

SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES PERIODO ENERO – JUNIO 2021

*Ángel David Gálvez Serna, *Carlos Mario
González Duque, *Felipe Cifuentes Castaño,
*Jeannette del Carmen Zambrano Nájera,
**Mauricio Velasco García

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

****Subdirección de Evaluación y
Seguimiento Ambiental CORPOCALDAS**

RESUMEN

Se presentan en este informe los resultados del monitoreo de contaminantes atmosféricos realizado en Manizales durante el período de enero a junio de 2021. Se realizó el seguimiento de material particulado (PM_{10} , $PM_{2.5}$) y los gases: ozono troposférico (O_3), dióxido de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO). Se presentan las gráficas resumen obtenidas y tablas de estadísticos (promedio, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo y percentil 95). Finalmente, se muestran los resultados obtenidos para los índices de calidad del aire (ICA), así como otros análisis complementarios como los son los registros de calidad del aire por imágenes satelitales para emisiones volcánicas y algunos contaminantes en la región.

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.....	15
3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales.....	16
3.4. Índice de calidad del aire (ICA) para PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el SVCA de Manizales.....	20
4. RESULTADOS DE MONITOREO PARA GASES.....	24
4.1. Monitoreo de monóxido de carbono (CO).....	24
4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO_2).....	27
4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O_3).....	29
4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O_3 , SO_2 y CO en el SVCA de Manizales....	34
5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS.....	35
5.1. Equipos manuales: Análisis comparativo de promedios entre PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la estación Gobernación.....	35
5.2. Relación entre los equipos automáticos: Estación Gobernación.....	36
5.3. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz.....	37
5.4. Imágenes satelitales: TROPOMI – Sentinel 5P.....	39
6. REFERENCIAS.....	42

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

En la actualidad, la contaminación atmosférica corresponde al cuarto factor de riesgo para la salud humana, después de fumar, la hipertensión y la diabetes (Our World in data, 2020). Durante la última década, el crecimiento poblacional y las actividades industriales han incrementado considerablemente las emisiones de contaminantes y sus niveles en aire ambiente. Entre los contaminantes de interés en zonas urbanas se destacan el material particulado (PM, por sus siglas en inglés), el cual puede ser clasificado de acuerdo con el diámetro de las partículas. Las fracciones más comunes monitoreadas en sistemas de vigilancia son: (1) Partículas suspendidas totales (PST), (2) Partículas con diámetro menor o igual a 10 micrómetros (PM_{10}) y (3) Partículas con diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), conocidas también como fracción fina respirable. Además, contaminantes gaseosos como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2) y ozono troposférico (O_3) generan impactos negativos sobre el recurso aire en ecosistemas naturales y centros urbanos (OMS, 2018).

El seguimiento a los fenómenos de contaminación del aire en Manizales y la información entregada por el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), es un sustento para tomar acciones que permitan controlar aquellas zonas donde se superen las normas de calidad del aire. Además, es un insumo para establecer medidas de prevención donde la calidad del aire sea catalogada como perjudicial 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 del IDEAM - SISAIRE. 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 2021 en la ciudad de Manizales se cuenta con un SVCA conformado por ocho (8) 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; el caso de los equipos manuales permite la obtención de registros promedio diario de la concentración en aire ambiente de dichos contaminantes (muestras de 24 horas cada tres días). Por otra parte, tanto los equipos automáticos de PM_{10} y $PM_{2.5}$, como el seguimiento de gases (O_3 , SO_2 y CO) permiten la obtención de registros cinco minutales, a partir de los cuales se obtienen registros promedio horario (media aritmética) y registros promedio octohorario (media móvil a partir de registros horarios). Todos los registros obtenidos de partículas y gases en aire ambiente son útiles para comparar los límites máximos permisibles definidos en la normativa colombiana: *Resolución 2254 de 2017* (MADS, 2017).

Actualmente el SVCA de Manizales es operado por el Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GTAIHA) de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, en convenio con la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS). La Tabla 1 presenta las características principales de cada estación perteneciente al SVCA de Manizales y la Figura 1 muestra la ubicación espacial de las estaciones de monitoreo sobre el área urbana de la ciudad (coordenadas decimales en origen Magna – Sirgas Bogotá).

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

Estación (Abreviatura)	Características y fuentes de contaminantes*	Equipos	Propietario	Año Instalación	Año de óptima operación – histórico	Estado actual	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación (Gob)	CU, SC – MTV, PAI	PM ₁₀ – Manual ^a	Corpocaldas	2009	2009	Operación óptima.	5.0686 / -75.5174	2155
		PM _{2.5} - Manual ^a	Corpocaldas	2009	2009	Operación óptima.		
		SO ₂ - Automático	UN	2014	Desde el 2019 – problemas de estabilización previos.	Detenido por fallas entre el 01 de enero al 12 de febrero.		
		O ₃ - Automático	UN	2014	2014 – Sin datos entre los años 2016-2017 por fallas.	Operación óptima.		
		CO - Automático	Corpocaldas	2014	2014 – Múltiples fallas durante sus primeros años.	Operación óptima.		
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b	Corpocaldas	2019	2019	Operación óptima.		
Palogrande (Pal)	ZC, SR – ATV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^c	UN	2009	2009	Operación óptima.	5.0534 / -75.4886	2154
Nubia (Nub)	ZSE, SR – BTV, AZI	PM ₁₀ - Manual ^c	UN	2009	2017 – En el SVCA	Operación óptima.	5.0269 / -75.4682	2091
Liceo (Lic)	CU, SC – ATV, PAI	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas	2000	2010 – En el SVCA	Operación óptima.	5.0654 / -75.5076	2156
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b	Corpocaldas	2019	2019	Operación óptima.		
Milán (Mil)	ZC, SR – MAI, MTV	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas	2012	2012	Operación óptima.	5.0468 / -75.4802	2091
Católica (UCM)	CU, SC – ATV, PAI	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas - UCM	2021	Instalado en mayo de 2021	Operación óptima.	5.0565 / -75.4838	2091

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

^b- Equipo automático de PM (Técnica nefelométrica)

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

*Características:

SR: Sector residencial

CU: Centro urbano

*Fuentes de contaminación:

ATV: Alto tráfico vehicular

AAI: Alta actividad industrial

AZI: Adyacente a zona industrial

SC: Sector comercial

ZC: Zona central

MTV: Moderado tráfico vehicular

MAI: Moderada actividad industrial

SAI: Sin actividad industrial.

ZSE: Zona sureste

ZI: Zona industrial

BTV: Bajo tráfico vehicular

PAI: Pequeña actividad industrial

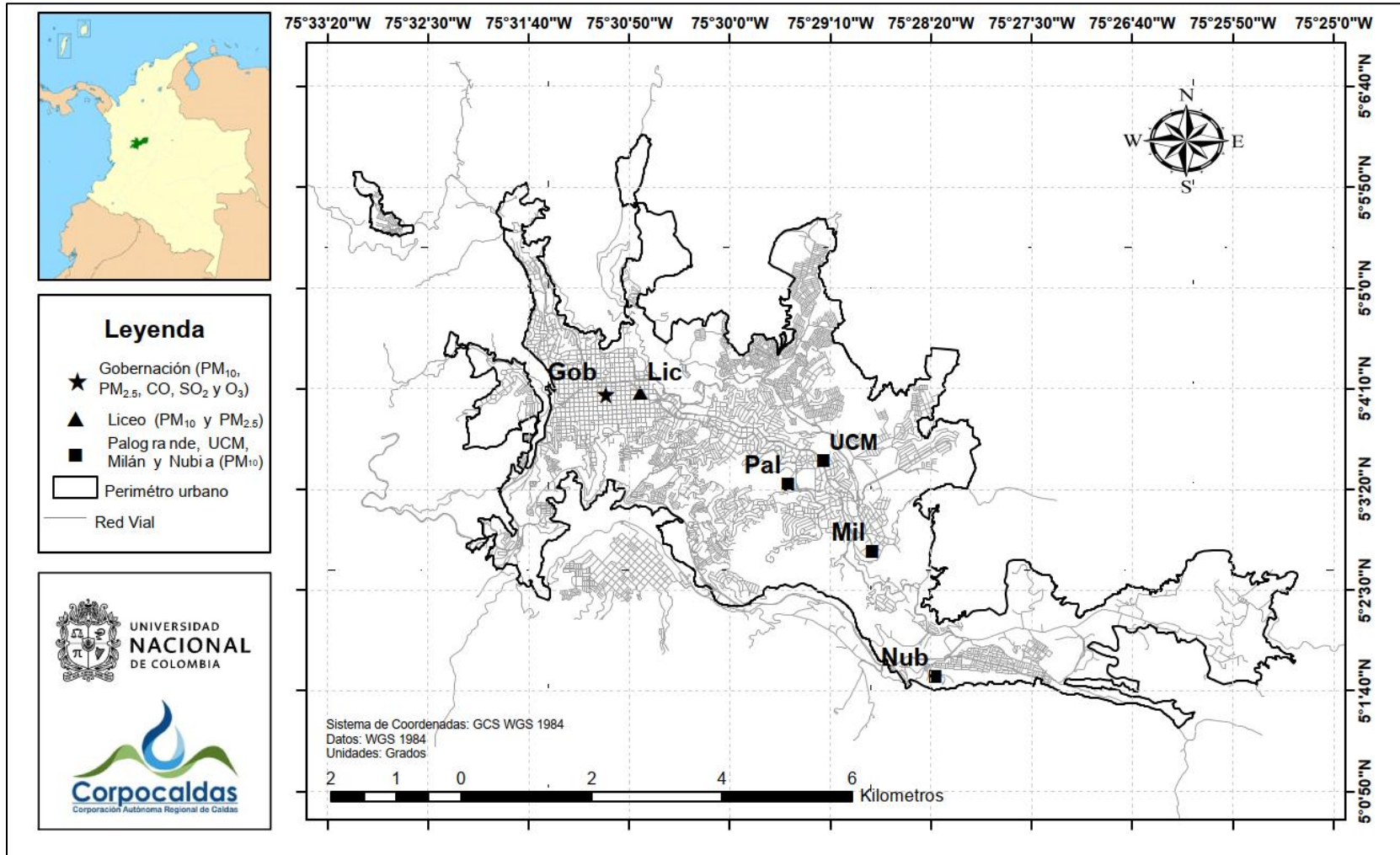


Figura 1. Mapa de Manizales con ubicación de las estaciones de calidad del aire pertenecientes al SVCA de Manizales

2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

La Tabla 2 presenta los consolidados mensuales de las variables meteorológicas en las estaciones más próximas a las estaciones de calidad del aire para los meses de enero a junio de 2021. Las estaciones meteorológicas corresponden a Gobernación de Caldas, Liceo, Posgrados, Milán planta Niza y Hospital de Caldas; esta última tomada debido a su punto de referencia espacial sobre el centro geográfico de Manizales. Con la información obtenida en estas estaciones meteorológicas, se estiman las concentraciones a condiciones estándar (25°C y 1 atm) obtenidas por los equipos del SVCA de Manizales. De manera alternativa las Figura 2 y Figura 3 presentan el comportamiento promedio mensual de algunas variables meteorológicas de las estaciones mencionadas. Se aprecia que el comportamiento de las variables a lo largo de la ciudad es estable.

Durante el primer semestre del año 2021, se observó un patrón característico del régimen bimodal de lluvias y la posible influencia del fenómeno de La Niña en la ciudad, marcándose en enero el final de la temporada de bajas precipitaciones (59 mm en promedio) y en febrero una temporada de altas precipitaciones (227 mm en promedio). Al comparar los registros de las estaciones se observa que Liceo obtuvo el mayor registro con 287.4 mm para el mes de febrero.

Para el caso de la temperatura ambiente y radiación solar, se observa un comportamiento inverso a las precipitaciones, obteniéndose los mayores registros durante el mes de enero con un valor promedio de 16.7 °C y 265.5 W/m² respectivamente, siendo Milán planta Niza la estación con los registros promedio más altos (18 °C y 330.4 W/m² respectivamente). 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 en el mes de marzo con un valor de 87.5 % en Gobernación.

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

Las condiciones climáticas juegan un papel importante en la dinámica de los contaminantes en el aire. Existen contaminantes secundarios como el ozono troposférico (O₃), que dependen de las reacciones en presencia de radiación solar para formarse en el aire, a partir de contaminantes primarios (COV y NOx) emitidos directamente por fuentes antropogénicas y naturales. La humedad en el aire y la lluvia también tienen una influencia, especialmente en las concentraciones de material particulado.

El aumento de la humedad relativa se asocia al aumento en la humedad de las partículas, por lo tanto, el aumento de su peso, lo cual influye en la velocidad de caída de las partículas suspendidas y en la disminución de partículas re-suspendidas (Loosmore y Cederwall, 2004). En el mismo sentido, la precipitación hace un lavado de la atmósfera, arrastrando hacia el suelo el material particulado del aire, este fenómeno se conoce como *Scavenging* (Akyüz y Cabuk, 2009). Finalmente, la velocidad del viento influye en la concentración de contaminantes de

forma inversa, puesto que a mayor velocidad del viento la dispersión de los contaminantes en dirección horizontal será mayor y su concentración en la atmósfera disminuirá.

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

Mes	Temperatura del Aire [°C]	Velocidad de Viento [m/s]	Dirección Viento [°]	Presión Atmosférica [HPa]	Humedad Relativa [%]	Precipitación Acumulada [mm]	Radiación Solar* [W/m ²]	Max. Rad. solar [W/m ²]
Gobernación de Caldas								
Enero	17.6	0.78	267.6	755.8	82.9	54.6	315.7	1183
Febrero	16.8	0.43	273.8	756.8	87.3	199.8	274.3	1293
Marzo	16.3	0.75	282.7	757.4	87.5	268.2	275.0	1397
Abril	17.1	0.73	284.3	756.6	87.2	138.4	258.9	1190
Mayo	17.4	0.76	283.9	757.2	85.6	116.0	275.6	1243
Junio	16.8	0.77	283.4	758.1	87.0	89.4	255.1	1266
Liceo								
Enero	16.9	0.55	261.8	784.8	76.2	75.0	183.3	925
Febrero	16.8	0.64	137.9	785.0	77.4	287.4	183.2	1051
Marzo	15.9	0.61	139.6	786.1	81.9	247.8	247.8	1183
Abril	16.8	0.56	113.9	785.3	80.7	140.6	218.1	1246
Mayo	16.8	0.55	149.6	786.5	80.4	163.4	225.2	1185
Junio	16.4	0.60	50.1	787.2	80.6	93	221.1	1137
Posgrados								
Enero	17.0	0.28	332.1	791.3	83.3	72.6	287.2	1086
Febrero	16.9	0.32	346.1	790.8	85.7	230.0	267.2	1129
Marzo	16.1	0.43	20.9	791.3	87.4	213.0	247.8	1213
Abril	16.8	0.30	355.9	791.8	86.7	123.2	233.8	1095
Mayo	16.8	0.31	347.4	793.2	86.3	142.0	260.9	1167
Junio	16.4	0.25	349.4	793.8	87.1	115.2	242.9	1111
Milán planta Niza								
Enero	18.0	0.14	331.1	777.6	78.9	55.4	330.4	1264
Febrero	17.7	0.11	341.5	778.0	77.7	243.8	307.7	1403
Marzo	16.7	0.09	327.6	779.2	77.8	225.6	271.8	1512
Abril	17.7	0.08	332.1	778.2	78.6	158.6	259.3	1311
Mayo	17.6	0.08	333.4	779.7	76.3	145.6	296.1	1436
Junio	17.3	0.07	336.2	780.2	77.4	130.8	271.6	1297
Hospital de Caldas								
Enero	17.8	0.97	215.8	792.5	82.8	75.6	299.7	1150
Febrero	17.6	1.00	180.2	792.8	84.7	258.4	271.3	1172
Marzo	16.8	0.97	128.4	794.1	85.4	196.4	240.5	1204
Abril	17.6	0.92	132.9	793.3	85.2	122.6	205.6	1088
Mayo	17.6	0.97	144.2	794.5	84.7	150.6	245.6	1232
Junio	17.2	0.91	126.7	795.2	85.6	101.6	232.8	1185

* Correspondiente al promedio comprendido entre las 6 am y 5 pm (periodo de luz solar).

