.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $16.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivamente. De otra parte, las concentraciones promedio medianas de Liceo para PM_{10} y $PM_{2.5}$ se encontraron alrededor de los $30.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $18.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $5.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 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, se puede observar un patrón similar al observado en los equipos manuales en donde febrero presentó los registros más altos con medianas mensuales para PM_{10} de $39.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Gobernación y $36.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Liceo; así como valores para $PM_{2.5}$ de $20.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Gobernación y $23.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Liceo. En cuanto a los máximos promedios diarios, se relacionan días con ausencias de precipitaciones y su recurrencia por más de 7 días consecutivos durante febrero, obteniéndose registros para PM_{10} de $66.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Gobernación y $50.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Liceo y para $PM_{2.5}$ de $28.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Gobernación y $30.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Liceo.

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

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Gobernación PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)				
Promedio	29.8	41.2	28.5	32.9
Mediana	26.2	39.9	27.6	31.8
Desv. Est.	13.7	10.8	7.5	12.2
Min.	8.6	20.9	15.6	8.6
Max.	53.7	66.1	45	66.1
Percentil 95	47.9	61.6	42.2	52.7
N° Datos	31	28	31	90
Liceo PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)				
Promedio	27.5	36.4	29.3	30.9
Mediana	27.3	36.9	27.3	30.8
Desv. Est.	5.6	4.5	8.6	8
Min.	15.7	21.4	15.9	15.7
Max.	37.8	50.6	49.7	50.6
Percentil 95	35.6	46.1	43.5	46.1
N° Datos	31	28	31	90

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.	Total
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)				
Promedio	14.4	20.3	15.3	16.6
Mediana	15.3	20.5	15.2	16.8
Desv. Est.	3.7	4.1	4.8	4.9
Min.	6.6	12.2	8.2	6.6
Max.	19.1	28.1	26.7	19.1
Percentil 95	18.9	26.1	24.1	26.1
N° Datos	31	28	31	90
Liceo PM_{2.5} (µg/m³ estándar)				
Promedio	16.3	22.6	17.2	18.6
Mediana	15.6	23.4	16.7	17.7
Desv. Est.	4.1	6.8	5.8	5.6
Min.	8.6	13.2	8.3	8.3
Max.	22.7	30.1	29.7	30.1
Percentil 95	22.2	29.1	28.3	28.1
N° Datos	31	28	31	90

* Datos promedio diarios del equipo

La Figura 9 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos PM₁₀ 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 PM₁₀ y PM_{2.5}, 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 PM₁₀ 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 40 µg/m³ para PM₁₀ y 20 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 900 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).

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.

