

SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES 2020

*Angel David Gálvez Serna, *Felipe Cifuentes
Castaño, *Carlos Mario González Duque,
*Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga,
**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 diciembre de 2020. En el mismo sentido, se presentan análisis comparativos para los datos registrados durante las diferentes dinámicas de movilidad asociadas a confinamiento por COVID-19. 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 muestran las gráficas resumen obtenidas y tablas de estadísticos (promedio, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo y percentil 95). Finalmente, se presentan los resultados obtenidos para los índices de calidad del aire (ICA) y otros análisis complementarios como espacialización de la información y registros de calidad del aire por imágenes satelitales de emisiones volcánicas y algunos contaminantes.

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}	10
3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales	10
3.2. Equipos manuales: Comparación con la norma anual	15
3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y comparación con eventos relacionados a días de confinamiento	17
3.4. Índice de calidad del aire (ICA) para PM ₁₀ y PM _{2.5} en el SVCA de Manizales	23
4. RESULTADOS DE MONITOREO PARA GASES	28
4.1. Monitoreo de monóxido de carbono (CO)	28
4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO ₂)	32
4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O ₃)	35
4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O ₃ , SO ₂ y CO en el SVCA de Manizales	40
5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS.....	41
5.1. Equipos manuales: Análisis comparativo de promedios entre PM ₁₀ y PM _{2.5} en la estación Gobernación.....	41
5.2. Relación entre los equipos automáticos: Estación Gobernación	42
5.3. Emisiones volcánicas.....	43
5.4. Imágenes satelitales	45
5.5. Espacialización de datos anuales para PM ₁₀ en Manizales durante el año 2020.....	50
5.6. Comparativo de concentraciones de CO, O ₃ , PM ₁₀ y PM _{2.5} – Automático con respecto a la línea base	51
6. REFERENCIAS	55

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 la hipertensión, fumar 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 en sistemas de vigilancia son: (1) Partículas suspendidas totales (PST), (2) Partículas con diámetro menor o igual a 10 micrómetros (PM₁₀) y (3) Partículas con diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) o fracción fina respirable. Además, contaminantes gaseosos como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y ozono troposférico (O₃) 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 2020 en la ciudad de Manizales se contó con un SVCA conformado por ocho (8) equipos para el monitoreo de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}: Cinco (5) equipos manuales de PM₁₀, un (1) equipo manual de PM_{2.5} y dos (2) equipos automáticos (nefelómetros) que miden simultáneamente PM₁₀ y PM_{2.5}. Además, el SVCA de Manizales contó con una (1) estación automática para el monitoreo de los gases ozono troposférico (O₃), dióxido de azufre (SO₂) y monóxido de carbono (CO).

El seguimiento de PM₁₀ 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, los equipos automáticos de PM₁₀ y PM_{2.5}, así como el seguimiento de gases (O₃, SO₂ y CO) permiten la obtención de registros cinco minútales, 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, su posible área de influencia y su relación con algunos puntos de interés ambiental, así como la clasificación del suelo de acuerdo con el plan de ordenamiento territorial (POT) del 2018 de la ciudad.

A lo largo del año 2020, se presentaron cambios en las dinámicas de la ciudad debido a la pandemia del COVID-19. Los equipos automáticos operaron con relativa normalidad durante las temporadas de confinamiento, mientras que los equipos manuales presentaron alteraciones en su funcionamiento debido a las restricciones de las actividades y de movilidad en la ciudad. Durante el año 2020 se presentó una normalidad económica aproximadamente hasta el viernes 20 de marzo, día en que se decretó una orden de cuarentena obligatoria en la ciudad, en donde se restringió la libre movilidad de los ciudadanos durante todo el mes con algunas excepciones contempladas, como la circulación de algunos vehículos de carga, un porcentaje del transporte público y vehículos particulares que aplicaron a personal de salud, distribución de bienes básicos, prestación de servicios básicos, entre otros. Esta medida continuó sin modificaciones hasta el mes de abril.

A partir del 27 de abril se dio paso a la primera reapertura económica de la ciudad, donde se flexibilizaron las medidas de confinamiento y se aplicaron medidas como el pico y cédula para ciudadanos. Esta medida fue nuevamente flexibilizada a partir del 11 de mayo, donde se hace una segunda reapertura a más sectores económicos, generando un aumento paulatino en el flujo de ciudadanos y medios de transporte motorizados en las vías de la ciudad. A partir del 01 de junio se dio paso a una nueva etapa de cuarentena, llamada aislamiento inteligente, en donde se realizó la reapertura a la mayoría de las actividades económicas y hubo una mayor flexibilización en la movilidad. Para el 01 de julio las medidas de pico y cédula fueron flexibilizadas nuevamente y la ciudad se encontró en una etapa de "nueva normalidad", en donde las actividades económicas fueron permitidas manteniendo todas las medidas de bioseguridad para afrontar la pandemia. Entre estas medidas destaca que los aforos de establecimientos fueron reducidos de acuerdo con el espacio disponible para evitar aglomeraciones.

Finalmente, se destaca que durante el mes de abril en casi toda la zona centro de la ciudad, aproximadamente entre las calles 19 a 24 y carreras 23 a 22, se presentó además un acceso restringido en estas vías y por ende existió una ausencia casi total de los medios de transporte motorizados como vehículos particulares, camiones y buses del transporte público. Esta medida afecta directamente el perímetro de la estación Gobernación, ubicada en la esquina de la carrera 21 con calle 23. Esta restricción sería paulatinamente flexibilizada hasta su eliminación total para el periodo de "nueva normalidad".

En este boletín se presenta una recopilación de los resultados de las mediciones de calidad del aire en la ciudad de Manizales para el año 2020 considerando la información anterior

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

Estación	Características y fuentes de contaminantes*	Equipos	Propietario	Año Instalación	Año de óptima operación – histórico	Estado actual	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación	CU, SC – MTV, PAI	PM ₁₀ – Manual ^a	Corpocaldas	2009	2009	Retoma actividades desde el 19 de mayo.	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2155
		PM _{2.5} - Manual ^a	Corpocaldas	2009	2009	Retoma actividades desde el 19 de mayo.		
		SO ₂ - Automático	UN	2014	Desde el 2019 – problemas de estabilización previos.	Detenido por fallas desde el 01 de agosto.		
		O ₃ - Automático	UN	2014	Salió de operación durante los años 2016-2017 por fallas.	Operación óptima.		
		CO - Automático	Corpocaldas	2014	2018 – Múltiples fallas durante sus primeros años.	Operación óptima.		
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b	Corpocaldas	2019	2019	Operación óptima.		
Palogrande	ZC, SR – ATV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^c	UN	2009	2009	Con datos intermitentes desde el 20 de marzo tras cuarentena.	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
Nubia	ZSE, SR – BTV, AZI	PM ₁₀ - Manual ^c	UN	2009	2017 – En el SVCA	Con datos intermitentes desde el 20 de mayo tras cuarentena.	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo	CU, SC – ATV, PAI	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas	2000	2010 – En el SVCA	Retoma actividades desde el 20 de mayo.	N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58"	2156
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b	Corpocaldas	2019	2019	Operación óptima.		
Milán	ZC, SR – MAI, MTV	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas	2012	2012	Retoma actividades desde el 20 de mayo.	N 5° 2' 48.5" W 75° 28' 48.68"	2188

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

SC: Sector comercial

ZC: Zona central

ZSE: Zona sureste

ZI: Zona industrial

*Fuentes de contaminación:

ATV: Alto tráfico vehicular

AAI: Alta actividad industrial

AZI: Adyacente a zona industrial

MTV: Moderado tráfico vehicular

MAI: Moderada actividad industrial

SAI: Sin actividad industrial.

BTV: Bajo tráfico vehicular

PAI: Pequeña actividad industrial

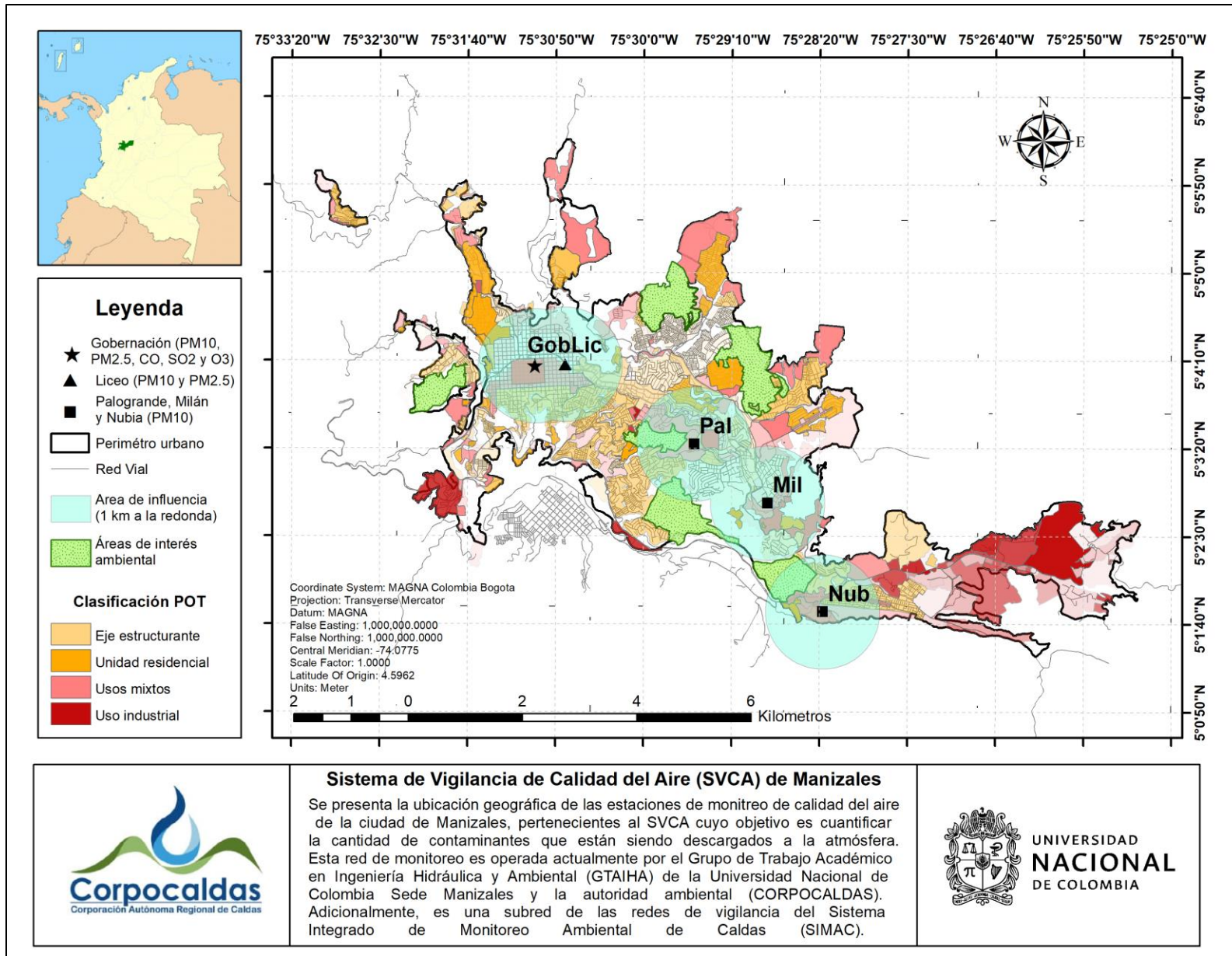


Figura 1. Mapa de Manizales con ubicación de las estaciones de calidad del aire

2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

La Tabla 2 presenta los consolidados meteorológicos de la estación Hospital de Caldas de la ciudad de Manizales para los meses de enero a diciembre del año 2020, así como los promedios consolidados para los años 2019 y 2020; con el fin de realizar un análisis comparativo con el año anterior. Esta estación es elegida como punto de referencia debido a que es una estación que ha presentado registros estables durante el periodo de análisis, además por su ubicación en el centro geográfico de Manizales y una altura de más de 10m (sobre la terraza del edificio del Hospital de Caldas). Estas características permiten considerarla como una estación de tipo mesoescala representativa para la mayoría de las variables meteorológicas. No obstante, se aclara que todas las concentraciones estimadas para las estaciones de calidad del aire del SVCA de Manizales se calculan con base en los datos de las estaciones meteorológicas más cercanas.

Durante el año 2020, se observó un patrón característico del régimen bimodal de lluvias de la ciudad, con dos periodos de bajas lluvias (diciembre a febrero y julio a septiembre) y dos periodos de altas lluvias (marzo a mayo y octubre a noviembre); registrando un total de precipitación acumulada anual de 1279 mm. Para el caso de la temperatura ambiente se registró el mayor promedio en el mes de febrero con un valor de 19.1 °C, mientras que la radiación solar presentó un mayor promedio en el mes enero con un valor de 364.9 W/m². 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 noviembre con un valor de 85.5 %, mes en el cual se obtuvo una de las mayores precipitaciones acumuladas (152.6 mm, solo superada por octubre con 159.8 mm) y la menor temperatura promedio mensual (17.1 °C).

Al comparar el año 2020 con el 2019, se presentó un incremento en la radiación solar de 28.6 W/m² (↑11%) y una reducción de 476 mm (↓27%) de la precipitación acumulada anual. De manera alternativa las Figura 2 y Figura 3 presentan el comportamiento promedio mensual de algunas variables meteorológicas de las estaciones más cercanas a las estaciones de calidad del aire. Se aprecia que el comportamiento de las variables a lo largo de la ciudad es estable. 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 vientos promedio diarias observadas a lo largo de la ciudad para el año 2020.

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 NO_x) 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, y por lo tanto, el aumento de 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 de la estación meteorológica Hospital de Caldas durante el año 2020

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]	Max. Rad. solar [W/m ²]
Enero	18.8	1.4	156.1	594.8	77.0	61.8	364.8	1164.0
Febrero	19.1	1.3	142.0	594.5	77.8	86.2	326.7	1202.0
Marzo	18.7	1.3	194.6	595.1	80.2	143.6	328.2	1306.0
Abril	18.2	1.1	138.0	595.8	84.6	151.0	258.8	1392.0
Mayo	18.7	1.1	129.4	595.5	83.5	77.6	259.3	1223.0
Junio	17.8	0.9	144.9	595.9	84.0	94.2	251.1	1199.0
Julio	17.5	0.9	197.1	595.6	84.6	74.6	253.9	1225.0
Agosto	18.0	1.0	229.2	595.4	83.4	86.8	275.0	1259.0
Septiembre	17.7	1.1	194.4	595.6	82.5	83.8	299.5	1320.0
octubre	17.4	1.0	121.8	595.5	84.7	159.8	253.6	1202.0
Noviembre	17.1	0.8	150.9	595.8	85.5	152.6	246.7	1160.0
Diciembre	17.3	0.9	201.3	595.3	84.7	107.0	240.7	1222.0
2020*	18.0	1.1	166.6	595.4	82.7	1279	279.9	1239.5
2019*	18.1	1.2	144.6	595.2	81.4	1755	251.3	1126.5

*Correspondiente al promedio entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2019 y 2020 respectivamente.

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

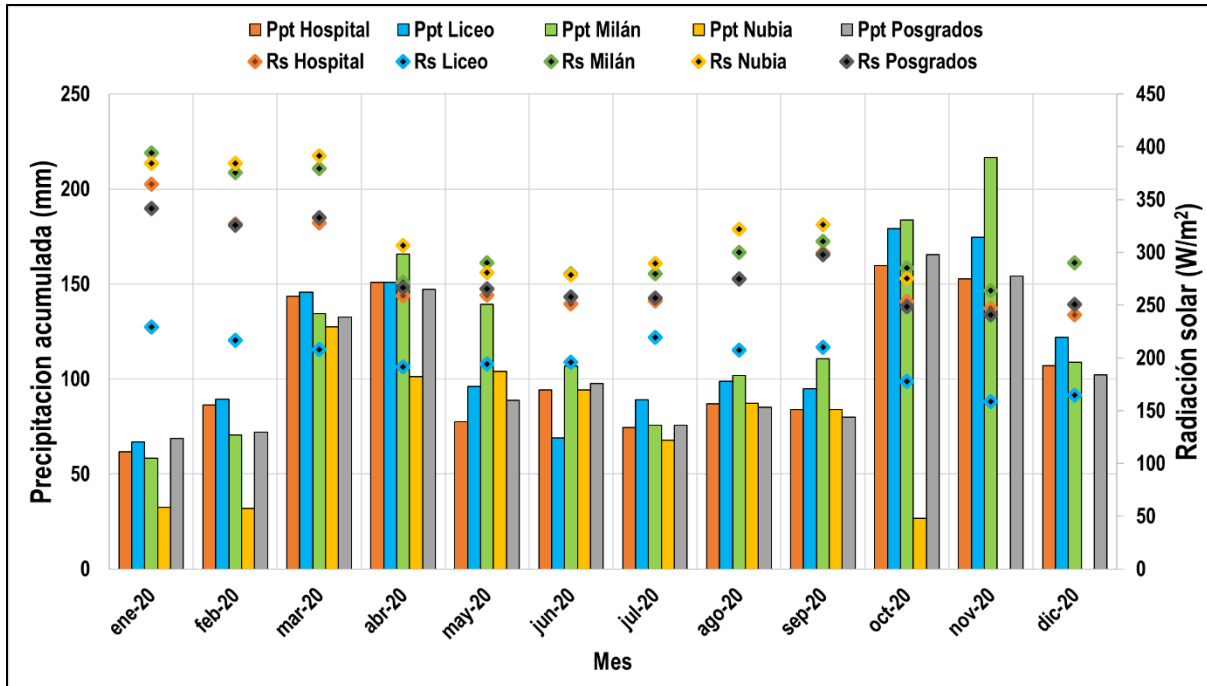


Figura 2. Promedios mensuales de precipitación y radiación solar en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el año 2020