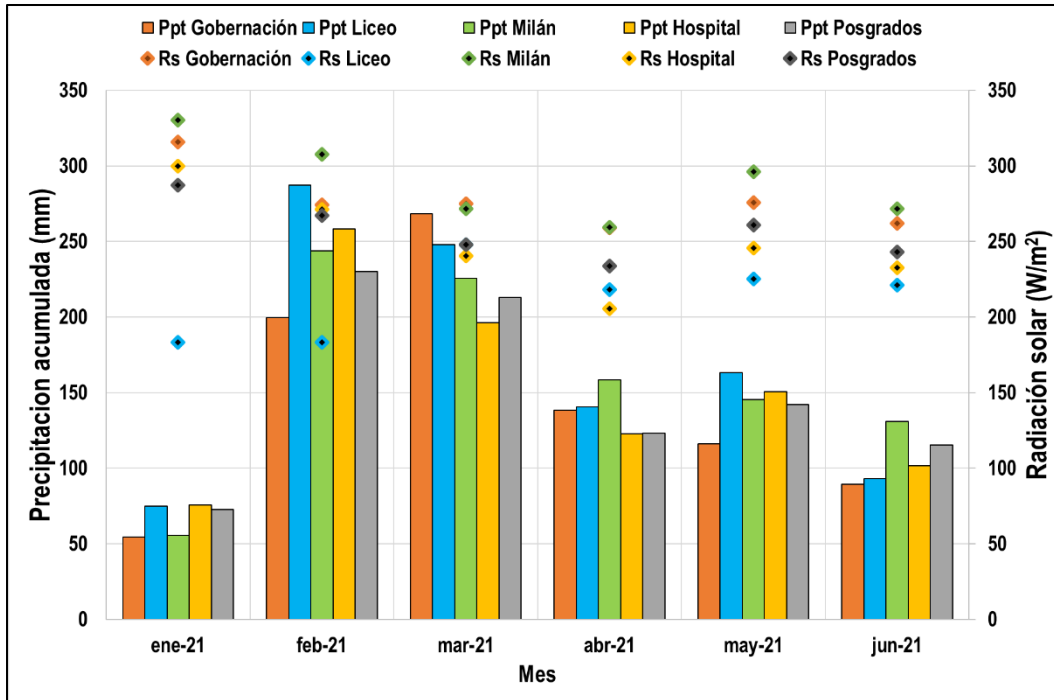


Figura 2. Promedios mensuales de precipitación acumulada (Ppt) y radiación solar (Rs) durante el periodo de análisis

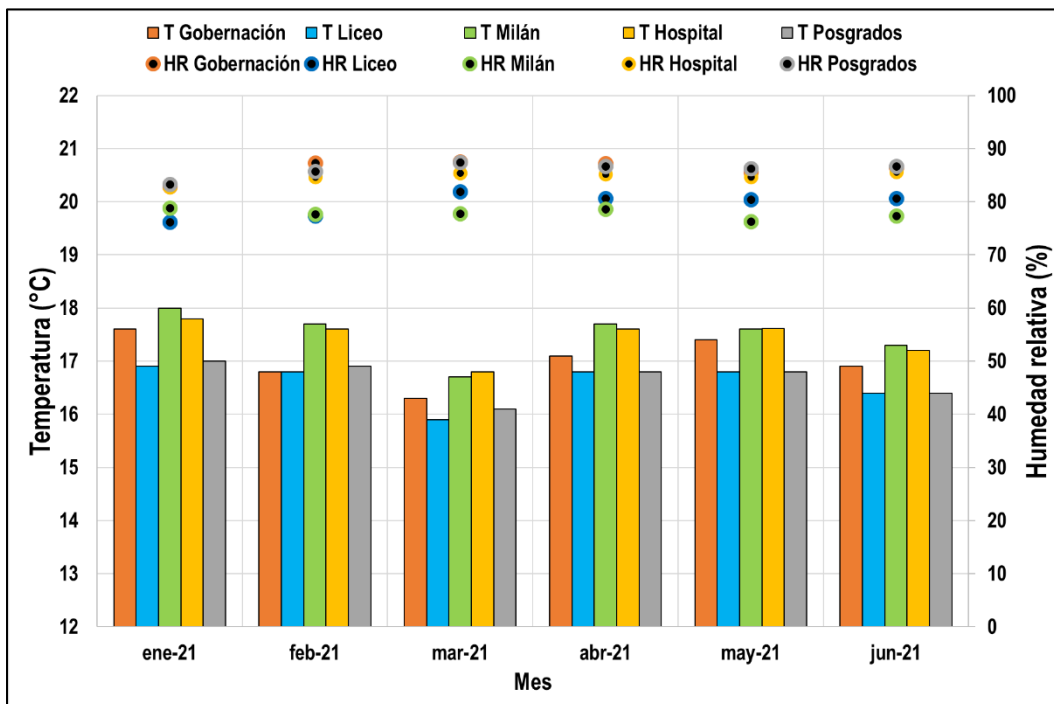


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire (T) y humedad relativa (HR) durante el periodo de análisis

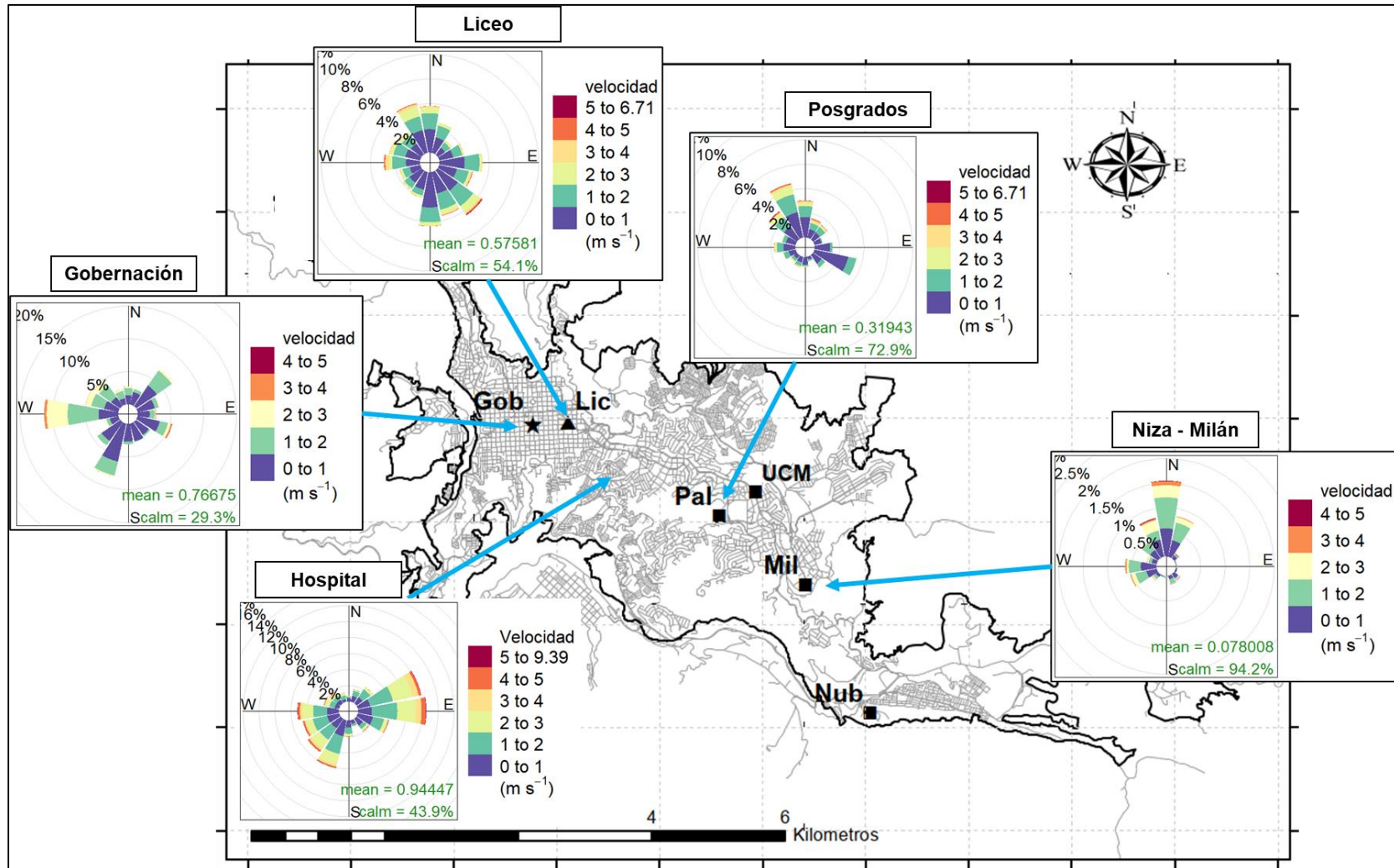


Figura 4. Rosas de viento en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el periodo de análisis

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 período de análisis (enero - junio de 2021). 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 de la Tabla 3 muestran que, durante el período de análisis, las estaciones de Milán y Liceo registraron las concentraciones más altas de PM₁₀ en la ciudad; mientras que Nubia y Palogrande presentaron los registros más bajos. La estación Milán presentó los mayores niveles de concentración de PM₁₀ con el mayor promedio aritmético mensual reportado en enero de $35 \pm 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$). De otra parte, la estación Palogrande presentó los menores niveles de concentración con el mayor promedio mensual en febrero de $21 \pm 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Se destaca que este patrón en los niveles de concentración también fue observado para el mismo periodo de los años 2020 y 2019, los cuales registraron los valores más altos de PM₁₀ en las estaciones Milán y Liceo con promedios mensuales por encima de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los menores registros fueron obtenidos en Nubia y Palogrande con promedios alrededor a los $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Al comparar los registros del 2021 con respecto al mismo periodo del 2020, se evidenció una reducción en las concentraciones promedio mensuales de febrero y marzo en todas las estaciones, con valores cercanos al 12% en Gobernación y 50% en Palogrande. Este fenómeno está directamente relacionado con las precipitaciones registradas durante estos meses, las cuales aumentaron para el 2021 alrededor de los 100 mm de lluvia. Los resultados ratifican el fenómeno de lavado atmosférico como uno de los factores clave en la reducción de la contaminación por material particulado en la ciudad de Manizales. Adicionalmente, para la estación de Milán se presentó para febrero y marzo de 2021 una reducción del 29% comparado con el mismo periodo en 2020, debido a la finalización de las obras de construcción en la empresa "Invermec", las cuales contribuyeron al aumento en los niveles de concentración en 2020; se recalca que esta estación es categorizada en el tipo de estación "Industrial" y con influencia de tráfico vehicular.

Para el caso del promedio aritmético semestral, la estación Milán registró los valores más altos de PM₁₀ con un valor de $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguida por las estaciones Liceo con $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Gobernación con $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Nubia con $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), por último, Palogrande con $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). La estación UCM comenzó a reportar datos solo a partir de los últimos dos meses del semestre con un promedio acumulado de $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Cabe resaltar que todas las estaciones cumplieron con el porcentaje de datos válidos del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010) establecido en 75% (actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS).

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

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)							
Promedio	19	23	19	14	24	24	21
Mediana	20	26	18	13	23	24	21
Incertidumbre**	1.20	1.20	1.16	1.45	1.19	1.37	1.26
Desviación Estándar	6	6	7	4	4	5	5
Mínimo	11	12	11	8	16	15	8
Máximo	26	29	32	24	30	32	32
Percentil 95%	26	29	28	21	29	32	28
N° Datos - %DV***	10 - 100	9 - 100	10 - 100	10 - 100	10 - 100	10 - 100	118 - 100
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)							
Promedio	29	25	23	23	24	24	25
Mediana	30	26	23	23	25	24	25
Incertidumbre	0.53	0.53	0.57	0.15	0.69	0.577	0.51
Desviación Estándar	5	5	6	5	6	3	5
Mínimo	21	15	11	12	15	18	11
Máximo	34	28	33	28	34	30	34
Percentil 95%	34	28	31	28	31	29	31
N° Datos - %DV	11 - 100	8 - 90	9 - 90	9 - 90	9 - 90	9 - 90	110 - 93
Palogrande PM₁₀ (µg/m³ estándar)							
Promedio	19	21	15	17	18	15	18
Mediana	20	21	14	16	18	15	17
Incertidumbre	0.53	0.53	1.06	1.06	1.08	1.08	0.89
Desviación Estándar	5	2	5	3	5	3	4
Mínimo	13	18	11	14	11	11	11
Máximo	26	23	26	21	25	21	26
Percentil 95%	25	23	23	21	24	19	23
N° Datos - %DV	9 - 90	7 - 80	7 - 80	7 - 70	8 - 80	9 - 90	94 - 80
Milán PM₁₀ (µg/m³ estándar)							
Promedio	35	30	27	29	26	28	29
Mediana	34	30	29	28	25	28	29
Incertidumbre	0.52	0.52	0.57	1.05	1.06	1.06	0.80
Desviación Estándar	6	6	4	5	7	6	6
Mínimo	25	21	17	21	17	20	17
Máximo	45	40	31	37	38	38	45
Percentil 95%	42	38	31	36	36	36	37
N° Datos - %DV	11 - 100	8 - 90	9 - 90	10 - 100	7 - 70	8 - 80	106 - 90

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Total
Nubia PM₁₀ (µg/m³ estándar)							
Promedio	20	20	18	20	17	19	19
Mediana	19	19	16	21	17	19	19
Incertidumbre	0.1	0.1	0.04	1.09	1.08	1.09	1.08
Desviación Estándar	6	6	5	3	7	5	5
Mínimo	15	16	11	15	11	13	11
Máximo	27	26	27	26	25	29	29
Percentil 95%	26	26	26	25	23	27	26
N° Datos - %DV	10 - 100	8 - 90	8 - 80	9 - 90	8 - 80	8 - 80	102 - 86
Católica PM₁₀ (µg/m³ estándar)							
Promedio	--	--	--	--	17	17	17
Mediana	--	--	--	--	18	16	17
Incertidumbre	--	--	--	--	1.09	1.11	1.10
Desviación Estándar	--	--	--	--	5	2	4
Mínimo	--	--	--	--	12	15	12
Máximo	--	--	--	--	25	21	25
Percentil 95%	--	--	--	--	24	20	23
N° Datos - %DV	--	--	--	--	5 - 50	9 - 90	28 - 24
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)							
Promedio	11	19	13	8	16	16	14
Mediana	12	19	12	8	16	16	14
Incertidumbre	1.17	1.17	1.40	1.58	1.18	1.19	1.28
Desviación Estándar	4	4	5	3	3	5	4
Mínimo	5	12	7	4	11	8	4
Máximo	16	24	24	12	21	24	24
Percentil 95%	15	24	21	12	21	22	20
N° Datos - %DV	11 - 100	8 - 90	10 - 100	10 - 100	10 - 100	10 - 100	118 - 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 durante el día de monitoreo y para reportar las concentraciones de contaminantes a condiciones estándar

*** %DV = Porcentaje de datos validos

De manera general, se ha identificado que las estaciones Milán, Liceo y en menor medida Gobernación, se encuentran influenciadas por tráfico vehicular (representado por un flujo importante de buses y camiones de carga). De acuerdo con la actualización del inventario de emisiones de la ciudad año base 2017, estas categorías poseen especial importancia ya que, a pesar de que su flota corresponde al 3.2% del total de vehículos de la ciudad, estos vehículos emplean diésel como combustible y son responsables del 56% (351.2 ton/año) y 24% (151.9 ton/año) del total de emisiones de PM₁₀ respectivamente (Unal - Corpocaldas, 2019). De otra parte, las áreas de influencia de las estaciones Nubia y Palogrande se encuentran relacionadas con bajas dinámicas de movilidad, debido a la reducida presencialidad en los campus universitarios.

En lo referente al monitoreo de PM_{2.5} de la estación Gobernación, se registró un promedio semestral de $14 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Se puede observar que febrero presentó el mayor nivel de concentraciones con un promedio mensual de $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras abril presentó el menor valor promedio con $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Al comparar los registros del 2021 con respecto al año 2020 se observó una reducción en las concentraciones promedio mensuales cercanos al 38% principalmente en enero y marzo. De manera similar a la fracción de PM₁₀, esta reducción se relaciona directamente con los valores de precipitación del presente año, que para el caso específico de Gobernación, se encontró que el aumento en precipitación superó los 120 mm de lluvia.

Adicionalmente, se presentan las figuras de evolución temporal de concentraciones diarias obtenidas para PM₁₀ (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 (PM₁₀ y PM_{2.5}) establecido en la Resolución 2254 de 2017 (MADS, 2017).