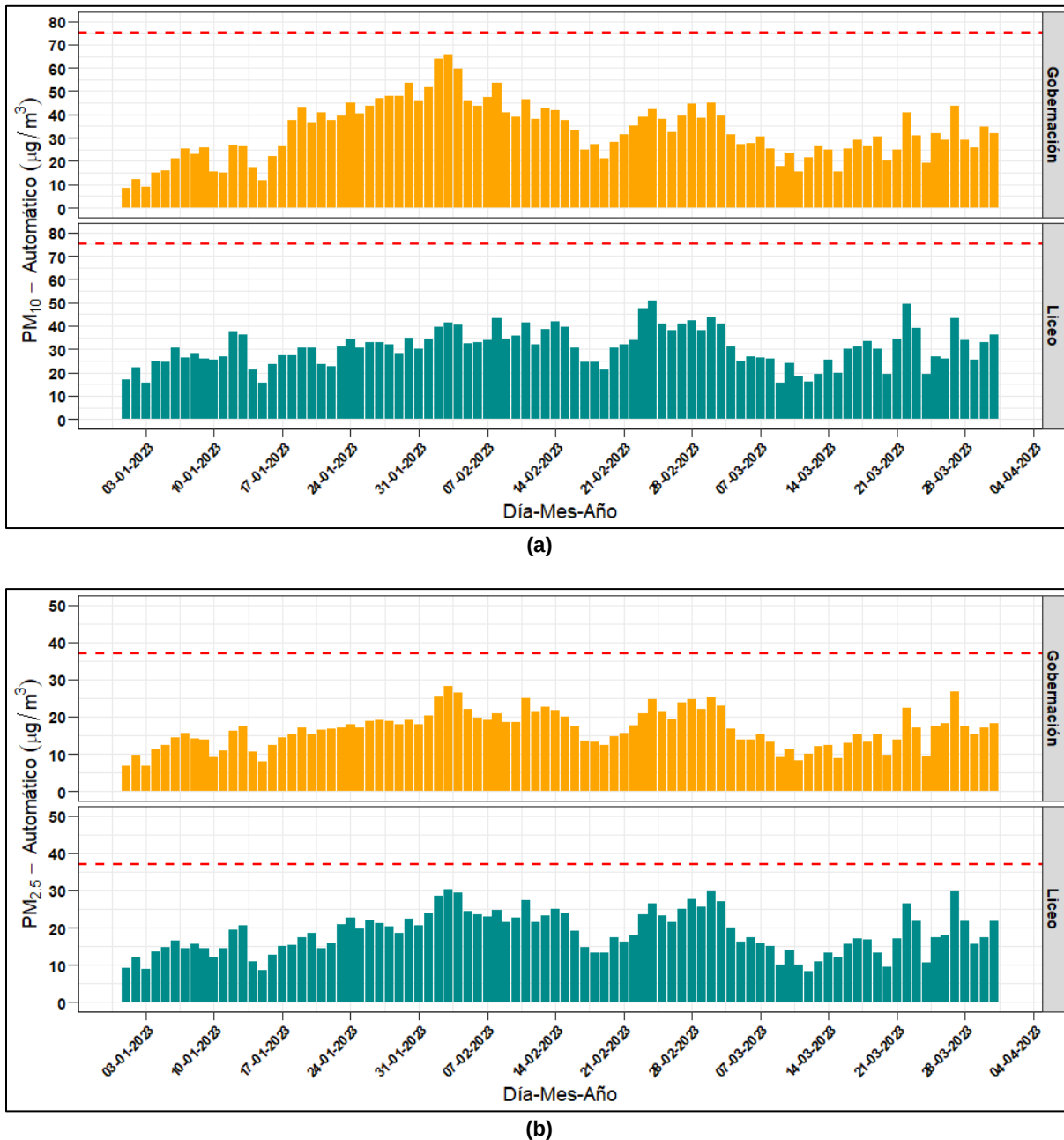


Figura 9. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM₁₀ y PM_{2,5} – Automáticos durante el año 2022: (a) PM₁₀ (b) PM_{2,5}

La línea punteada roja hace referencia a los límites máximos diarios permisibles definidos en la Res, 2254 de 2017 del MADS: 75 µg/m³ (PM₁₀) y 37 µg/m³ (PM_{2,5})

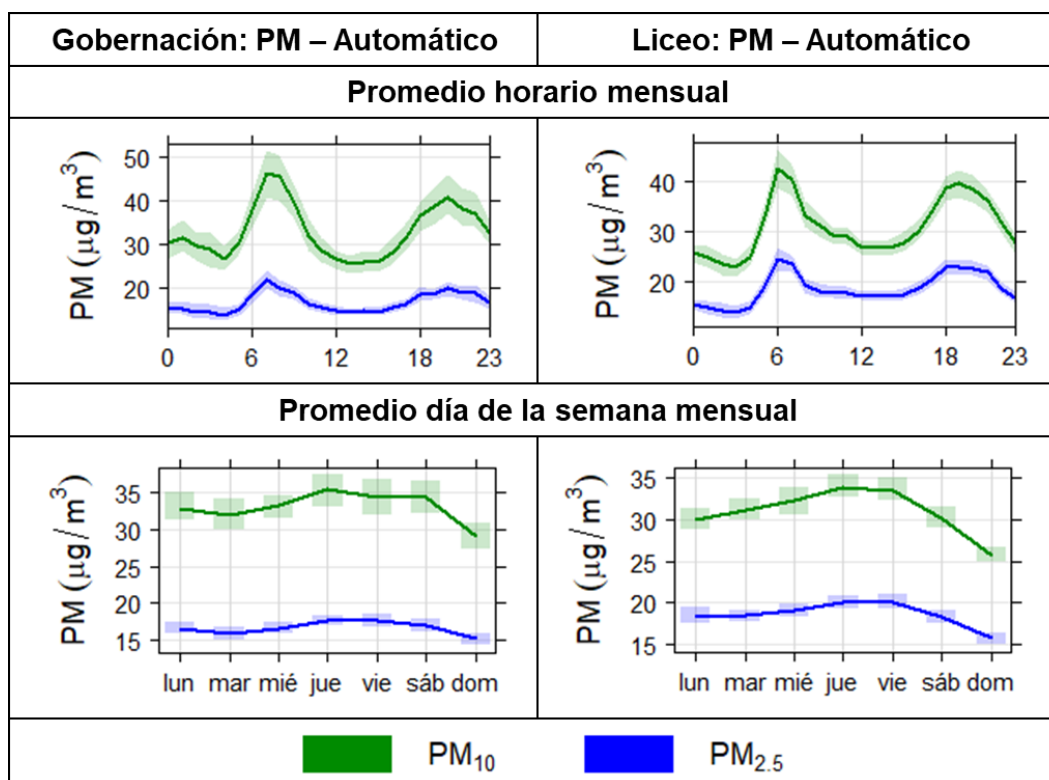


Figura 10. Promedio horario y semanal de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el periodo de análisis. Gobernación (izquierda) y Liceo (derecha)

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

3.4. Índice de calidad del aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2.5} en el SVCA de Manizales

Las Figura 11 y Figura 12 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 PM₁₀ – 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 43% de los días analizados presentaron ICA en estado moderado, un 44% menor con respecto al mismo periodo del año 2022 (primer trimestre, PM_{2.5} – Manual 77% ICA moderado).