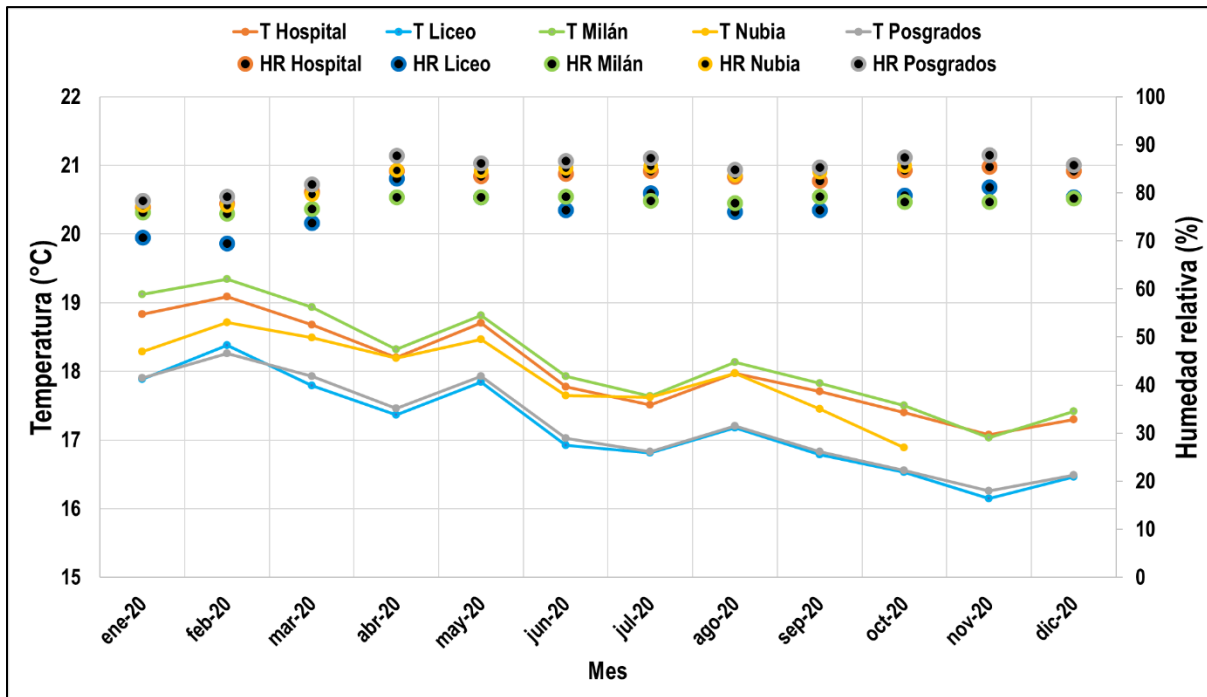


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire y humedad en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el año 2020

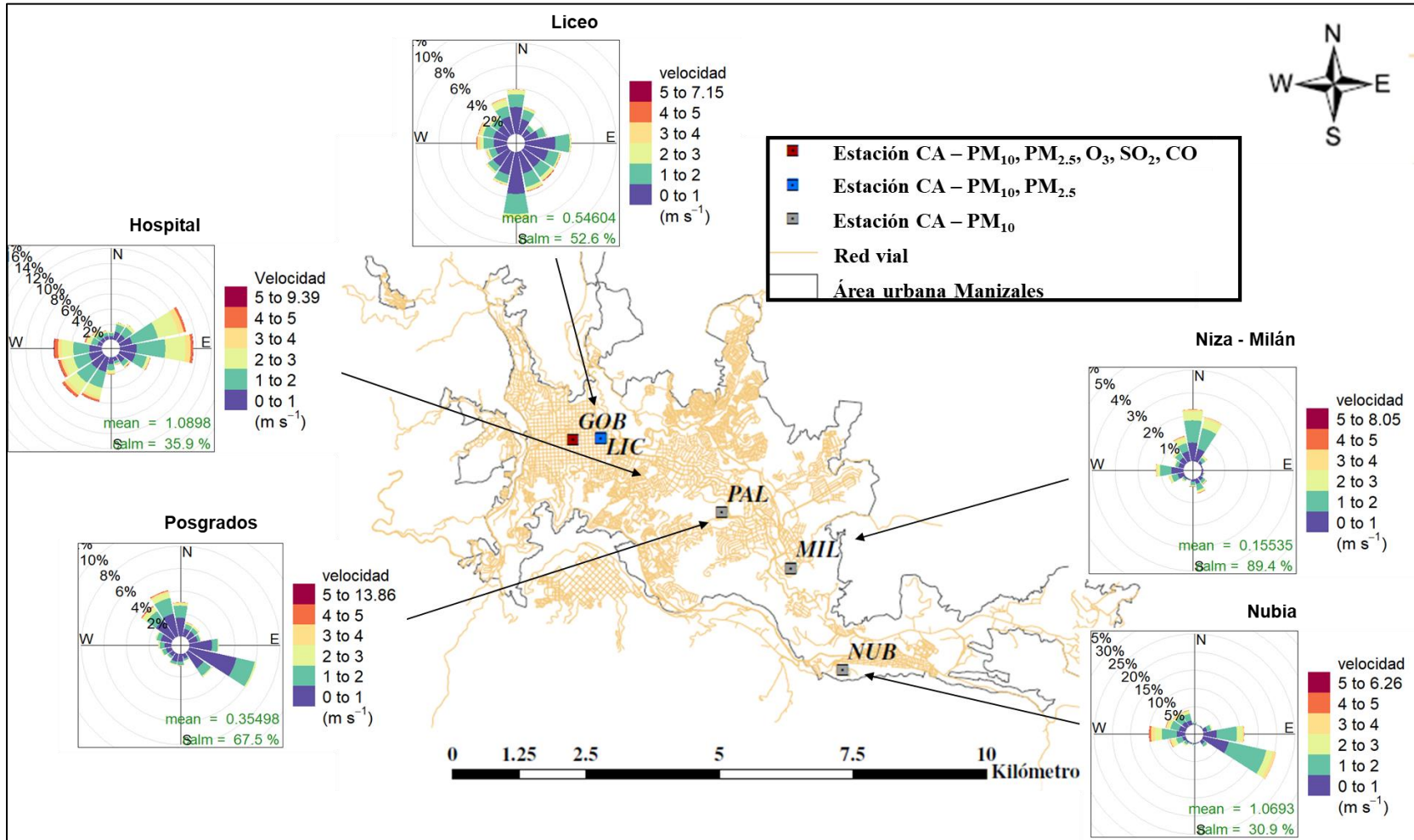


Figura 4. Rosas de vientos en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el año 2020

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

3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales

La Tabla 3 y Tabla 4 presentan los estadísticos descriptivos para las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales obtenidas durante el período de análisis (enero - diciembre de 2020). Se muestra el promedio aritmético con su respectiva incertidumbre asociada, mediana, desviación estándar, concentración mínima, concentración máxima, el percentil 95 y el número de datos obtenidos mensualmente. 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 equipos de PM – Manuales operaron con normalidad desde el 01 de enero hasta el 18 de marzo (con excepción de los equipos semiautomáticos, los cuales operaron hasta el 25 de marzo), debido a las medidas de restricción producto de la cuarentena se detuvo la medición de estos equipos hasta aproximadamente el 20 de mayo, para posteriormente retomar su funcionamiento intermitentemente; razón por la cual se presentarán algunos baches en los resultados.

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 toda la ciudad, el mismo comportamiento que se ha observado para los años 2018 y 2019. En el año 2020 la estación Milán presentó los mayores niveles de concentración de PM₁₀ con promedios mensuales aritméticos entre $21 \pm 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en agosto y $42 \pm 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en febrero; seguida por la estación Liceo con promedios mensuales aritméticos entre $17 \pm 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en mayo y $37 \pm 0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en febrero. En el año 2019 los valores más altos de PM₁₀ también los presentaron las estaciones Milán y Liceo con promedios mensuales máximos de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivamente, ambas concentraciones máximas obtenidas en el mes de marzo. Finalmente, de todos los meses del año, mayo correspondió al mes en el que las concentraciones del año 2020 comparadas al 2019 se redujeron en mayor proporción, con un 23% para Milán y 39% para Liceo, valores posiblemente asociados a las estrictas restricciones de movilidad durante este mes.

La estación de Milán presentó para febrero de 2020 un aumento del 50% y 31% con respecto a los años 2018 y 2019 respectivamente, lo cual puede estar asociado a las obras de construcción en la empresa "Invermec" que contribuyeron a los niveles de concentración, por lo que se hace necesario aclarar el tipo de estación considerándose ésta como "Industrial". Las demás estaciones presentaron también un ligero aumento durante el mes de febrero con respecto a los años 2018 y 2019, por lo tanto no se descarta además el posible efecto de un fenómeno a escala regional relacionado con los incendios forestales que ocurrieron en el mes de febrero en la Orinoquía Colombo-Venezolana, el Sumapaz y la zona Caribe Colombiana, acrecentados por la temporada de bajas lluvias (86.2 mm), los cuales afectaron la calidad de aire en otras ciudades como Bogotá y Medellín durante los primeros meses del año 2020.

Para el caso de los promedios aritméticos anuales, la estación Milán registró los valores más altos de PM_{10} con un valor de $31 \mu g/m^3$ (desv. std = $9 \mu g/m^3$), seguida por las estaciones Liceo con $25 \mu g/m^3$ (desv. std = $8 \mu g/m^3$), Palogrande y Nubia con $22 \mu g/m^3$ (desv. std = 8 y $7 \mu g/m^3$ respectivamente), por último, Gobernación con $21 \mu g/m^3$ (desv. std = $7 \mu g/m^3$). Cabe resaltar que, debido a todas las dinámicas y situaciones atípicas del año 2020, todas las estaciones presentaron pérdida o ausencia de datos, obteniéndose un porcentaje de datos válidos entre 28% en Nubia y 70% en Liceo, según lo establecido por el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS, 2010), el valor aceptable para datos validos es del 75% para datos anuales y únicamente la estación Gobernación cumplió este criterio con un valor del 79% de datos válidos para el 2020.

Al analizar el período con restricciones de movilidad en la ciudad, se identificó que las estaciones Milán y Liceo, las cuales se encuentran influenciadas por tráfico vehicular (representado por un flujo importante de buses y camiones de carga), obtuvieron concentraciones mensuales promedio menores comparado con el mismo periodo de 2019 en porcentajes equivalentes al 23% en Liceo y 16% en Milán, indicando la influencia directa de las fuentes móviles en la contaminación por PM_{10} en la ciudad. De acuerdo con la actualización del inventario de emisiones de la ciudad año base 2017, los buses y camiones de carga tienen una especial importancia ya que a pesar de que su flota corresponde al 3.2% del total de vehículos de la ciudad, estos emplean diésel como combustible y son responsables de cerca del 56% (351.2 ton/año) y 24% (151.9 ton/año) del total de emisiones de PM_{10} respectivamente (Unal - Corpocaldas, 2019).

En las estaciones Nubia, Palogrande y Gobernación se observó que en general estas estaciones registraron menores concentraciones durante el año 2020; siendo además la estación Gobernación la que registró la mínima concentración del SVCA de Manizales con un valor de $6 \mu g/m^3$ correspondiente al martes 11 de agosto. Al comparar los registros del año 2019 con el 2020, se evidenció un aumento en los promedios mensuales durante los primeros tres meses del año con valores de 21% en Palogrande, 13% en Gobernación y 7% en Nubia

Finalmente, las bajas concentraciones registradas en estas estaciones también puede estar relacionadas con las bajas dinámicas de movilidad en inmediaciones de las estaciones a lo largo del año, en donde por ejemplo los campus universitarios (Nubia y Palogrande) presentaron cese de actividades presenciales total y el centro de la ciudad se vio sometido a restricciones vehiculares y reducción en el número total de vehículos debido al reemplazo de la presencialidad por el teletrabajo para los ciudadanos Manizaleños.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ – Manuales (µg/m³) durante el año 2020 en Manizales

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio	21	26	29	---****	19	21	21	13	17	22	19	19	21
Mediana	20	25	28	---	18	20	21	12	14	19	20	21	20
Incertidumbre**	1.20	1.18	1.18	---	1.15	1.15	1.19	1.19	1.16	1.17	1.16	1.34	1.19
Desviación Estándar	8	6	7	---	4	7	4	5	7	7	2	4	7
Min. – Max.	12-41	19-37	19-42	---	14-26	12-35	15-27	6-21	9-34	14-34	17-21	11-25	6-42
Percentil 95%	33	35	40	---	25	31	25	19	30	32	21	24	34
N° Datos - %DV***	10-100	8-80	9-90	---	5-50	10-100	10-100	10-100	9-90	11-100	4-40	9-90	95-79
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio	24	37	36	---	17	27	26	18	23	23	22	26	25
Mediana	25	37	35	---	17	26	26	17	22	23	22	27	24
Incertidumbre	0.01	0.01	0.01	---	---**	0.53	0.53	0.50	0.53	0.53	0.53	0.531	0.43
Desviación Estándar	3	8	7	---	2	11	5	5	4	4	4	11	8
Min. – Max.	15-34	24-49	28-44	---	15-19	11-41	15-37	12-28	19-30	19-30	16-29	7-40	7-49
Percentil 95%	33	48	43	---	19	40	33	26	29	29	28	38	41
N° Datos - %DV	10-100	9-90	4-40	---	4-40	7-70	10-100	8-80	10-100	6-60	9-90	7-70	84-70
Palogrande PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio	22	28	30	---	---	---	13	---	---	---	---	18	22
Mediana	24	28	30	---	---	---	14	---	---	---	---	17	21
Incertidumbre	0.02	0.16	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.21	0.13
Desviación Estándar	4	7	8	---	---	---	4	---	---	---	---	5	8
Min. – Max.	16-29	18-39	19-41	---	---	---	6-19	---	---	---	---	13-23	6-41
Percentil 95%	28	37	39	---	---	---	18	---	---	---	---	22	35
N° Datos - %DV	9-90	10-100	5-50	---	---	---	10-100	---	---	---	---	3-30	37-31
Milán PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio	32	42	38	---	23	38	28	21	27	30	28	32	32
Mediana	34	40	38	---	23	38	27	21	26	31	28	34	31
Incertidumbre	0.18	0.18	0.18	---	---	0.53	0.53	0.52	0.53	0.54	0.52	0.12	0.42
Desviación Estándar	7	7	7	---	10	7	4	2	4	4	11	8	9
Min. – Max.	21-37	31-53	29-49	---	16-30	28-47	22-36	18-23	23-34	22-35	11-43	15-42	11-53
Percentil 95%	37	51	47	---	29	46	34	23	33	34	41	40	47
N° Datos - %DV	5-50	10-100	5-50	---	2-20	8-80	8-80	4-40	10-100	6-60	9-90	8-80	75-63
Nubia PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedi	20	27	28	---	---	---	18	---	---	---	---	17	22
Mediana	22	28	29	---	---	---	17	---	---	---	---	19	22
Incertidumbre	0.21	0.03	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.12	0.12
Desviación Estándar	7	6	6	---	---	---	3	---	---	---	---	7	7
Min. – Max.	9-30	17-37	20-35	---	---	---	13-24	---	---	---	---	9-22	9-37
Percentil 95%	28	35	34	---	---	---	22	---	---	---	---	22	33
N° Datos - %DV	9-90	9-90	5-50	---	---	---	8-80	---	---	---	---	3-30	34-28

* 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

**** "---": indica la ausencia de datos producto de las medidas de restricción de movilidad en la ciudad

En lo referente al monitoreo de PM_{2.5} de la estación Gobernación, la Tabla 4 presenta los estadísticos descriptivos correspondientes. Se observa que esta estación registró un promedio anual de $13 \pm 1.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Se puede identificar que durante la normalidad económica (enero a marzo) las concentraciones promedio mensuales fueron superiores con respecto al periodo de restricciones y cuarentena, cuyo promedio aritmético se estabilizó alrededor de los $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Adicionalmente, de manera similar a los patrones observados en PM₁₀ el mayor promedio aritmético mensual fue registrado en febrero con un valor de $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, correspondiente a un aumento del 38% comparado con el mismo periodo del 2019; mientras el mínimo promedio aritmético mensual fue registrado en agosto con $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, un valor 60% inferior comparado con el mismo periodo del año 2019. Similarmente, al comprar los primeros tres meses (Enero – Marzo) del año 2020 con respecto al mismo periodo del 2019, se evidenció un aumento del 24% en los promedios mensuales registrados, mientras que para el último semestre (Julio – Diciembre) se observó una reducción promedio del 21% para el año 2020, valores relacionados directamente con las bajas dinámicas de movilidad en inmediaciones de la estación a lo largo del año, en especial para los periodos de restricciones.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio mensuales de PM_{2.5} – Manual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el año 2020 en Manizales

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	
Gobernación PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)							
Promedio	16	18	21	---***	13	14	
Mediana	15	17	22	---	14	15	
Incertidumbre**	1.1	1.26	1.26	---	1.13	1.13	
Desviación Estándar	3	4	3	---	5	5	
Min. – Max.	11-21	12-26	18-25	---	7-18	7-21	
Percentil 95%	20	25	25	---	18	21	
N° Datos - %DV***	10-100	10-100	6-60	---	5-50	10-100	
Estadístico	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Gobernación PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)							
Promedio	13	4	7	14	13	10	12
Mediana	13	3	7	14	13	10	13
Incertidumbre	---	1.16-	1.18	1.16	1.21	1.46	1.18
Desviación Estándar	3	2	3	5	4	5	6
Min. – Max.	8-18	2-8	2-12	7-21	5-16	3-16	2-26
Percentil 95%	17	8	8	20	16	16	22
N° Datos - %DV	8-80	10-100	10-100	8-80	9-90	10-100	96-80

* 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

**** “---”: indica la ausencia de datos producto de las medidas de restricción de movilidad en la ciudad

De manera complementaria 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).