Finalmente, 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 la mayores disminuciones en las concentraciones se obtienen los días domingo, principalmente en estaciones con influencia de tráfico vehicular en las cercanías de las zonas de monitoreo. Adicionalmente, se evidencia que en la estación Liceo principalmente los sábados tienen un comportamiento similar a los días laborales, con promedios diarios sin cambios significativos; mientras los lunes presentan una concentración media menor a las registradas en los demás días laborales. Este comportamiento se asocia con un efecto de remanente de atmósfera limpia, producto de la disminución de concentración obtenida durante el domingo.

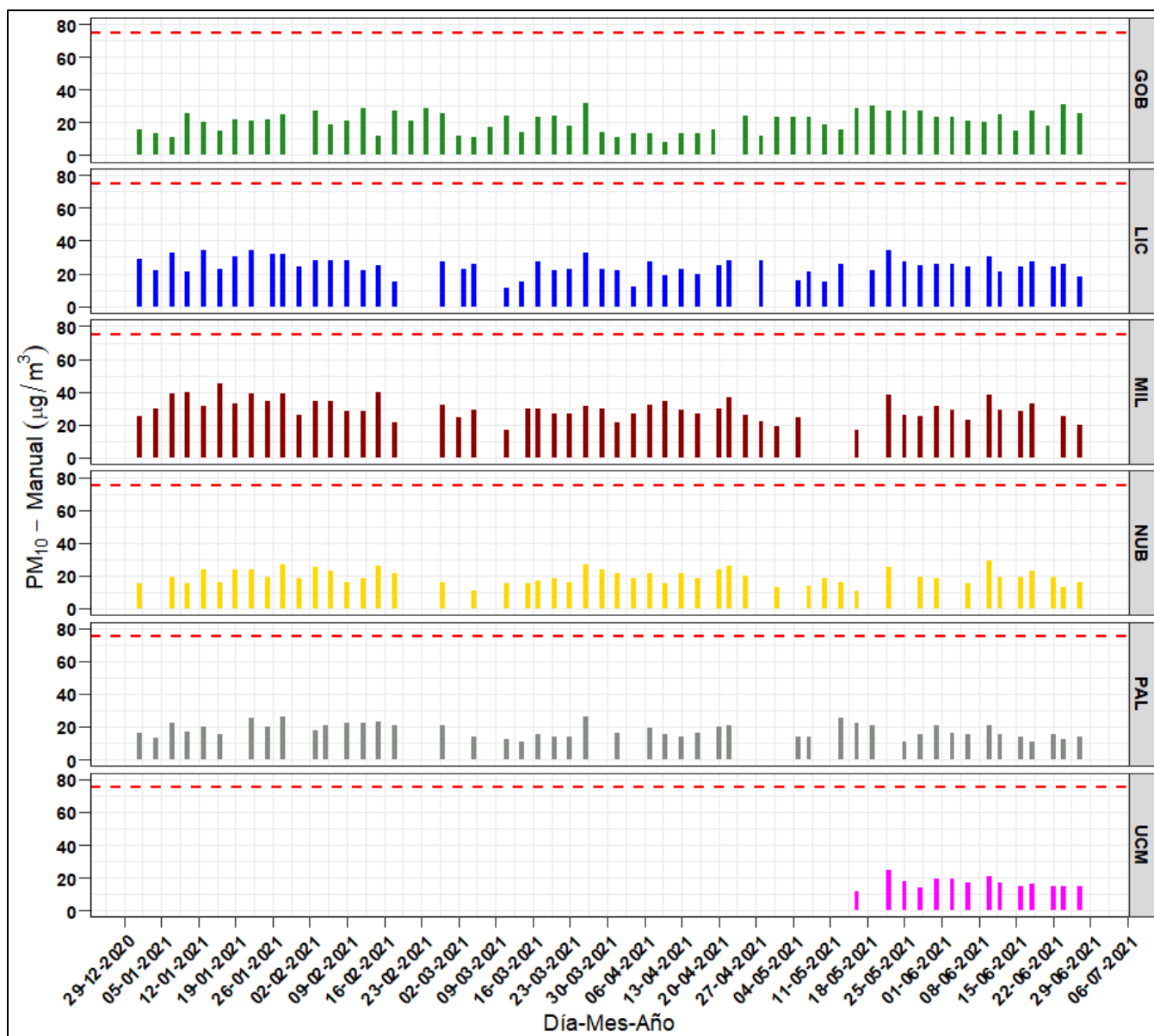


Figura 5. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM₁₀ - Manuales durante el periodo de análisis en el SVCA de Manizales.

La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM₁₀ establecido en la Resolución 2254 de 2017: 75 µg/m³

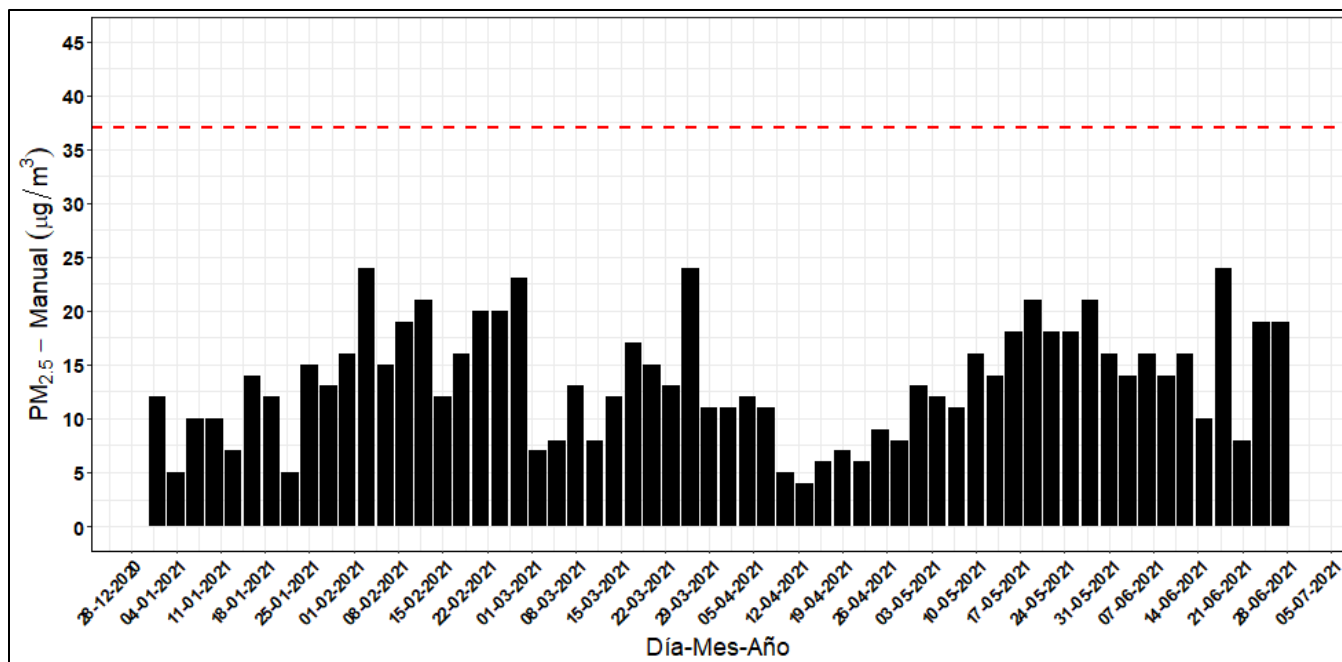


Figura 6. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{2.5} - Manual durante el periodo de análisis en el SVCA de Manizales.

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

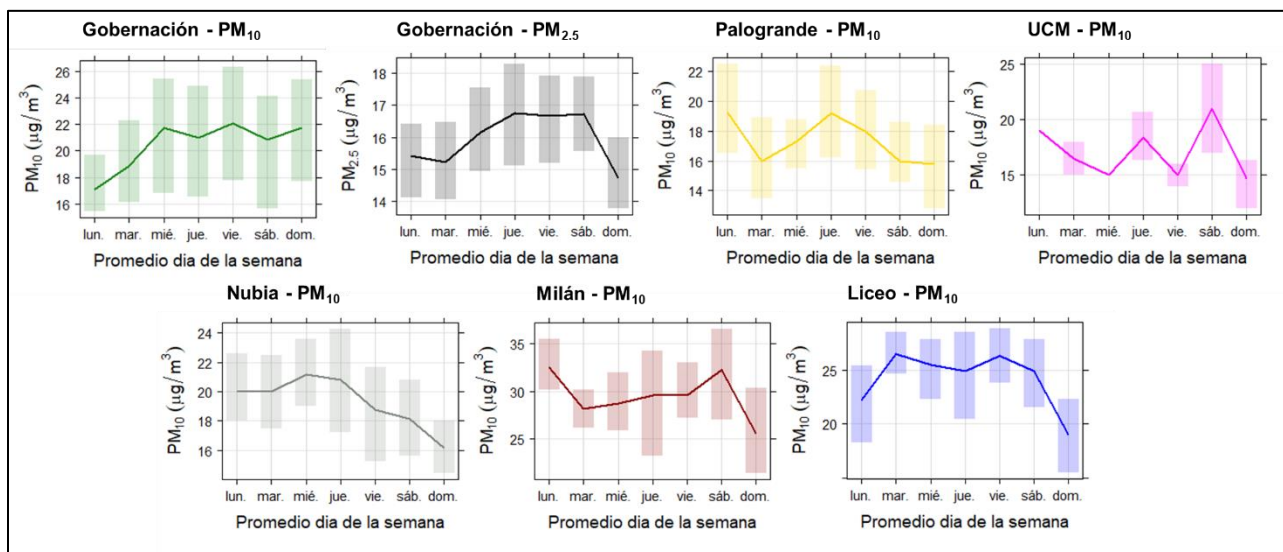


Figura 7. Variación promedio de concentraciones por días de la semana para PM₁₀ y PM_{2.5} - Manuales, durante el periodo de análisis.

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

3.2. Equipos manuales: Comparación preliminar con la norma anual

Se realizó el ejercicio de comparación del promedio aritmético obtenido para las concentraciones de PM_{10} (Figura 8) y $PM_{2.5}$ (Figura 9) para el periodo de análisis. Lo anterior con el fin de analizar preliminarmente las diferencias con respecto a los límites normativos anuales, establecidos 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 en ninguna de las estaciones se ha superado la norma anual colombiana. Finalmente, es importante destacar que los promedios obtenidos en Gobernación, Liceo y Milán para PM_{10} y $PM_{2.5}$ (Gobernación), superaron las recomendaciones promedio anual propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$.

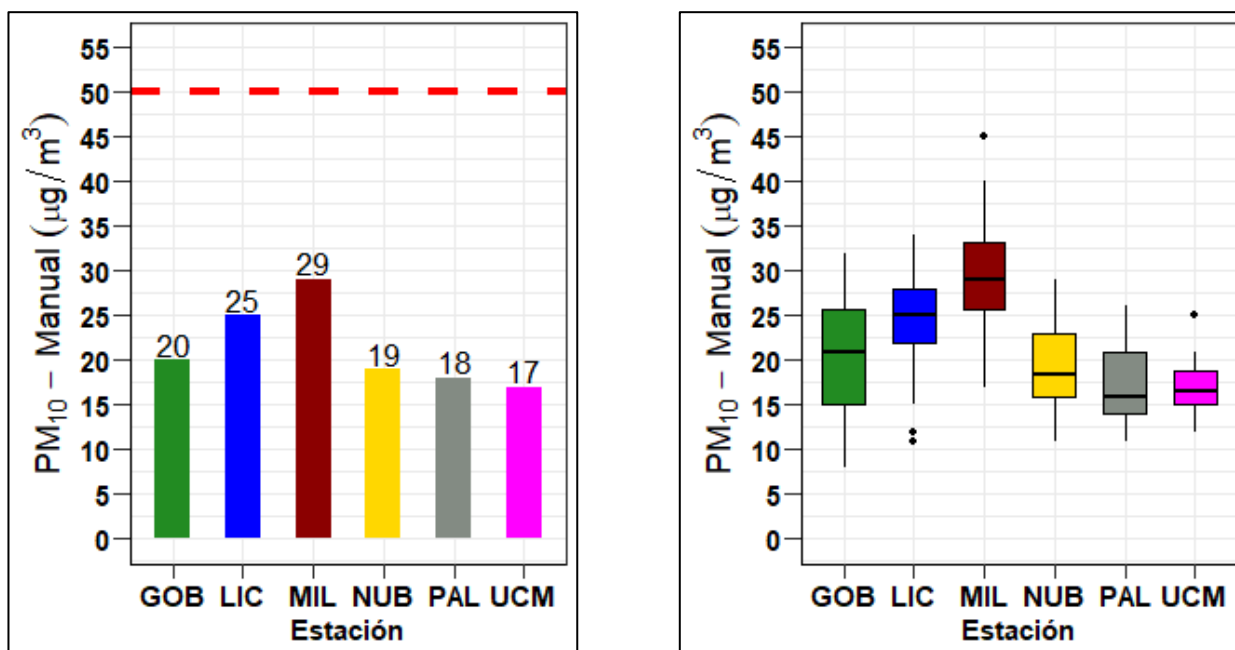


Figura 8. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de PM_{10} - Manuales durante el periodo de análisis. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 del MADS: $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

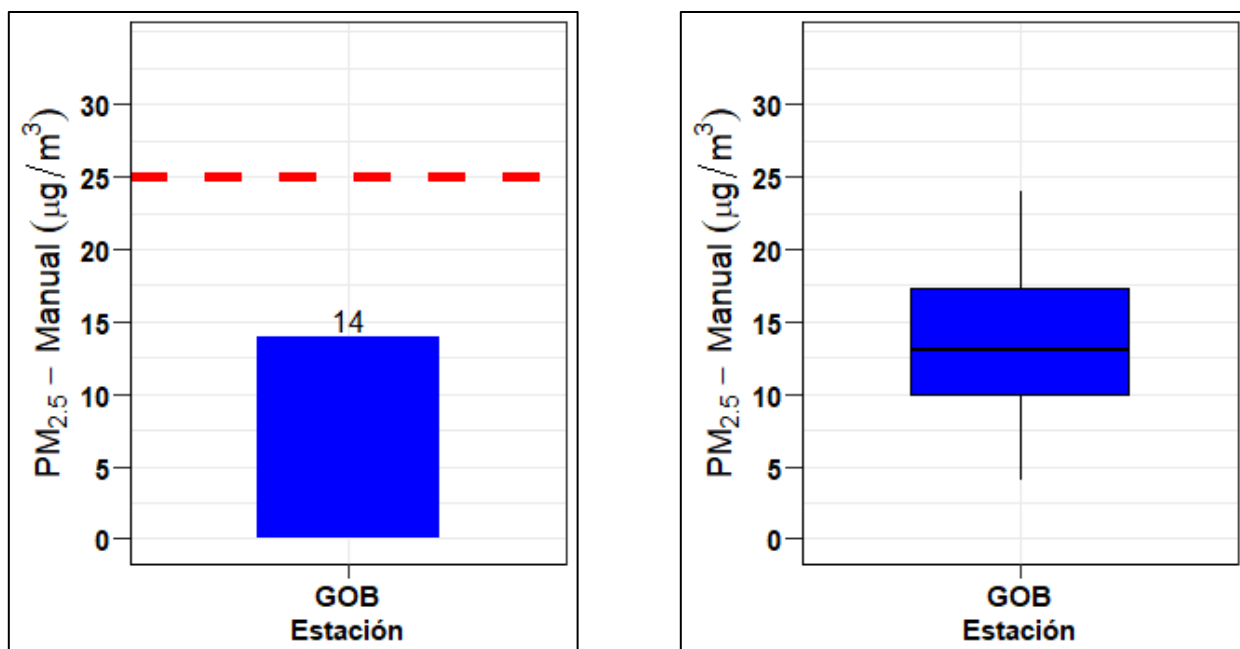


Figura 9. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de PM_{2.5} - Manual durante el periodo de análisis. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 del MADS: 25 µg/m³

3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales

La Tabla 4 presenta los estadísticos descriptivos comparativos de PM₁₀ y PM_{2.5} - Automáticos en estaciones Gobernación y Liceo durante el período de análisis. Se observó que durante el primer semestre del 2021, las concentraciones promedio (medianas¹) de Gobernación para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 18 µg/m³ (desv. std = 5 µg/m³) y 12 µg/m³ (desv. std = 3 µg/m³) respectivamente. De otra parte, las concentraciones promedio medianas de Liceo para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 25 µg/m³ (desv. std = 3 µg/m³) y 11 µg/m³ (desv. std = 3 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 a los promedios mensuales, se puede observar que el patrón en los niveles de concentración es similar a los obtenidos en los equipos manuales, indicando la relación inversa entre el material particulado y la precipitación, debido al fenómeno de lavado atmosférico. En este sentido, el máximo promedio mensual obtenido para PM₁₀ fue de 45.2 µg/m³ en Gobernación y 74.1 µg/m³ en Liceo, ambos registros obtenidos en enero (mes con las menores precipitaciones). De forma similar sucedió para PM_{2.5} cuyos promedios mensuales para enero fueron de 35.2 µg/m³ y 46.5 µg/m³ también en enero.