Por otro lado, las concentraciones de PM₁₀ – Automático presentaron calidad del aire en estado bueno en todos los días en la estación Liceo. Por su parte, en Gobernación se presentaron tres días consecutivos con clasificaciones en estado moderado 2 al 4 de febrero, valores relacionados a la ausencia de lluvias, fenómeno que permaneció por cerca de 7 días consecutivos. Para el caso de PM_{2.5} – Automático, en ambas estaciones se tuvo un porcentaje entre 77% 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 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.

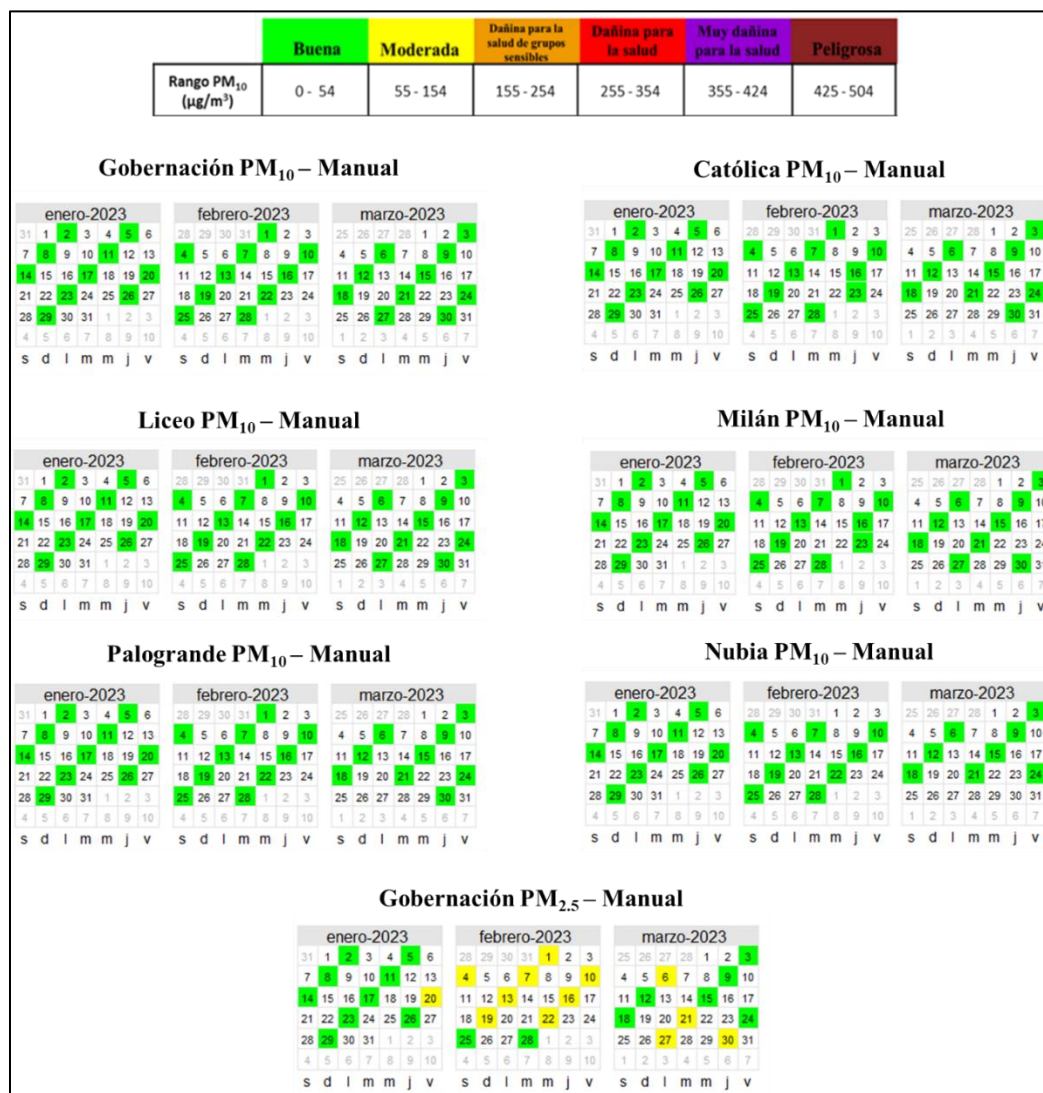


Figura 11. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Manual en las estaciones: Gobernación, Liceo y Milán del SVCA de Manizales durante el período de análisis