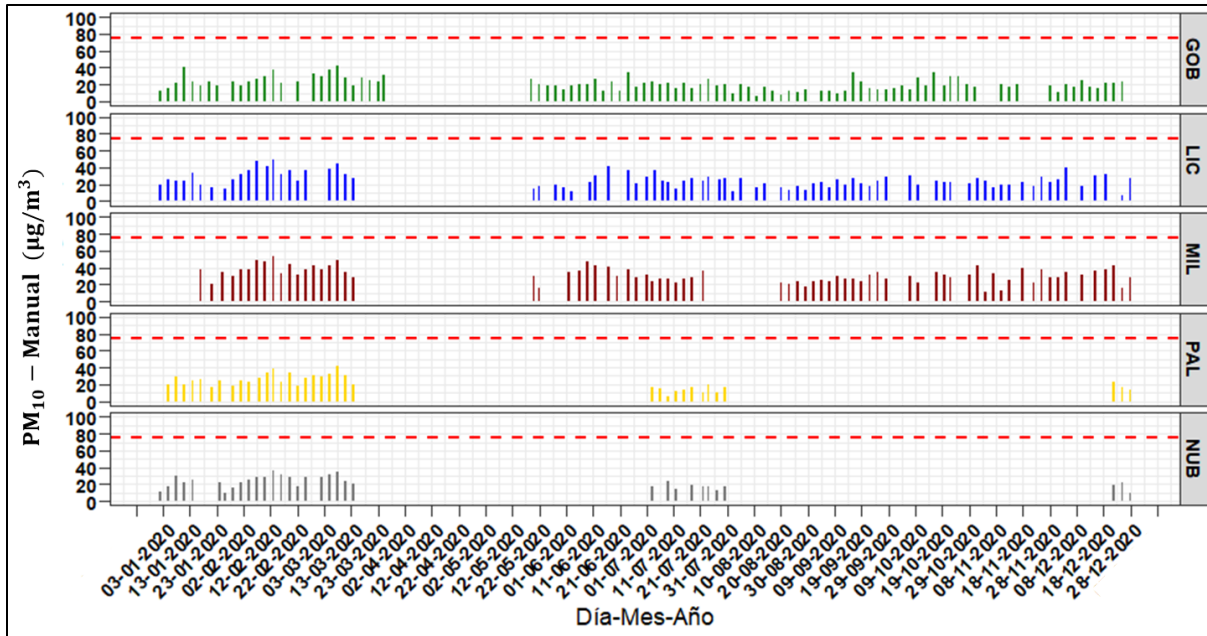


Figura 5. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM₁₀ - Manuales durante el año 2020 en el SVCA de Manizales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM₁₀ establecido en la Resolución 2254 de 2017: 75 µg/m³

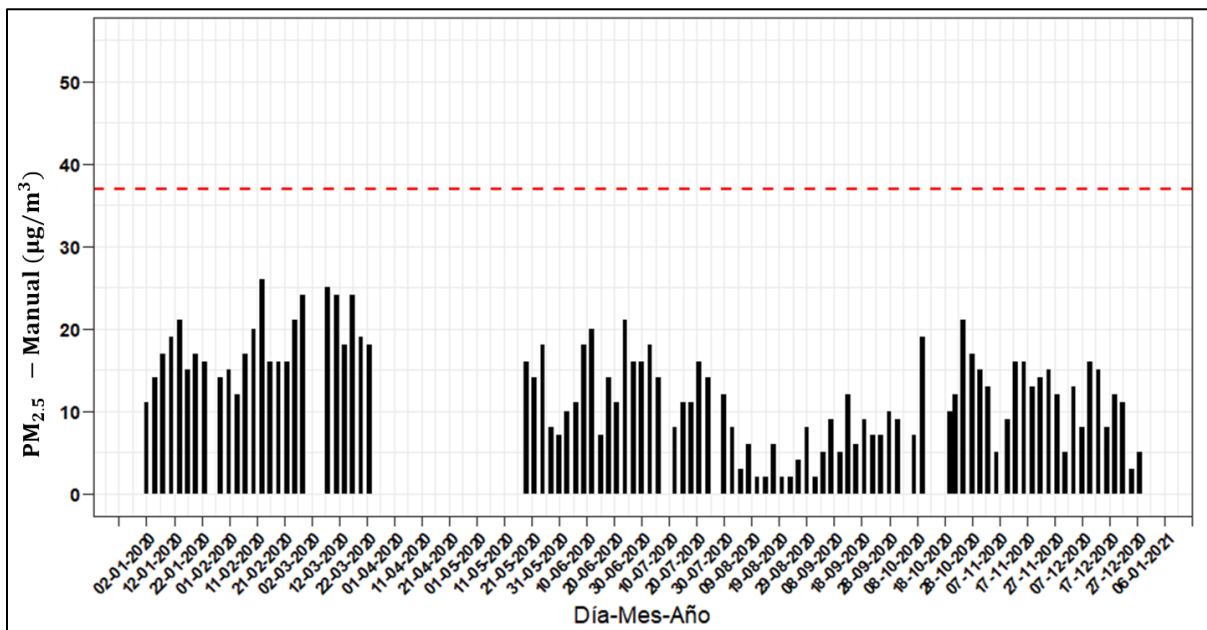


Figura 6. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{2.5} - Manual durante el año 2020 en el SVCA de Manizales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM_{2.5} establecido en la Resolución 2254 de 2017: 37 µg/m³

Finalmente, la Figura 7 presenta la variación promedio de concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ - Manuales por días de la semana en las estaciones de la ciudad. Se puede observar que las menores concentraciones se obtienen los fines de semana (específicamente los días domingo) demostrando así la influencia de las emisiones por tráfico vehicular en las cercanías de las zonas de monitoreo. Adicionalmente, se evidencia que en las estaciones Liceo, Milán y Gobernación 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, comportamiento que se asocia al efecto de un remanente de atmósfera limpia producto de la disminución de concentración obtenida durante el domingo.

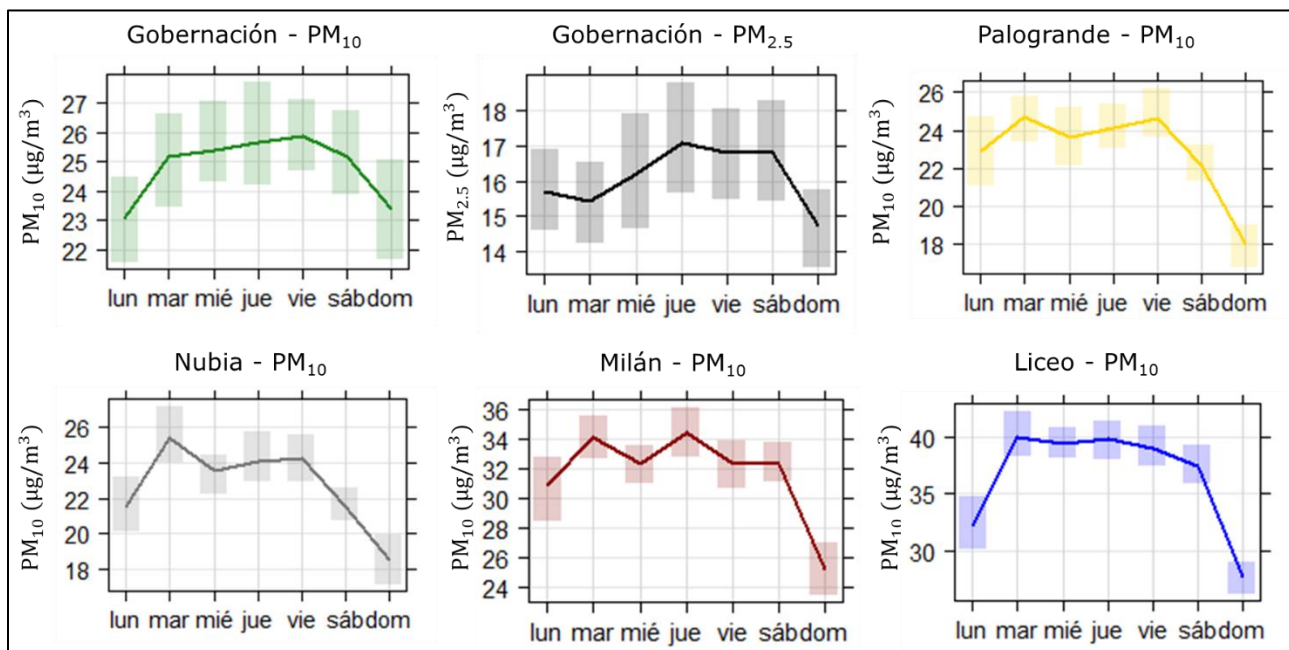


Figura 7. Variación promedio de concentraciones por días de la semana para PM_{10} y $PM_{2.5}$ - Manuales, durante el año 2020. La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

3.2. Equipos manuales: Comparación 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 2020. Lo anterior con el fin de analizar las diferencias 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, aunque cabe resaltar el poco número de datos de este año obteniéndose un porcentaje de datos válidos de 28% en Nubia, 31% en Palogrande, 63% en Milán, 70% en Liceo, 79% en Gobernación PM_{10} y 80% en Gobernación $PM_{2.5}$. Finalmente, es importante destacar que los promedios tanto PM_{10} como $PM_{2.5}$ obtenidos en todas las estaciones superan 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 $PM_{2.5}$.

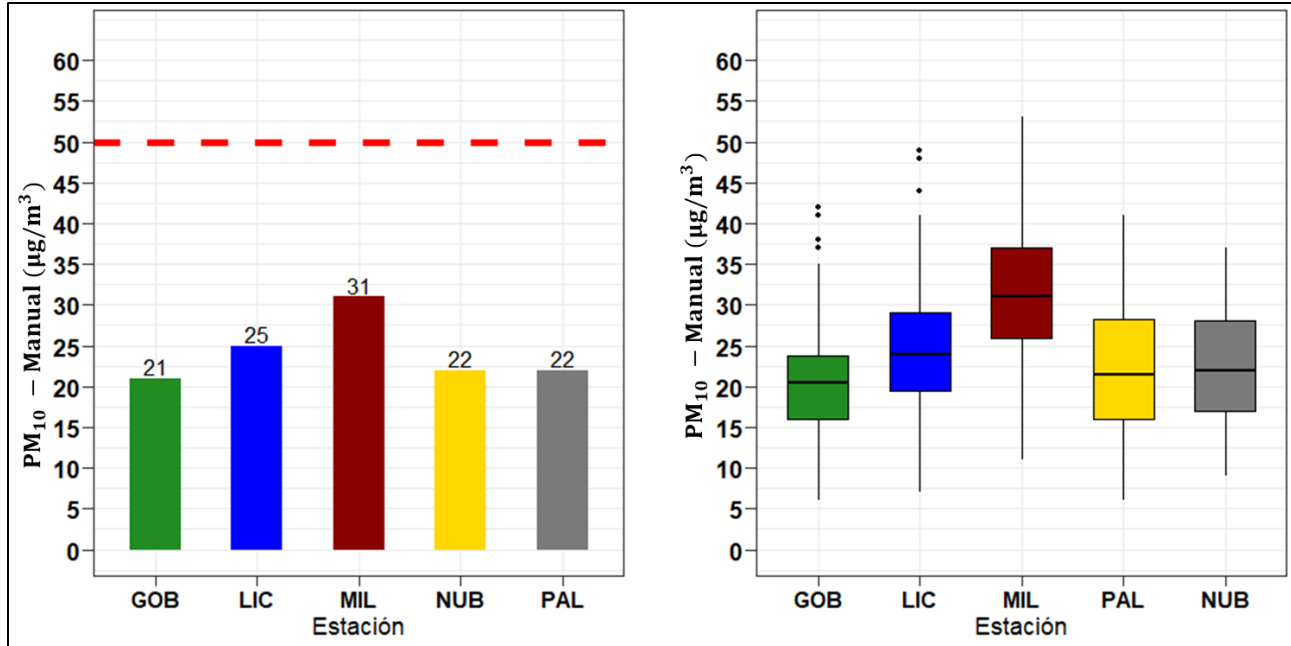


Figura 8. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de PM₁₀ - Manuales durante el año 2020. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS: 50 µg/m³

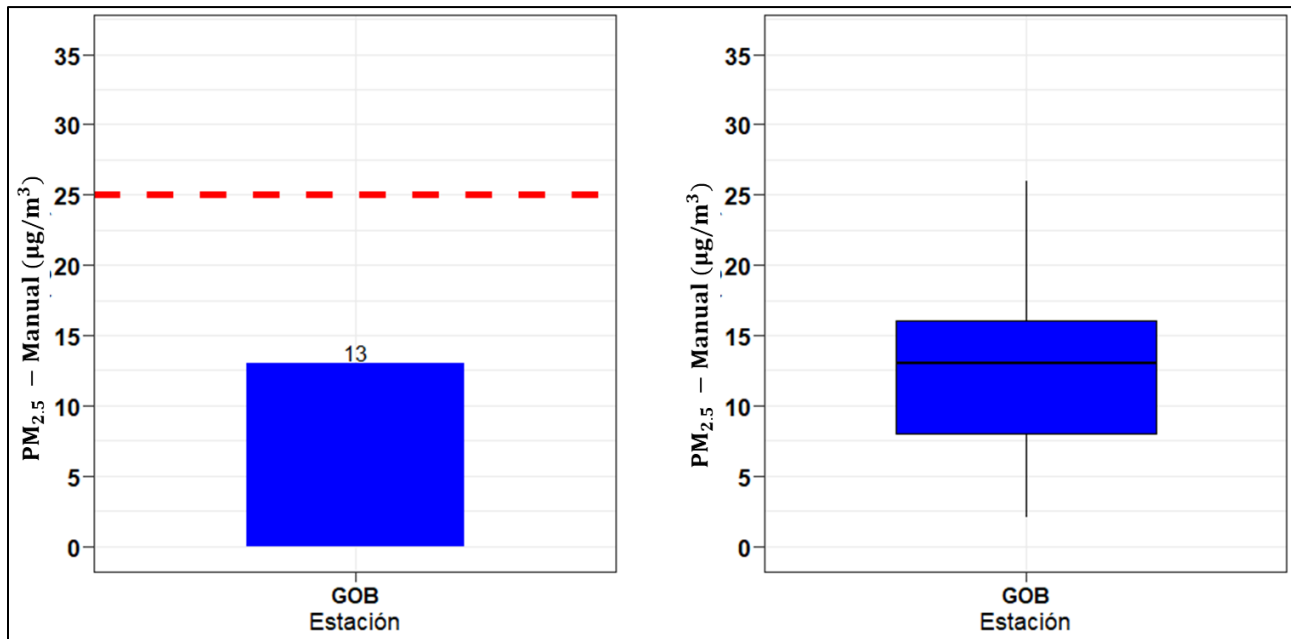


Figura 9. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de PM_{2.5} - Manual durante el año 2020. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS: 25 µg/m³

3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y comparación con eventos relacionados a días de confinamiento

Para el análisis de los equipos automáticos se tuvieron en cuenta los diferentes cambios en las dinámicas de la ciudad provocados por la pandemia del COVID-19, por lo tanto el análisis fue dividido de la siguiente manera: Etapa cero caracterizada por la normalidad del año 2020 (entre 01 de enero al 19 de marzo) en donde no hubo restricciones de ninguna clase. Primera etapa - cuarentena obligatoria (20 de marzo al 26 de abril). Segunda etapa - cuarentena con reapertura de algunos sectores económicos (27 de abril al 10 de mayo). Tercera etapa - cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos o segunda reapertura económica (11 de mayo al 31 de mayo). Cuarta etapa - cuarentena inteligente, la restricción se modificó a un aislamiento inteligente (01 de junio al 30 de junio). Por último, la quinta etapa - "nueva normalidad" en donde las actividades económicas fueron permitidas manteniendo todas las medidas de bioseguridad, caracterizada por limitar el aforo de los establecimientos.

La Tabla 5 y Tabla 6 presentan los estadísticos descriptivos comparativos de PM₁₀ y PM_{2.5} en ambas estaciones automáticas durante el período de análisis. Se observó que, durante periodos con normalidad en la movilidad, las concentraciones promedio medianas¹ de Gobernación para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 26.8 µg/m³ y 15.1 µg/m³ respectivamente. De otra parte, las concentraciones promedio medianas de Liceo para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 29.7 µg/m³ y 16.9 µg/m³ respectivamente.

En la estación Gobernación, se observa que las concentraciones promedio medianas durante las etapas de la cuarentena, presentaron una disminución entre el 33 a 46% para PM₁₀ y entre el 24 a 41% para PM_{2.5}, obteniéndose la mayor de las reducciones en las concentraciones en la cuarta etapa, la cual registro las menores concentraciones medianas del periodo de análisis con 14.4 µg/m³ para PM₁₀ y 8.9 µg/m³ para PM_{2.5}. De otra parte, para el caso de la estación Liceo se presentó un comportamiento similar observándose una reducción entre el 15 a 57% para PM₁₀ y 28 a 88% para PM_{2.5} para las diferentes etapas de cuarentena en la ciudad, siendo la quinta etapa la que registró las menores concentraciones medianas en esta estación con valores de 12.6 µg/m³ para PM₁₀ y 4.6 µg/m³ para PM_{2.5}. Pese al sesgo estadístico, se destaca que los porcentajes de disminución obtenidos a partir de la mediana estuvieron cercanos a los obtenidos con la media estadística.

Estos fenómenos de reducción en las concentraciones de ambos contaminantes y en ambas estaciones se pueden atribuir a las medidas como el pico y cédula, el cierre de las vías cercanas a las estaciones de monitoreo y la reducción en los aforos de establecimientos, indicando además el efecto de las fuentes móviles en ruta en los niveles de concentración de material particulado en la ciudad de Manizales.