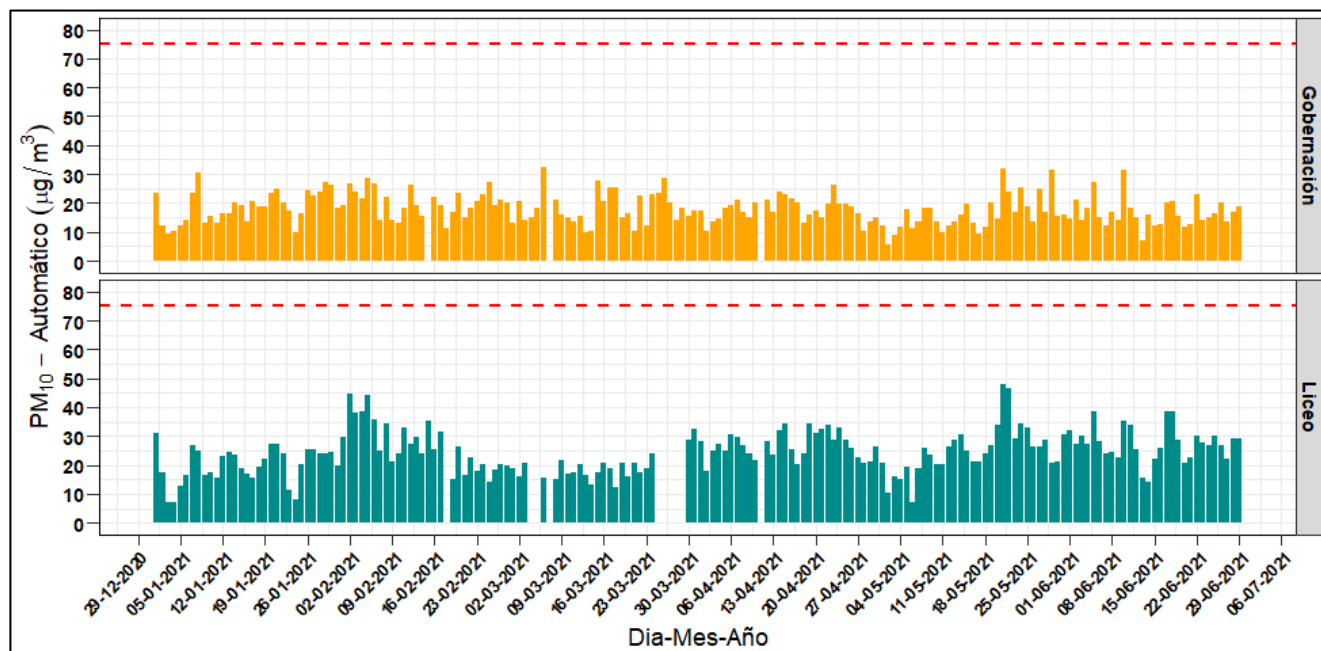
¹ Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático (µg/m³) durante el periodo de análisis

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)							
Promedio	19.5	20.4	18.6	17.9	16.4	17	18
Mediana	18.9	20.1	17.4	18.1	14.8	15.8	18
Desv. Est.	7.3	4.6	5.8	3.8	6.2	5	5
Min.	9.3	10.8	10.1	10.2	5.6	7.3	6
Max.	45.2	28.9	32.1	27.5	33.4	30.2	45
Percentil 95	29.1	27.1	28.2	23.8	28.5	26.6	28
N° Datos	31	28	30	29	31	30	180
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)							
Promedio	21.7	26.9	18.6	27.3	25.3	27.4	25
Mediana	22.1	25.1	18.9	27.2	25.1	27.4	24
Desv. Est.	11.5	8.5	3.3	4.8	8.6	5.9	3
Min.	7.2	14.3	12.1	18	7.4	14.1	18
Max.	74.1	44.6	26.2	36.6	48.3	38.7	74
Percentil 95	29.2	17.3	23.8	34.4	40.5	38.6	32
N° Datos	31	28	23	30	31	30	182
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)							
Promedio	12.6	12.8	11.9	12.6	10.9	11.5	12
Mediana	12.4	13.2	11.4	12.8	10.6	11.3	12
Desv. Est.	5.4	3.2	3.5	2.2	3.6	2.9	3
Min.	6	5.8	6.5	7.5	3.8	5.5	4
Max.	35.2	19.1	20	16.9	20.8	19.5	35
Percentil 95	17.1	17.6	18.3	16.2	17.4	16.5	17
N° Datos	31	28	30	29	31	30	180
Liceo PM_{2.5} (µg/m³ estándar)							
Promedio	14.2	10.5	6.7	13.8	10.8	12.5	11
Mediana	14.8	9.9	6.6	13.9	10.5	12.5	11
Desv. Est.	7.4	4	1.7	2.3	3.8	2.6	3
Min.	3.6	5.1	4.4	9.7	3.7	6.2	4
Max.	46.5	18.2	13.5	17.4	21.3	17.5	47
Percentil 95	18.8	42.2	8.4	16.9	17.8	16.6	23
N° Datos	31	28	23	30	31	30	182

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

La Figura 10 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos (promedio diario) durante el periodo de análisis para las estaciones Gobernación y Liceo.



(a)



(b)

Figura 10. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el periodo de análisis. (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}).

Finalmente, se presenta la Figura 11 con 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 para el período de análisis.

Se identifica que 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).

Estos máximos de concentración horaria en ambas estaciones registraron valores cercanos a los $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 $1300 \text{ W}/\text{m}^2$ 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 límite planetaria, dando lugar a una mayor dispersión de los contaminantes emitidos (Cuesta y otros, 2020).

Adicionalmente, 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 30% respecto al promedio semanal para ambas estaciones y para ambos contaminantes.

Lo anterior sugiere que tanto el PM_{10} como el $PM_{2.5}$ provienen de la misma fuente de emisión. 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.

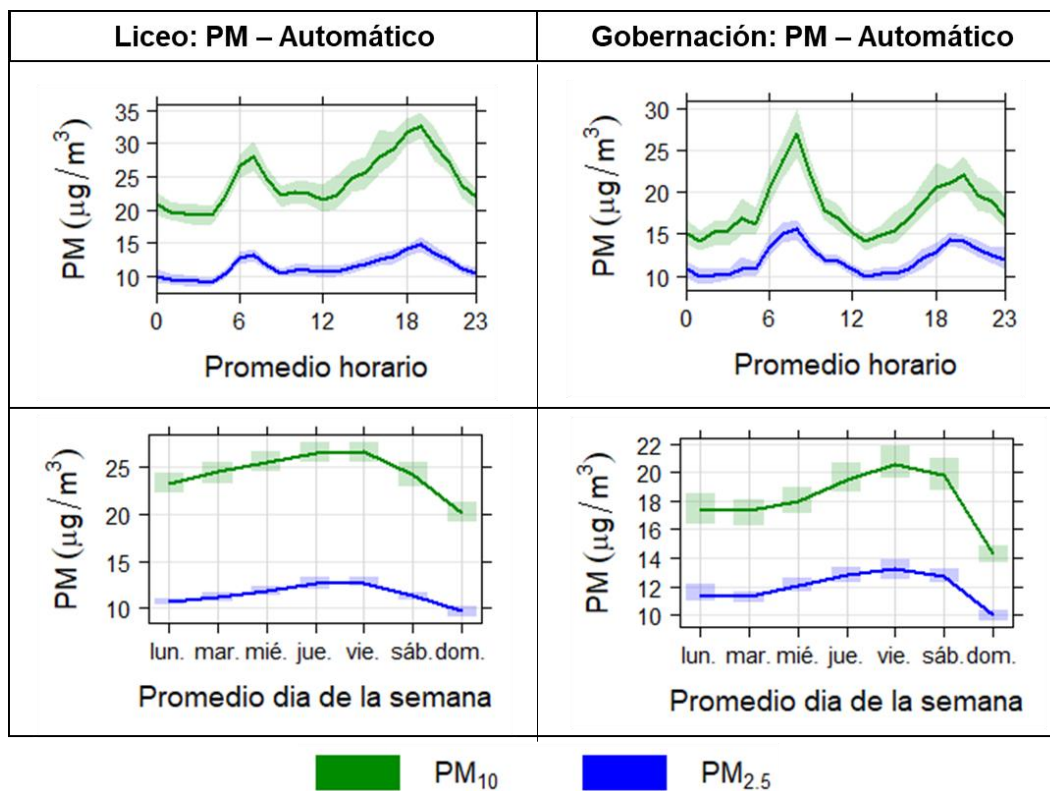


Figura 11. Promedio horario y semanal de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el periodo de análisis, en Gobernación (derecha) y Liceo (izquierda)

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

La Figura 12 y 13 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM - Manuales. De forma similar, la Figura 14 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM – 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. Para el caso de PM_{2.5} – Manual en la estación Gobernación, un 55% de los días analizados presentaron ICA en estado moderado.

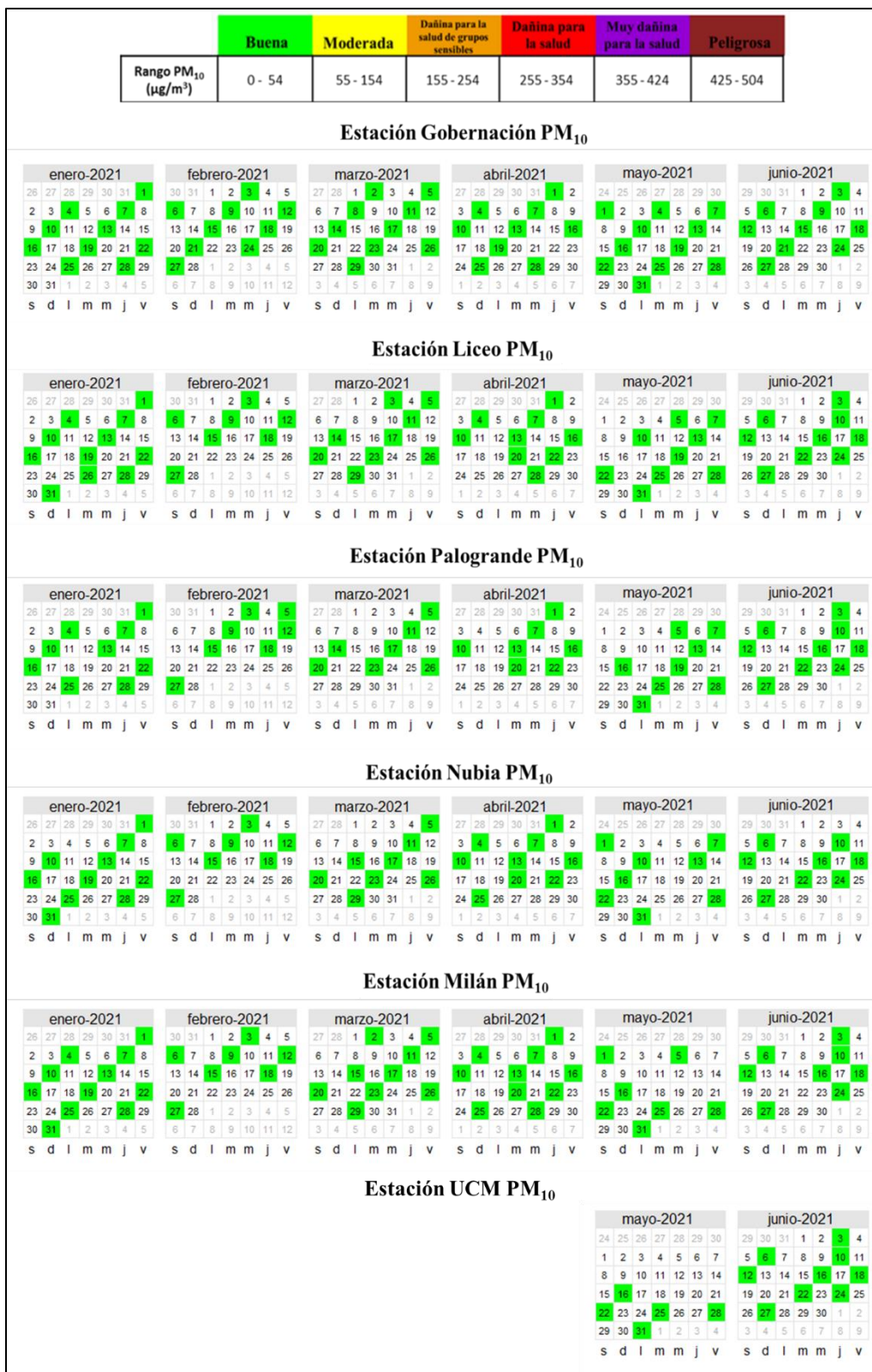


Figura 12. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ Manual durante el periodo de análisis.

Cálculo según lineamientos de la resolución 2254 de 2017 del MADS

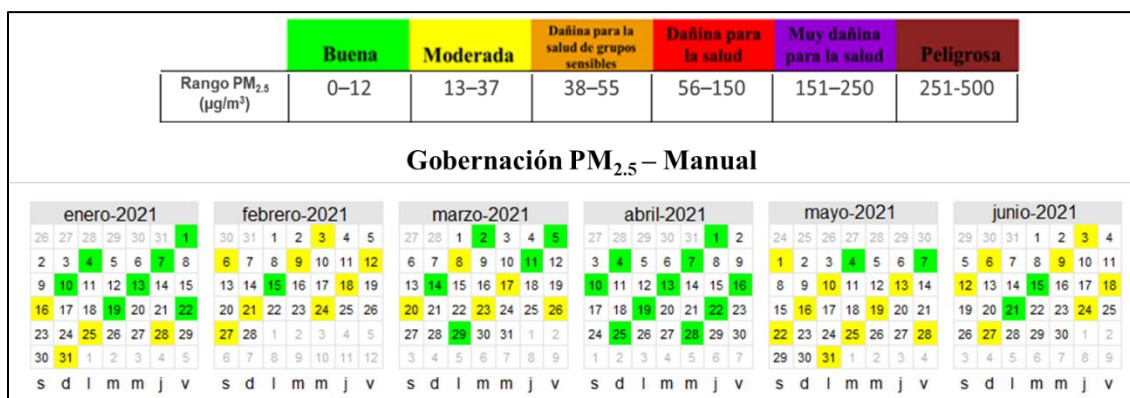


Figura 13. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{2.5} – Manual durante el periodo de análisis.

Cálculo según lineamientos de la resolución 2254 de 2017 del MADS

Por otro lado, con base en la concentración de PM₁₀ - Automático, se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en todos los días en la estación Gobernación y Liceo; mientras que, para el caso de PM_{2.5} – Automático, en ambas estaciones se presentó un total del 45% de los días con un ICA en estado moderado.

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.