Cálculo según lineamientos de la resolución 2254 de 2017 del MADS

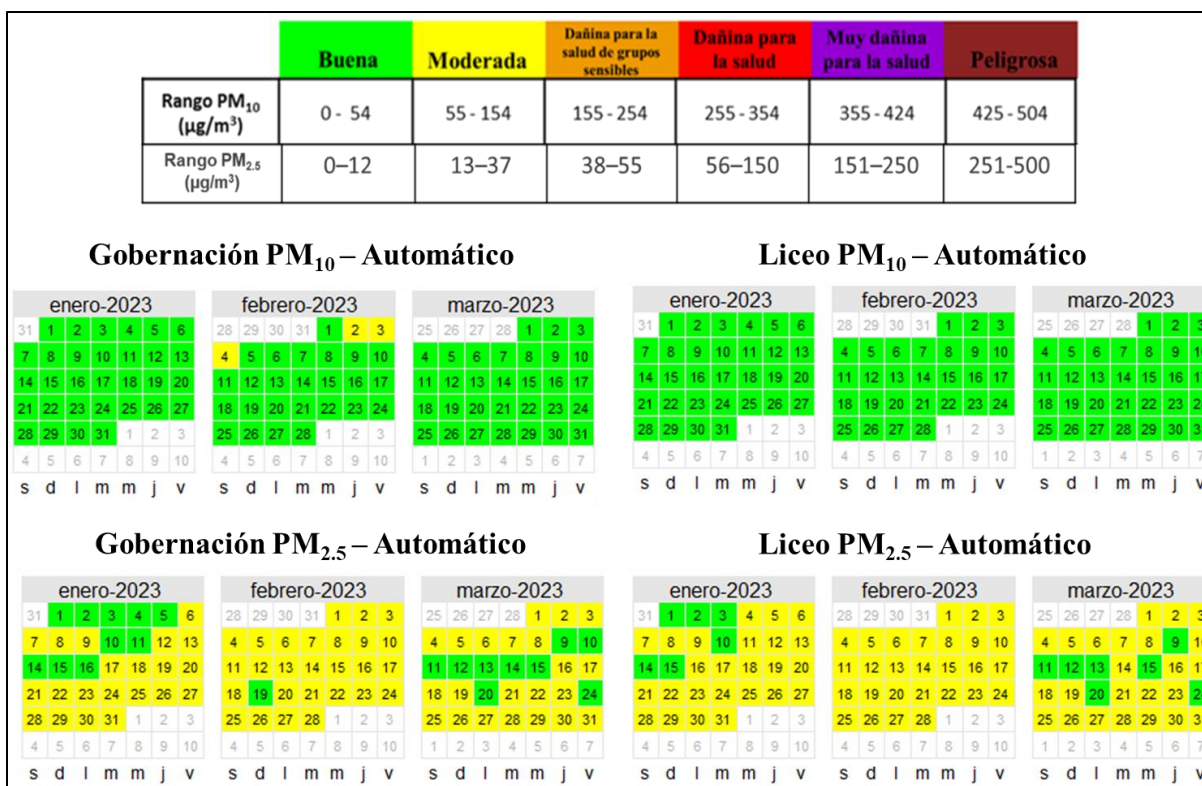


Figura 12. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático en las estaciones: Gobernación y Liceo durante el período de análisis
Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

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, durante 2023 las concentraciones promedio medianas² se encontraron alrededor de 795 µg/m³ (desv. std. = 640.8 µg/m³). Al comparar los registros de la mediana del 2023 con respecto al año 2022 (867,4 µg/m³), se observó una disminución del 8.3%, una variación poco 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

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.

ciudad. Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que enero presentó el mayor registro con un valor de $1101.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, indicando un posible aumento en la presencia de vehículos particulares en inmediaciones de la estación debido a las festividades de las ferias de Manizales.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el período de análisis

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Promedio	1101.63	959.9	867.8	977
Mediana	1101.6	748.3	703	795
Incertidumbre**	1.3	1.3	1.3	1.3
Desv. Est.	678.1	627.3	591.7	640.8
Min.	178.1	209.2	162.4	162.4
Max.	3816.8	4200	4243.2	4243.2
Percentil 95	2584.3	2175.2	1935.1	2340.2
N° Datos	743	671	744	2158

* 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 13 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). 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 14 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 $1700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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).

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 $720 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta disminución cercana al 28% en comparación con el promedio semanal, indica la representatividad del aporte de las fuentes móviles en las concentraciones de CO observadas.

