

SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES Enero - Septiembre 2025

*Angel David Gálvez Serna,
*Caren Xiomara Guzmán España,
*Carlos Mario González Duque,
**Mauricio Velasco García



Equipo Hi-Vol Manual / Estación Nubia
Campus La Nubia, Universidad Nacional de Colombia / Manizales, Caldas



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA



*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	6
3. RESULTADOS DE MONITOREO PARA PM ₁₀ Y PM _{2.5}	11
3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales	11
3.2. Equipos manuales: Comparación con la norma anual	14
3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales.....	15
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.....	23
4.1. Monitoreo de dióxido de azufre (SO ₂)	23
4.2. Monitoreo de ozono troposférico (O ₃)	25
4.3. Índices de calidad del aire (ICA) para SO ₂ y O ₃ en el SVCA de Manizales	28
5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS	30
5.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz.....	30
6. REFERENCIAS	31

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

Para el 2019 la contaminación atmosférica se constituyó como 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 2025 en la ciudad de Manizales se cuenta con un SVCA conformado por nueve (7) equipos para el monitoreo de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$: Cinco (5) equipos manuales de PM_{10} 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 norma colombiana: *Resolución 2254 de 2017* (MADS, 2017).

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 a septiembre de 2025

Estación (Abreviatura)	Características y fuentes de contaminantes*	Equipos	Propietario	Año de inicio operación óptima	Estado actual y operación durante 2025	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación (Gob)	CU, SC – MTV, MAI	SO ₂ - Automático	UN	2019	Los equipos de gases presentaron inestabilidad para el primer semestre del año. Para CO, los daños persisten. El equipo de PM – Automático recolecta datos con normalidad.	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2155
		O ₃ - Automático	UN	2018			
		CO - Automático	Corpocaldas	2018			
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^a	Corpocaldas	2019			
Palogrande (Pal)	ZC, SE – MTV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^b	UN	2009	Operación óptima.	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
Nubia (Nub)	ZSE, SE – BTV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^b	UN	2017	Se inicia recolección de muestras el 09 de febrero.	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo (Lic)	CU, SC – ATV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^b	Corpocaldas	2010	Se inicia recolección de muestras de PM – Automático el 17 de marzo. El equipo de PM – Manual inicio actividades el 16 de enero.	N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58"	2156
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^a	Corpocaldas	2019			
Milán (Mil)	ZC, ZI, SR – MTV, AZI	PM ₁₀ - Manual ^b	Corpocaldas	2012	Se inicia recolección de muestras el 12 de febrero.	N 5° 2' 48.5" W 75° 28' 48.68"	2188
Católica (UCM)	SC, SR, SE – ATV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^b	Corpocaldas - UCM	2021	Operación óptima.	N 5° 3' 34.13" W 75° 29' 13.63"	2091

^a - Equipo automático – nefelómetro (Técnica fotométrica)

^b - Equipo de alto volumen (Hi-Vol).

*Características:

SR: Sector residencial

SC: Sector comercial

SE: Sector educativo

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

MAI: Moderada actividad industrial

AZI: Adyacente a zona industrial

SAI: Sin actividad industrial.

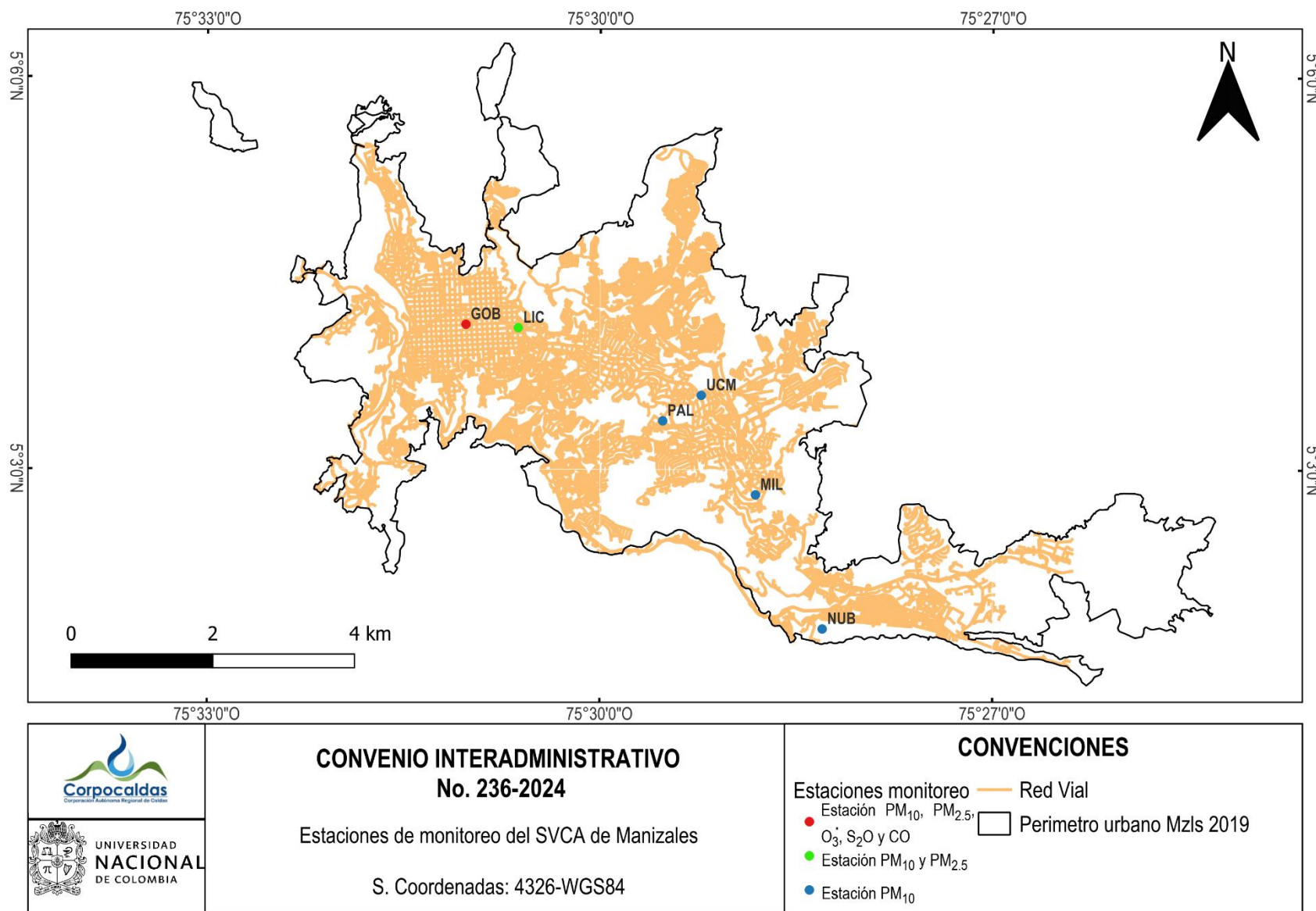


Figura 1. Mapa con ubicación de las estaciones de calidad del aire pertenecientes al SVCA de Manizales

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). En cuanto al estado del SVCA, las estaciones Liceo y Gobernación presentaron interrupciones en la toma de datos, ocasionadas por obras de adecuación en sus instalaciones durante el primer trimestre, situación que ya ha sido solucionada satisfactoriamente. La estación Liceo retomó su actividad el 17 de marzo, mientras que la estación Gobernación fue reinstalada el 20 de febrero.

De otra parte, pese a las fallas presentadas durante los primeros meses de 2025 con la cabina de gases, a partir de mayo se solucionaron los inconvenientes técnicos presentados y entraron en funcionamiento los analizadores de O_3 y SO_2 . En el caso del analizador de monóxido de carbono (CO), el equipo continúa registrando datos inconsistentes. Estas condiciones técnicas han comprometido la calidad de los datos obtenidos para el seguimiento de CO, generando pérdida en los resultados y continuidad de la información. Específicamente para CO, la situación está siendo atendida y se espera para el 2026 contar nuevamente con registros confiables y continuos.

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 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 primer semestre de 2025. Las estaciones meteorológicas corresponden a Liceo, Posgrados, Milán Planta Niza, La Nubia y Hospital de Caldas. Esta última incluida por su influencia regional o mesoescala, lo cual permite comprender los fenómenos meteorológicos en toda el área urbana de la ciudad. 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 lo corrido del 2025, se evidencian mínimos de precipitación para el mes de julio en todas las estaciones, se registraron temperaturas máximas diarias que superaron los $30^{\circ}C$ durante los meses más secos y se observa el régimen bimodal de lluvias característico de la región, notándose el efecto de bajas precipitaciones en enero y en julio. La estación Milán planta Niza registró la mayor precipitación mensual con un acumulado de 303 mm en febrero, mientras que Posgrados tuvo el menor registro mensual con 17.4 mm en julio. Para la radiación solar se identifica un comportamiento inverso a la precipitación con promedios mensuales por encima de $177 W/m^2$ en toda la ciudad, y máximos promedios mensuales de hasta $306.2 W/m^2$ como en Hospital de Caldas durante enero.

Por su parte la humedad relativa se relacionó de forma directa con las precipitaciones y de manera inversa con la temperatura y radiación solar, obteniéndose la mayor humedad relativa promedio mensual durante febrero con un valor de 91.7 % en La Nubia y mínimos mensuales de 62.1% en Liceo en enero.