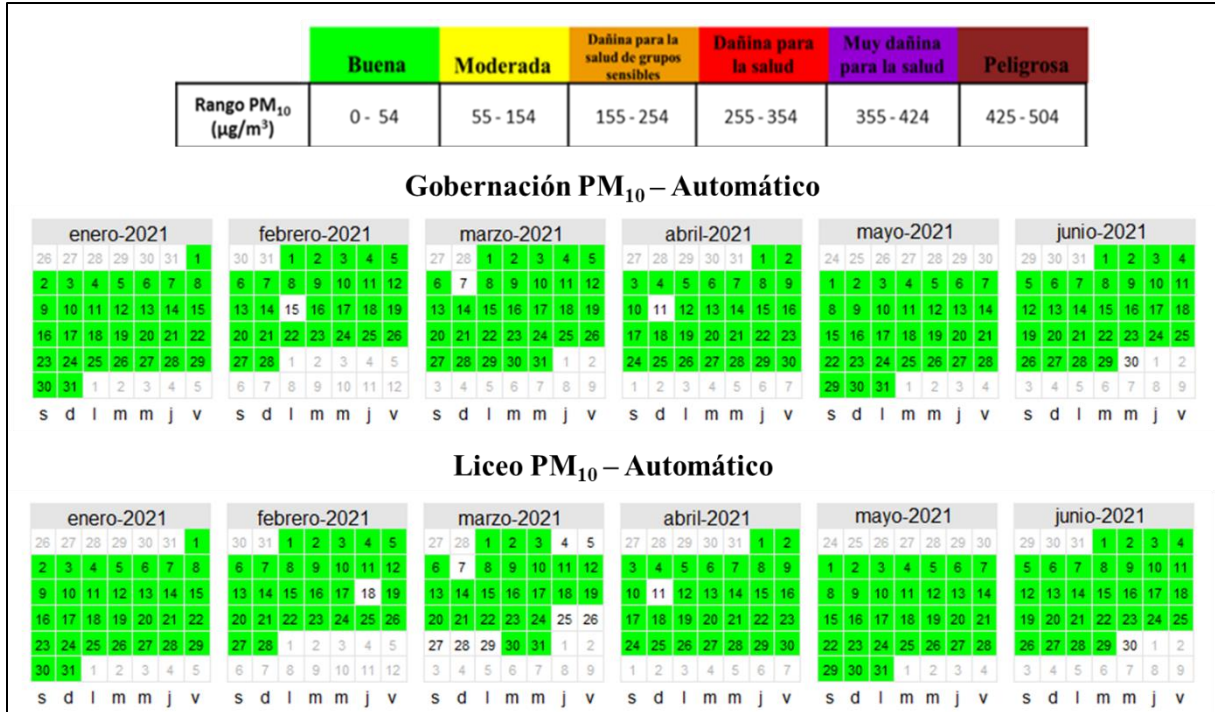


Figura 14. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{10} – Automático en las estaciones Gobernación y Liceo durante el periodo de análisis. Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

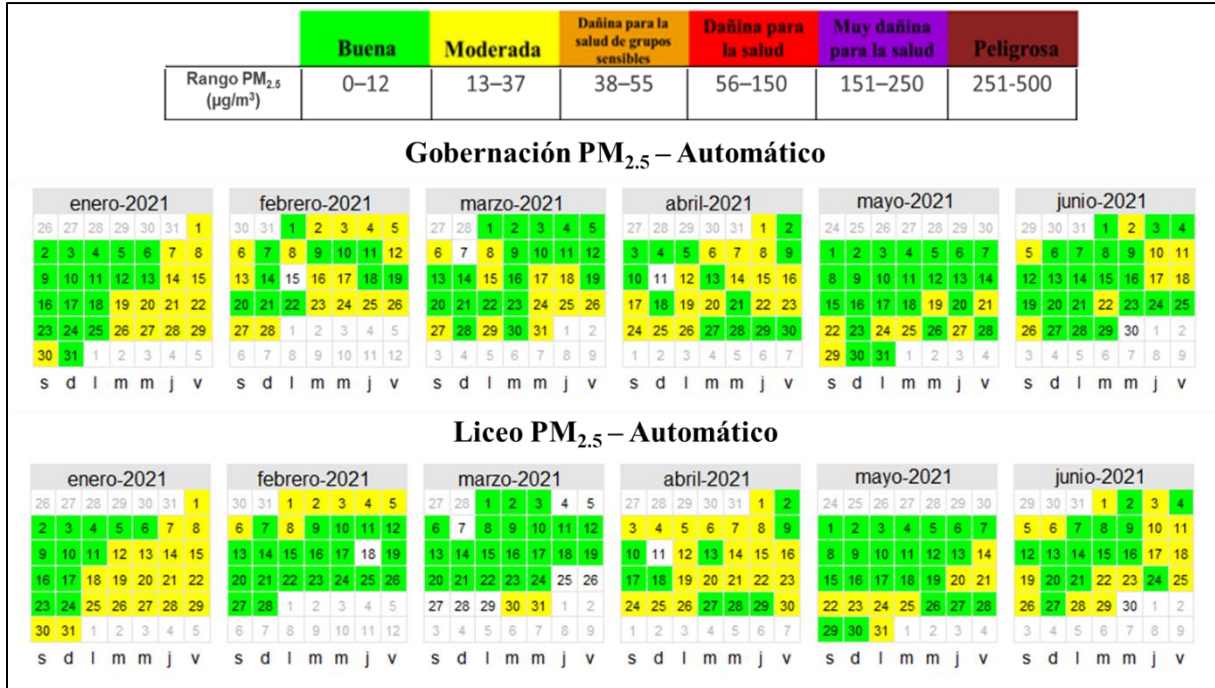


Figura 15. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{10} – Automático en las estaciones Gobernación y Liceo durante el periodo de análisis. Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

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 el periodo de análisis. Se observó que, durante el primer semestre del 2021 las concentraciones promedio medianas² se encontraron alrededor de 796 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = 407 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). 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 junio presentó el mayor registro con un valor promedio de 975 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, indicando un posible aumento en la presencia de vehículos particulares en inmediaciones de la estación y la influencia de menores registros de precipitación durante este mes. Para el caso del mínimo promedio registrado, este se presentó el 01 enero con un valor de 151.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, día festivo caracterizado en general por ausencia de fuentes de emisión en toda la ciudad.

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

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Total
Promedio	673.0	924.3	875.6	951.7	924.1	1086.4	905.9
Mediana	561.0	813.7	777.1	847.4	799.0	974.7	795.5
Incertidumbre**	1.40	1.40	1.40	1.494	1.494	1.494	1.45
Desv. Est.	345.6	407.4	398.4	409.9	435.7	446.6	407.3
Min.	151.1	288.8	246.1	359.1	282.1	457.9	151.1
Max.	2205.9	2837.7	2797.8	2845.2	2971.6	3191.1	3191.1
Percentil 95	1394.3	1714.7	1691.6	1842.1	1810.9	2014.7	1775
N° Datos	762	696	768	669	719	696	8620

* 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.

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.

Al comparar el primer semestre del año 2021 con respecto al mismo periodo del 2020 y 2019, se presentó un aumento en las concentraciones cercano al 25% con respecto al 2020; y una variabilidad poca significativa comparado con el 2019, por lo que no se presenta una evidencia clara en los patrones de emisión. El CO es mayoritariamente dominado por la combustión de gasolina proveniente de motocicletas y vehículos particulares, categorías vehiculares que aportan cerca del 41% (11599.7 ton/año) y 38% (10653 ton/año) respectivamente a la emisión de este contaminante (Corpocaldas – Unal, 2019).

De manera complementaria, la Figura 16 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de CO durante el periodo de análisis. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cinco minútales 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).

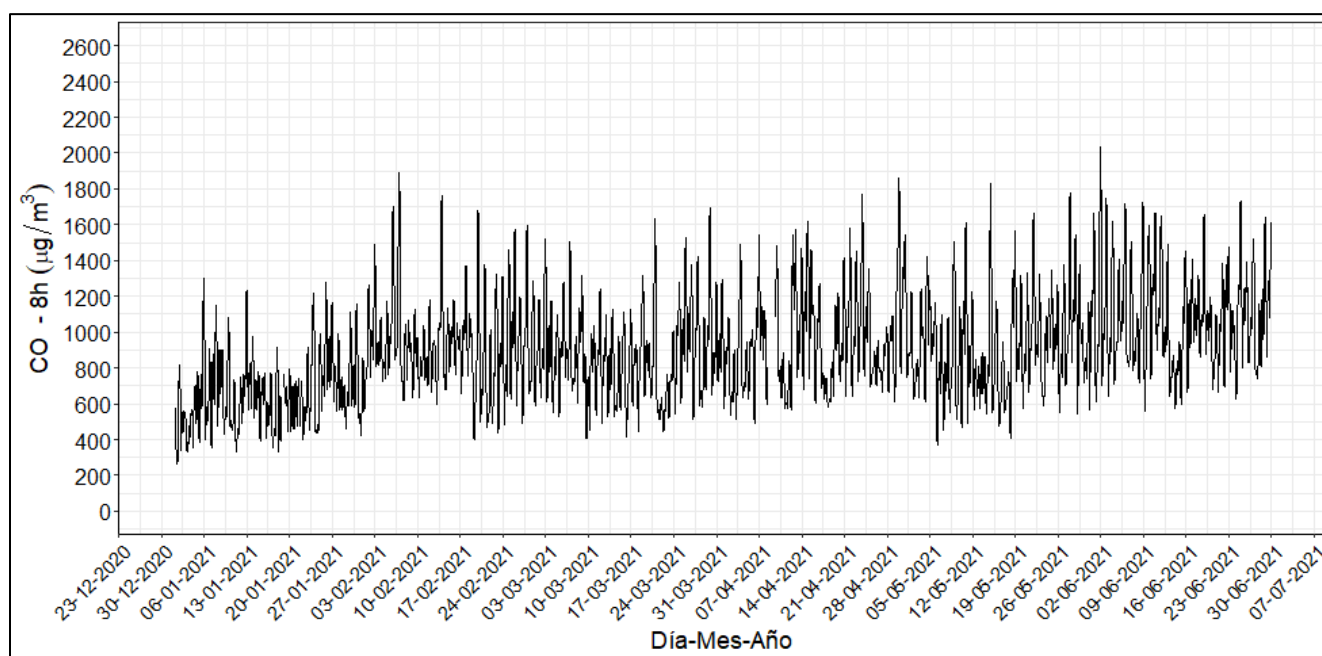


Figura 16 Evolución temporal de concentraciones promedio octohoraria de monóxido de carbono (CO) durante el periodo de análisis.

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

Adicionalmente, la Figura 17 presenta la variación promedio horario, mensual y por día de la semana. Se observa que los máximos horarios de concentración ocurren en las horas pico de tráfico vehicular (al inicio y final de la jornada laboral) alrededor de las 7 am y las 6 pm, con promedios horarios de $1300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1420 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. De otra parte, se observan mínimos alrededor de los $380 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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).

Para el caso de la hora pico del medio día se registran concentraciones alrededor de los $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor relacionado directamente con las dinámicas que se presentan en la atmósfera de la ciudad. Debido a la presencia de radiación solar se incrementa la temperatura de las masas de aire y aumenta la flotabilidad de estas. Consecuentemente se genera la elevación de la capa límite planetaria generando una mayor dispersión de los contaminantes en la atmósfera, además de la intensificación de los procesos de reacción química que generan contaminantes secundarios como el ozono troposférico (O_3) (Cuesta y otros, 2020).

Al comparar el promedio entre los días de semana, se observa que la concentración máxima se presentó los martes con un valor promedio alrededor de los $960 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una concentración mínima los domingos (día con la menor actividad económica de la ciudad) con un valor promedio de $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este valor es 25% inferior comparado con el promedio semanal, indicando la representatividad del aporte de las fuentes de emisión en las concentraciones de CO observadas.

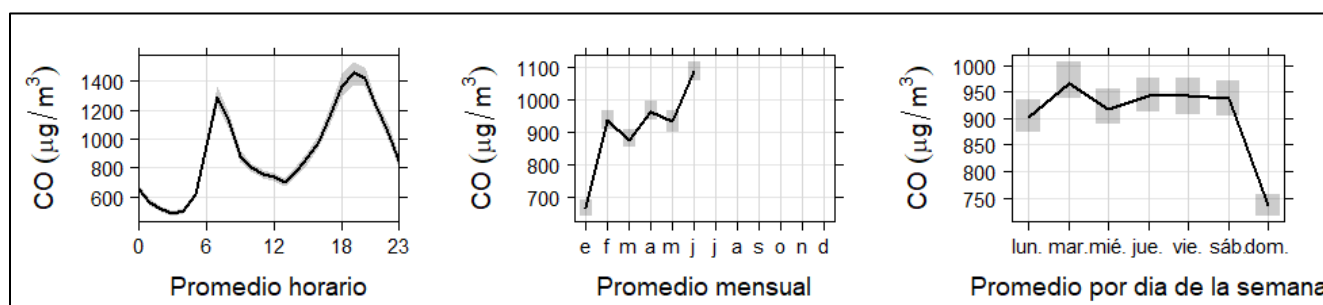


Figura 17. Variación promedio de monóxido de carbono (CO) horario (izquierda), mensual (centro) y por día de la semana (derecha) durante el periodo de análisis

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

4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO₂)

La Tabla 6 presenta los estadísticos descriptivos comparativos para SO₂ durante el periodo de análisis. Para este equipo en particular se tienen registros a partir del 12 de febrero, debido a algunas fallas en el sistema de medición. Se observó que, durante el primer semestre del 2021, las concentraciones promedio medianas³ se encontraron alrededor de 7 µg/m³ (desv. std = 2 µg/m³), con un máximo promedio horario de 21.2 µg/m³ obtenido el 19 de abril entre las 5 a 6 am, valor relacionado a la actividad del Volcán Nevado del Ruiz, (ver sección 5.3), el cual registró una altura de columna de gases de 1400 m desde la boca del volcán, adicionalmente para este día se presentó una predominancia de vientos en sentido Oriente – Occidente, dirección de la ciudad de Manizales en referencia al volcán. 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 febrero se presentó el mayor registro con un valor promedio mensual de 9.2 µg/m³, indicando un posible aumento en la presencia de vehículos en inmediaciones de la estación. Estas fuentes móviles en ruta utilizan combustibles como gasolina y diésel. Al comparar febrero con los demás meses del semestre se evidencia una reducción en las concentraciones registradas, contrastando con los reportes de actividad volcánica durante el periodo de análisis (ver sección 5.3), donde se identificó que las mayores emisiones de la columna de gases provenientes del volcán fueron superiores durante marzo, abril y mayo, con registros de emisión de gases con alturas superiores a los 1200 m.

De manera complementaria, la Figura 18 presenta la evolución de concentraciones horarias de SO₂ durante el periodo de análisis. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cinco minútales 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 µg/m³ para 1 hora).

Adicionalmente, la Figura 19 presenta la variación promedio horaria, mensual y por día de la semana. Se observa un comportamiento horario mensual 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 de 8.5 µg/m³ y 7 µg/m³ respectivamente. Asimismo, se observan mínimos alrededor de los 3.5 µg/m³ al medio día (entre las 11 am y 1 pm). Al comparar el promedio por día de la semana mensual, se observa un comportamiento con máximos de concentración los sábados con un valor medio alrededor de los 7 µg/m³ y mínimos promedio los domingos alrededor de los 5.5 µg/m³.