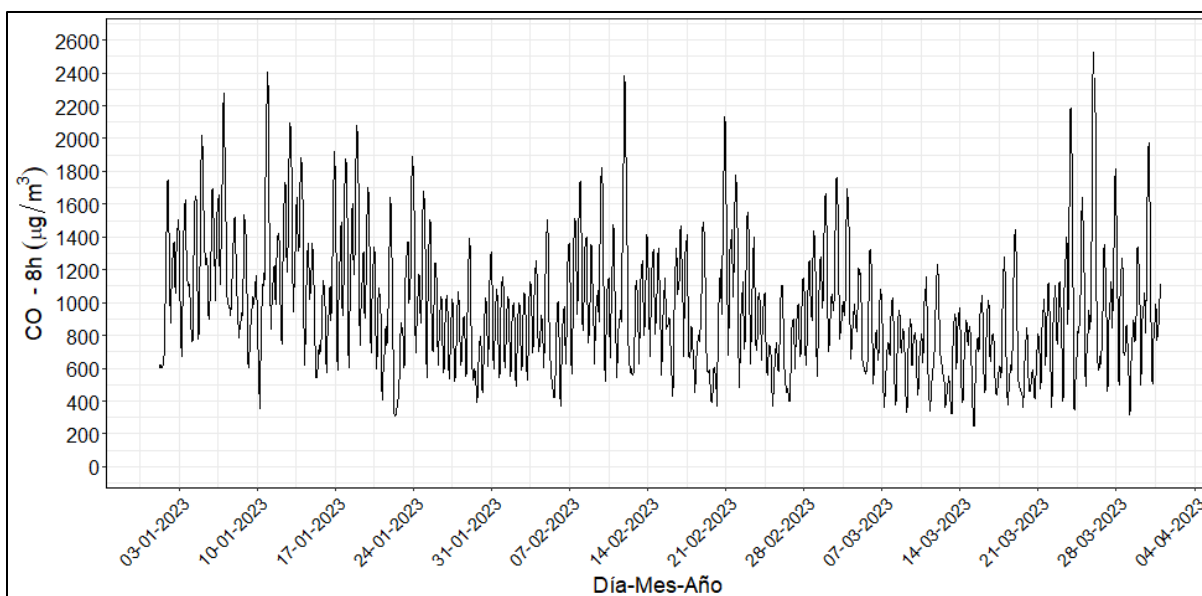


Figura 13. Evolución temporal de concentraciones promedio octohoraria de CO durante el período de análisis

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

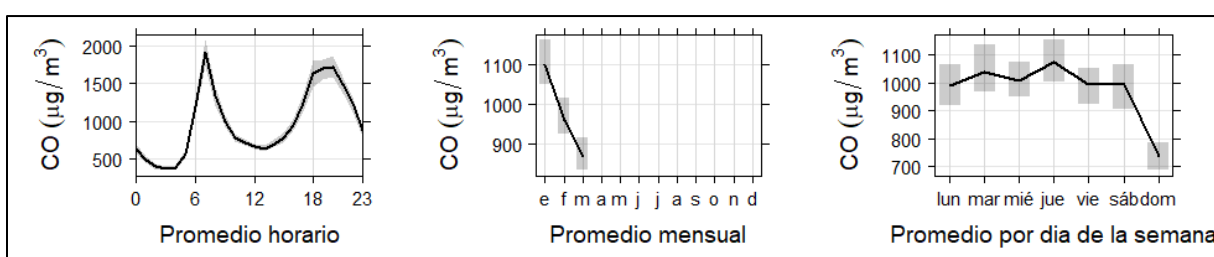


Figura 14. Variación promedio de CO horario (izquierda), mensual (centro) y por día de la semana (derecha) durante el período de análisis

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

4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (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 medianas³ se encontraron alrededor de $4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std. = $2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con un máximo valor horario registrado de $21.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenido en febrero, registro atribuible a la actividad volcánica (ver sección 5.1) y la ausencia de precipitaciones. Al comparar el registro de la mediana en mención con respecto al año 2022 ($5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se observó una disminución del 13%, indicando una variabilidad no significativa en la ciudad para este contaminante.

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.

En Manizales, las fuentes móviles en ruta han sido identificadas como fuentes de aporte considerable de este contaminante en cercanías de 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 al igual que PM y CO durante febrero se presentó el mayor promedio horario con un valor de $21.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, específicamente el 8 febrero, valor atribuido a una emisión de gases del volcán en donde la columna superó los 3000 m de altura (SGC, 2020).

Tabla 6. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el período de análisis

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Promedio	5.4	5.5	4.2	5
Mediana	4.9	4.6	3.6	4.4
Incertidumbre**	1.5	1.5	1.5	1.5
Desv. Est.	1.7	2.6	1.9	2.2
Min.	2.7	2.2	1.6	1.6
Max.	16.7	21.1	12.9	21.1
Percentil 95	8.9	10.4	8.3	9.3
N° Datos	648	671	744	2063

* 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 válidos (<30% del mes) o ausencia de datos ocasionado por fallas de medición.

De manera complementaria, la Figura 15 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 permitidos por la normatividad vigente ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 1 hora).

La Figura 16 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 $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 $5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y mínimos promedio los domingos alrededor de los $4.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ relacionados a la actividad de las fuentes móviles en ruta de la ciudad.