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 del viento bajas que limitan la dispersión y transporte 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 enero a septiembre de 2025

Mes	Temperatura del Aire [°C]	Velocidad de Viento [m/s]	Dirección Viento [°]	Presión Atmosférica [mm Hg]	Humedad Relativa [%]	Precipitación Acumulada [mm]	Radiación Solar [W/m ²]
Liceo							
Enero	17.5	0.58	247.3	589.2	62.1	60.8	225.2
Febrero	16.5	0.35	259.6	589.4	79.2	278.4	177.3
Marzo	16.8	0.43	218.5	589.9	76.5	217.4	205.2
Abril	17.3	0.51	243.2	589.4	75.6	272.8	250.4
Mayo	17.2	0.38	251.9	590.1	77.2	211.0	222.9
Junio	18.0	0.45	226.1	588.0	75.4	156.0	220.2
Julio	20.1	0.52	276.9	584.8	67.5	17.6	255.4
Agosto	19.5	0.60	237.8	585.3	69.4	159.8	282.4
Septiembre	19.4	0.56	267.1	585.2	68.4	97.4	236.5
Posgrados							
Enero	17.2	0.10	326.1	594.0	83.1	50.2	317.6
Febrero	16.6	0.10	347.8	593.9	89.9	241.0	227.2
Marzo	17.1	0.20	0.6	593.6	88.1	144.4	247.6
Abril	18.2	0.73	40.3	588.6	88.2	186.8	277.4
Mayo	18.5	0.58	18.1	588.9	88.2	140.2	252.6
Junio	18.4	0.44	345.2	589.2	86.8	128.6	259.9
Julio	19.1	0.58	21.6	588.7	82.3	17.4	281.6
Agosto	18.7	0.68	14.1	589.0	82.7	137.0	300.1
Septiembre	18.5	0.58	38.9	589.1	83.7	55.8	266.5
Milán planta Niza							
Enero	18.7	0.39	41.7	583.5	73.6	54.0	303.7
Febrero	17.6	0.34	39.7	583.7	69.0	303.0	213.6
Marzo	18.0	0.36	48.5	583.5	72.1	175.4	243.4
Abril	18.6	0.36	54.1	580.0	72.2	284.2	266.8
Mayo	18.5	0.27	46.4	580.7	72.0	154.8	237.2
Junio	18.4	0.29	45.2	580.8	72.8	149.6	248.2
Julio	19.2	0.32	44.2	590.2	76.6	17.6	265.1
Agosto	18.7	0.36	47.1	580.6	74.1	59.6	271.5
Septiembre	18.6	0.35	58.6	580.5	75.6	45.6	256.1
La Nubia							
Enero	19.3	1.12	143.7	595.4	85.0	40.0	225.2
Febrero	19.0	0.56	241.8	595.1	91.7	183.8	177.3
Marzo	19.1	0.68	188.3	595.7	90.7	151.4	205.2
Abril	19.5	0.69	189.8	595.1	80.9	216.0	250.4
Mayo	19.5	0.59	165.2	595.6	91.1	103.6	222.9
Junio	19.3	0.71	210.1	595.8	90.1	117.6	220.2
Julio	19.9	0.94	145.5	595.5	85.6	18.2	--

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]
Agosto	19.5	0.97	173.1	595.9	86.4	81.4	--
Septiembre	19.3	1.02	128.4	595.9	86.8	51.6	--
Hospital de Caldas							
Enero	20.2	1.14	187.3	593.6	84.0	49.4	306.2
Febrero	19.4	0.90	206.6	593.6	91.3	254.2	213.8
Marzo	19.7	0.99	173.5	594.1	89.2	173.8	230.7
Abril	20.2	1.10	151.9	593.5	88.0	218.2	267.2
Mayo	20.1	0.90	166.2	594.1	89.9	184.6	218.6
Junio	19.9	0.94	177.7	594.5	88.6	165.2	223.8
Julio	20.7	1.03	158.1	593.9	83.9	20.0	260.8
Agosto	20.2	1.16	173.7	594.3	84.5	152.6	288.7
Septiembre	20.1	1.08	119.9	594.2	85.1	61.6	251.7

* Para la estación Gobernación, se presentan dificultades de acceso a la información en línea a partir de marzo, por lo tanto, no se presenta información posterior. Se está llevando a cabo el restablecimiento del acceso.

** ---: Indica ausencia de datos, para algunos casos se cuenta con un número bajo de datos para estimación confiable de promedios o la estación presentó fallas técnicas que impiden la recolección de datos.

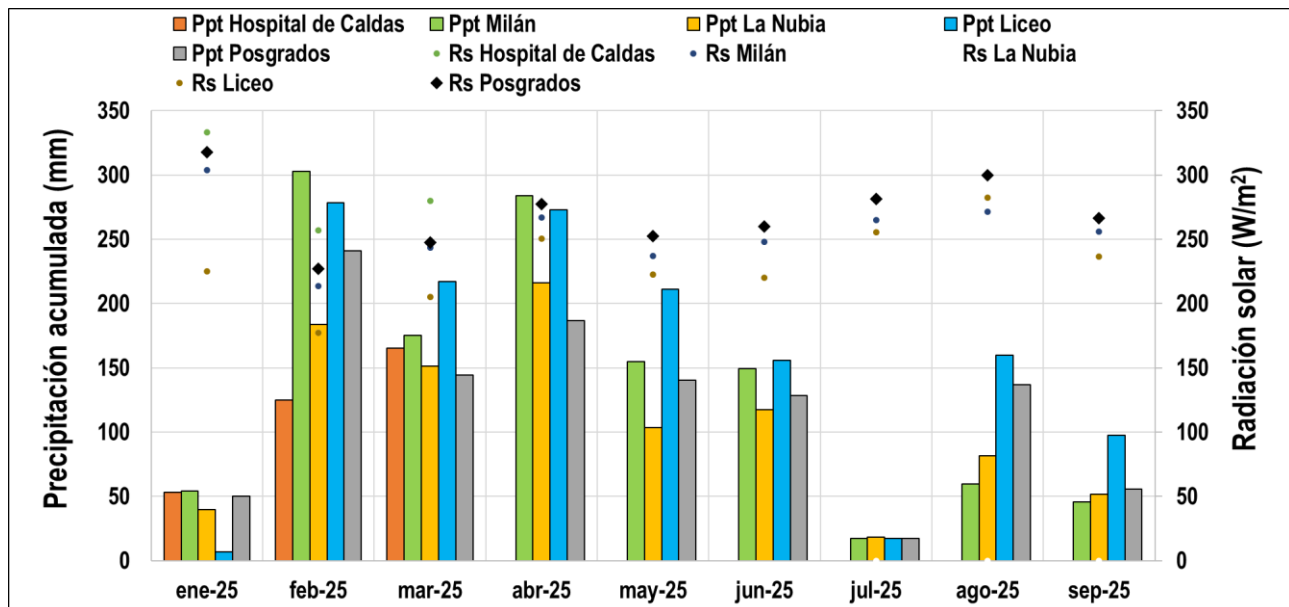


Figura 2. Precipitación mensual acumulada (Ppt) y promedio mensual de radiación solar (Rs) durante enero a septiembre de 2025

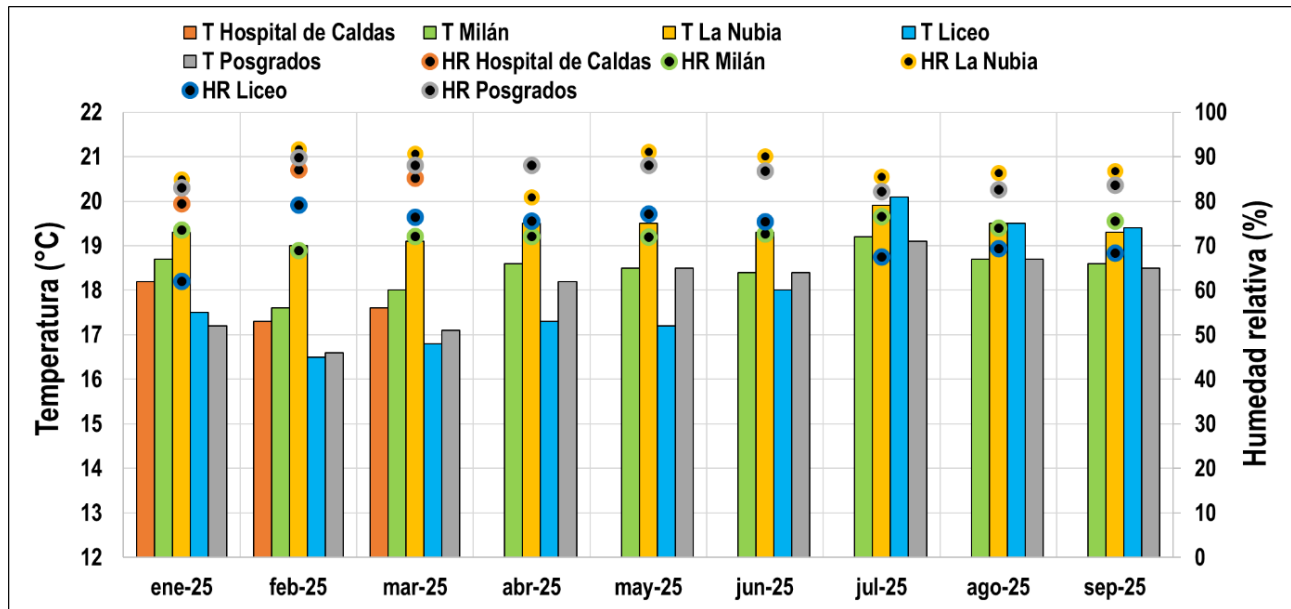


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire (T) y humedad relativa (HR) durante enero a septiembre de 2025