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

Tabla 6. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de SO₂ (µg/m³) durante el periodo de análisis

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Total
Promedio	---	9.2	7.1	5.8	5.1	5.6	6.6
Mediana	---	8.6	6.8	5.5	4.7	5.1	6.2
Incertidumbre**	---	0.27	0.27	0.966	0.966	0.966	0.69
Desv. Est.	---	2.4	1.8	2.1	1.8	2.0	2.0
Min.	---	5.4	3.3	2.1	2.1	2.5	2.1
Max.	---	16.9	14.8	21.2	14.3	14.2	21.2
Percentil 95	---	13.5	10.9	9.6	8.5	9.6	11
N° Datos	---	395	768	669	719	696	6494

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

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

*** Numero de datos no validos (<30% del mes)

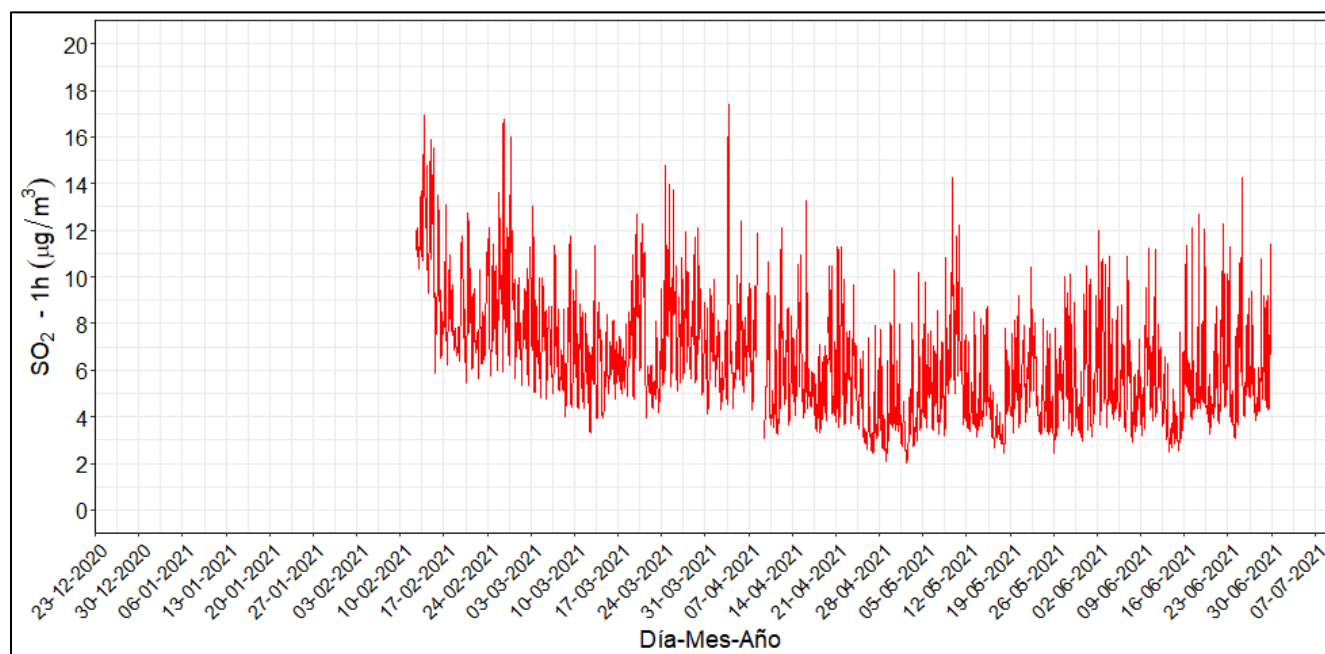


Figura 18. Evolución temporal de concentraciones promedio horario de dióxido de azufre (SO₂) durante el periodo de análisis.
 El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a 100 µg/m³ no fue superado en ningún día

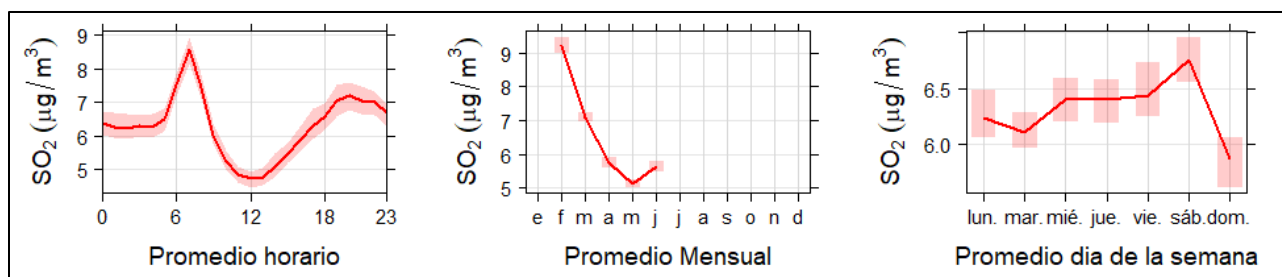


Figura 19. Variación promedio de monóxido de dióxido de azufre (SO₂) horario (izquierda), mensual (centro) y por día de la semana (derecha) durante el periodo de análisis

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 comparativos para O₃ durante el periodo de análisis, así como la subclasificación entre las concentraciones del día (diurnas) y la noche (nocturno). Se observó que, durante el primer semestre del 2021, las concentraciones promedio medianas⁴ se encontraron alrededor de 20 µg/m³ para el día completo, 27 µg/m³ para la jornada diurna y 13 µg/m³ para la jornada nocturna. 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, inversamente al CO, durante febrero se presentó el menor registro con un valor promedio de 11.5 µg/m³ y durante abril se registró el mayor promedio mensual con un valor de 31.6 µg/m³.

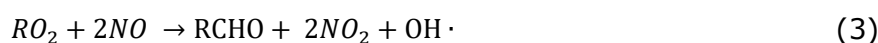
Para poder explicar el comportamiento de este contaminante, se resalta que el O₃ es un contaminante secundario que es formado en la atmósfera debido a las reacciones fotoquímicas en presencia de contaminantes primarios conocidos como precursores. Los principales precursores del O₃ son los óxidos de nitrógeno (NO_x, que representa especies NO y NO₂) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs). En la ciudad de Manizales ambos precursores son dominados por emisiones vehiculares (Corpocaldas – Unal, 2019). 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.

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.

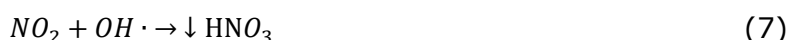
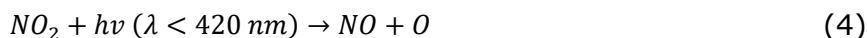
Bajo una relación mayor a 1 entre COVs/NO_x, los radicales OH· reaccionarán mayoritariamente con los COVs para generar moléculas de agua, NO₂ y especies de aldehídos (ver reacciones 1, 2 y 3). Por otro lado, con una baja relación de COVs/NO_x las reacciones de NO_x serán predominantes (ver reacciones 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 este sentido, la disminución de emisiones de contaminantes primarios puede ser interpretadas como una reducción de emisiones de precursores como los NO_x, debido al bajo 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).



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

Tabla 7. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de O₃ (µg/m³) durante el periodo de análisis y su comparativo entre horarios

Estadísticos	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Total
Promedio	12.8	11.5	13.7	31.6	23.7	27.4	20.1
Mediana	10	8.9	11.3	28.8	20.6	22.4	17.0
Incertidumbre**	1.18	1.18	1.18	0.812	0.812	0.812	0.81
Min.	1.4	0.4	0.9	3.1	3.4	3.9	0.4
Max.	44.2	39.1	45.1	83.7	68.6	75.9	83.7
Percentil 95	30.6	29	32.5	66.5	51.4	63.1	47
N° Datos	639	696	697	669	720	668	8178
Promedio diurno	18.1	16.1	19.1	40.3	32.6	37.3	27.3
Mediana diurna	18.3	16.5	19.4	40.7	33.7	36.9	27.6
Desv. Est.	10	9.3	10	19.8	15.3	18.5	13.8
Max.	44.2	39.1	45.1	83.7	68.6	75.9	83.7
N° Datos	315	348	349	333	360	332	4074
Promedio nocturno	7.8	6.9	8.2	23.1	14.9	17.2	13.0
Mediana nocturna	6.8	5.5	7.6	21.1	13.1	15.1	11.5
Desv. Est.	4.8	4.7	5.1	13.1	8.9	10.4	7.8
Max.	29.9	21.7	27.7	58.5	42.7	48.1	58.5
N° Datos	324	348	348	336	360	336	4104

* 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.

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).

De manera complementaria, la Figura 20 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de O_3 durante el periodo de análisis. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cinco minútales 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).

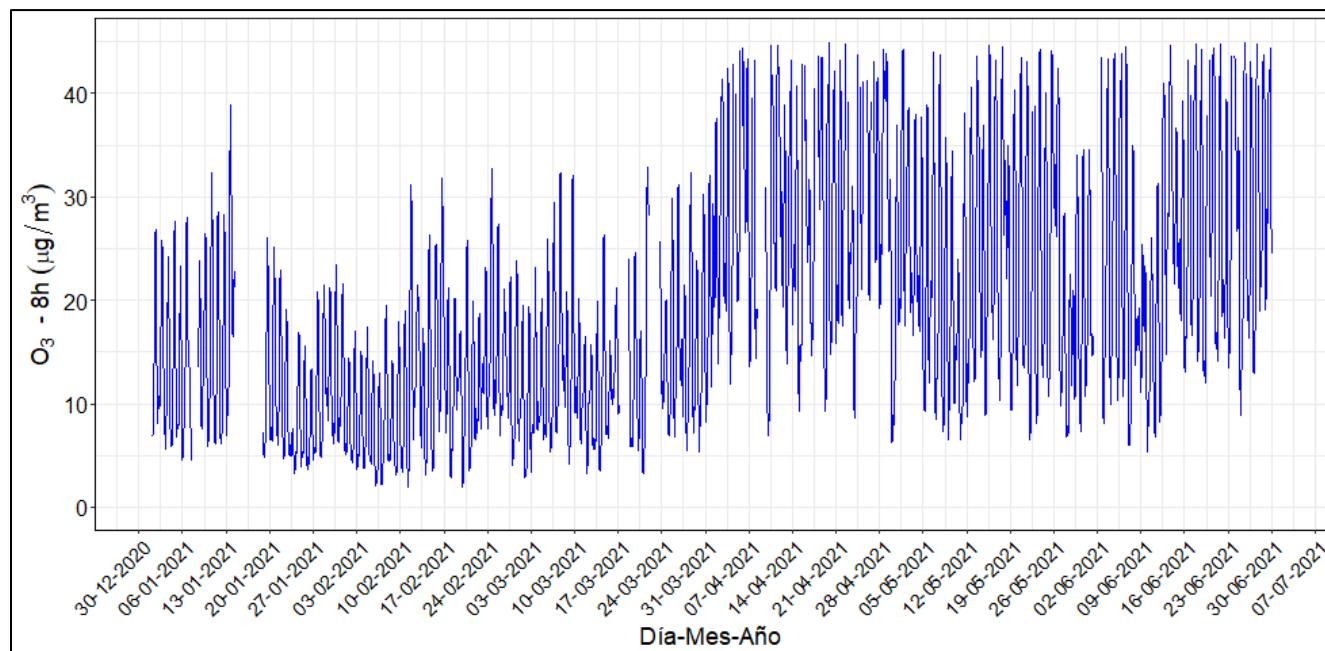


Figura 20. Evolución temporal de concentraciones promedio octohorario de O_3 durante el periodo de análisis.

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

La Figura 21 presenta el resumen de la variación de O_3 y radiación solar promedio horaria mensual y promedio día de la semana 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 una relación directa entre el ozono y la radiación solar, los picos máximos en las concentraciones de ozono y radiación solar ocurren durante las 11:30 am y 3:00 pm del día, alcanzando concentraciones promedio cercana a los $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y niveles de radiación promedio cercanos a los $500 \text{ W}/\text{m}^2$.

Para el período nocturno, sin presencia de radiación solar, la concentración de ozono disminuye aproximadamente el doble. Adicionalmente, se presenta un pico de ozono entre la 1:00 am y 3:00 am con valores cercanos a los $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 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 disminuirá la temperatura de las masas de aire y por ende la reducción en la flotabilidad, generando la disminución de la altura de la capa límite, impidiendo así la libre dispersión de contaminantes en la atmosfera. De otra parte, se identifica que las concentraciones diurnas son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con una mediana diurna de $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una nocturna de $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

De manera general se evidencia que los promedios nocturnos no presentan relación clara con los días de la semana, esto se asocia a que en la noche no existe radiación solar y por tanto no hay generación de O_3 y el registrado será producto de la acumulación del O_3 generado durante el día. Por otra parte, los promedios diurnos y semanales evidencian que las variaciones de O_3 tienen relación directa con la radiación solar, y para el caso de sábados y domingos se presenta un aumento en concentraciones de O_3 , lo que se asocia al remanente del generado durante los días de mayor actividad de las fuentes de emisión (lunes a viernes). Además, la posible influencia en la disminución de emisiones de precursores como el NO_x debido al bajo tráfico vehicular de estos dos días, alterando así las reacciones de titulación que generan y consumen O_3 ; y desplazando el equilibrio hacia una mayor producción de este contaminante.

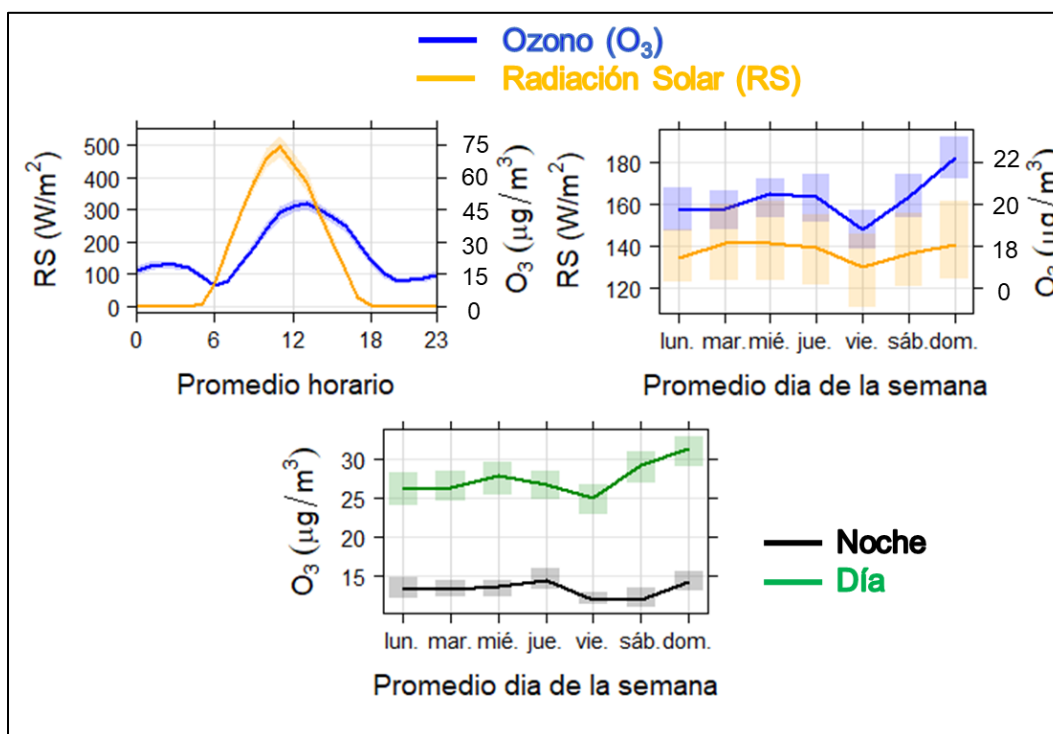


Figura 21. Variación promedio horaria y semanal de O_3 y radiación solar. Se incluye además el comportamiento promedio semanal entre las horas diurnas y nocturnas durante el periodo de análisis

4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O₃, SO₂ y CO en el SVCA de Manizales

La Figura 22 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de CO, SO₂ y O₃. 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 tanto en O₃, SO₂ y CO se utiliza la metodología propuesta por la resolución 2254 de 2017 (capítulo IV artículo 18 al 21) del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS 2017). Se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena durante todo el periodo analizado para los contaminantes mencionados.