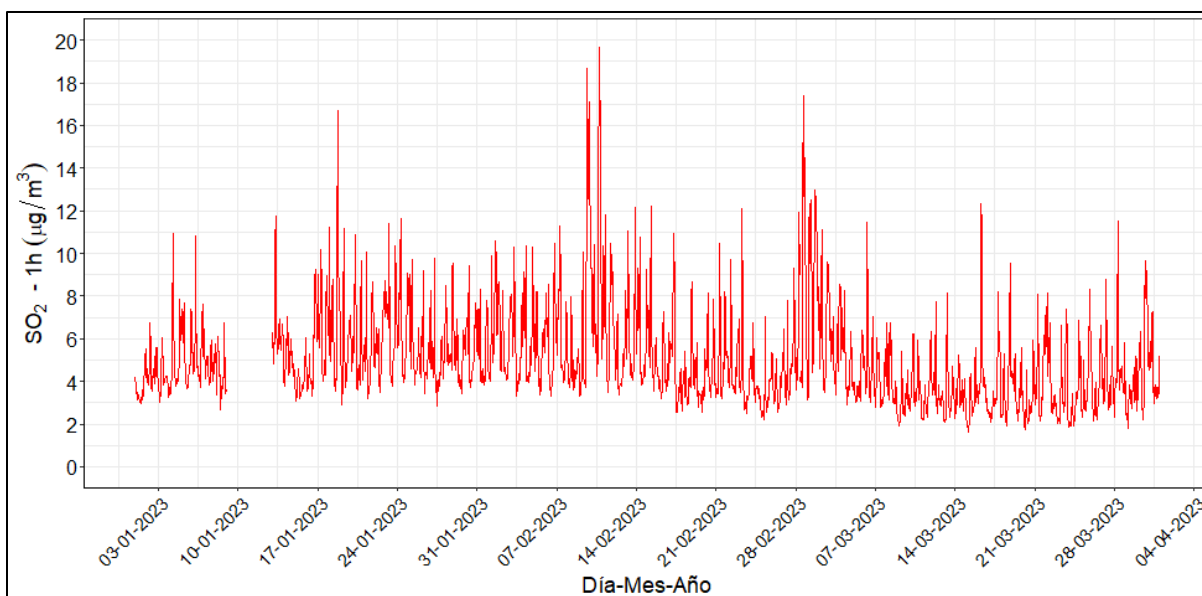


Figura 15, Evolución temporal de concentraciones promedio horario de SO₂ durante el período de análisis

El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a 100 µg/m³ no fue superado en ningún día

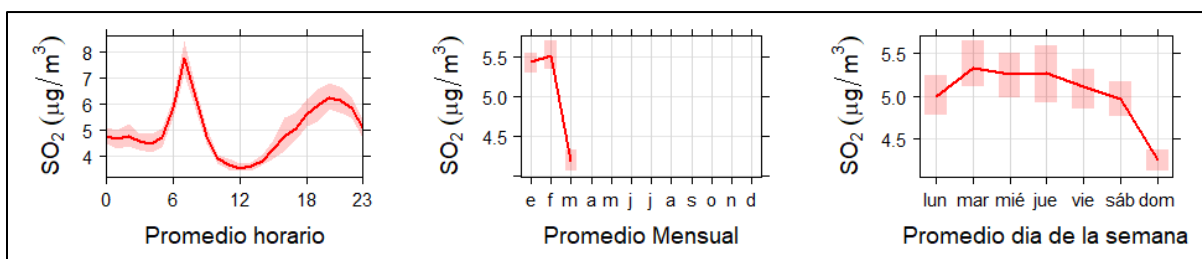


Figura 16. Variación promedio de SO₂ horario (izquierda), mensual (centro) y por día de la semana (derecha) durante el período de análisis

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

4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O₃)

La Tabla 7 presenta los estadísticos descriptivos para O₃ durante el periodo de análisis, así como la subclasificación entre las concentraciones del día (diurno) y la noche (nocturno). Las concentraciones promedio medianas⁴ para el 2023, se encontraron alrededor de 23,3 µg/m³ para el día completo, 39.3 µg/m³ para la jornada diurna y 15 µg/m³ para la jornada nocturna. Al comparar los registros de la mediana diaria de lo corrido del 2023 con respecto al 2022 (24.6 µg/m³), se observó una disminución del 5.3%, indicando un posible cambio en la emisión de precursores de O₃.

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.