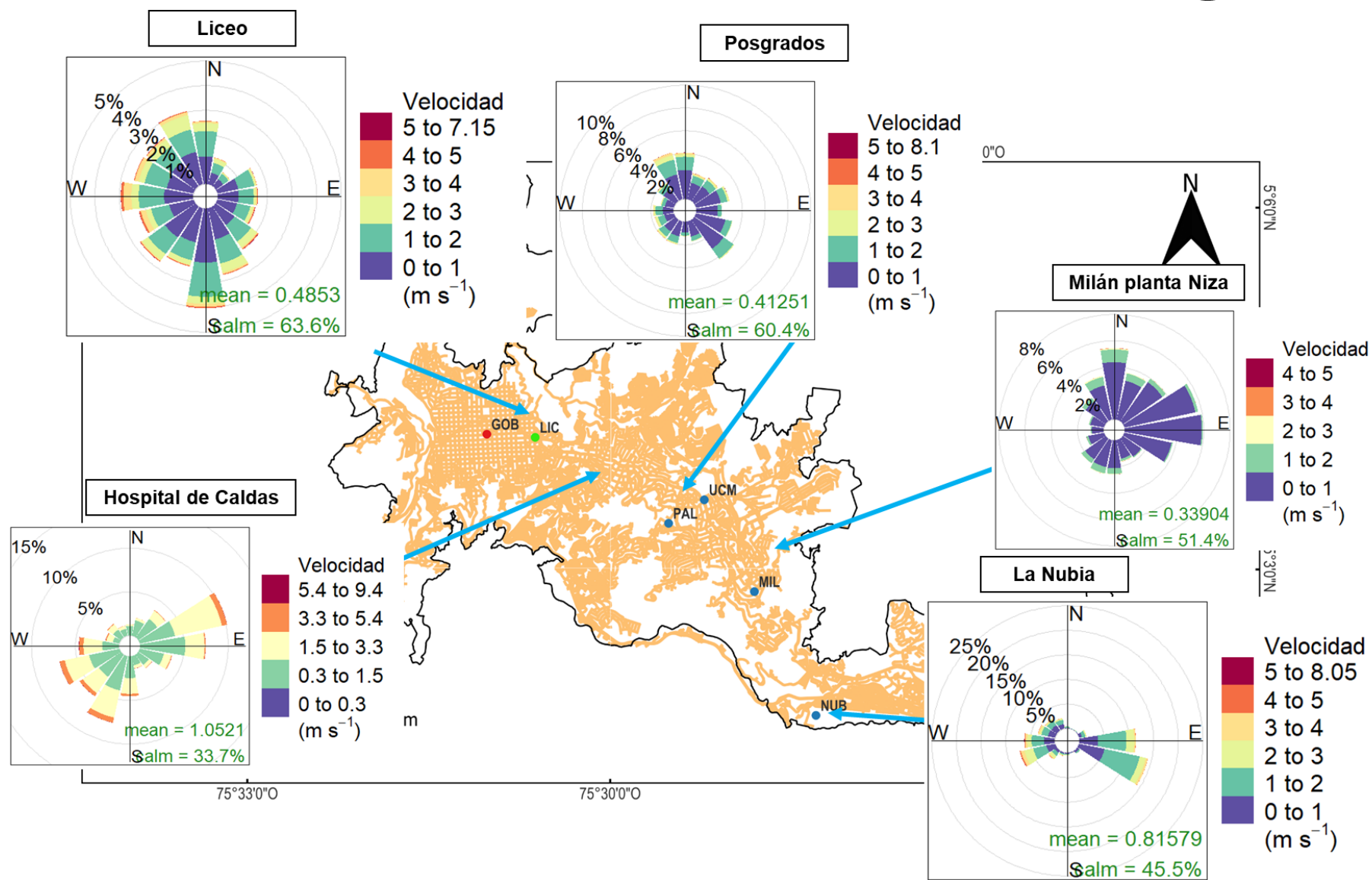


Figura 4. Rosas de viento en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante enero a septiembre de 2025

3. RESULTADOS DE MONITOREO PARA PM₁₀ y PM_{2.5}

3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales

La Tabla 3 resume los estadísticos descriptivos mensuales para las concentraciones de PM₁₀ – Manuales obtenidos durante el periodo de reporte del presente boletín, comprendido entre enero a septiembre de 2025. 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). Se aclara que, durante el período de análisis, los equipos manuales de PM₁₀ en las estaciones Milán y Nubia no operaron con plena normalidad debido a problemas de acceso a las estaciones.

Los resultados indican que las estaciones de Milán y Liceo registraron las concentraciones promedio más altas de PM₁₀ con valores de $28 \pm 3.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $28 \pm 0.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente; seguidos por: Católica con $17 \pm 3.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Palogrande con $17 \pm 2.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y por último Nubia, con $16 \pm 1.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 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 2024, 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 en las estaciones Palogrande y Católica todos los meses monitoreados cumplieron con el porcentaje de datos válidos establecido en 75%, según el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica (MAVDT, 2010). En las estaciones Nubia y Milán se cumplió con este criterio el 78% y 67% de los meses monitoreados respectivamente, debido a las consideraciones expuestas previamente.

Liceo presentó los mayores niveles de concentración de PM₁₀ con el mayor promedio aritmético mensual reportado en enero con $33 \pm 1.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y un máximo diario de $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el domingo 29 de junio. Esta estación es caracteriza por tener influencia de alto tráfico vehicular. De otra parte, la estación Nubia presentó los menores niveles de concentración con un promedio mensual mínimo en junio de $13 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 1.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), valores asociados posiblemente a la baja actividad vehicular de la zona.

**Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio mensuales de PM₁₀–
Manuales (µg/m³) durante enero a septiembre de 2025**

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Total
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)										
Promedio	33	32	25	26	25	25	29	31	27	28
Mediana	34	34	26	24	26	25	30	31	27	27
Incertidumbre**	1.99	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.70	0.86	0.82	0.87
Desviación Estándar	8	9	8	7	4	12	3	5	7	8
Mínimo	24	20	11	18	15	10	23	26	12	10
Máximo	44	44	34	37	30	56	33	38	33	56
Percentil 95%	42	44	34	37	29	43	32	38	33	39
N° Datos - %DV***	5 - 45	9 - 100	10 - 100	10 - 100	11 - 100	11 - 100	8 - 80	7 - 70	7 - 70	78 - 86
Palogrande PM₁₀ (µg/m³ estándar)										
Promedio	19	19	20	15	14	12	14	28	20	17
Mediana	19	19	20	15	14	12	15	21	20	17
Incertidumbre**	3.02	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	3.44	0.80	0.68	2.33
Desviación Estándar	4	8	6	4	4	4	5	19	2	8
Mínimo	13	7	11	10	8	6	2	13	16	2
Máximo	26	33	28	22	19	19	20	68	22	68
Percentil 95%	25	30	28	21	19	17	19	59	22	27
N° Datos - %DV***	11 - 100	8 - 89	10 - 100	10 - 100	11 - 100	10 - 100	10 - 100	8 - 80	8 - 80	86 - 94
Milán PM₁₀ (µg/m³ estándar)										
Promedio	----****	30	27	25	27	26	29	31	33	28
Mediana	---	32	27	24	26	27	31	31	35	29
Incertidumbre**	---	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	4.87	0.82	0.83	3.18
Desviación Estándar	---	10	4	5	5	6	8	2	4	6
Mínimo	---	13	22	16	20	10	17	29	25	10
Máximo	---	43	32	34	33	31	37	36	40	43
Percentil 95%	---	41	31	32	36	31	37	35	38	36
N° Datos - %DV***	---	6 - 67	8 - 80	10 - 100	10 - 100	11 - 100	7 - 70	8 - 80	8 - 80	68 - 75
Católica PM₁₀ (µg/m³ estándar)										
Promedio	19	22	21	14	14	14	15	17	18	17
Mediana	19	23	20	13	14	16	14	17	19	16
Incertidumbre**	2.26	4.73	4.70	4.71	4.71	4.70	5.85	0.55	0.63	3.65
Desviación Estándar	3	6	5	4	3	4	3	3	3	5
Mínimo	14	14	14	8	9	7	12	11	13	7
Máximo	26	32	30	23	19	21	20	21	22	32
Percentil 95%	24	30	29	21	19	20	19	21	21	26
N° Datos - %DV***	11 - 100	8 - 89	10 - 100	10 - 100	11 - 100	11 - 100	10 - 100	9 - 90	8 - 80	88 - 97
Nubia PM₁₀ (µg/m³ estándar)										
Promedio	----****	19	17	14	16	13	16	15	21	16
Mediana	---	17	16	13	16	13	17	16	22	16
Incertidumbre**	---	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.57	0.71	0.70	1.32
Desviación Estándar	---	7	3	6	2	4	3	3	3	4
Mínimo	---	7	12	8	12	6	11	9	17	6
Máximo	---	27	21	30	18	18	20	18	25	30
Percentil 95%	---	27	21	24	18	18	20	18	24	25
N° Datos - %DV***	---	7 - 78	9 - 90	10 - 100	11 - 100	11 - 100	10 - 100	8 - 80	7 - 70	73 - 80

* 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.

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

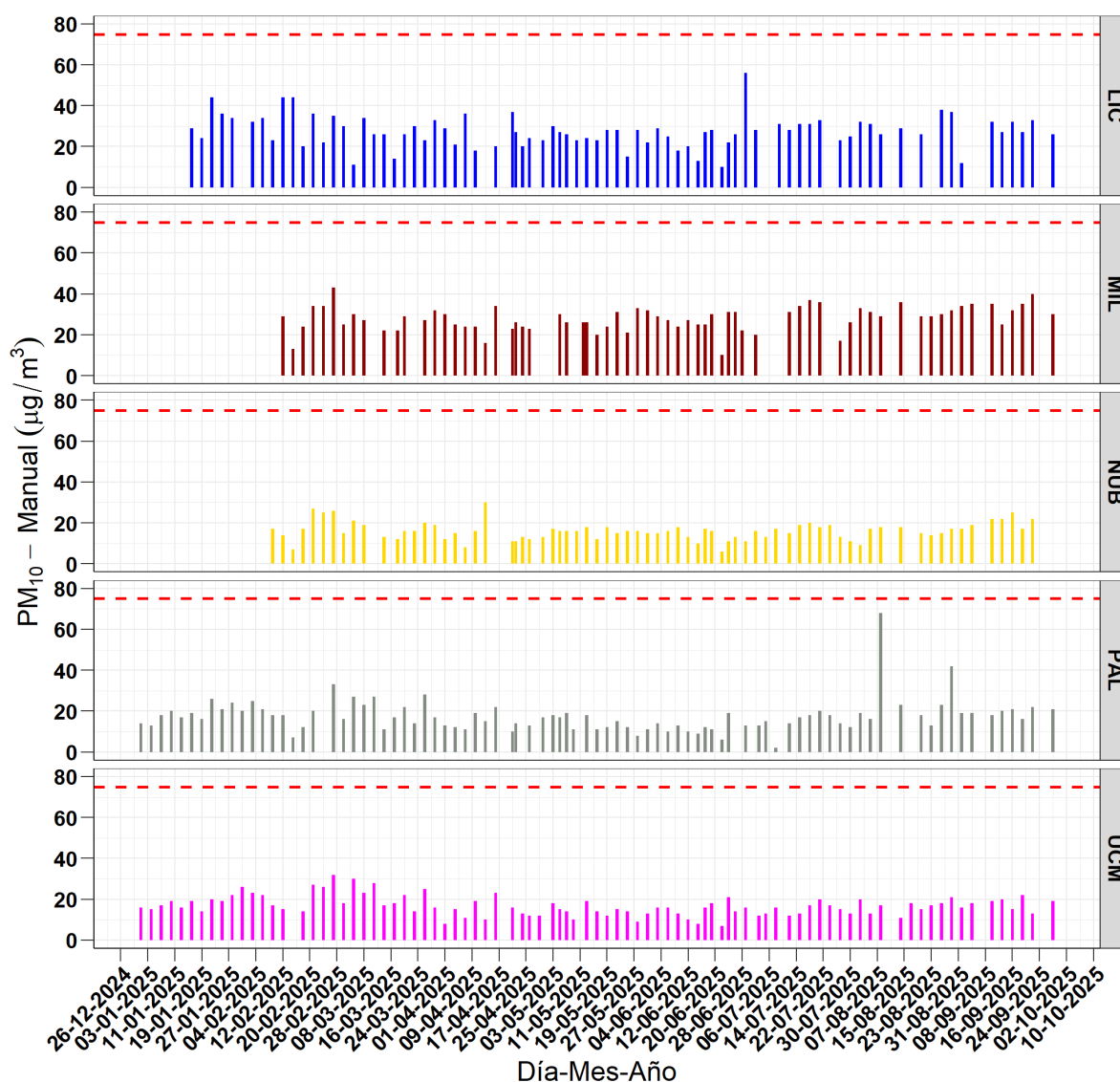


Figura 5. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{10} – Manuales durante enero a septiembre de 2025

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

Por último, la Figura 6 presenta la variación promedio de concentraciones de PM_{10} – 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 Católica y Milán. En el caso de las estaciones Palogrande y Nubia ubicadas en campus universitarios, se observan mayores niveles de concentración los viernes.