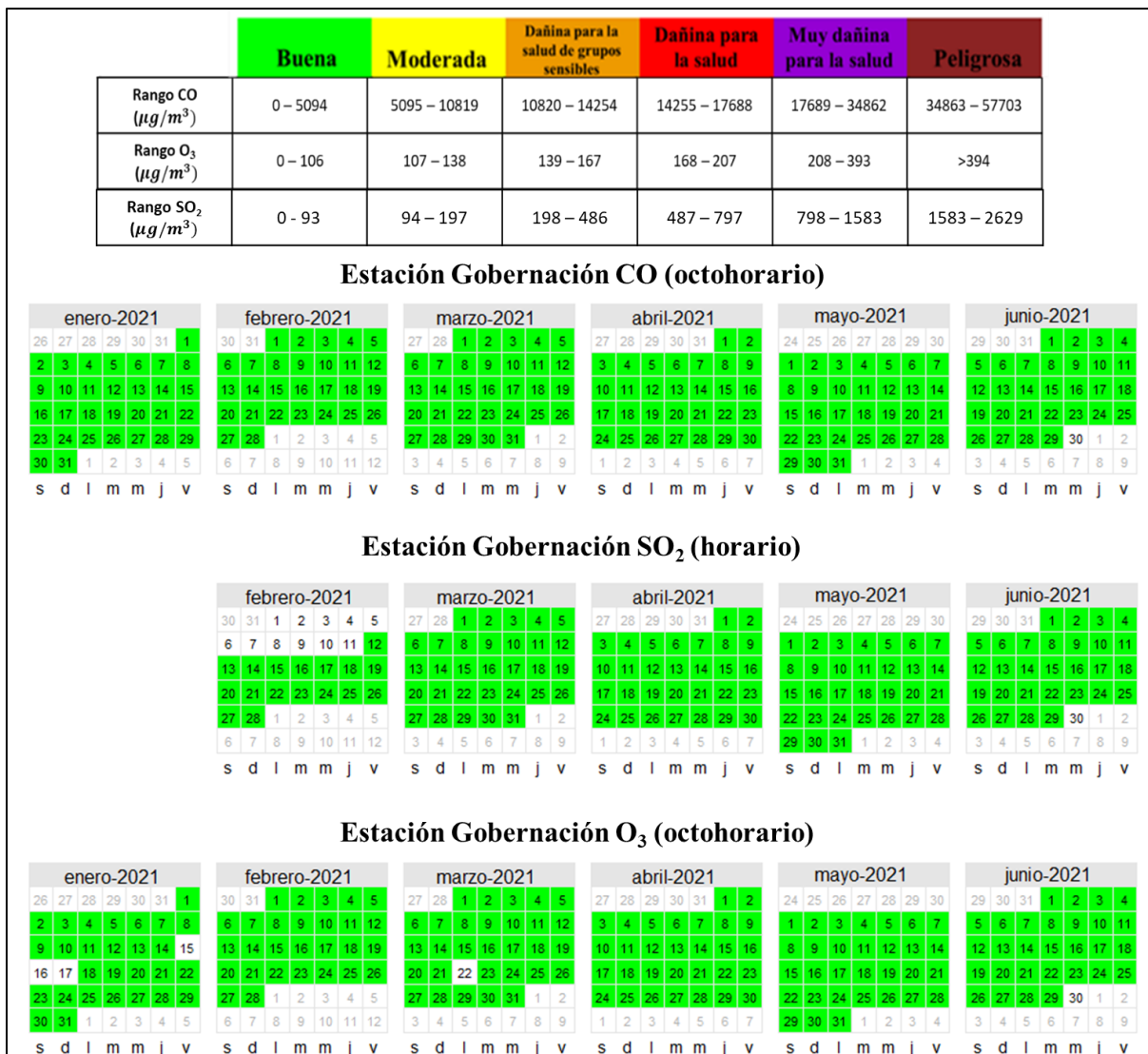


Figura 22. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, SO₂ y O₃ en Manizales durante el periodo de análisis.

Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS

5.1. Equipos manuales: Análisis comparativo de promedios entre PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la estación Gobernación

Actualmente, en la estación Gobernación se encuentran juntos los equipos manuales de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$. Esto permite analizar la distribución en tamaño de las partículas inferiores a $10\ \mu\text{m}$ de diámetro. Dentro de la fracción respirable, se consideran partículas gruesas aquellas con un diámetro aerodinámico entre 2.5 y $10\ \mu\text{m}$; las partículas finas tienen diámetro menor que $2.5\ \mu\text{m}$. Es importante destacar que el $PM_{2.5}$ es una parte del PM_{10} . La Figura 23 presenta la relación entre las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ obtenidas en la estación Gobernación para el periodo de análisis. Se identifica que en todos los casos, la concentración de $PM_{2.5}$ es menor que la de PM_{10} , resultado coherente y que coincide con lo descrito anteriormente.

Se identificó que en la mayoría de los casos la concentración de $PM_{2.5}$ (partículas finas) representa más de la mitad de la concentración de PM_{10} , con una contribución promedio del 70%, por lo tanto, el porcentaje restante se refiere a la fracción de partículas con un diámetro entre $10\ \mu\text{m}$ y $2.5\ \mu\text{m}$ (fracción gruesa). Estos resultados son un indicativo de que ambos contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$ pueden estar relacionados con el mismo tipo de fuente de emisión y la generación de $PM_{2.5}$ no está fuertemente influenciada por reacciones en la atmósfera que caracterizan a los contaminantes secundarios (Berkeley L. Laboratory, 2013).

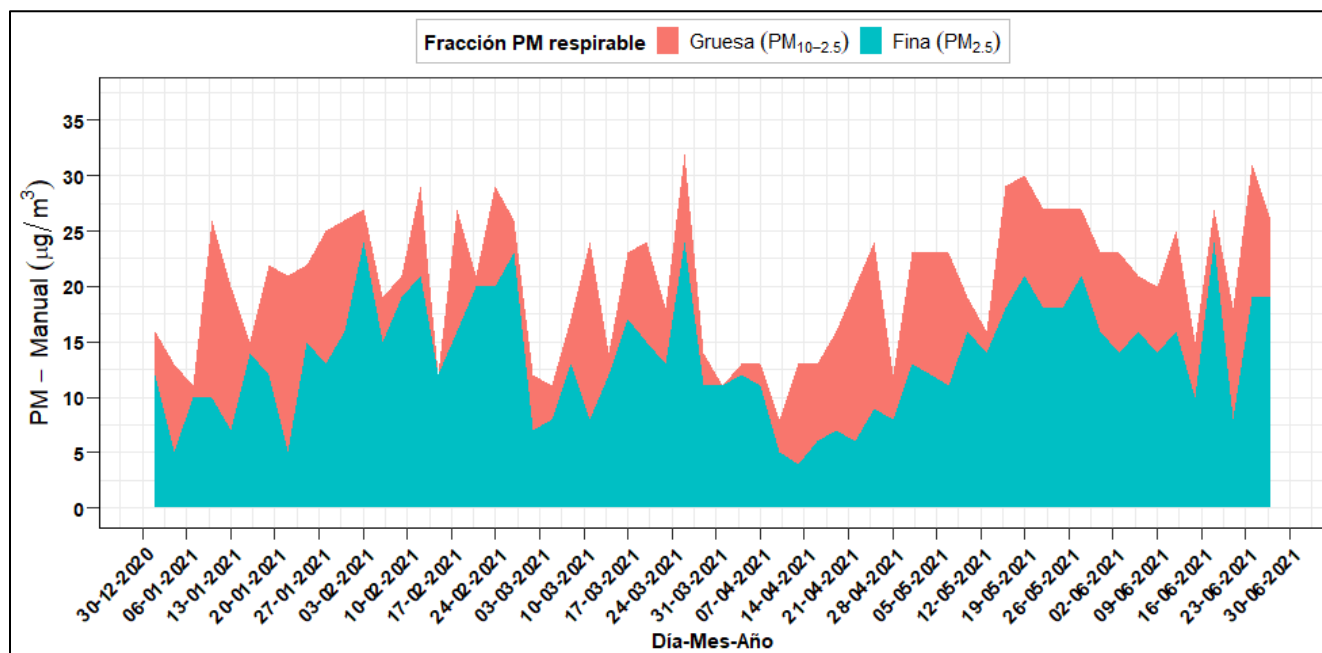


Figura 23. Relación entre el material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Manuales en la estación Gobernación durante el periodo de análisis

5.2. Relación entre los equipos automáticos: Estación Gobernación

La Figura 24 presenta la variación promedio horaria para los contaminantes SO_2 , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ - Automático y CO en la estación Gobernación para el periodo de análisis. Se observa que el SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ y CO poseen un comportamiento similar a lo largo del día, presentando picos de máxima concentración en las mismas franjas horarias características de horas de alto tráfico vehicular, comportamiento asociado directamente con las fuentes de emisión cercanas a la estación. Las fuentes móviles son las de mayor contribución de la zona, resultados que sugieren que en Manizales estos son contaminantes primarios producto de la actividad de las fuentes vehiculares.

Por su parte, el O_3 presenta un comportamiento diferente a los contaminantes anteriormente analizados, ya que las mayores concentraciones de O_3 se presentan alrededor del mediodía, horas en que se presenta la mayor radiación solar lo que favorece las reacciones de formación de O_3 . Este comportamiento inverso ha sido observado por otros autores, atribuyendo este fenómeno a la dinámicas de los contaminantes en las reacciones con los precursores del O_3 como los NO_x y COVs , ya sea de manera directa o indirecta (Sharma y colaboradores, 2017; Özbay y colaboradores, 2011).

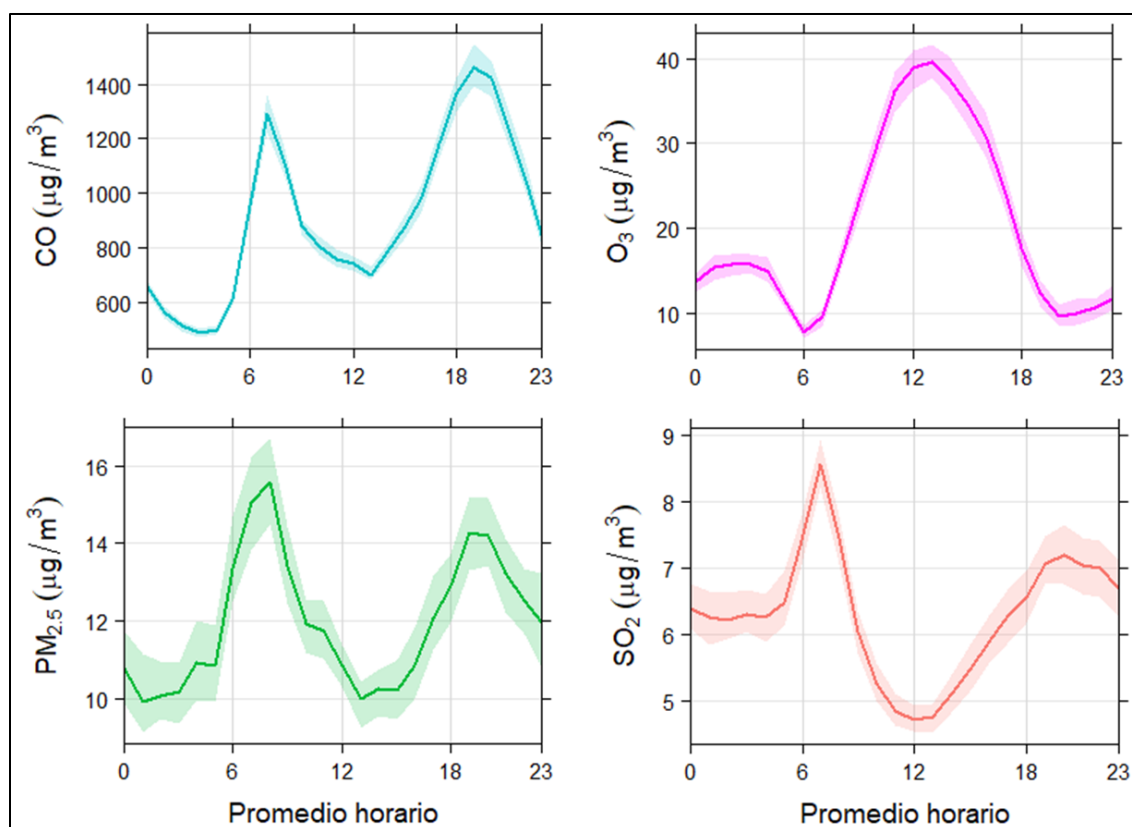


Figura 24. Comparación de perfiles promedio horarios de concentración de CO , O_3 , SO_2 y $\text{PM}_{2.5}$ - Automático en la estación Gobernación durante el periodo de análisis

5.3. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz

Durante el año 2021 se realizó además 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 emisión asociadas a ceniza volcánica y SO₂ en la atmósfera por parte de esta fuente puntual natural. La Tabla 8 presenta un resumen con algunos de los días que tuvieron alturas significativas para la columna de gases (superiores a los 1100 metros). De estos días se destaca que el 100% de los reportes presentaron predominancia de vientos hacía el occidente y/o noroccidente, ubicación de Manizales, generando una posible afectación a la calidad del aire por esta fuente en la ciudad.

El efecto de esta columna de gases fue notorio durante febrero, para algunas concentraciones de febrero, y mayo, en donde se registraron bajas humedades relativas (77.7 a 87.3%), condiciones que favorecen el transporte a meso escala de material particulado, como sucedió para los días 27 de febrero y el 19 de mayo, días que registraron concentraciones diarias de PM_{2.5} de 23 y 21 µg/m³ respectivamente, así como concentración de PM₁₀ de 26 y 30 µg/m³ respectivamente.

De manera alternativa, la Figura 25 presenta un ejemplo de imagen satelital tomada por el proyecto "Sentinel 5P/TROPOMI" de la European Space Agency (ESA), para los días 06 de marzo y 15 de junio, donde se observa el comportamiento de la pluma del volcán y las altas concentraciones para la columna atmosférica de SO₂ con valores alrededor de las 2 unidades Dobson.

Tabla 8. Resumen de emisiones volcánicas significativas (Altura de la columna de gases superiores a los 1100 m), posible afectación en concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ – Manual Gobernación (SGC, 2021).

Fecha (dd-mm)	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento	Concentración promedio de PM _{2.5} (µg/m ³) – Dia posterior de monitoreo (dd/mm)	Concentración promedio de PM ₁₀ (µg/m ³) – Dia posterior de monitoreo (dd/mm)
3-ene	1256	Noroccidente	5 – 04/01	13 – 04/01
7-ene	1108	Occidente - Noroccidente	10 – 07/01	11 – 07/01
30-ene	1520	Noroccidente - Suroccidente	16 – 31/01	NA
7-feb	1149	Noroccidente - Occidente	19 – 09/02	21 – 09/02
26-feb	1154	Noroccidente - Suroccidente	23 – 27/02	26 – 27/02
6-mar	1328	Occidente	13 – 08/03	17 – 08/03
14-mar	1217	Occidente - Suroccidente	12 – 14/03	14 – 14/03

Fecha (dd-mm)	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento	Concentración promedio de PM _{2.5} (µg/m ³) – Dia posterior de monitoreo (dd/mm)	Concentración promedio de PM ₁₀ (µg/m ³) – Dia posterior de monitoreo (dd/mm)
20-mar	2140	Occidente - Suroccidente	15 – 20/03	24 – 20/03
29-mar	2572	Occidente - Suroccidente	11 – 29/03	14 – 29/03
11-abr	2118	Occidente - Noroccidente	4 – 11/04	8 – 11/04
19-abr	1400	Occidente - Noroccidente	7 – 19/04	16 – 19/04
20-abr	2150	Occidente - Noroccidente	6 – 22/04	NA
1-may	1460	Occidente - Noroccidente	13 – 1/05	23 – 1/05
9-may	1290	Noroccidente - Suroriente	16 – 10/05	19 – 10/05
19-may	1128	Occidente - Noroccidente	21 – 19/05	30 – 19/05
31-may	2700	Occidente - Noroccidente	16 – 31/05	23 – 31/05

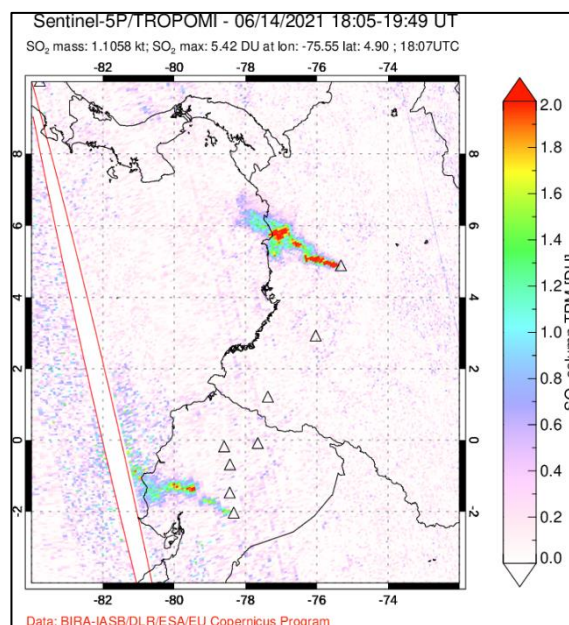
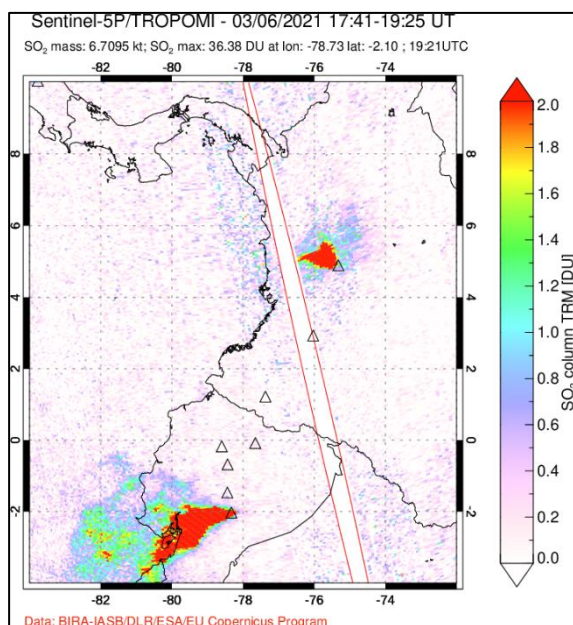


Figura 25. Ejemplo: Comportamiento de columna de SO₂ registradas por el satélite TROPOMI. (a) 06-Mar-2021 (b) 14 – Jun -2021

5.4. Imágenes satelitales: TROPOMI – Sentinel 5P

De manera similar a los registros de emisiones volcánicas provenientes de imágenes satelitales del dispositivo TROPOMI de la European Space Agency (ESA), se ha explorado la alternativa de visualización de contaminantes criterio mediante el uso de imágenes satelitales. Esta alternativa permite visualizar el panorama sobre el comportamiento de los contaminantes para grandes áreas de interés. El satélite utilizado es nuevamente TROPOMI cuyas imágenes son descargadas del repositorio de la NASA en línea "*disc.gsfc.nasa.gov*". Resalta que la información presentada en esta sección sirve como complemento a las mediciones en superficie realizadas al interior de la ciudad de Manizales que se presentaron previamente en el boletín, ya que permiten explorar el comportamiento de los diferentes contaminantes en una mayor área geográfica.