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 marzo se presentó el menor registro con un valor de $28.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y durante febrero se registró el mayor promedio mensual con un valor $32.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La Figura 17 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 ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 ($\text{OH}\cdot$) en el ambiente.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el período de análisis y su comparativo entre periodos del día

Periodo	Estadísticos	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Diario (0:00 a 23:59)	Promedio	27.3	32.3	26.1	28.4
	Mediana	22.7	26.3	20.9	23.3
	Incertidumbre**	1.1	1.1	1.1	1.1
	Min.	1.6	1.8	1.5	1.5
	Max.	91.3	92.3	84.5	92.3
	Percentil 95	68.4	76.1	65.2	71.5
	N° Datos	743	671	744	2158
Diurno (6:00 a 17:59)	Promedio diurno	38.5	45.5	35.8	39.7
	Mediana diurna	38.3	47.8	34.9	39.3
	Desv. Est.	21.6	25.1	21.3	22.9
	Max.	91.3	92.3	84.5	92.3
	N° Datos	371	334	372	1078
Nocturno (18:00 a 5:59)	Promedio nocturno	16.1	19.1	16.3	17.1
	Mediana nocturna	13.5	16.3	14.1	15
	Desv. Est.	11.4	12.5	11.3	11.8
	Max.	54.7	57.4	58.9	58.9
	N° Datos	372	336	372	1080

* 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.

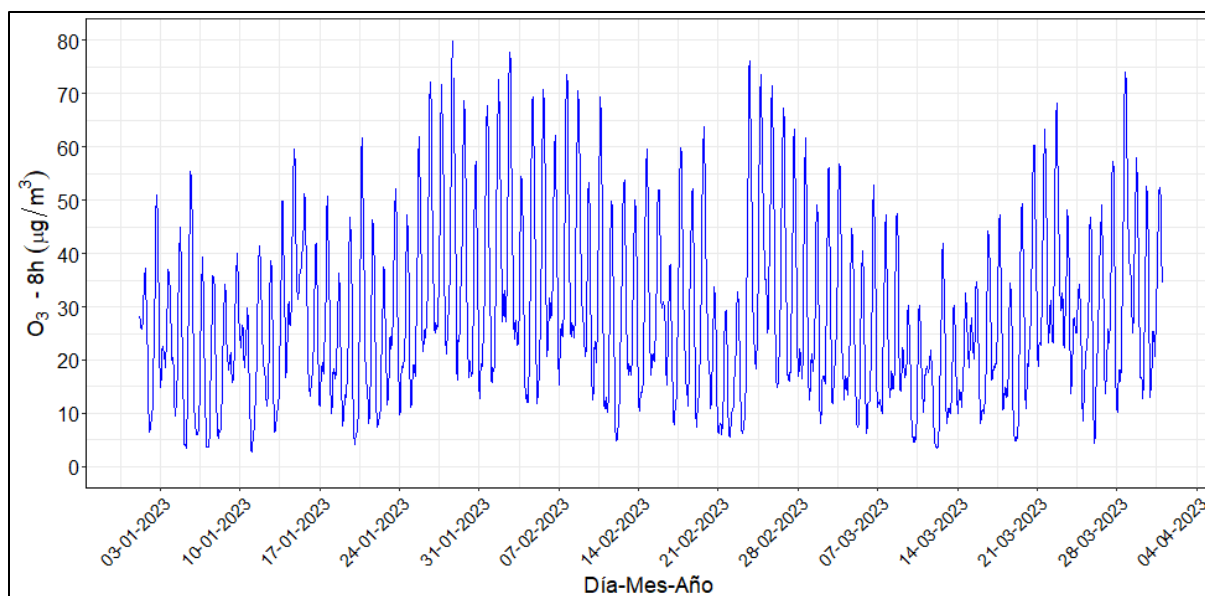


Figura 17. Evolución temporal de concentraciones promedio octohorario de O_3 durante el período de análisis

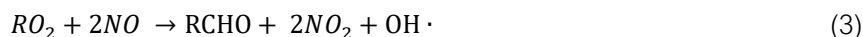
El nivel máximo permisible octohorario de la Res, 2254 de 2017 equivalente a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no fue superado

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 ($\text{OH}\cdot$) 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).



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).



Dónde: $h\nu$ representa la energía fotoquímica efecto de la radiación solar en su longitud de onda corta.

La Figura 18 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 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones diurnas son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con una mediana diurna de $39.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una nocturna de $17.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

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.

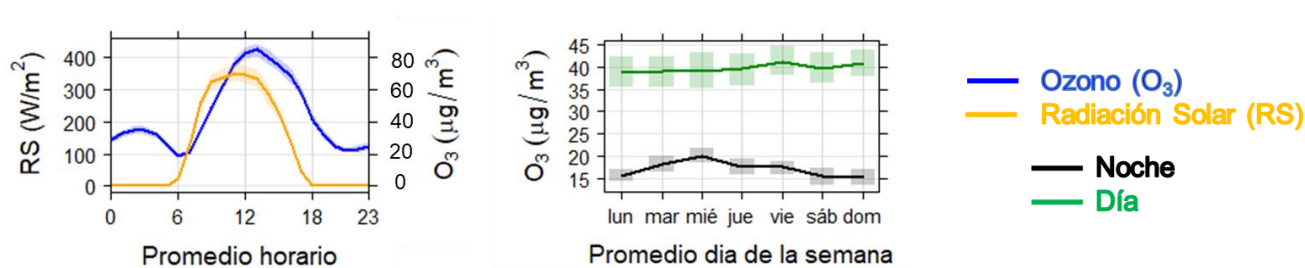


Figura 18. Variación promedio horaria de O_3 y Radiación solar. Se incluye además el comportamiento promedio semanal entre las horas diurnas y nocturnas durante período de análisis

4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O_3 , SO_2 y CO en el SVCA de Manizales

La Figura 19 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 (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 lo corrido del 2023 para los contaminantes mencionados.