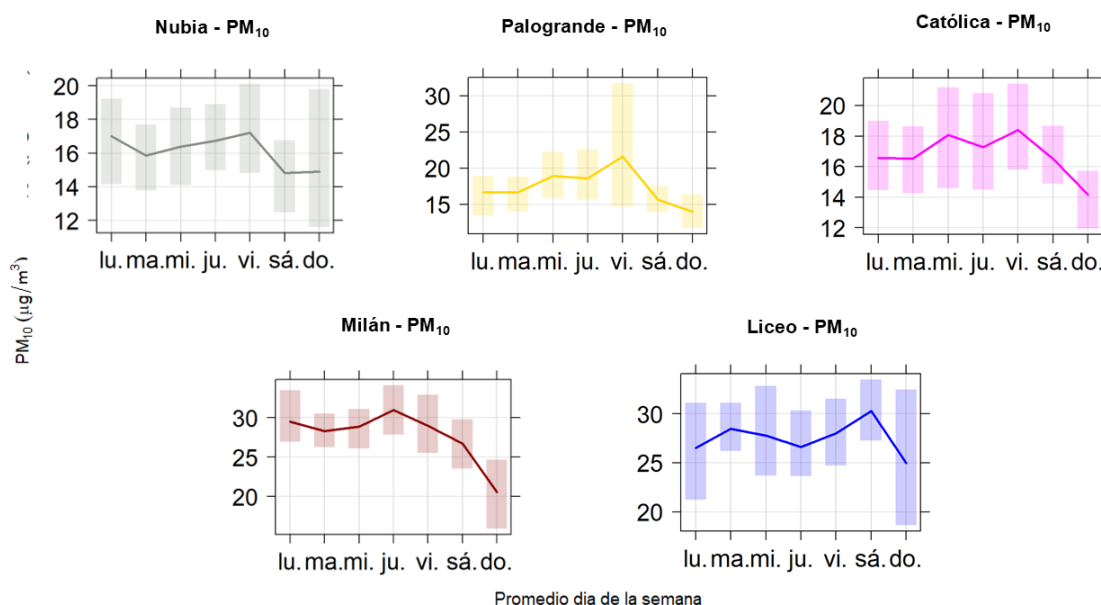


Figura 6. Variación promedio de concentraciones por días de la semana para PM_{10} – Manuales durante enero a septiembre de 2025

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 7 se presenta la comparación del promedio aritmético obtenido para las concentraciones de PM_{10} con el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 ($50 \mu g/m^3$). Se destaca que ninguna de las estaciones ha superado el valor de la norma anual colombiana. Es importante resaltar que los promedios obtenidos en Manizales para PM_{10} 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 $15 \mu g/m^3$ para PM_{10} (OMS, 2022).

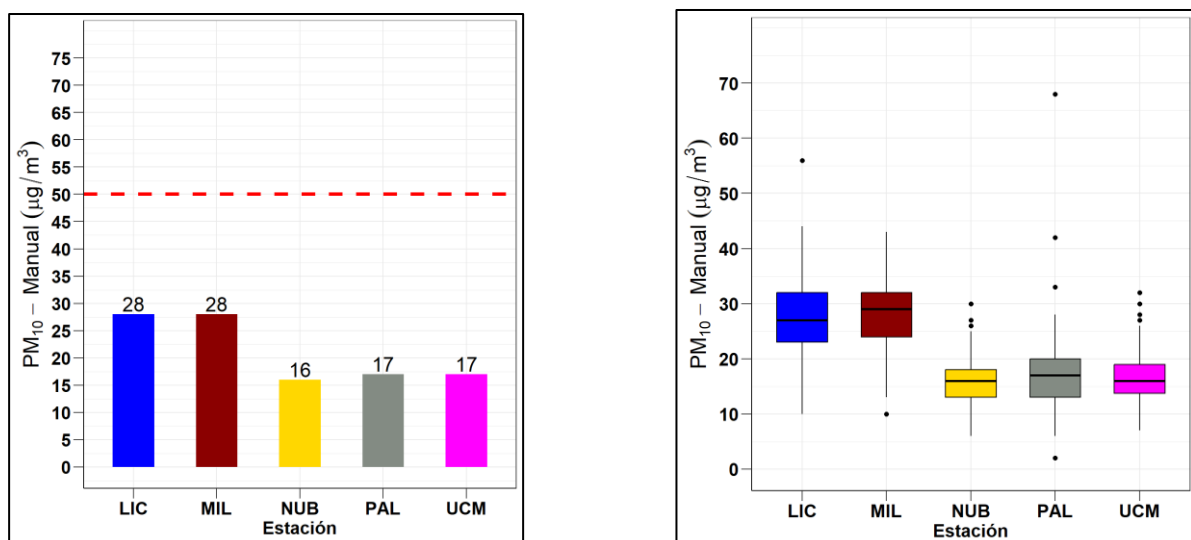


Figura 7. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de PM₁₀ Manuales durante enero a septiembre de 2025

La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 del MADS: 50 µg/m³ (PM₁₀)

3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales

La Tabla 4 presenta los estadísticos descriptivos de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos en las estaciones Gobernación y Liceo. Se observó que las concentraciones promedio (medianas¹) de Gobernación para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 27.5 µg/m³ (desv. std = 7.4 µg/m³) y 12.9 µg/m³ (desv. std = 3.6 µg/m³) respectivamente. De otra parte, las concentraciones promedio medianas de Liceo para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 22.3 µg/m³ (desv. std = 11.5 µg/m³) y 13.1 µg/m³ (desv. std = 3.1 µg/m³) 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 al comportamiento mensual, los máximos registros obtenidos en la estación Gobernación para PM₁₀ y PM_{2.5} fueron de 32.7 µg/m³ y 13.8 µg/m³ respectivamente, obtenidos en septiembre. En el caso de Liceo los máximos registros para PM₁₀ y PM_{2.5} fueron de 42.8 µg/m³ y 14.9 µg/m³ obtenidos en marzo.

La Figura 8 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos (promedio diario) durante enero a septiembre de 2025 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. 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.

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.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático (µg/m³) durante enero a septiembre de 2025

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)										
Promedio	31.9	27.3	25.6	22.1	17.9	--**	27.0	27.4	31.8	26.8
Mediana	31.7	29	25.9	22.3	15.6	--	27.1	28.4	32.7	27.5
Desv. Est.	5.2	8.3	5.1	6.9	7.6	--	5.8	3.3	5.2	7.4
Min.	17.4	11	15.2	7.7	7.8	--	15.4	14.8	20.9	7.7
Max.	41.4	39.9	36.2	34.5	37.6	--	40.3	41.4	40.8	41.1
Percentil 95	40.7	38.5	34.3	32.9	29.9	--	37.3	38.9	39.4	38.0
N° Datos	29	27	31	30	15	--	27	31	29	219
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)										
Promedio	--	--	44.3	34.6	21.4	16.5	27.1	19.4	21.9	25.1
Mediana	--	--	42.8	28.8	21.7	16.5	27.1	19.1	21.8	22.3
Desv. Est.	--	--	12.2	16.8	1.8	3.6	5.8	4.6	5.5	11.5
Min.	--	--	21.7	17.7	12.7	8.6	15.1	11.2	13.8	8.6
Max.	--	--	62.2	93.8	29.9	22.3	36.7	30.0	43.7	93.9
Percentil 95	--	--	58.9	71	26.4	21.4	34.5	27.9	27.5	47.2
N° Datos	--	--	15	30	31	29	31	31	29	196
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)										
Promedio	16.5	14.1	13.2	11.4	8.1	--	12.2	11.1	13.6	12.8
Mediana	16.4	14.9	13.4	11.5	9.2	--	12.1	10.7	13.8	12.9
Desv. Est.	2.6	4.3	2.6	3.6	3.8	--	2.7	2.3	2.3	3.6
Min.	9	5.7	7.9	7.7	4.1	--	2.7	2.3	2.3	4.0
Max.	17.9	20.6	18.7	34.5	19.4	--	18.1	16.7	17.6	21.3
Percentil 95	20.9	19.8	17.7	16.9	15.4	--	17.5	15.5	16.8	18.1
N° Datos	29	27	31	30	15	--	27	31	29	219
Liceo PM_{2.5} (µg/m³ estándar)										
Promedio	--	--	16.4	13.5	12.9	11.4	14.5	11.9	14.3	13.3
Mediana	--	--	14.9	12.7	12.8	11.6	14.4	11.5	13.8	13.1
Desv. Est.	--	--	4.4	3.4	1.8	2.6	2.6	2.5	2.2	3.1
Min.	--	--	10.5	6.7	8.6	5.8	9.4	7.0	10.2	5.8
Max.	--	--	24.4	21	16.6	15.3	19.8	16.9	19.1	24.5
Percentil 95	--	--	58.9	19.9	15.8	15.1	17.8	16.5	17.1	18.1
N° Datos	--	--	15	30	30	29	31	31	29	196