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 5. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio de PM₁₀ – Automático (µg/m³) durante el año 2020 y la relación de algunos eventos de movilidad asociados al COVID-19

Estadísticos*	Normalidad Año 2020 (01 de enero al 19 de marzo)	Primera etapa: Cuarentena obligatoria (20 de marzo al 26 de abril)	Segunda etapa: Cuarentena con reapertura de algunos sectores económicos (27 de abril al 10 de mayo)	Tercera etapa: Cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)	Cuarta etapa: Cuarentena inteligente (01 de junio al 30 de junio)	Quinta etapa: "Nueva normalidad" (01 de julio al 31 de diciembre)
GOBERNACIÓN						
Promedio	27.5	18.3 ↓ 33%**	19.0 ↓ 30%	16.9 ↓ 39%	17.9 ↓ 35%	17.7 ↓ 36%
Mediana	26.8	15.7 ↓ 41%	17.9 ↓ 33%	15.9 ↓ 40%	14.4 ↓ 46%	18 ↓ 33%
Desv. Est.	8.5	10.8	2.9	3.1	9.4	5.5
Min.	10.2	4.5	15.3	11.5	9.6	4.6
Max.	47.3	43.2	23.8	22.6	43.3	34.2
Percentil 95	42.7	40.3	23.1	21.8	40.1	25.8
N° de días	78	36	14	21	26	184
LICEO						
Promedio	30.3	25.1 ↓ 17%	26.2 ↓ 13%	22.5 ↓ 26%	21.8 ↓ 28%	15.7 ↓ 48%
Mediana	29.7	20.7 ↓ 30%	25.1 ↓ 15%	21.5 ↓ 27%	18.8 ↓ 36%	12.6 ↓ 57%
Desv. Est.	9.1	15.7	3.2	3.9	11.5	8.1
Min.	10.0	6.8	21.9	14.3	9.9	4.1
Max.	49.6	61.9	31.1	29.8	63.0	41.0
Percentil 95	46.1	56.7	30.7	27.8	46.1	33.4
N° de días	75	35	14	21	31	182

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

** Porcentaje comparativo de cada etapa respecto al periodo de normalidad al inicio del año 2020.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio de PM_{2.5} – Automático (µg/m³) durante el año 2020 y la relación de algunos eventos de movilidad asociados al COVID-19

Estadísticos	Normalidad Año 2020 (01 de enero al 19 de marzo)	Primera etapa: Cuarentena obligatoria (20 de marzo al 26 de abril)	Segunda etapa: Cuarentena con reapertura de algunos sectores económicos (27 de abril al 10 de mayo)	Tercera etapa: Cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)	Cuarta etapa: Cuarentena inteligente (01 de junio al 30 de junio)	Quinta etapa: "Nueva normalidad" (01 de julio al 31 de diciembre)
GOBERNACIÓN						
Promedio*	15.7	12.1 ↓ 23%	11.5 ↓ 26%	10.3 ↓ 35%	9.6 ↓ 38%	10.6 ↓ 32%
Mediana	15.1	9.9 ↓ 34%	11.4 ↓ 24%	10.1 ↓ 33%	8.9 ↓ 41%	10.7 ↓ 29%
Desv. Est.	5.4	7.9	1.6	2.1	3.4	3.4
Min.	4.9	2.8	8.8	6.4	4.2	2.5
Max.	30.1	30.7	14.2	14.0	17.5	22.6
Percentil 95	25.2	28.1	13.5	13.6	15.7	15.9
N° de días	78	35	11	21	26	184
LICEO						
Promedio*	17.3	12.8 ↓ 26%	12.6 ↓ 27%	8.9 ↓ 48%	7.7 ↓ 55%	6.3 ↓ 63%
Mediana	16.9	10.3 ↓ 39%	12.1 ↓ 28%	8.8 ↓ 48%	7.8 ↓ 53%	4.6 ↓ 88%
Desv. Est.	5.9	9.2	1.8	1.8	3.7	4.5
Min.	5.5	2.0	9.8	3.6	2.5	1.1
Max.	33.3	34.2	15.7	12.0	16.2	18.4
Percentil 95	27.5	31.5	15.6	11.1	15.5	14.9
N° de días	75	35	14	21	31	172

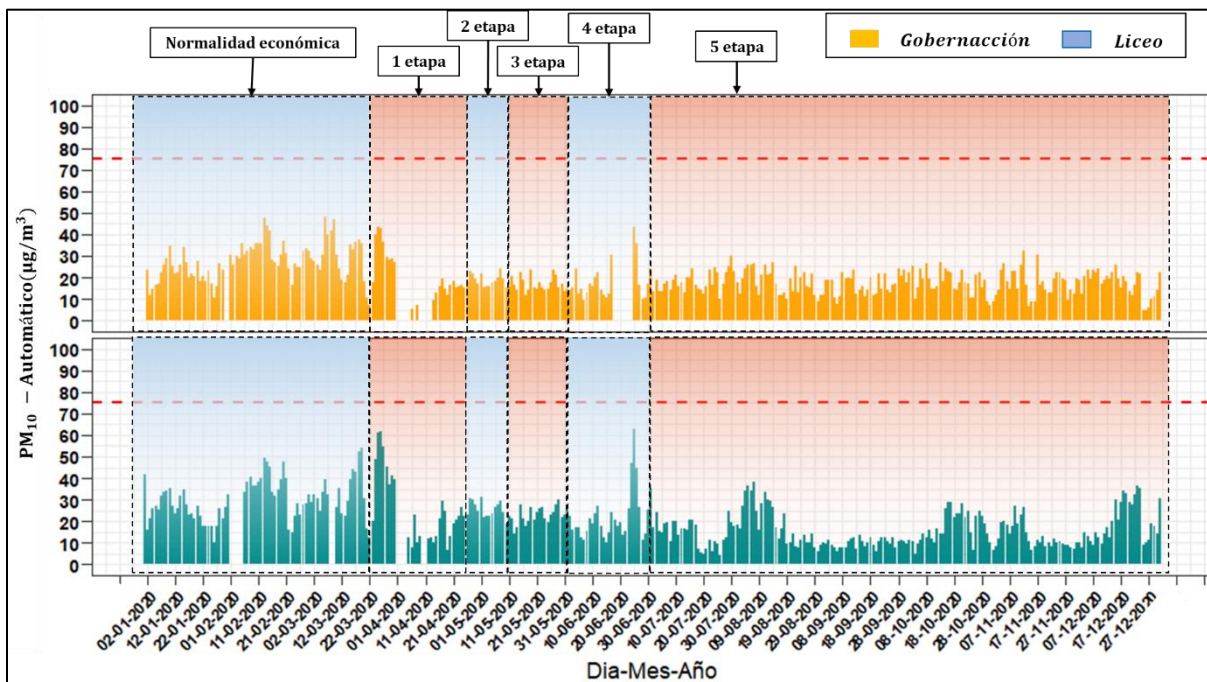
* Estadísticos estimados a partir de datos promedios diarios del equipo

** Porcentaje comparativo de cada etapa respecto al periodo de normalidad al inicio del año 2020.

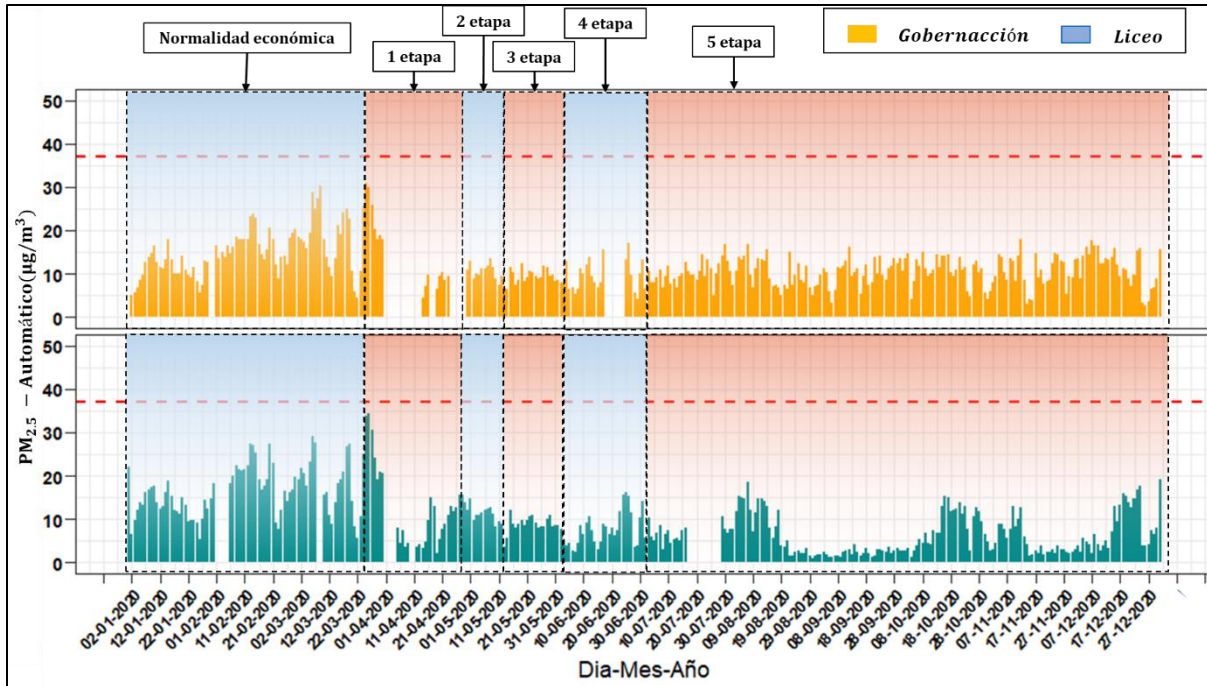
De manera alternativa, la Figura 10 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos (promedio diario) durante el año 2020 para las estaciones Gobernación y Liceo. Se destacan allí las diferentes etapas relacionadas a las dinámicas ocurridas en la ciudad debido a las medidas tomadas por las autoridades para enfrentar el COVID-19, medidas que iniciaron el viernes 20 de marzo.

Se puede identificar inicialmente que, durante la primera etapa las medidas tomadas no tuvieron un impacto significativo en las concentraciones obtenidas en ninguna de las estaciones, con registros similares a los días de normalidad económica. A partir de 01 de abril, con el cierre de las vías principales del centro de la ciudad, entre las calles 19 a 24 y carreras 23 a 22, las concentraciones observadas presentaron una reducción, seguida de una estabilización con valores alrededor de los $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ en ambas estaciones.

Por último, a finales del mes de junio se observó un aumento en las concentraciones registradas en ambas estaciones y ambos contaminantes con promedios diarios que superaron los $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$, valores posiblemente relacionados a la alerta emitida por el IDEAM sobre el fenómeno de tipo sinóptico del polvo proveniente del desierto del Sahara, en donde una capa de aire seco cargada de material particulado llegó a Colombia impactando mayoritariamente la zona norte de Colombia (Semana, 2020).



(a)



(b)

Figura 10. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el año 2020. (a) PM₁₀ (b) PM_{2.5}. La línea punteada roja hace referencia a los límites máximos permisibles de promedio diario de PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente establecidos en la Resolución 2254 de 2017 de MADS: 75 µg/m³ para PM₁₀ y 37 µg/m³ para PM_{2.5}

Finalmente, de manera alternativa se presenta la Figura 11 con la evolución promedio horaria, por día de la semana y mensual de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticas en las estaciones Gobernación y Liceo para todo 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 28 µg/m³ para PM₁₀ y 13 µg/m³ para PM_{2.5}. Para el caso particular del medio día, no se observan estos picos de concentración debido a las dinámicas de las masas de aire en la ciudad, que, al calentarse por acción de la radiación solar, cuyo valor máximo supera los 1300 W/m² entre las 11 am y 1 pm, ganan flotabilidad y ascienden en la atmósfera, comportamiento 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 de manera general 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 PM₁₀ 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 (5%), indicando que este día se comporta como un día laboral en la ciudad. Finalmente, en los promedios mensuales se identifica nuevamente el fenómeno de reducción relacionada a las medidas de restricción a partir del mes de abril, concentraciones que posteriormente se estabilizarían alrededor de los 18 µg/m³ para PM₁₀ y 10 µg/m³ para PM_{2.5}. Para el caso particular de la estación Gobernación la estabilización de concentraciones es más notable, lo cual indica la poca variabilidad en las fuentes de emisión en el área de influencia de la estación.

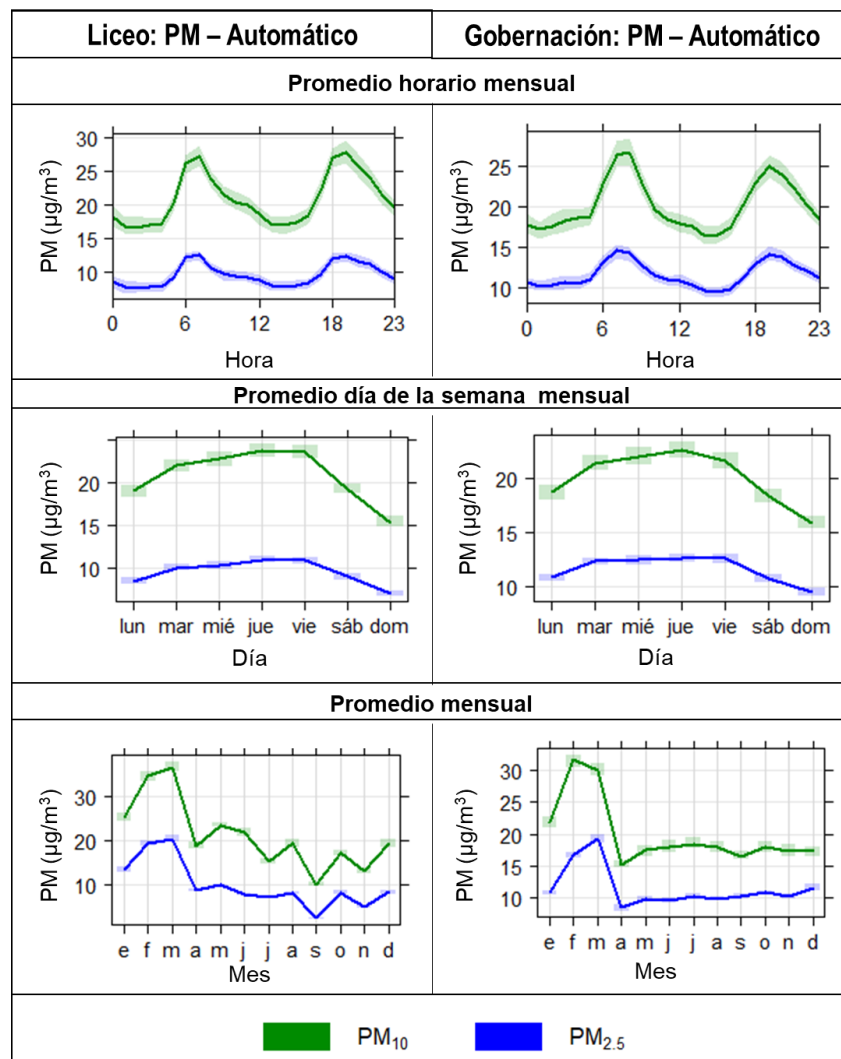


Figura 11. Promedio horario, semanal y mensual para PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el año 2020 en las estaciones Gobernación y Liceo

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

La Figura 12, Figura 13 y Figura 14 presentan los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM - Manuales. De otra parte, la Figura 15 y Figura 16 presentan 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).

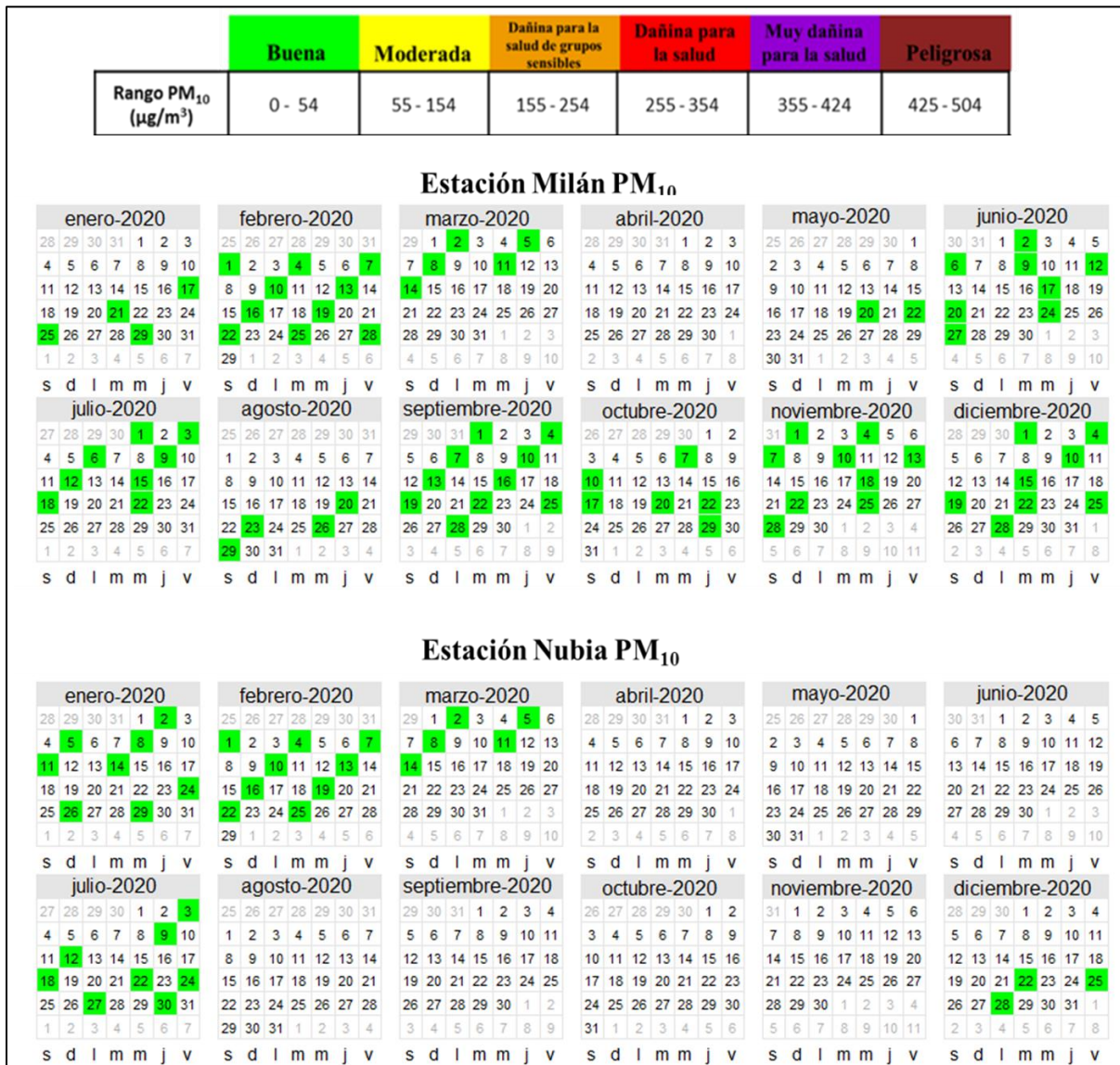
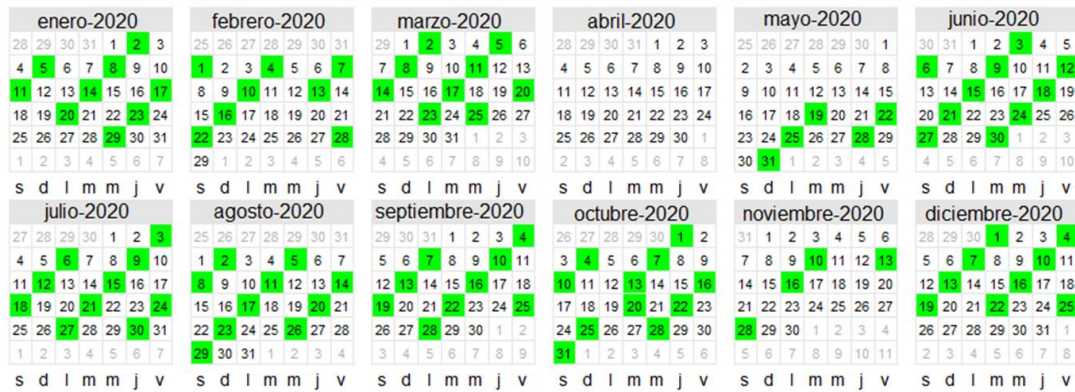