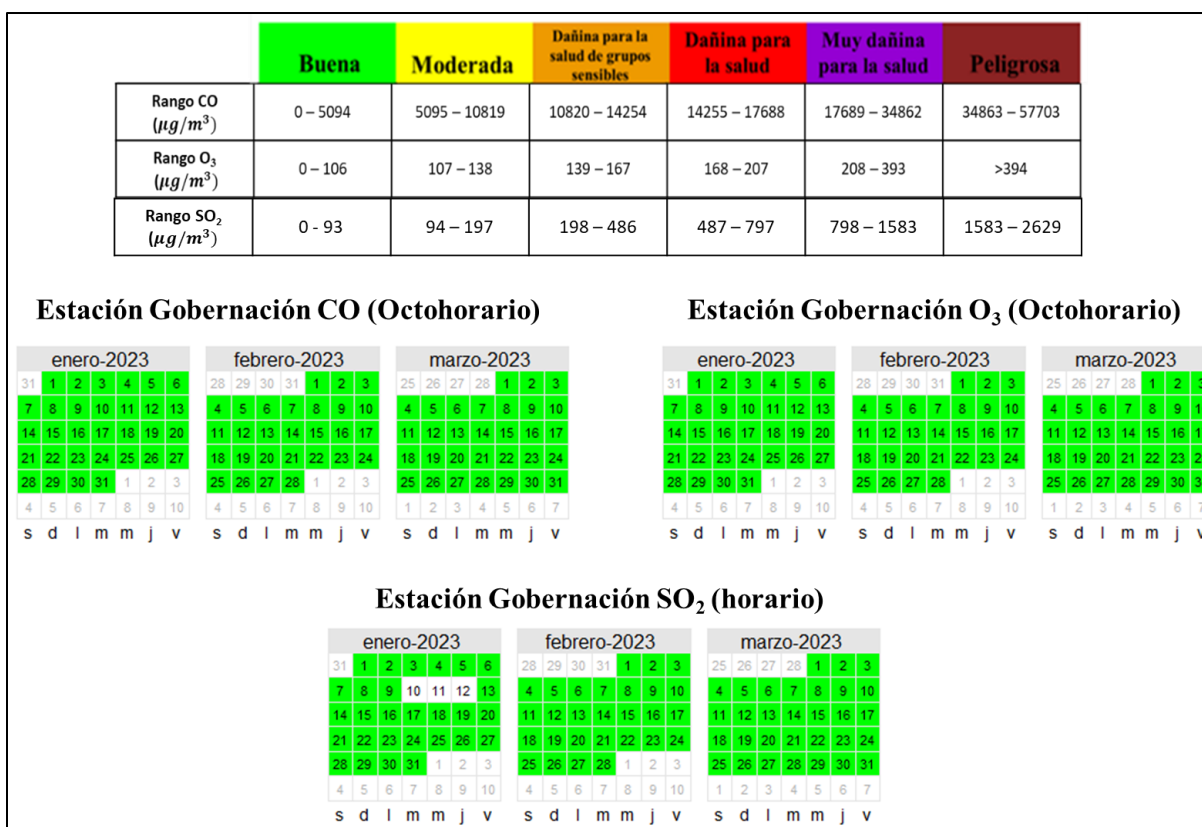


Figura 19. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, SO_2 y O_3 en Manizales durante el período de análisis

Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS

5.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz

Durante el primer trimestre de 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 SO₂. 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 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 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 SO₂ fueron de 9.3 µg/m³, caso similar al ocurrido el día 08 de febrero que registró concentraciones de 53.6 µg/m³ para PM₁₀ y 8.8 µg/m³ de SO₂.

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 PM₁₀ – Automático y SO₂ 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)
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
25-01	1300	Noroccidente	40.6	6.5
01-02	1800	Noroccidente	51.7	7
08-02	3800	Occidente	53.6	8.8
15-02	1600	No predominante	37.4	6.1
23-02	1300	No predominante	38.8	6.3
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

*-- Ausencia de datos

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 SO₂ 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_{2,5}/PM₁₀ 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_{2,5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide,
- Our World in Data, “Indoor Air Pollution” Hannah Ritchie and Max Roser, 2019, [En línea], Disponible en: <https://ourworldindata.org/air-pollution>, [Último acceso: 17/04/2022],
- 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