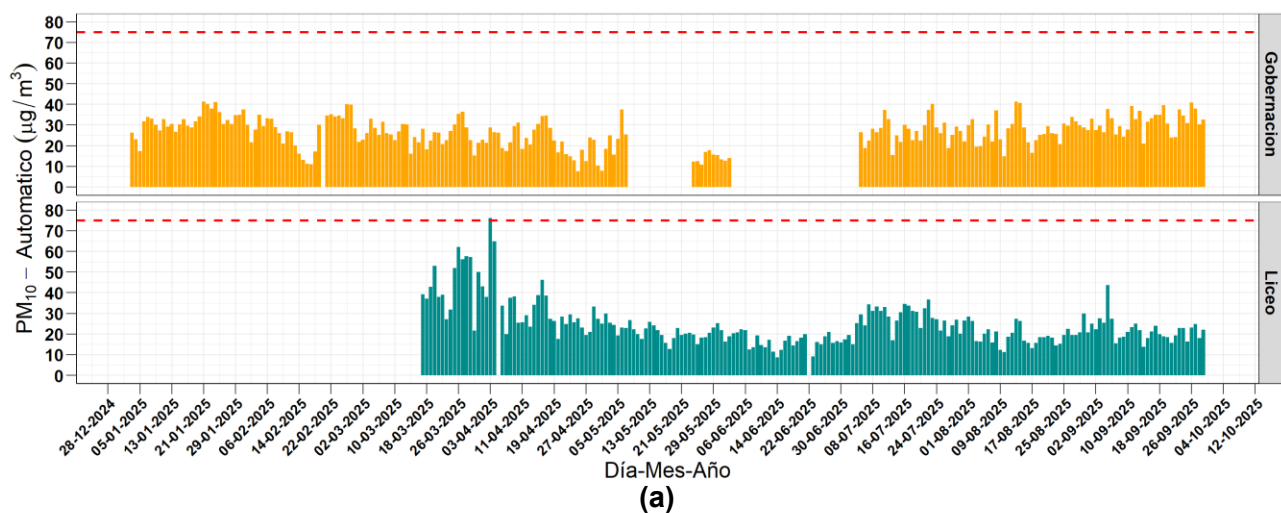
* A partir de datos promedio diarios del equipo

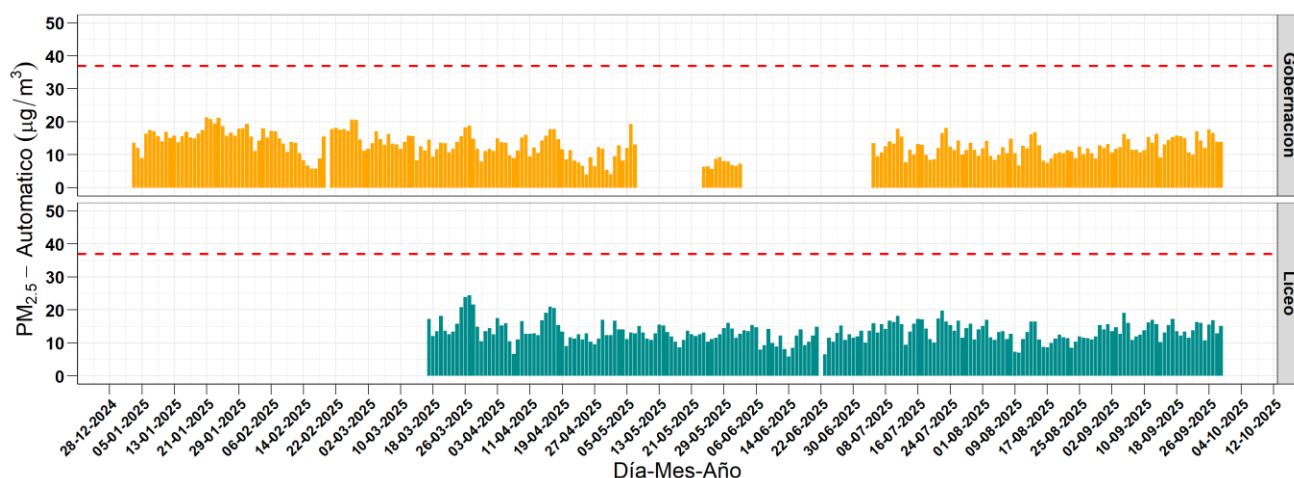
** -- Indica ausencia de datos

Adicionalmente, la Figura 9 presenta la evolución promedio horaria y por día de la semana 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).

Los máximos de concentración horaria en ambas estaciones registraron valores superiores a los $20 \mu g/m^3$ para PM_{10} y $15 \mu g/m^3$ 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 $950 W/m^2$ entre las 11 am y 1 pm; ganan flotabilidad y ascienden en la atmósfera. Este comportamiento es favorecido por el aumento en la altura de la capa de mezcla, dando lugar a una mayor dispersión de los contaminantes emitidos y un descenso en la concentración medida (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.





(b)

Figura 8. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos durante enero a septiembre de 2025: (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: $75 \mu g/m^3$ (PM_{10}) y $37 \mu g/m^3$ ($PM_{2.5}$)

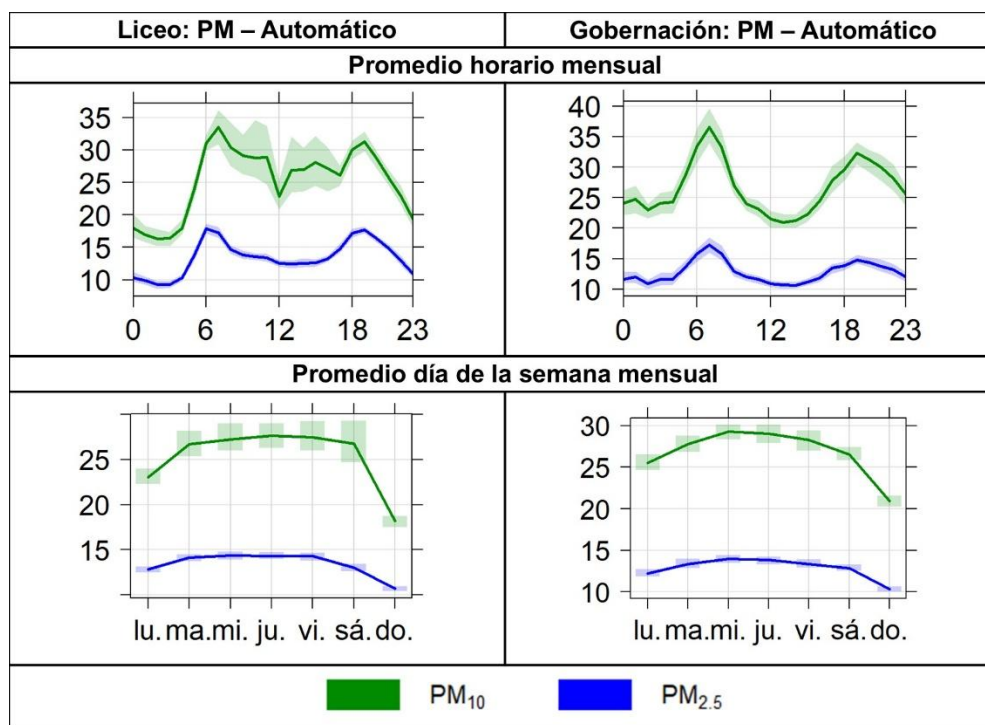


Figura 9. Promedio horario y semanal de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos durante el enero a septiembre de 2025. Gobernación (izquierda) y Liceo (derecha)
 La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

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

Las Figura 10 y a la Figura 13 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 cinco estaciones de monitoreo para todos los días analizados, excepto en Liceo y Palogrande, donde un día alcanzó un ICA aceptable.

Por otro lado, las concentraciones de PM_{10} – Automático presentaron calidad del aire en estado bueno en el total de días para la estación Gobernación y en un 96% en la estación Liceo. Para el caso de $PM_{2.5}$ – Automático, se obtuvo un porcentaje de 32% y 60% de los días con ICA en estado aceptable en la estación Gobernación y Liceo respectivamente.

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.

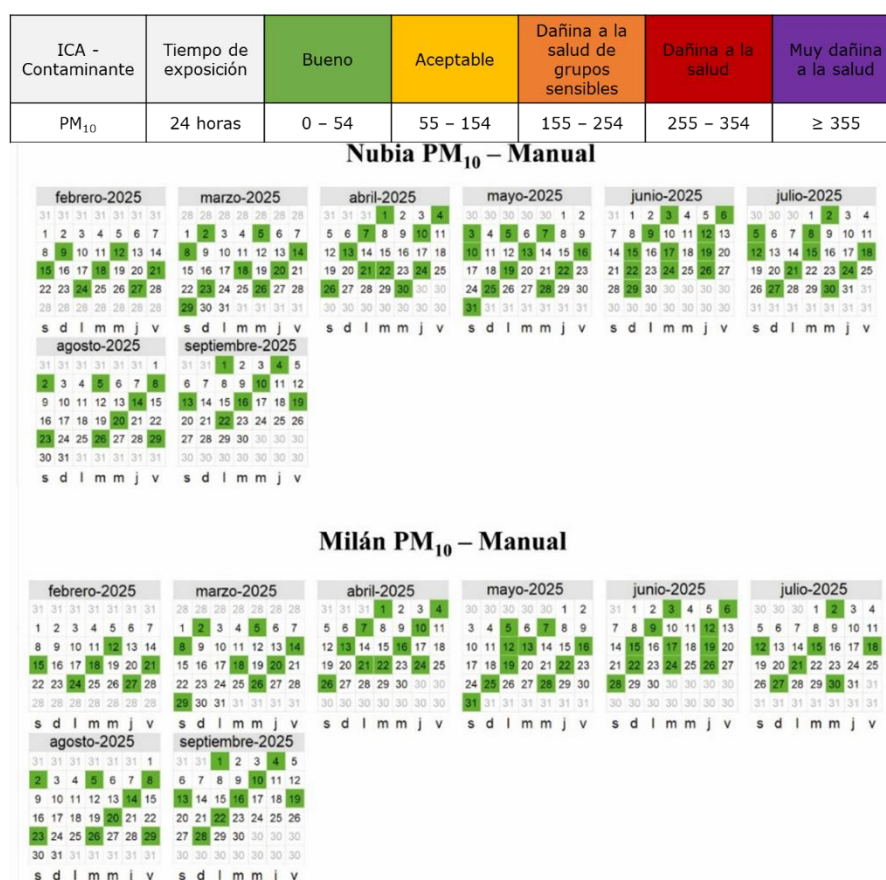
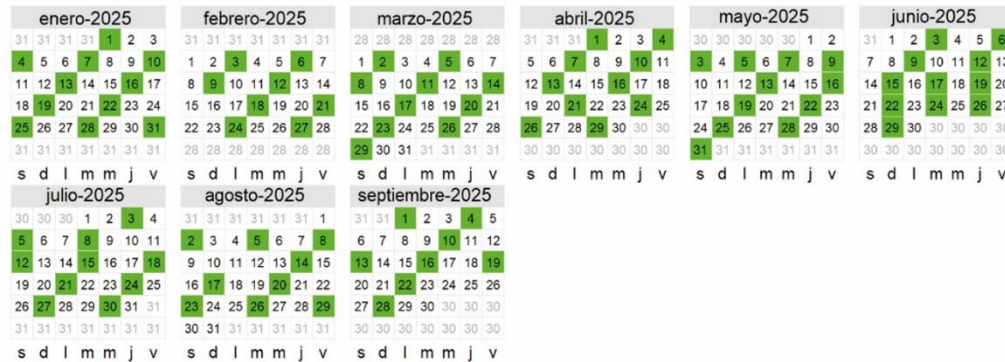