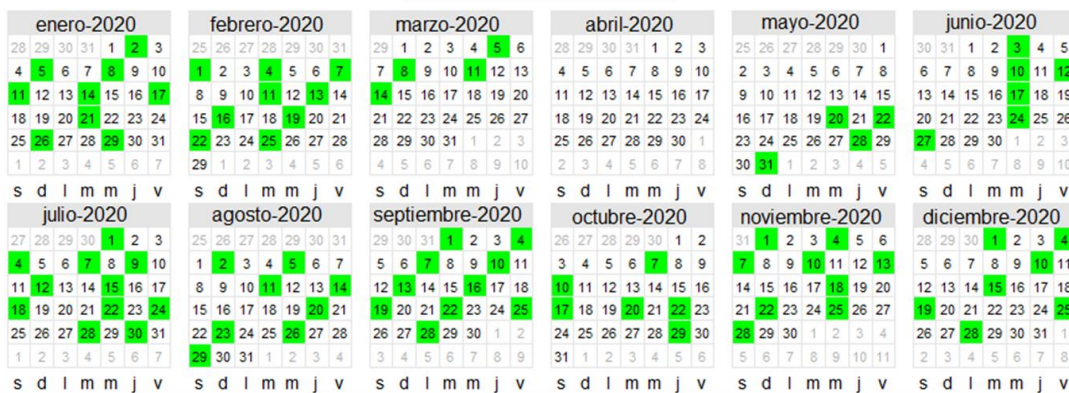
Figura 12. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ – Manual: Milán y Nubia en Manizales durante el año 2020. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS

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

Estación Gobernación PM₁₀



Estación Liceo PM₁₀



Estación Palogrande PM₁₀



Figura 13. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ – Manual: Gobernación, Liceo y Palogrande en Manizales durante el año 2020. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS

Con base en la concentración de PM₁₀ – Manual, se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en las cinco estaciones de monitoreo para todos los días analizados. Para el caso de PM_{2.5} – Manual en la estación Gobernación, un 47% de los días analizados presentaron 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.

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 en el 96% de los días en la estación Liceo, en donde los días 19, 25, 26 y 27 de marzo, se tuvo un ICA en estado moderado, fenómenos sin explicación atribuible. Por otra parte, para el caso de PM_{2.5} – Automático, en ambas estaciones se tuvo un promedio del 48% de los días con ICA en estado moderado, la mayoría de ellos registrados durante la normalidad económica; al comparar con las etapas de la cuarentena se evidencia el mejoramiento de la calidad del aire en materia de PM_{2.5} debido a la reducción de las fuentes de emisión producto de las medidas de restricción por la pandemia.

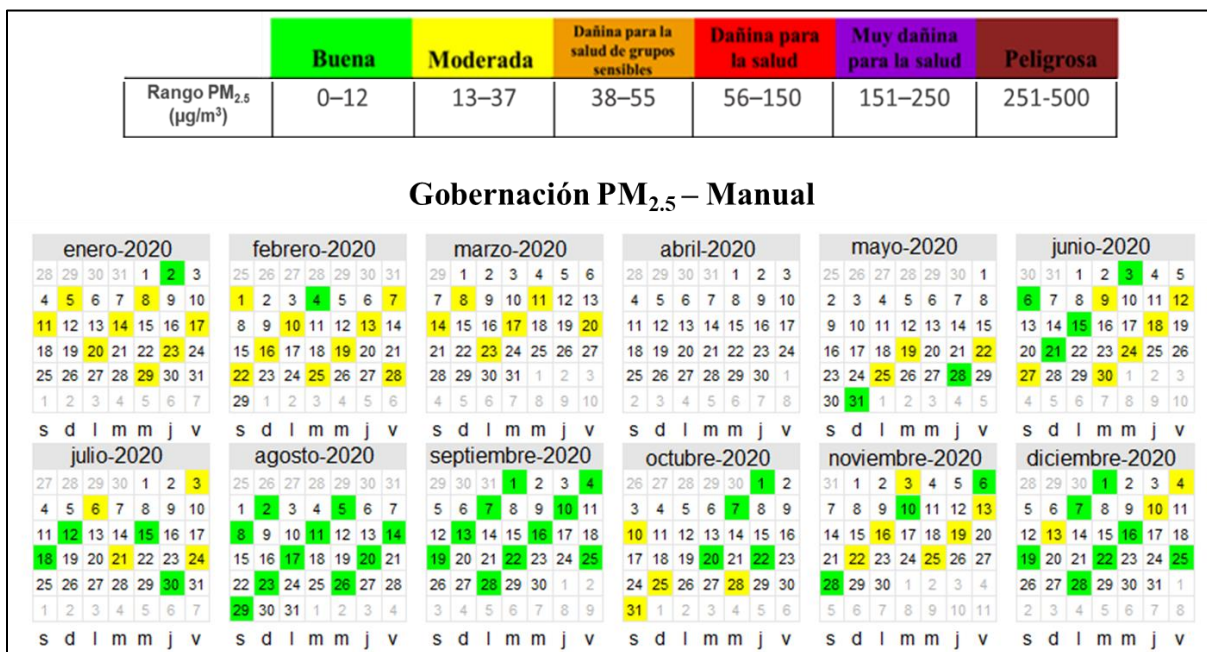


Figura 14. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{2.5} – Manual: Gobernación en Manizales durante el año 2020. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS

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

Gobernación PM₁₀ – Automático



Liceo PM₁₀ – Automático



Figura 15. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ – Automático: Gobernación y Liceo en Manizales durante el año 2020. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS

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

Gobernación PM_{2.5} – Automático



Liceo PM_{2.5} – Automático



Figura 16. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{2.5} – Automático: Gobernación y Liceo en Manizales durante el año 2020. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS

4. RESULTADOS DE MONITOREO PARA GASES

4.1. Monitoreo de monóxido de carbono (CO)

La Tabla 7 presenta los estadísticos descriptivos para las concentraciones promedio horarias de CO durante el año 2020 y la relación entre las diferentes dinámicas presentadas en la ciudad asociadas a las medidas para combatir el COVID-19. Se observa que la mediana de las concentraciones horarias durante la normalidad económica se encontró alrededor de los de 581.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Al comparar con la primera etapa de cuarentena se presentó una reducción del 8% en las concentraciones observadas, fenómeno atribuible a la ausencia casi total de fuentes de emisión, vehículos particulares, debido al cese total de actividades y al cierre de vías próximas a la estación, que se encuentra ubicada en la carrera 21 con calle 23.

Una vez ocurrió la reapertura económica, segunda y tercera etapa, se observaron concentraciones similares e incluso superiores comparados con la etapa de normalidad con un incremento porcentual en la mediana de 3 y 24% respectivamente, valores relacionados con la reapertura de las vías próximas a la estación. Este incremento en las actividades económicas, por ende, en la circulación de vehículos en las vías, continuó hasta la cuarta etapa en donde se observó un incremento máximo de los valores de la mediana en un 35%. Para la quinta etapa, los valores medios de las concentraciones se estabilizaron alrededor de los 575.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nuevamente, es decir, se retornó a las dinámicas de la normalidad de inicio del año 2020.

Al comparar los mínimos en los promedios horarios obtenidos, se observa que el mínimo anual fue registrado durante la etapa de normalidad económica con un promedio de 49.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor registrado el fin de semana entre el 13 al 15 de marzo, un valor similar (62.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) fue observado en la quinta etapa para un fin de semana con puente festivo. Estos fenómenos de reducción en los registros mínimos horarios se relacionan directamente con la actividad en las fuentes de emisión vehiculares, que durante los fines de semana reducen su circulación por la ciudad debido a la baja actividad económica para estos días, especialmente domingos y festivos. De otra parte, al observar los máximos horarios, durante la normalidad económica y las etapas de cuarentena se evidencian registros superiores a los 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la cuarta y quinta etapa, para ratificar esto, al comparar el percentil 95 de los datos se identifica que en realidad durante estos periodos si ocurrió un aumento significativo en los máximos promedios registrados.

Cabe resaltar que el incremento en los valores promedio para CO durante las etapas de cuarentena son opuestos a los observados para PM₁₀ y PM_{2.5}, esto se relaciona directamente con las fuentes de emisión, particularmente con el tipo de vehículos y combustibles, siendo el CO mayoritariamente dominado por la combustión de gasolina proveniente de motocicletas y vehículos particulares, mientras que la emisión de PM tiene un aporte asociado principalmente al uso de diésel, característico en vehículos como camiones de carga, buses y busetas (Corpocaldas – Unal, 2019).

Tabla 7. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio de CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el año 2020 y la relación de algunos eventos de movilidad asociados al COVID-19

Estadísticos	Normalidad Año 2020 (01 de enero al 19 de marzo)	Primera etapa: Cuarentena obligatoria (20 de marzo al 26 de abril)		Segunda etapa: Cuarentena con reapertura de algunos sectores económicos (27 de abril al 10 de mayo)		Tercera etapa: Cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)		Cuarta etapa: Cuarentena inteligente (01 de junio al 30 de junio)		Quinta etapa: "Nueva normalidad" (01 de julio al 31 de diciembre)	
Promedio	653.6	555.1	↓ 15%***	666.5	→ 2%	771.0	↑ 18%	844.5	↑ 29%	652.9	→ 0%
Mediana	581.4	536.8	↓ 8%	598.5	→ 3%	723.1	↑ 24%	785.2	↑ 35%	575.7	→ 1%
Incertidumbre**	1.408	1.408		1.408		1.408		1.408		1.407	
Desv. Est.	339.1	141.0		162.7		221.3		289.5		345.1	
Min.	49.8	210.9		451.2		453.1		393.3		62.7	
Max.	2044.4	1320.5		1320.5		1578.0		2204		2714.2	
Percentil 95	1294.8	805.1		968.5		1204.9		1366.6		1313.5	
N° de datos	1865	888		312		480		720		4288	

* 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.

*** Porcentaje comparativo de cada etapa respecto al periodo de normalidad al inicio del año 2020.

De manera complementaria, la Figura 17 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de CO durante el 2020 y la identificación de las diferentes etapas de análisis. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cinco minutos 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).

De manera general se puede identificar la reducción de los picos de concentración máximos durante la primera, segunda y tercera etapa de cuarentena. Sin embargo, a medida que ocurrió la reapertura económica, estos máximos de concentración se acrecentaron, debido a las nuevas dinámicas de movilidad y apertura de vías. Lo anterior indica nuevamente un aumento en la presencia de fuentes de emisión, en especial vehículos particulares y motocicletas, fuentes identificadas como las principales responsables de emisiones de CO con un aporte de 22552 ton/año, 38% atribuible a vehículos particulares y 41% a motocicletas (Corpocaldas – Unal, 2019).

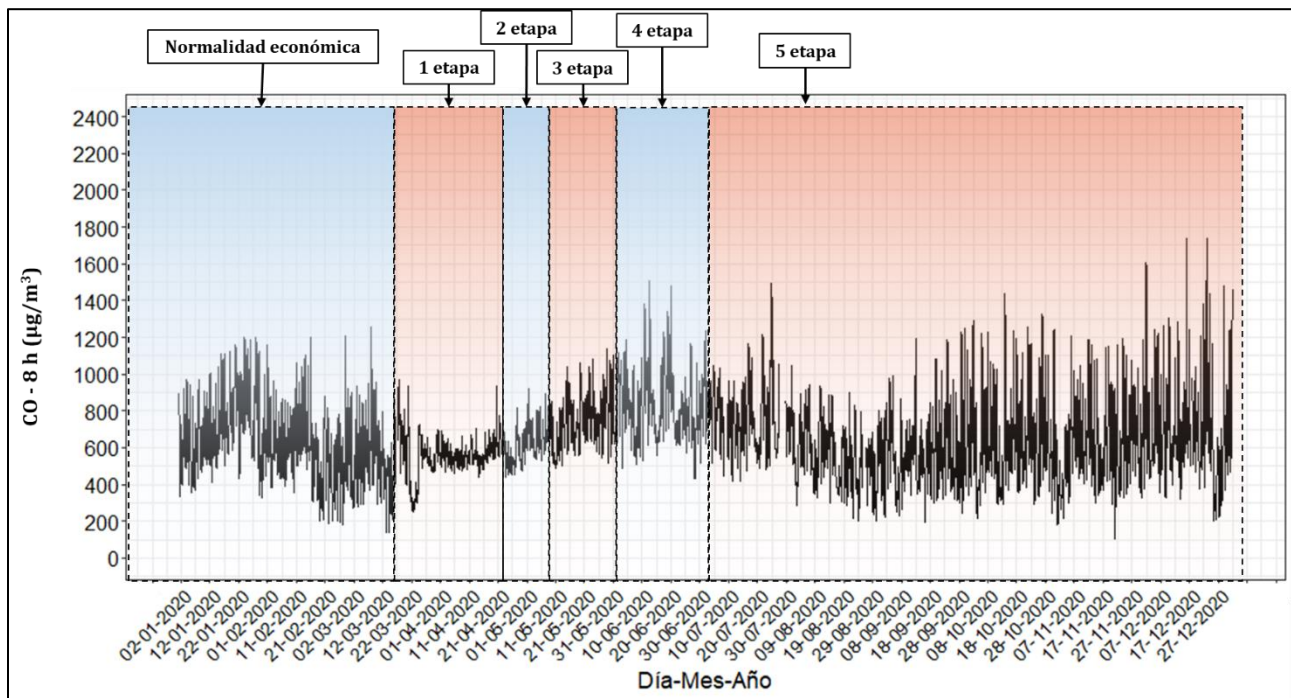


Figura 17 Evolución temporal de concentraciones promedio octohoraria de monóxido de carbono (CO) durante el año 2020. El nivel máximo permisible octohorario de la Resolución 2254 de 2017 = 5000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no fue superado en ningún día

Adicionalmente, la Figura 18 presenta la variación promedio horario, por día de la semana y mensual para el año 2020. 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 960 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Por 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 580 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 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 presenta los viernes con un valor promedio alrededor de los 700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y una concentración mínima los domingos (día con la menor actividad económica de la ciudad) con un valor promedio de 550 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este valor es 19% inferior comparado con el promedio semanal, indicando la representatividad del aporte de las fuentes de emisión en las concentraciones de CO observadas.

Finalmente, se observa el comportamiento mensual de las concentraciones de CO, donde se identifica un mínimo promedio mensual para marzo y agosto con valores aproximados de 550 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un máximo promedio mensual durante junio con un valor de 850 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Valores relacionados directamente a las dinámicas de la ciudad siendo por ejemplo marzo caracterizado por altas precipitaciones (144 mm) e inicios de la cuarentena obligatoria, mientras que junio se caracterizó por presentar movilidad asociada a cuarentena inteligente y ser la etapa con el mayor incremento en los valores medios registrados.