La Figura 26 presenta el comportamiento de la columna atmosférica de CO para el periodo de análisis. Se puede observar concentraciones más altas durante enero, febrero y abril con concentraciones promedio de 1880, 1887 y 2061 Pmolec/cm². Mientras que los meses de Marzo, mayo y junio presentan niveles más bajos de CO, con valores medios de columna de alrededor de 1750 Pmolec/cm². Al comprar con los datos de superficie sección 4.1 se observa un comportamiento inverso, siendo el segundo trimestre el que reportó valores más elevados.

De manera similar la Figura 27 muestra el comportamiento de la columna atmosférica de NO₂. En esta es posible apreciar que a en lo transcurrido del año han primado fuertes concentraciones de NO₂ en la zona norte del país y en el departamento de Cundinamarca. Durante el mes de Febrero de este año también se hicieron presentes focos de NO₂ en los departamentos de Caquetá, Guaviare y Meta, posiblemente asociados a quema de biomasa o incendios. El valor medio de columna de NO₂ ha sido relativamente constante durante el primer semestre de 2021, variando entre 2.0 y 2.3 Pmolec/cm².

La Figura 28 presenta la variación de la columna de O₃, en esta se puede apreciar que enero y febrero presentaron los menores registros. Por el contrario, el mes más crítico de 2021, hasta la fecha, es abril. Al comprar con los registros en superficie, sección 4.3, el comportamiento es similar y concuerda con los datos obtenidos, presentándose el mayor registro mensual en abril con un valor promedio en superficie de 31.6 µg/m³.

Finalmente, la Figura 29 presenta las variaciones de la columna atmosférica de SO₂. Esta imagen permite identificar que a lo largo del año los mayores registros de SO₂ se concentran sobre el departamento de Caldas. Por otro lado, durante el mes de abril se observa una alta columna atmosférica sobre el ya mencionado departamento de Caldas, pero también sobre departamentos vecinos. Este comportamiento puede deberse a un incremento de la actividad volcánica durante dicho mes, y al posterior arrastre de las emisiones volcánicas a otras regiones producto de las corrientes de viento.

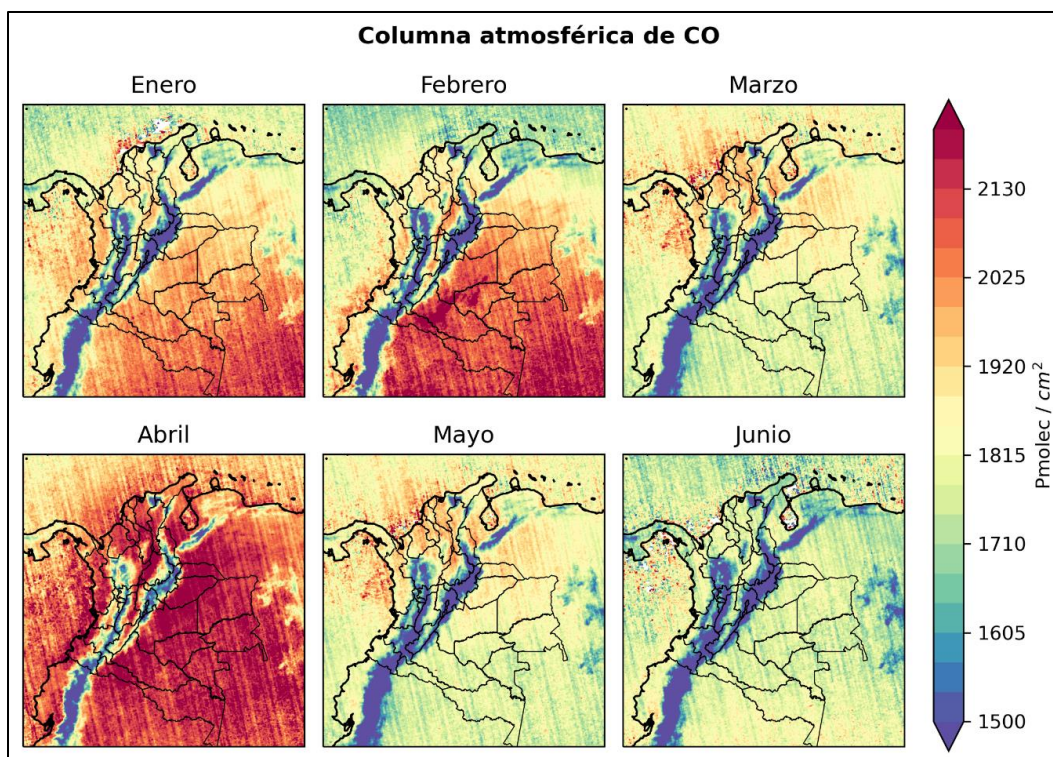


Figura 26. Columna atmosférica de CO promedio mensual entre enero y junio de 2021. Satelite TROPOMI – Sentinel 5P

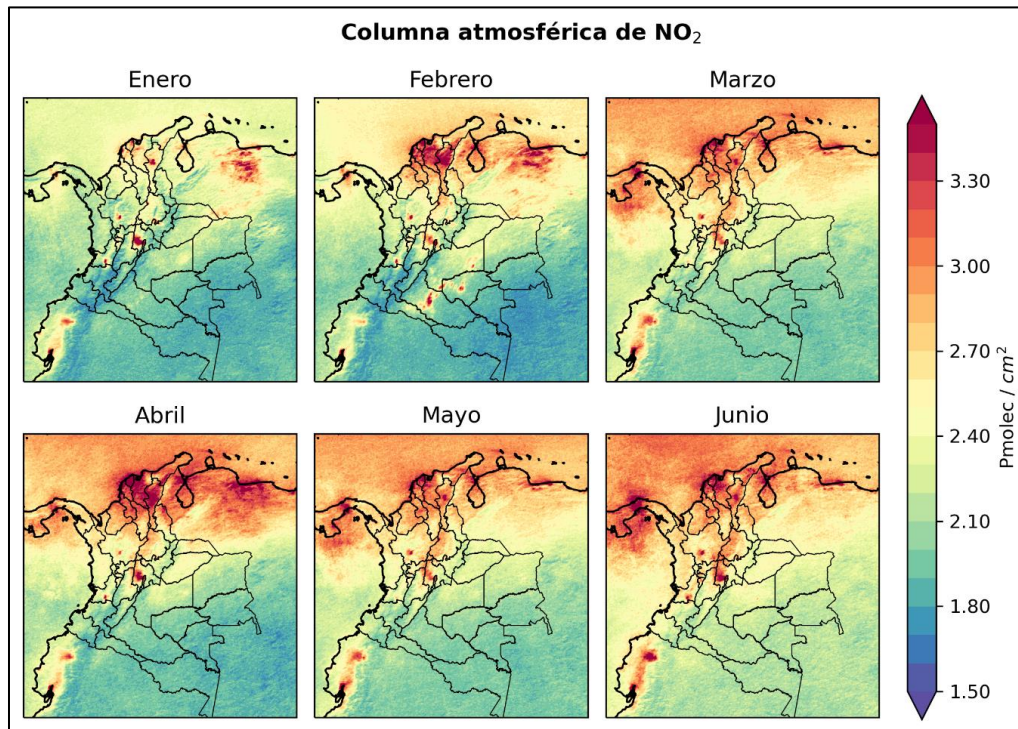


Figura 27. Columna atmosférica de NO₂ promedio mensual entre enero y junio de 2021. Satelite TROPOMI – Sentinel 5P

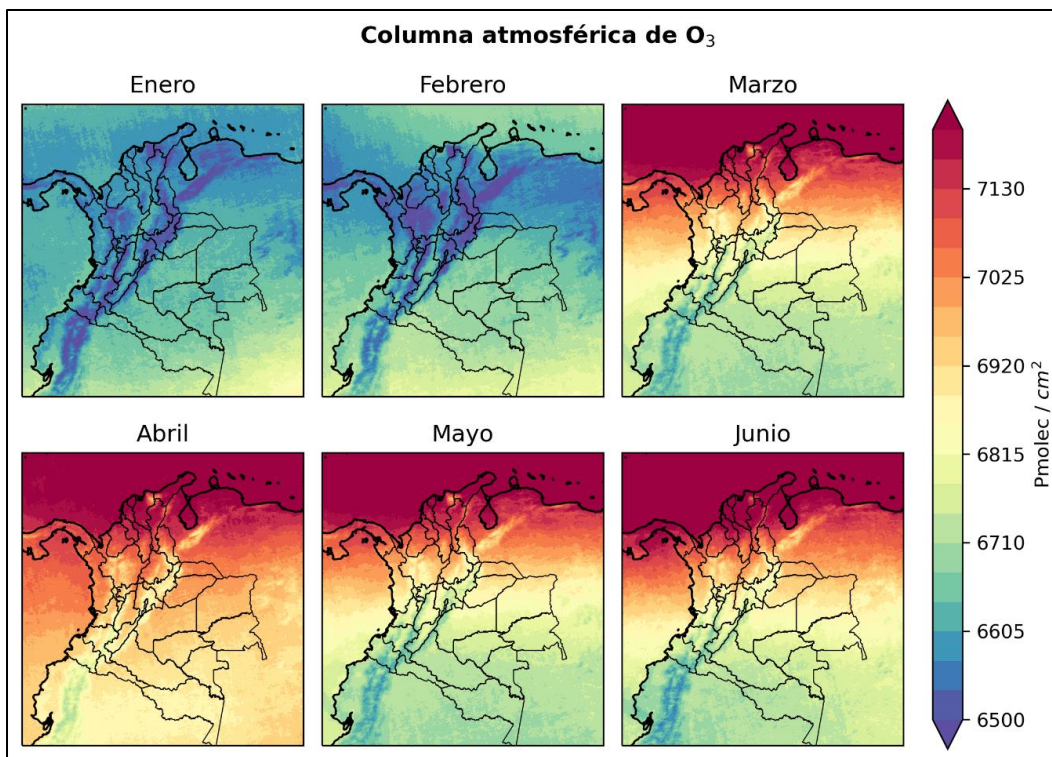


Figura 28. Columna atmosférica de O₃ promedio mensual entre enero y junio de 2021. Satelite TROPOMI – Sentinel 5P

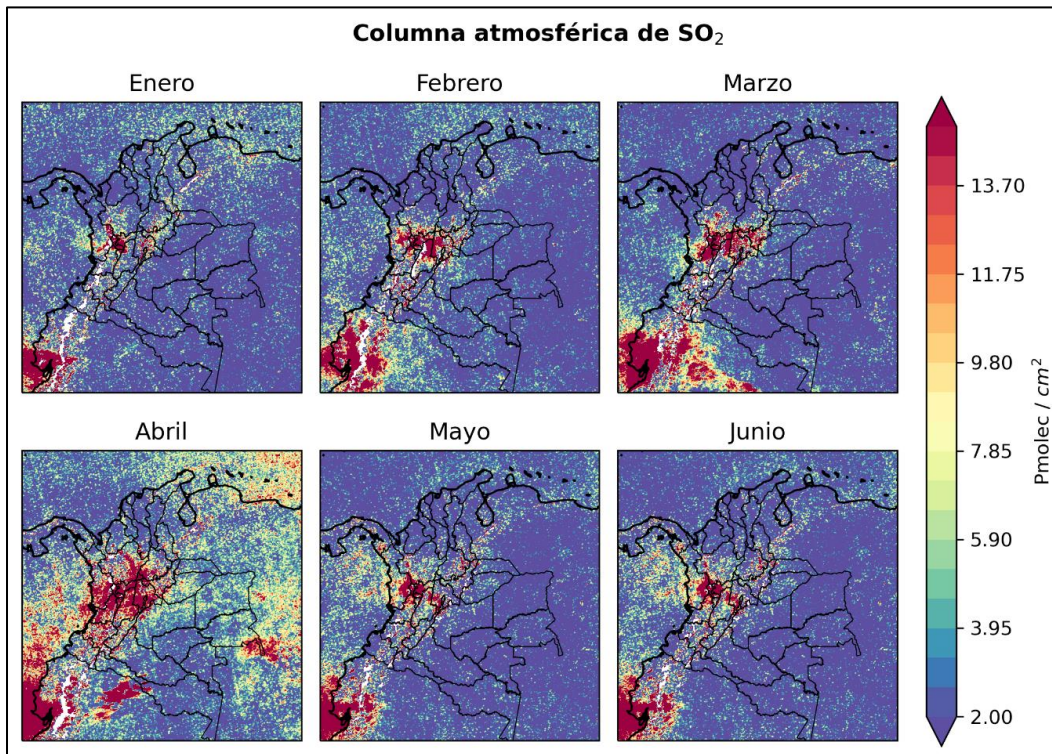


Figura 29. Columna atmosférica de SO₂ promedio mensual entre enero y junio de 2021. Satelite TROPOMI – Sentinel 5P

6. REFERENCIAS

- Berkeley L. Laboratory, 2013. Improving the understanding of PM_{2.5} and ozone chemistry from air quality monitoring for more accurate prediction of power generation impacts. California Energy Commission. California. USA.
- 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.
- Cortés, Johana, y otros. 2015. Análisis de datos de calidad del aire en la ciudad de Manizales utilizando Matlab y Operair. [aut. libro] Beatriz Aristizabal, y otros. *Entendimiento de fenómenos ambientales mediante análisis de datos*. Manizales : Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, 2015, págs. 73 - 108.
- 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>.
- González, C.M., Gómez, C.D., Rojas, N.Y., Acevedo, H., Aristizábal, B.H., 2017. Relative impact of on-road vehicular and point-source industrial emissions of air pollutants in a medium-sized Andean city. *Atmospheric Environment*. Vol 152, pp. 279-289. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.048>.
- 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 y Desarrollo Sostenible (MADS), 2013. 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.
- Nasa, 2018. Global sulfur dioxide monitoring home page. Fuente en línea: [consultado el 02/03/2019]. *Imágenes satelitales tomada de*: <https://so2.gsfc.nasa.gov/>
- 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)
- Our World in Data, "Indoor Air Pollution" Hannah Ritchie and Max Roser, 11 2019. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/indoor-air-pollution>. [Último acceso: 23/10/2020].
- Özbay B., Keskin G., Dogruparmak S., Ayberk S., 2011. Multivariable methods for ground-level ozone modeling. *Atmospheric Research*. Vol 105, pp 57-65. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.06.005
- Servicio geológico colombiano (SGC), 2019. Boletín semanal de actividad del volcán Nevado del Ruiz. Manizales, Caldas. Dirección de geoamenazas.
- Shama A., Mandal T., Shama S., Shukla D., Singh S., 2017. Relationships of surface ozone with its precursors, particulate matter and meteorology over Dheli. *Atmospheric Chemistry*. 74, pp. 451-474. DOI: 10.1007/s10874-016-9351-7
- 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, 2019. 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>
- Zapata C., Gálvez A., González C., Aristizábal B., Velasco M., 2019. Boletín de calidad del aire en Manizales periodo Enero – marzo 2019, [Fuente en línea]. Disponible en: <http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/543/Informe%20SVCA%20enero-marzo%202019.pdf>