Figura 10. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{10} – Manual en las estaciones: Nubia y Milán del SVCA de Manizales durante enero a septiembre de 2025
Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

ICA - Contaminante	Tiempo de exposición	Bueno	Aceptable	Dañina a la salud de grupos sensibles	Dañina a la salud	Muy dañina a la salud
PM ₁₀	24 horas	0 – 54	55 – 154	155 – 254	255 – 354	≥ 355

UCM PM₁₀ – Manual



Palogrande PM₁₀ – Manual



Liceo PM₁₀ – Manual



Figura 11. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ – Manual en las estaciones: Católica, Palogrande y Liceo del SVCA de Manizales durante enero a septiembre de 2025
Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

ICA - Contaminante	Tiempo de exposición	Bueno	Aceptable	Dañina a la salud de grupos sensibles	Dañina a la salud	Muy dañina a la salud
PM ₁₀	24 horas	0 – 54	55 – 154	155 – 254	255 – 354	≥ 355
PM _{2.5}	24 horas	0 - 12	13 – 37	38 – 55	56 – 150	≥ 151

Gobernación PM₁₀ – Automático



Liceo PM₁₀ – Automático

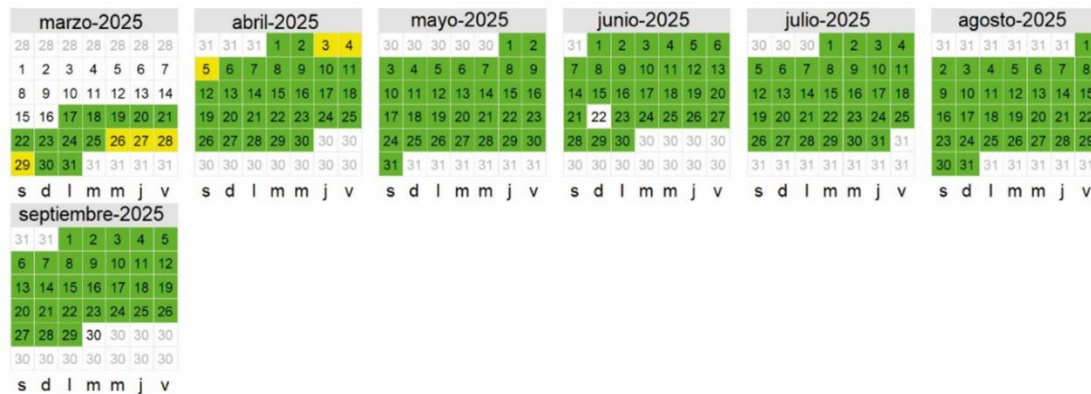
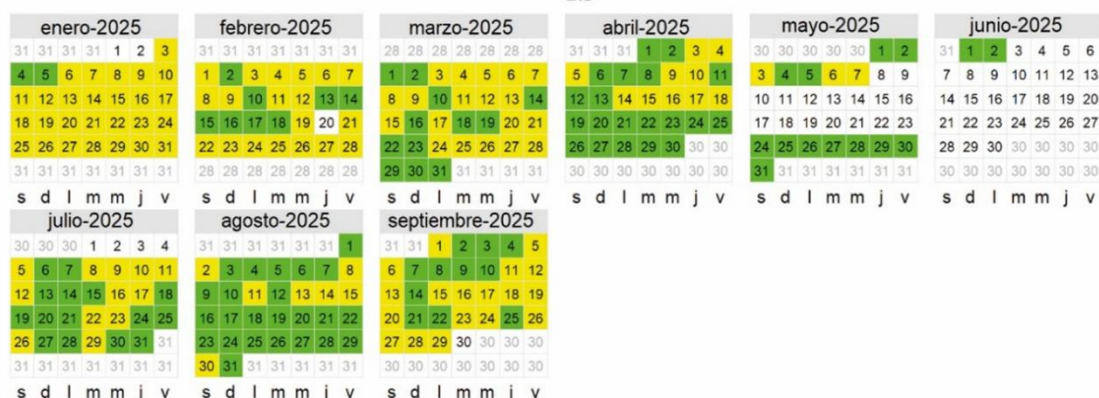


Figura 12. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ – Automático en las estaciones: Gobernación y Liceo durante enero a septiembre de 2025
Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

ICA - Contaminante	Tiempo de exposición	Bueno	Aceptable	Dañina a la salud de grupos sensibles	Dañina a la salud	Muy dañina a la salud
PM ₁₀	24 horas	0 – 54	55 – 154	155 – 254	255 – 354	≥ 355
PM _{2.5}	24 horas	0 - 12	13 – 37	38 – 55	56 – 150	≥ 151

Gobernación PM_{2.5} – Automático



Liceo PM_{2.5} – Automático

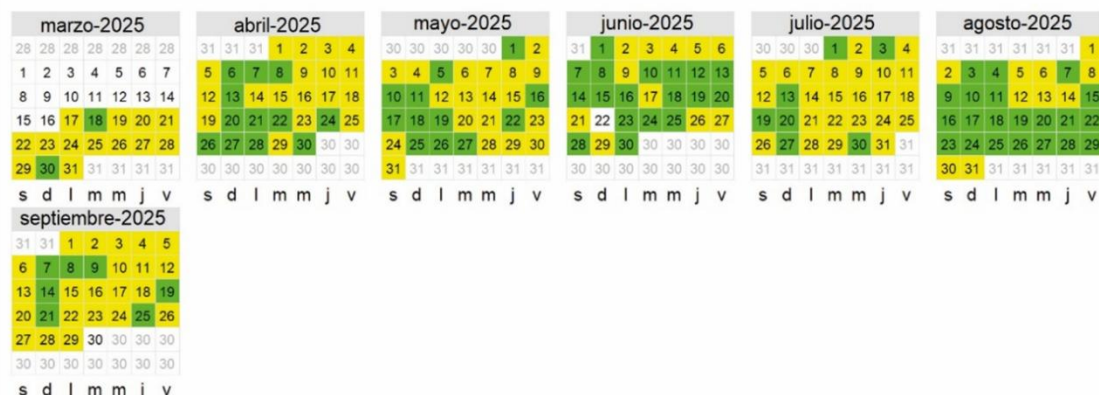


Figura 13. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{2.5} – Automático en las estaciones: Gobernación y Liceo durante enero a septiembre de 2025
Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

4. RESULTADOS DE MONITOREO PARA GASES

4.1. Monitoreo de dióxido de azufre (SO₂)

La Tabla 5 presenta los estadísticos descriptivos para el SO₂ durante lo corrido del 2025. Se observa que, durante el año 2025, las concentraciones promedio medianas² se encontraron alrededor de 2.7 µg/m³ (desv. std. = 2.02 µg/m³), con un mínimo y máximo valor horario registrado de 0.12 y 18.73 µg/m³ este último obtenido en agosto.

Se destaca que a pesar de los múltiples reportes de actividad volcánica relacionada a emisión de ceniza y gases del Nevado del Ruiz que superaban altura de columna de gases de 1500 m y patrones de viento predominantes hacia la ciudad de Manizales (Noroccidente), no se identificaron aumentos representativos en las concentraciones de SO₂. Las mediciones de concentración en aire ambiente se pueden ver influenciadas mayoritariamente por consideraciones de tipo local, como la dinámica de fuentes de emisión antrópicas (vehículos, industrias, entre otros), mientras que fuentes naturales (por ejemplo, las emisiones del volcán Nevado del Ruiz) tienen un efecto regional que, según los monitoreos realizados, no tiene un efecto inmediato en los picos de concentración del equipo; lo anterior 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 14 presenta la evolución de concentraciones horarias de SO₂ durante el 2024. 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/m³ para 1 hora).

Tabla 5. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de SO₂ (µg/m³) durante enero a septiembre de 2025

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Total
Promedio	--**	3.2	3.2	2.24	2.92	3.27	3.49	2.85	3.71	3.2
Mediana	--	2.7	2.7	1.99	2.41	2.87	2.98	2.17	3.03	2.7
Desv. Est.	--	2.03	2.02	1.42	2.04	1.99	1.67	2.18	2.16	2.02
Min.	--	0.12	0.12	0.29	0.12	0.21	0.22	0.29	0.67	0.12
Max.	--	18.7	18.7	7.11	12.5	10.99	10.65	18.73	15.89	18.73
Percentil 95	--	7.36	5.5	4.87	7.21	7.48	7.27	7.34	7.97	7.36
Nº Datos	--	53	48	156	663	551	665	740	720	3626

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

** --: Indica ausencia de datos.

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.