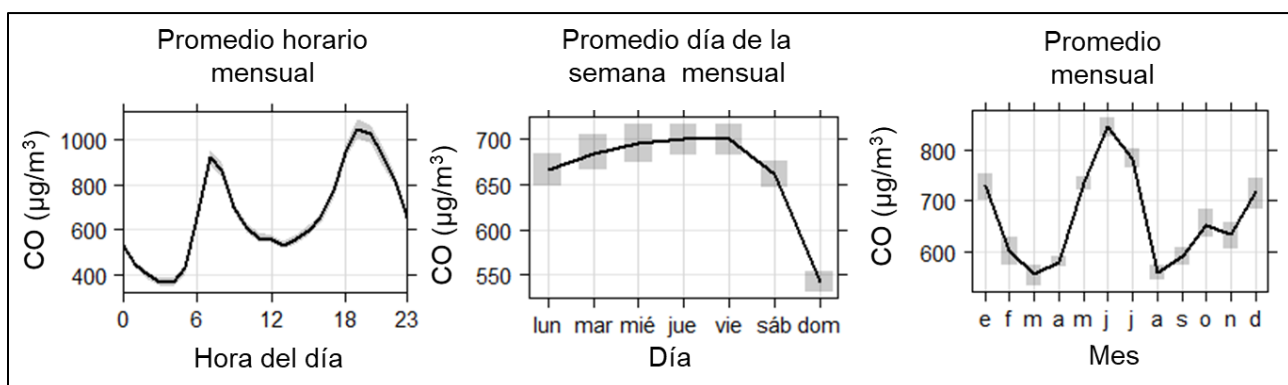


Figura 18. Variación promedio de monóxido de carbono (CO) horario mensual, por día de la semana y mensual durante el año 2020

4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO₂)

La Tabla 8 presenta los estadísticos descriptivos comparativos para SO₂ durante el año 2020 y la relación entre las diferentes dinámicas presentadas en la ciudad asociadas a las medidas para combatir el COVID-19. Se observa que las concentraciones horarias medianas durante la normalidad se encontraron alrededor de los 3.7 µg/m³. Al comparar con las etapas de la cuarentena, se obtuvo una disminución en todas con valores entre el 38 y 48%, siendo la primera etapa la reducción más significativa. Adicionalmente, se puede observar como el promedio de reducción disminuyó paulatinamente pasando del 48% de reducción para la primera etapa al 34% de reducción para la cuarta etapa, fenómeno atribuible a la reapertura de las vías, lo cual generó el retorno de las fuentes de emisión más representativas en la estación, fuentes móviles.

Este fenómeno de reducción en las concentraciones de SO₂ pudo estar relacionado con (1) la reducción de la actividad de las fuentes de emisión, fuentes móviles en ruta, que utilizan combustibles como gasolina y diésel; y (2) la baja actividad volcánica durante las etapas de cuarentena (ver sección 5.3), en donde se identificó que las mayores emisiones de la columna de gases provenientes del volcán fueron superiores durante los meses de febrero y marzo con registros de emisión de gases desde la boca del volcán con alturas superiores a los 1370 m. Estas emisiones generan picos máximos de concentración con valores hasta de 32 µg/m³, una desviación estándar de 2.6 µg/m³ y un percentil 95 de 7.6 µg/m³ indicando la alta variabilidad de los datos durante este periodo.

De manera complementaria, la Figura 19 presenta la evolución de concentraciones horarias de SO₂ durante el 2020, con la identificación de las diferentes etapas de análisis y registros de emisiones volcánicas, como los registrados el 20 de febrero, 9 de marzo y 2 de abril. 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).

De manera general se puede identificar la reducción de los picos de concentración máximos durante las diferentes etapas de cuarentena con valores que no superaron los 6 µg/m³, a excepción del día 02 de abril cuyo registro pudo ser alterado debido a emisiones volcánicas registradas y reportadas por el servicio geológico colombiano (SGC). Finalmente, durante el año 2020 se registraron concentraciones horario promedio mínimas de 0.4 µg/m³ y máximas de 38.8 µg/m³, estos valores están dentro de los límites permitidos por la normatividad vigente (100 µg/m³ para 1 hora).

Tabla 8. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio de SO₂ (µg/m³) durante el año 2020 y la relación de algunos eventos de movilidad asociados al COVID-19

Estadísticos*	Normalidad Año 2020 (01 de enero al 19 de marzo)	Primera etapa: Cuarentena obligatoria (20 de marzo al 26 de abril)		Segunda etapa: Cuarentena con reapertura de algunos sectores económicos (27 de abril al 10 de mayo)		Tercera etapa: Cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)		Cuarta etapa: Cuarentena inteligente (01 de junio al 30 de junio)	
Promedio	4.1	2.2	↓ 47%***	2.1	↓ 49%	2.2	↓ 46%	2.7	↓ 34%
Mediana	3.7	1.9	↓ 48%	2.0	↓ 46%	2.0	↓ 46%	2.3	↓ 38%
± Incertidumbre**	1.931	1.549		1.549		1.549		1.549	
Desv. Est.	2.6	0.9		0.6		0.7		2.4	
Min.	0.4	1.0		1.2		0.6		0.5	
Max.	32.0	10.7		5.1		5.9		38.8	
Percentil 95	7.6	3.5		3.4		3.7		5.0	
N° de datos	1772	888		312		480		720	

* 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.

*** Porcentaje comparativo de cada etapa respecto al periodo de normalidad al inicio del año 2020.

Adicionalmente, la Figura 20 presenta la variación promedio horaria, por día de la semana y mensual durante el año 2020. 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 5.8 µg/m³ y 5 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 mensual, no se observa un comportamiento definido observándose máximos de concentración los lunes con un valor alrededor de los 4.8 µg/m³ y mínimos los domingos alrededor de los 3.5 µg/m³.

Finalmente, se observa el comportamiento mensual de las concentraciones, en donde se identifica un mínimo promedio mensual durante abril y mayo con un valor de 2.1 µg/m³ y un máximo promedio mensual durante enero y febrero con un valor de 4.1 µg/m³. Valores relacionados posiblemente a la actividad volcánica de cada periodo (ver sección 5.3), ocurriendo mayor actividad durante el inicio del año, posterior a una reducción de actividad del fenómeno natural durante marzo hasta junio, sumado a la reducción de las actividades económicas durante las etapas de cuarentena.

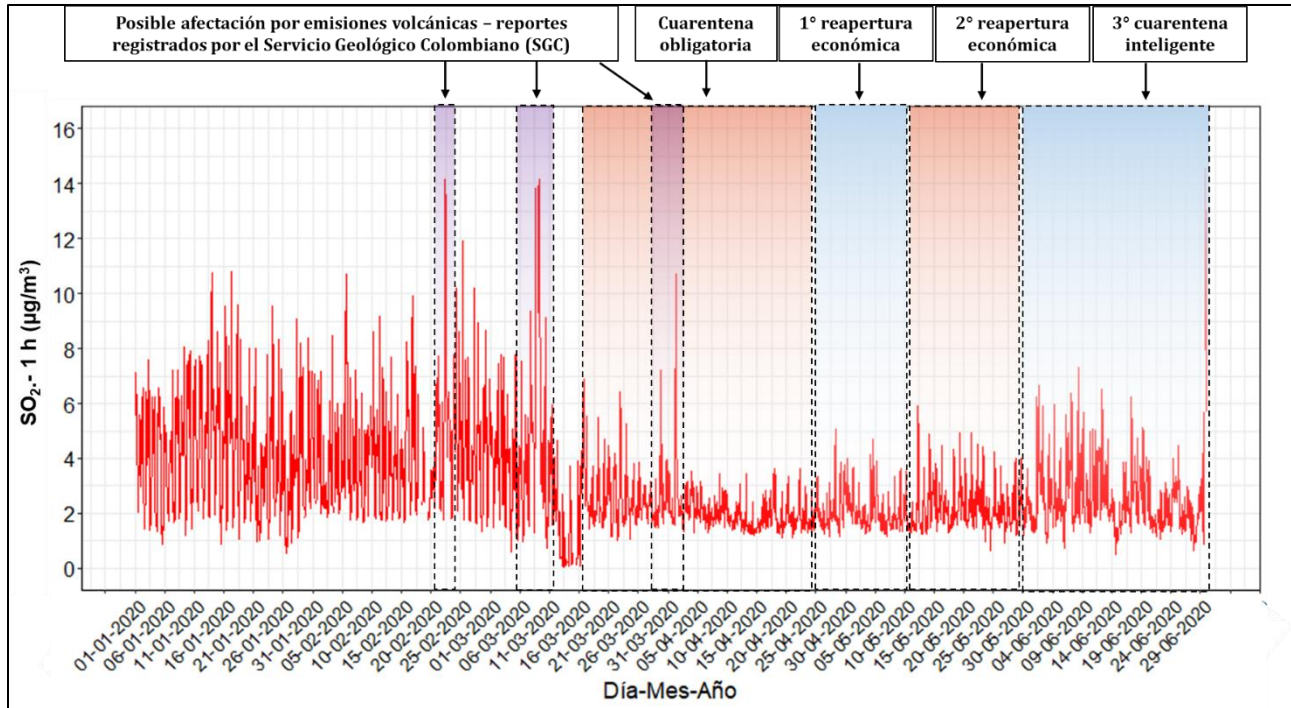


Figura 19. Evolución temporal de concentraciones promedio horario de dióxido de azufre (SO₂) durante el año 2020. El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 = 100 µg/m³ no fue superado en ningún día

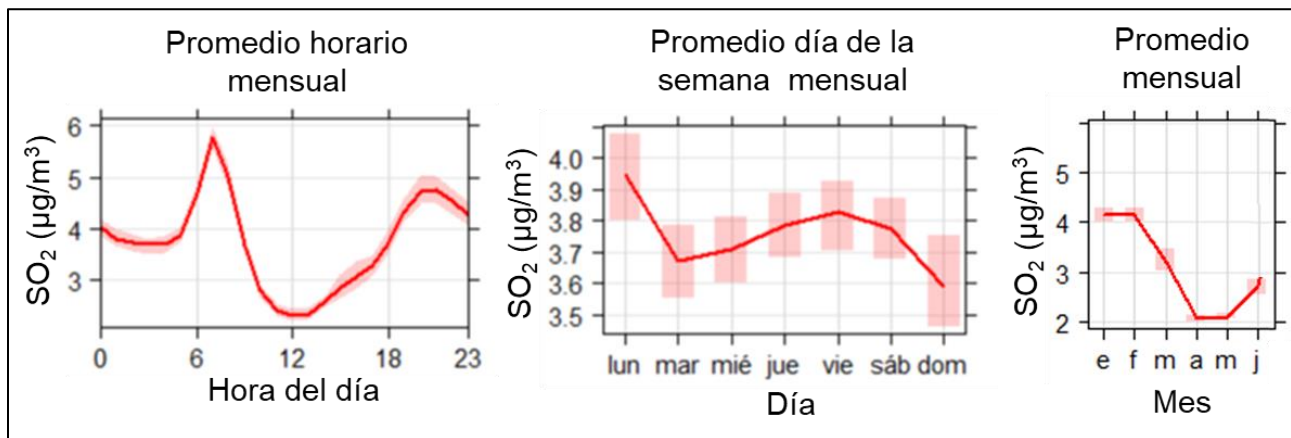


Figura 20. Variación promedio horaria mensual, por día de la semana y mensual de dióxido de azufre SO₂ durante el año 2020

4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O₃)

La Tabla 9 presenta los estadísticos descriptivos comparativos para O₃ durante el año 2020 y la relación entre las diferentes dinámicas presentadas en la ciudad asociadas a las medidas para combatir el COVID-19. Se observa que la mediana de las concentraciones horarias durante la normalidad económica se encontró alrededor de los 13.6 µg/m³. Al comparar con la primera y segunda etapa de cuarentena, se presentó un aumento de la mediana de las concentraciones en valores porcentuales de 57 y 47% respectivamente. A medida que la reapertura económica tenía lugar, las concentraciones medianas de este contaminante en la estación se estabilizaron hasta obtener registros similares al periodo de normalidad económica, obteniéndose una variación del 6% menor durante la quinta etapa con respecto a la normalidad. Para este contaminante en particular, se observa un cambio significativo en los porcentajes de variación al comparar la media con la mediana, siendo más evidente el efecto de la distribución no normal de los datos.

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. Bajo la suficiente relación 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 y en contraposición con los resultados de CO, la disminución de emisiones de contaminantes primarios durante la primera y segunda etapa de cuarentena, pueden ser interpretadas como una reducción de emisiones de precursores como el 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. Finalmente, 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).

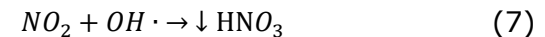
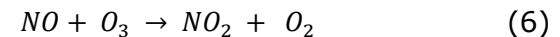
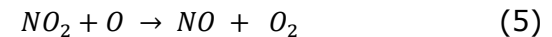
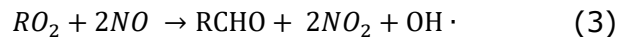
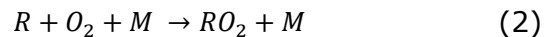
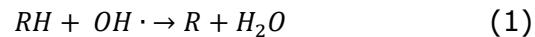
Tabla 9. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio de O₃ (µg/m³) durante el año 2020 y la relación de algunos eventos de movilidad asociados al COVID-19

Estadísticos	Normalidad Año 2020 (01 de enero al 19 de marzo)	Primera etapa: Cuarentena obligatoria (20 de marzo al 26 de abril)	Segunda etapa: Cuarentena con reapertura de algunos sectores económicos (27 de abril al 10 de mayo)	Tercera etapa: Cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)	Cuarta etapa: Cuarentena inteligente (01 de junio al 30 de junio)	Quinta etapa: "Nueva normalidad" (01 de julio al 31 de diciembre)
Promedio	17.0	22.9 ↑ 35%***	20.9 ↑ 23%	15.6 ↓ 8%	14.0 ↓ 17%	15.3 ↓ 10%
Mediana	13.6	21.4 ↑ 57%	20.2 ↑ 47%	13.5 → 0%	12.2 ↓ 10%	12.8 ↓ 6%
Incertidumbre**	1.730	1.455	1.455	1.455	1.455	0.799
Desv. Est.	11.8	10.3	9.7	8.7	8.4	10.5
Min.	2.1	3.5	3.0	2.4	2.0	1.3
Max.	61.9	54.6	46.2	40.9	54.5	88.9
Percentil 95	38.8	41.8	38.7	32.9	29.9	34.3
N° de datos	908	888	312	480	628	4091

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

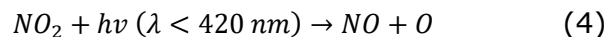
** Unidades: ppb. Las fuentes de incertidumbre están relacionadas principalmente con los procedimientos de calibración multipunto realizados con empresa externa: Comparación con patrones de referencia, desempeño por repetibilidad y resolución del instrumento.

*** Porcentaje comparativo de cada etapa respecto al periodo de normalidad al inicio del año 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.



A medida que aumenta la generación de precursores durante la tercera, cuarta y quinta etapa de cuarentena, se presenta una competencia por el consumo de radicales hidroxilos ($\text{OH}\cdot$) presentes en el ambiente y la reacción de titulación (reacción 6) es desplazada hacia un mayor consumo de O_3 , por consiguiente, una reducción de las concentraciones observadas. Al observar los resultados obtenidos para O_3 durante las diferentes dinámicas de movilidad, se puede observar que las concentraciones de O_3 en la ciudad de Manizales se encuentran dominadas por la presencia de COVs en la atmósfera (Li, 201; Sengel y otros, 2020).

De manera complementaria, la Figura 21 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de O_3 durante el 2020, con la identificación de las diferentes etapas de análisis. Allí se puede identificar el efecto de los fenómenos anteriormente mencionados para cada etapa de la cuarentena. Se resalta que para este equipo se presentaron fallas de medición a lo largo del mes de febrero y mediados de marzo. 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 durante el año 2020 se encontraron entre $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $88.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valores que están dentro de los límites permitidos por la normatividad vigente ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 8 horas).

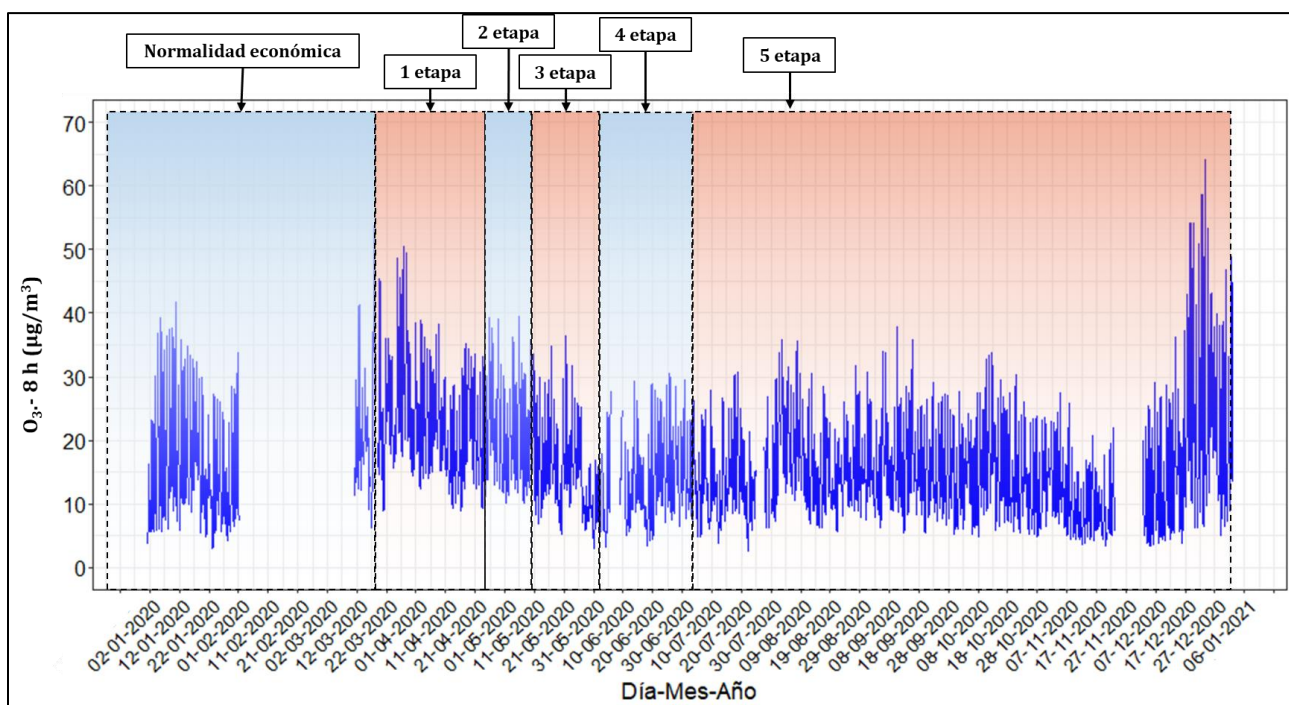


Figura 21. Evolución temporal de concentraciones promedio octohorario de O_3 durante el año 2020. El nivel máximo permisible octohorario de la Resolución 2254 de 2017 = $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no fue superado en ningún día

De manera alternativa la Figura 22 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, 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 $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y niveles de radiación promedio cercanos a los $400 \text{ W}/\text{m}^2$.