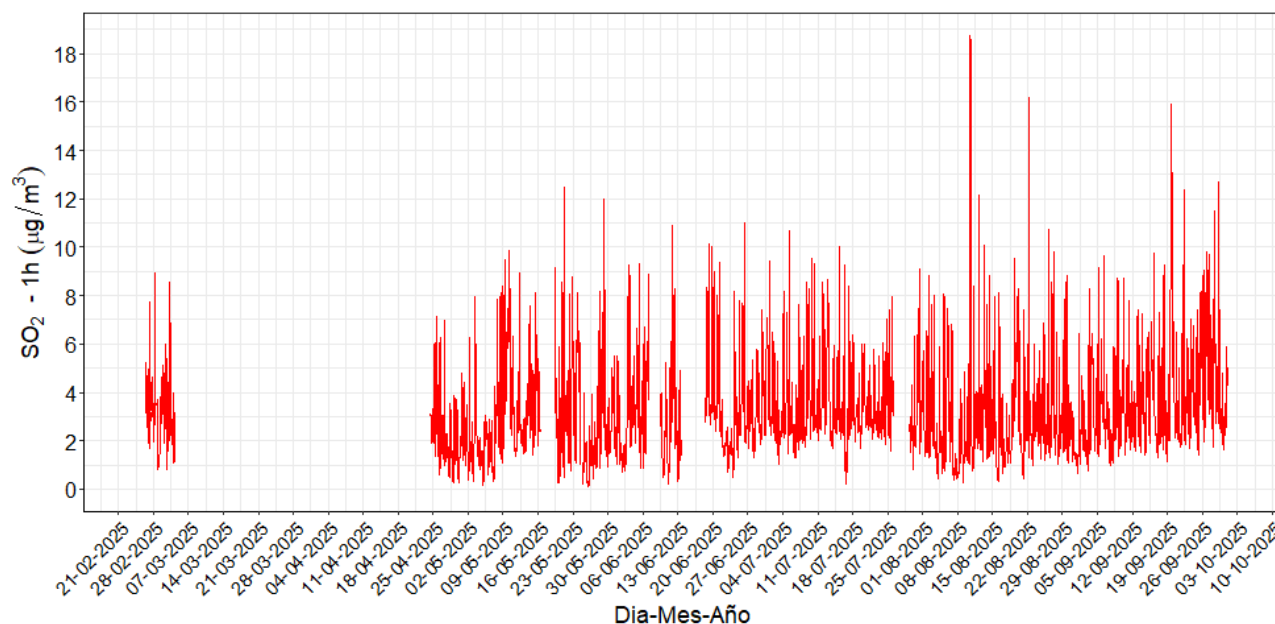


Figura 14. Evolución temporal de concentraciones promedio horario de SO₂ durante enero a septiembre de 2025

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

La Figura 15 presenta la variación promedio horaria, mensual y por día de la semana. Se observan 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 6 µg/m³ y 4.2 µg/m³ respectivamente. Asimismo, se observan mínimos alrededor de los 2.2 µg/m³ 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 y jueves con un valor alrededor de 3.6 µg/m³ y mínimos promedio los domingos alrededor de los 2.6 µg/m³, una reducción aproximada del 30% relacionada a la baja actividad de las fuentes móviles en ruta de la ciudad.

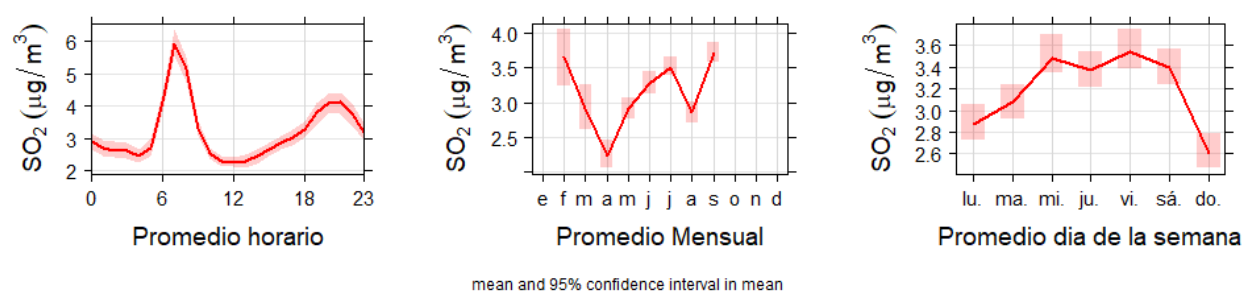


Figura 15. Variación promedio de SO₂ horario (izquierda), mensual (centro) y por día de la semana (derecha) durante enero a septiembre de 2025

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

4.2. Monitoreo de ozono troposférico (O₃)

La Tabla 6 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 octohorarias medianas³ durante el 2025, se encontraron en 24.56 µg/m³ para el día completo, 39.86 µg/m³ para la jornada diurna y 14.99 µg/m³ para la jornada nocturna. Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que durante mayo se presentó el menor registro octohorario con un valor de 17.85 µg/m³ y durante agosto se registró el mayor promedio octohorario mensual con un valor 89.04 µg/m³.

La Figura 16 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de O₃ durante el periodo de análisis en 2025. 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 O₃ se encontraron por debajo de los límites establecidos por la normatividad vigente (100 µg/m³ para promedios de 8 horas).

Tabla 6. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de O₃ (µg/m³) durante enero a septiembre de 2025 y su comparativo entre periodos del día

Periodo	Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Total
Diario (0:00 a 23:59)	Promedio octohorario	--**	22.2	25.7	21.24	20.89	23.61	30.27	31.24	30.89	27.27
	Mediana octohoraria	--	19.96	24.33	20.83	17.85	20.65	27.54	27.02	26.42	24.56
	Min. octohorario	--	6.29	5.17	4.65	2.63	2.81	5.74	1.73	1.19	2.63
	Max. octohorario	--	47.27	52.25	44.96	64.82	67.88	66.5	89.04	82.16	89.04
	N° Datos	--	55	80	156	635	659	744	740	720	3789
Diurno (6:00 a 17:59)	Promedio diurno	--	34.1	36.58	29.49	29.8	33.38	41.67	41.95	43.06	37.86
	Mediana diurna	--	36.45	37.36	30.5	28.2	31.91	44.37	44.02	46.89	39.01
	Desv. Est.	--	20.94	19.11	16.44	17.4	18.45	19	20.67	20.51	19.92
	Max.	--	64.19	65.56	60.04	73.7	76.31	79.28	89.04	82.16	89.04
	N° Datos	--	25	38	78	315	330	372	372	360	1890
Nocturno (18:00 a 5:59)	Promedio nocturno	--	17.91	15.53	12.67	12.23	13.65	18.74	20.41	18.73	16.75
	Mediana nocturna	--	12.6	12.53	10.59	9.7	11.95	17.26	19.45	17.16	14.99
	Desv. Est.	--	13.03	10.75	9.44	9.26	9.12	11.92	11.17	11.47	11.14
	Max.	--	48.65	46.03	37.17	43.7	47.75	61.47	57.88	54.91	61.47
	N° Datos	--	30	42	78	320	329	372	368	360	1899

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

** --: Indica ausencia de datos.

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.

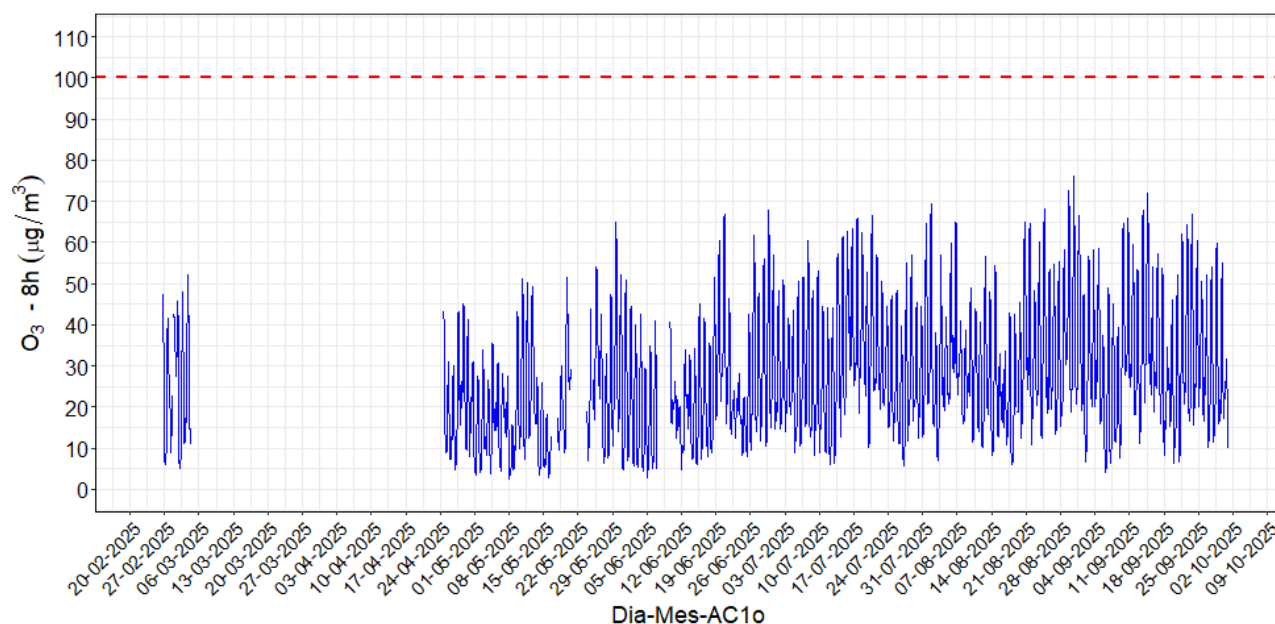


Figura 16. Evolución temporal de concentraciones promedio octohorario de O₃ durante enero a septiembre de 2025

El nivel máximo permisible octohorario de la Res, 2254 de 2017 equivalente a 100 µg/m³ no fue superado

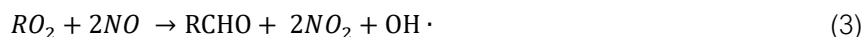
Para poder explicar el comportamiento de este contaminante, se resalta que el O₃ es un contaminante secundario que es formado en la atmósfera debido a las reacciones fotoquímicas en presencia de contaminantes primarios conocidos como precursores. Los principales precursores del O₃ son los óxidos de nitrógeno (NO_x, que representa las especies NO y NO₂) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs). En la ciudad de Manizales ambos precursores son dominados por emisiones vehiculares (Unal - Corpocaldas, 2020). La formación de O₃ 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.

Bajo una relación mayor a 1 entre COVs/NO_x, los radicales hidroxilos (OH) reaccionarán mayoritariamente con los COVs para generar moléculas de agua, NO₂ 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 O₃ 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).

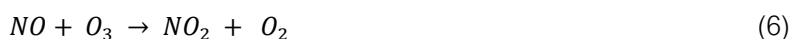
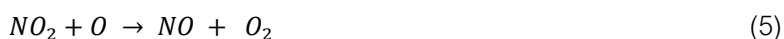
En general, la disminución de emisiones de precursores como los NO_x se relaciona con una reducción en la actividad del tráfico vehicular. Este fenómeno altera las reacciones fotoquímicas induciendo una mayor generación de O₃, debido a que los radicales (OH·) tenderán hacia la reacción con COVs y favorecerán la producción neta de NO₂ (reacciones 1, 2 y 3),

Posteriormente, la fotólisis del NO₂ (reacción 4) favorecerá la generación de O₃ (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 O₃ durante la noche (reacción 7), generando así un remanente atmosférico de O₃ 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 O₃, por consiguiente, una reducción de las concentraciones observadas. En este sentido se podría sugerir que las concentraciones de O₃ 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 (C₂H₆) el grupo R representara la cadena C₂H₅); 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 17 presenta el promedio horario y promedio por día de la semana de la variación de O₃ 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 88 µg/m³. Las concentraciones diurnas son aproximadamente 2.6 veces más elevadas que en las noches, con una mediana diurna de 39.01 µg/m³ y una nocturna de 14.99 µg/m³.

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 µg/m³, fenómeno relacionado posiblemente al transporte de O₃ 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.

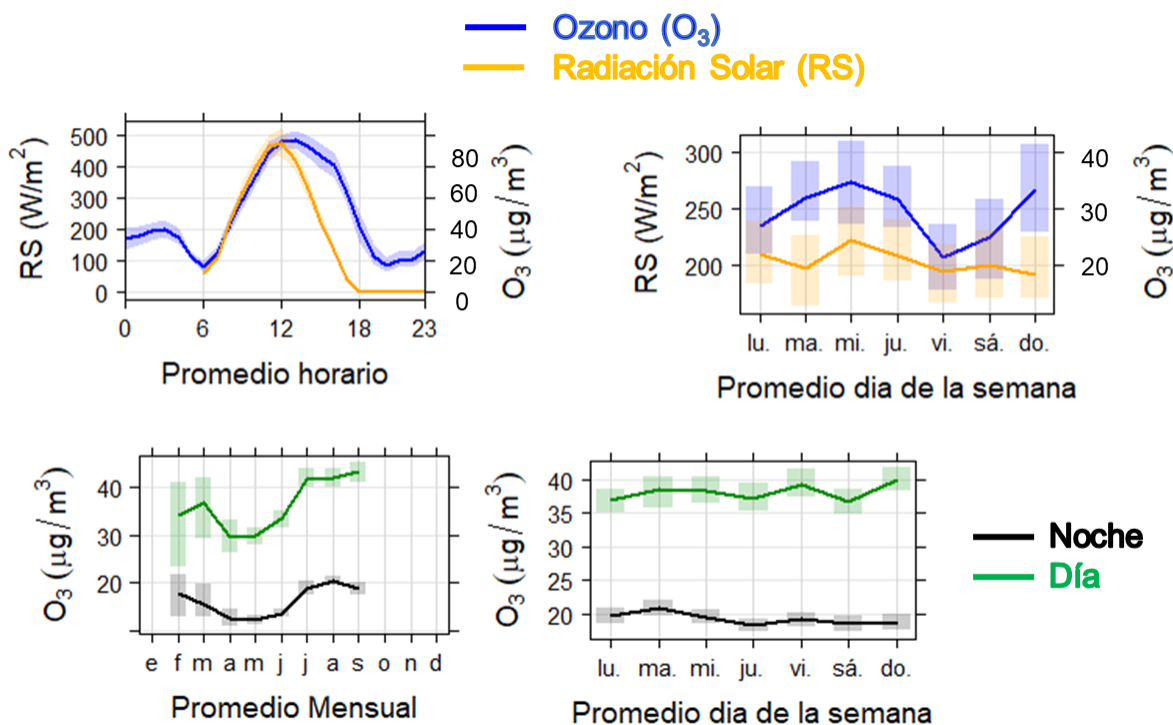


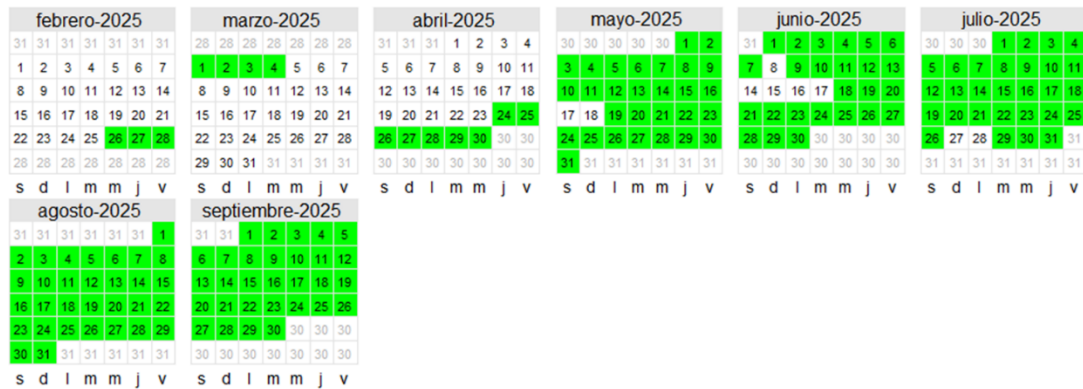
Figura 17. Variación promedio horaria y por día de la semana de O_3 y radiación solar
Se incluye además el comportamiento promedio semanal entre las horas diurnas y nocturnas durante período de análisis

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

La Figura 18 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de 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 en lo que va del 2025 para los contaminantes mencionados.

ICA - Contaminante	Tiempo de exposición	Bueno	Aceptable	Dañina a la salud de grupos sensibles	Dañina a la salud	Muy dañina a la salud
O ₃	8 horas	0 – 106	107 – 138	139 – 167	168 – 207	≥ 208
SO ₂	1 hora	0 – 93	94 – 197	198 – 486	487 – 797	≥ 798

Estación Gobernación SO₂ (horario)



Estación Gobernación O₃ (Octohorario)

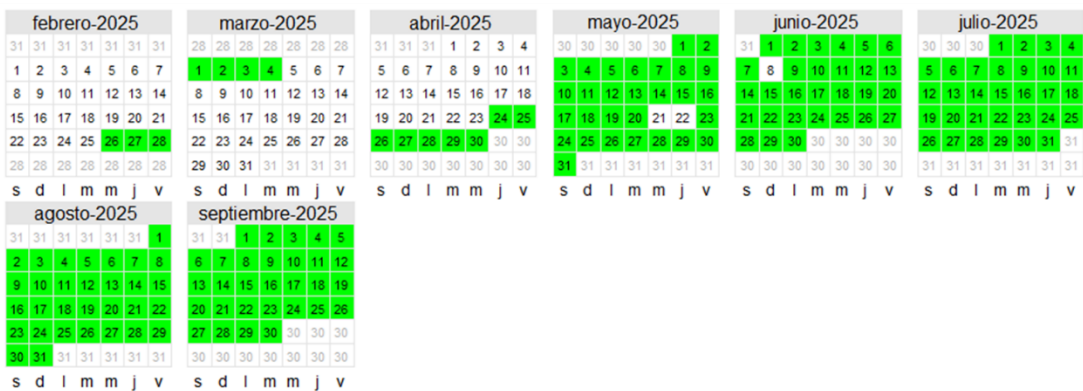


Figura 18. Índice de calidad del aire (ICA) para SO₂ y O₃ en Manizales durante enero a septiembre de 2025

Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS

5.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz

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 7 presenta un resumen con algunos de los días que tuvieron alturas significativas de la columna de gases emitidos (superiores a los 1500 metros). De estos días se destaca que el 64% de los reportes presentaron predominancia de vientos hacia el suroccidente y un 32% hacia el noroccidente y/o occidente, ubicación de Manizales, generando una posible afectación a la calidad del aire por esta fuente en la ciudad. Finalmente, cabe mencionar que, a pesar de la actividad en lo corrido del año, las concentraciones en la ciudad no se vieron afectadas de manera drástica, entre otros por el efecto favorable de las direcciones del viento.

Tabla 7. Resumen de emisiones volcánicas significativas con altura de la columna de gases superiores a los 1500 m (SGC, 2025) y concentraciones diarias de PM₁₀ – Automático y SO₂ en la estación Gobernación

Fecha (dd-mm)	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento *	PM ₁₀ – Automático (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)
01 - 01	2100	Suroccidente	26.3	--
19 - 01	1600	Suroccidente	31.8	--
20 - 01	1400	Suroccidente	34.1	--
09 - 02	1500	Suroccidente	26.0	--
10 - 02	1500	Suroccidente	20.9	--
13 - 02	2300	Suroccidente	20.1	--
20 - 02	1800	Noroccidente	--**	--
11 - 03	1800	Noroccidente y suroccidente	26.9	--
25 - 03	1900	Suroccidente	30.4	--
26 - 04	2000	Nororiente	--	--
29 - 04	1800	Noroccidente	22.8	--
09 - 05	2000	Noroccidental y occidental	--	--
05 - 06	1800	Noroccidente y occidente	--	--
09 - 07	1700	Noroccidente y occidente	26.4	1.9
19 - 07	2400	Noroccidente y occidente	27.2	0.9
31 - 07	1800	Noroccidente y occidente	29.9	3.2
08 - 08	1600	Noroccidental	37.1	3.5
21 - 08	1800	Noroccidente, occidente y suroccidente	29.5	--
26 - 08	1800	Noroccidente, occidente y suroccidente	29.7	--
30 - 08	1800	Noroccidente, occidente y suroccidente	28.7	--
14 - 09	1500	Noroccidente	20.9	4.7
28 - 09	2500	Noroccidente	30.2	5.26

* Corresponde a la dirección a la que se dirigió la columna de gases

**-- 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,
- 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, 2017, [En línea], Disponible en: <https://ourworldindata.org/air-pollution>, [Último acceso: 15/07/2024],
- Servicio geológico colombiano (SGC), 2025, 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>