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 $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 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; sumado a ello 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 atmósfera. De otra parte, se identifica que las concentraciones diurnas son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con un promedio diurno de $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y uno nocturno 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 de la posible 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 O_3 , desplazando el equilibrio hacia una mayor producción de este contaminante.

Finalmente se observa el comportamiento mensual de las concentraciones durante las jornadas diurnas y nocturnas, se identifica un mínimo promedio diurno mensual para noviembre con un valor de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un máximo promedio diurno mensual durante marzo y diciembre con valores de alrededor de $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Valores relacionados directamente a los promedios de radiación solar, en donde por ejemplo marzo registró un promedio mensual de $334.5 \text{ W}/\text{m}^2$, mientras junio presentó un promedio mensual de $250 \text{ W}/\text{m}^2$.

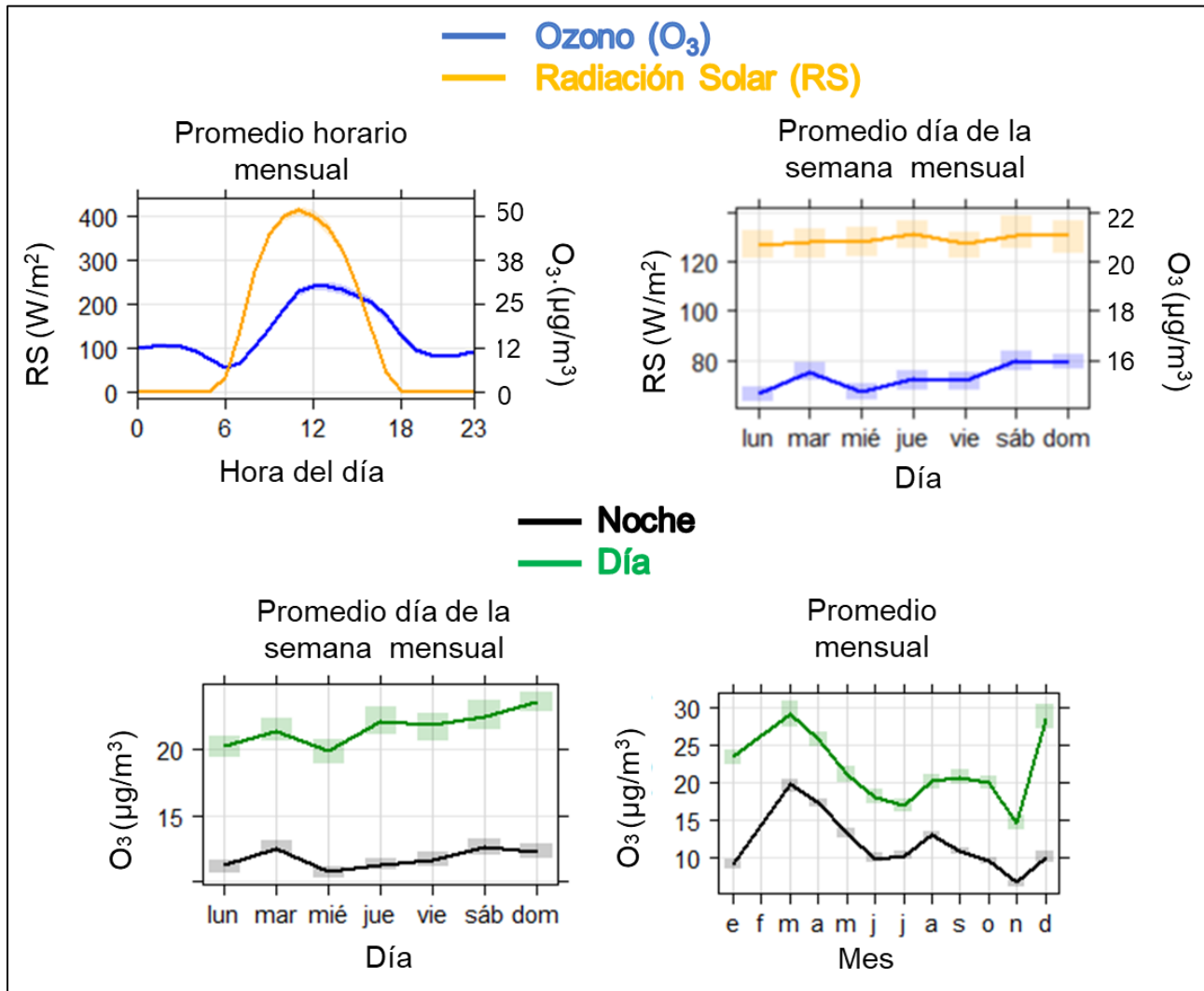


Figura 22. Variación promedio horaria y semanal de O₃ y radiación solar. Se incluye además el comportamiento promedio semanal y mensuales entre las horas diurnas y nocturnas, durante el año 2020

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

La Figura 23 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 todos los contaminantes.

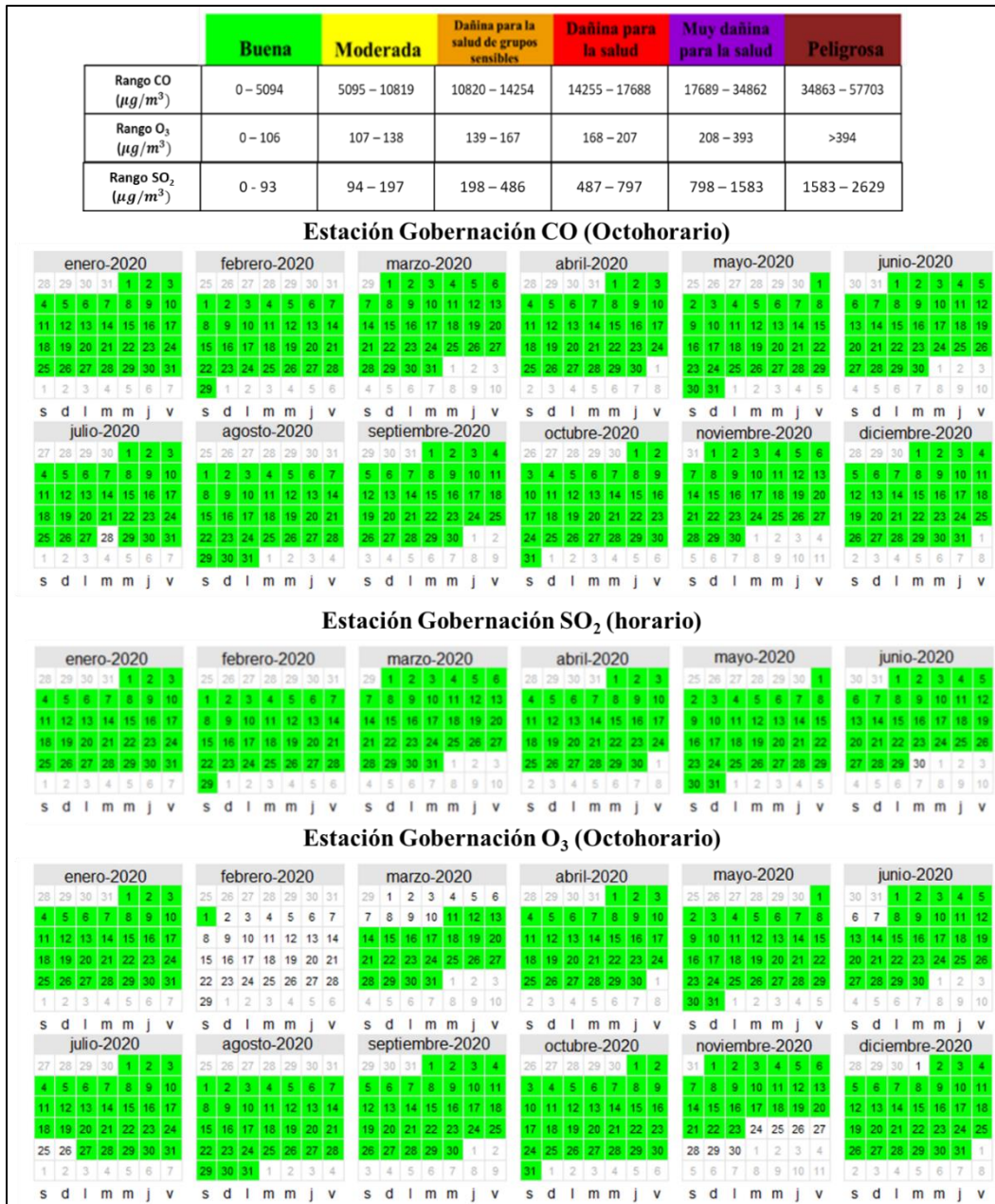


Figura 23. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, SO₂ y O₃ en Manizales durante el año 2020. Basado en la resolución 2254 de MADS

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 a 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 24 presenta la relación entre las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ obtenidas en la estación Gobernación para el año 2020. 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).

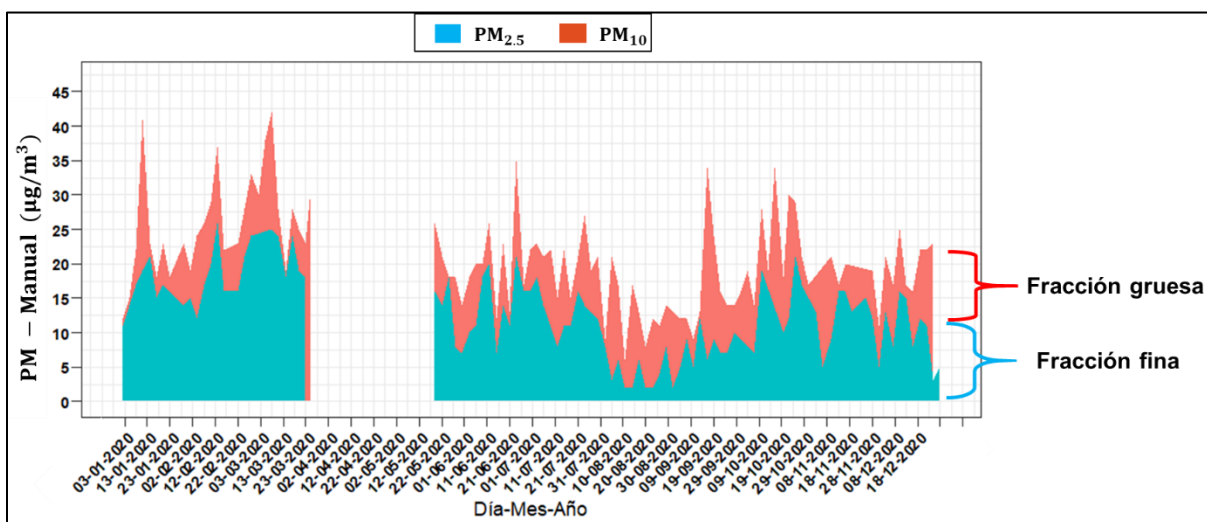


Figura 24. Relación entre el material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Manuales en la estación Gobernación durante el año 2020

5.2. Relación entre los equipos automáticos: Estación Gobernación

La Figura 25 presenta la variación promedio horaria para los contaminantes SO₂, O₃, PM_{2.5} - Automático y CO en la estación Gobernación para el año 2020. Se observa que el SO₂, 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, siendo las fuentes móviles las de mayor contribución de la zona, resultados indicativos de que en Manizales estos son contaminantes primarios producto de la actividad de las fuentes vehiculares.

Por su parte, el O₃ presenta un comportamiento diferente a los contaminantes anteriormente analizados, ya que las mayores concentraciones de O₃ se presentan alrededor del mediodía, horas en que se presenta la mayor radiación solar lo que favorece las reacciones de formación de O₃, este comportamiento inverso ha sido observado por otros autores y se le atribuye este fenómeno a las dinámicas de los contaminantes en las reacciones con los precursores del O₃ como los NO_x y COVs ya sea de manera directa o indirecta (Sharma y colaboradores, 2017; Özbay y colaboradores, 2011).

Finalmente, la Tabla 10 presenta los diferentes coeficientes de correlación lineal de Pearson entre los promedios diarios de los contaminantes analizados para todo el periodo de análisis, de allí se confirma la relación positiva entre el SO₂, CO y PM_{2.5}, el mayor coeficiente el correspondiente a la relación entre el SO₂ y CO (0.712) permitiendo concluir que todos ellos provienen de fuentes primarias de emisión, siendo las fuentes móviles en ruta las de mayor aporte, resultados que concuerdan con los observado en los inventarios de emisiones estimados en la ciudad (González y colaboradores, 2017, Unal – Corpocaldas, 2019).

Tabla 10. Coeficiente de correlación lineal de Pearson entre los promedios diarios de contaminantes durante el año 2020

	CO (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)
CO (µg/m ³)	1	-0.310	0.456	0.712
O ₃ (µg/m ³)	-0.310	1	-0.151	-0.402
PM _{2.5} (µg/m ³)	0.456	-0.151	1	0.453
SO ₂ (µg/m ³)	0.712	-0.402	0.453	1

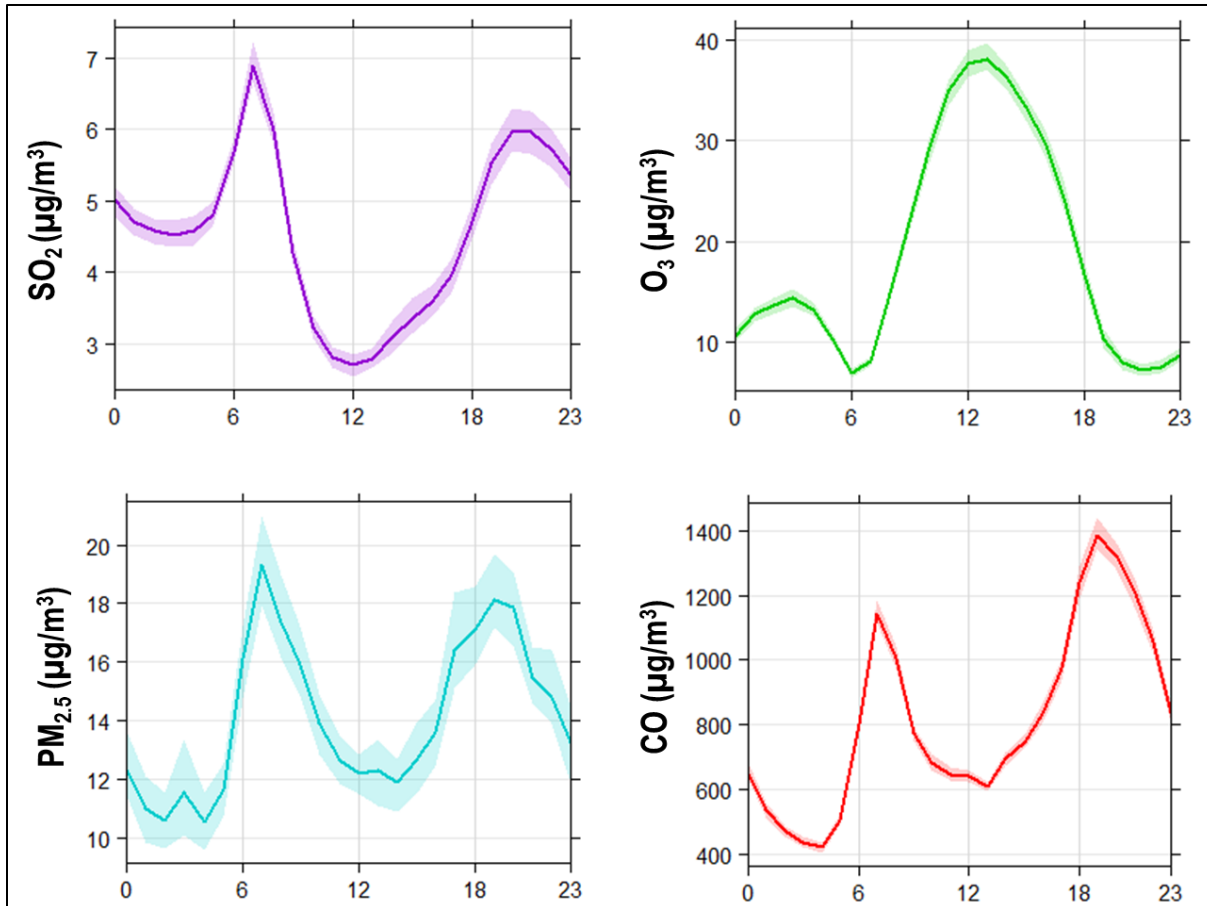


Figura 25. Comparación de perfiles promedio horarios de concentración de SO₂, O₃, CO y PM_{2.5} - Automático en la estación Gobernación (Año 2020)

5.3. Emisiones volcánicas

Durante el año 2020 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 11 presenta un resumen con algunos de los días que tuvieron alturas para la columna de gases significativas (superiores a los 1400 metros), de estos días se destaca que el 67% de los reportes presentaron predominancia de vientos hacia el occidente y/o noroccidente, ubicación de Manizales, generando una posible afectación a la contaminación atmosférica por esta fuente en la ciudad, siendo notorio este efecto durante los meses de febrero y marzo, en donde se registraron bajas humedades relativas (77 y 77.8%), condiciones que favorecen el transporte de PM₁₀. De manera alternativa la Figura 26 presenta un ejemplo de imagen satelital tomada por el proyecto "Sentinel 5P/TROPOMI" de la European Space Agency (ESA), para el día 13 de febrero del 2020, 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 11. Resumen de emisiones volcánicas significativas (Altura de la columna de gases superiores a los 1400 m) durante el 2020 (SGC, 2020).

Fecha	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento	Fecha	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento
30-ene	1619	Occidente - Noroccidente	17-sep	1800	Occidente - Noroccidente
13-feb	1950	Occidente - Noroccidente	28-sep	1800	Occidente - Noroccidente
20-feb	1450	Occidente - Noroccidente	2-oct	2033	Occidente - Noroccidente
29-feb	1450	Occidente - Noroccidente	18-oct	2079	Noroccidente
9-mar	1943	Suroccidente - Noroccidente	21-oct	1809	Occidente - Noroccidente
11-mar	2000	Occidente - Noroccidente	28-oct	1995	Nororiente
23-mar	1500	Nororiente-Suroriente	4-nov	2122	Nororiente - Sur
2-abr	1430	Nororiente-Suroriente	10-nov	2400	Noroccidente
19-abr	1540	Suroccidente - occidente	28-nov	2518	Noroccidente
23-ago	1672	Occidente - Noroccidente	1-dic	1545	Noroccidente
31-ago	1800	Occidente - Noroccidente	20-dic	1600	Occidente - Noroccidente
1-sep	1802	Occidente - Noroccidente	23-dic	1593	Suroriente

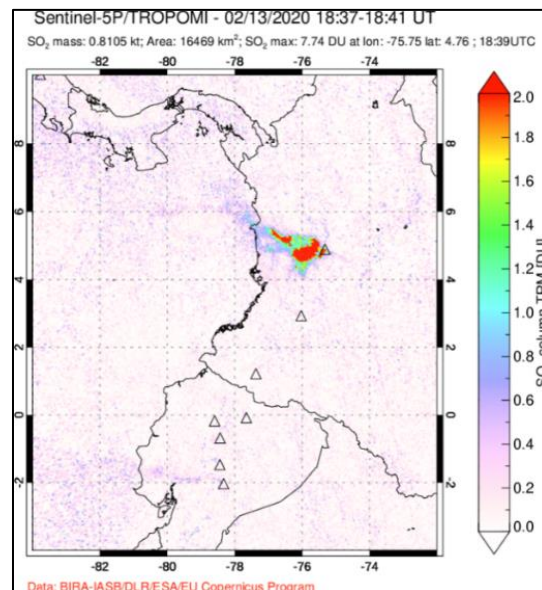


Figura 26. Ejemplo: Comportamiento de columna de SO₂ registradas por el satélite TROPOMI. Viernes 13-Feb-2020

5.4. Imágenes satelitales

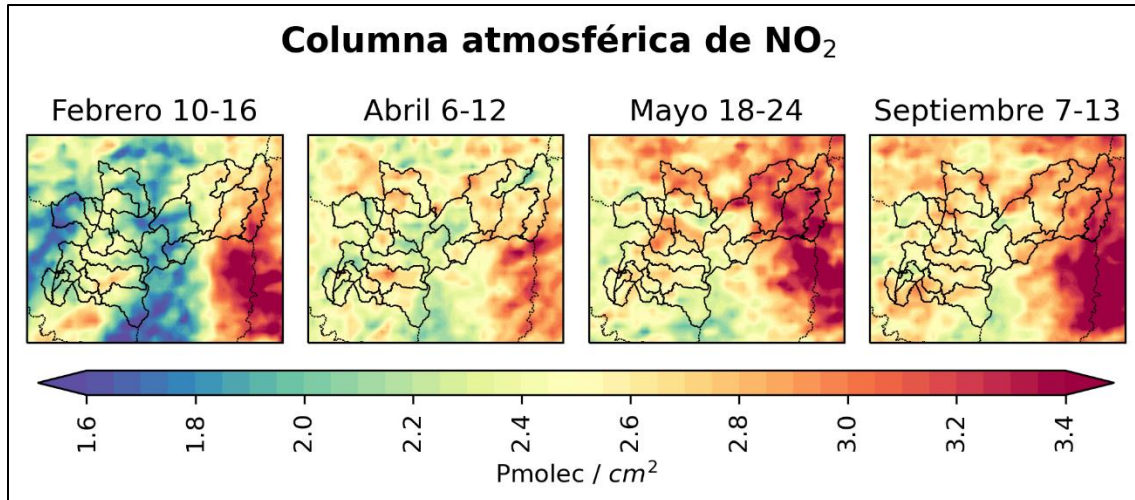
De manera similar a los registros de emisiones volcánicas provenientes de imágenes satelitales del dispositivo TROPOMI de la European Space Agency (ESA), se ha explorado la alternativa de visualización de contaminantes criterio mediante el uso de imágenes satelitales. Esta alternativa permite visualizar 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*".

La Figura 27 presenta el promedio semanal de la columna atmosférica de: (a) NO₂, (b) O₃, (c) CO, (d) SO₂ y (e) Índice de absorción de aerosoles sobre el departamento de Caldas durante cuatro periodos comparativos: febrero 10 al 16 (Normalidad económica), abril 6 al 12 (cuarentena obligatoria), mayo 18 al 24 (reapertura económica) y septiembre 7 al 13 ("*nueva normalidad*"). De manera general se puede observar que las mayores concentraciones de NO₂, O₃ y CO se presentan hacia la zona oriente del departamento de Caldas durante todo el periodo de análisis. Mientras que para SO₂ e índice de aerosoles existe una mayor concentración en el sector centro sur del departamento (ciudad de Manizales y alrededores).

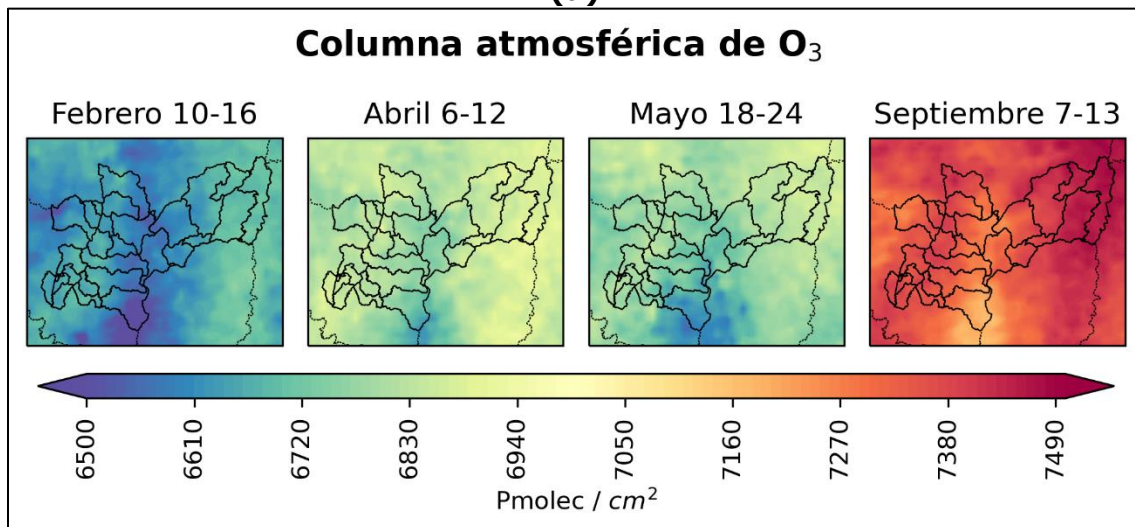
Para el caso de la columna atmosférica de O₃ se logra identificar un patrón similar al comportamiento observado en la troposfera, por otra parte las demás columnas de contaminantes parecen no haber tenido un efecto de reducción significativo durante el periodo de cuarentena obligatoria, no obstante es importante recalcar que esta columna incluye tanto el comportamiento en superficie como en la estratosfera, motivo por el cual no puede identificarse de manera clara el efecto favorable de las condiciones de cuarentena en la calidad del aire, pudiendo estar relacionados estas concentraciones a fenómenos de mayor escala como transporte regional.

De manera similar la Figura 28 presenta el comportamiento promedio semanal de la columna atmosférica de: (a) NO₂, (b) O₃, (c) CO, (d) SO₂ e (e) Índice de absorción de aerosoles sobre el país durante los mismos periodos. Se puede identificar que las mayores concentraciones para NO₂, O₃ y CO se encuentran hacia la zona norte, mientras que para SO₂ e índice de aerosoles la distribución es más uniforme y no se cuenta con un patrón definido.

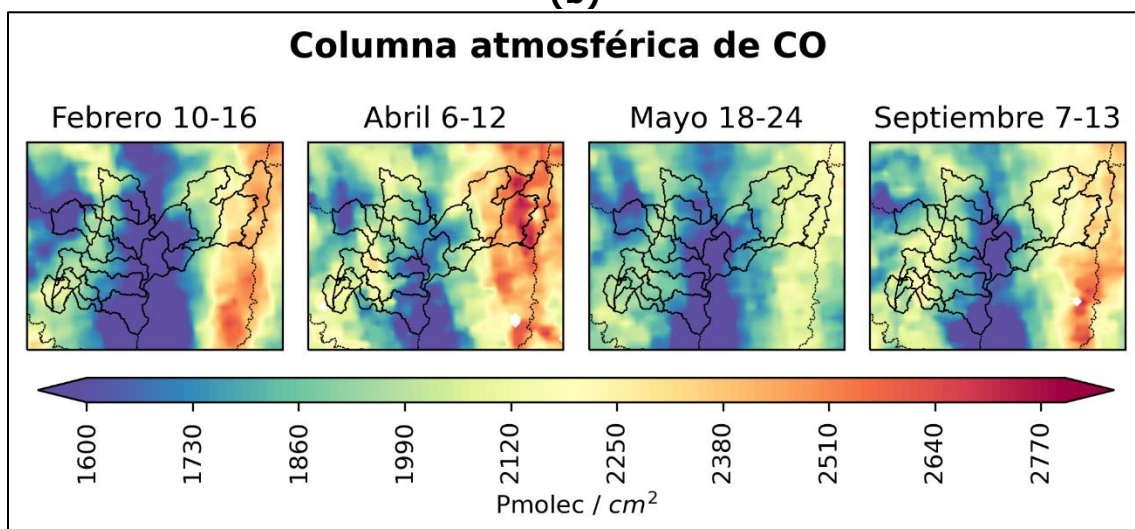
Adicionalmente, se puede observar que durante el periodo de cuarentena obligatoria y nueva normalidad, no se presentó un efecto significativo en las concentraciones de la columna total observadas y por contrario aparentemente aumentaron durante este periodo, por lo que no se pueden descartar fenómenos de transporte intercontinental de estos contaminantes.



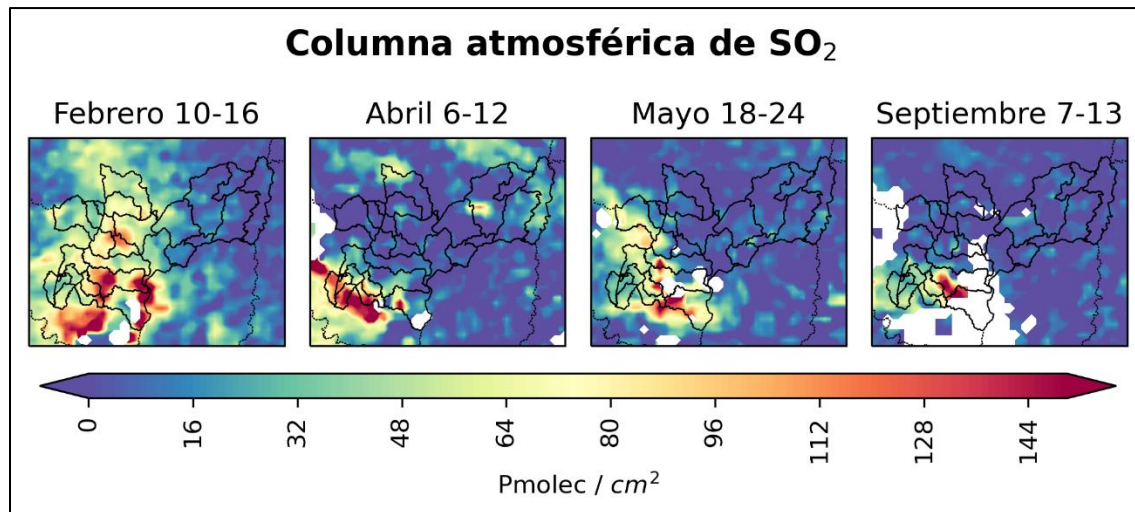
(a)



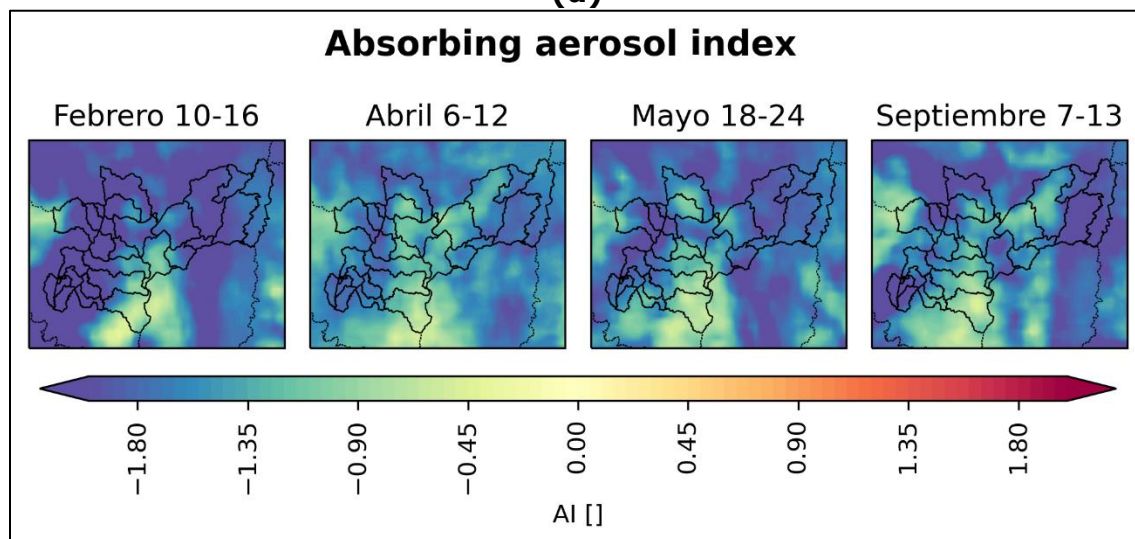
(b)



(c)

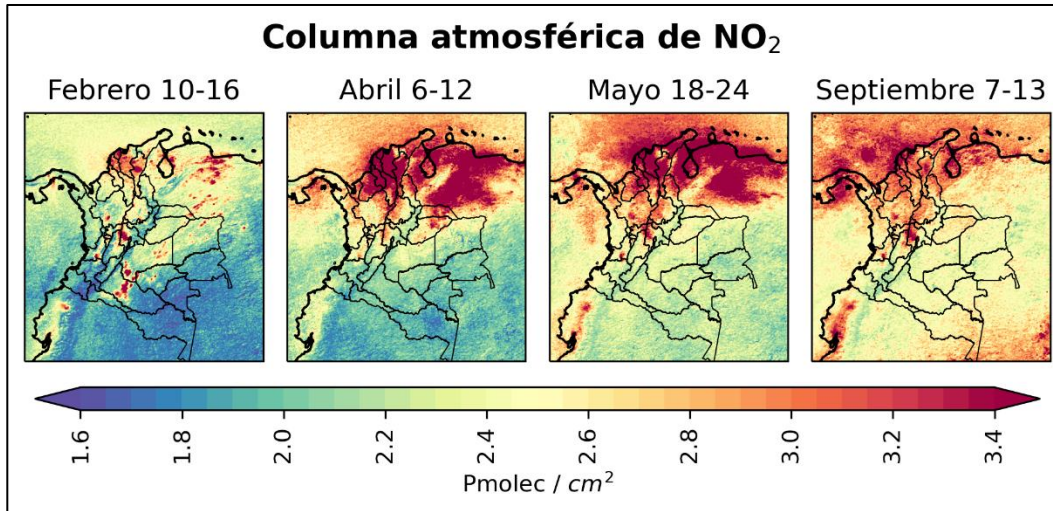


(d)

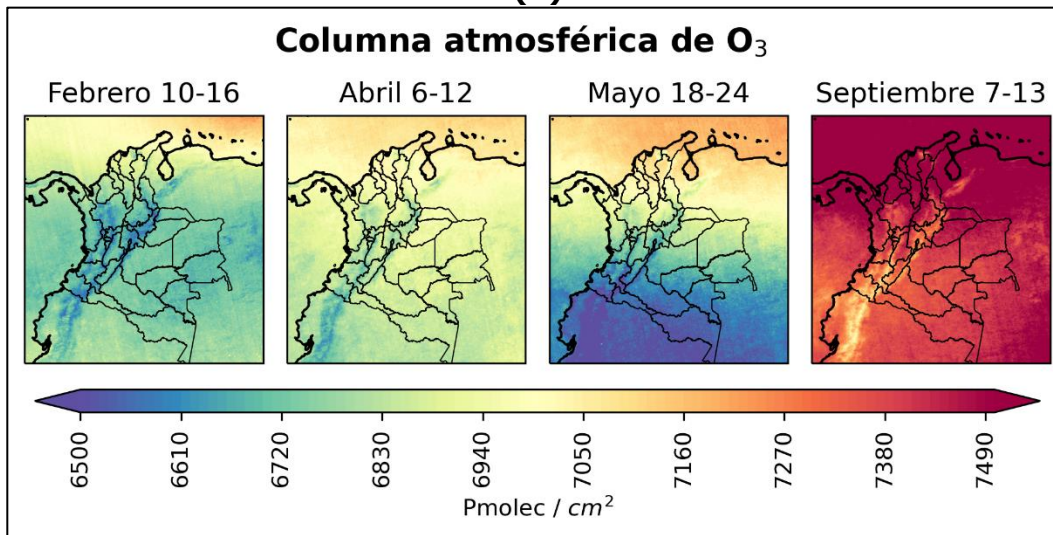


(e)

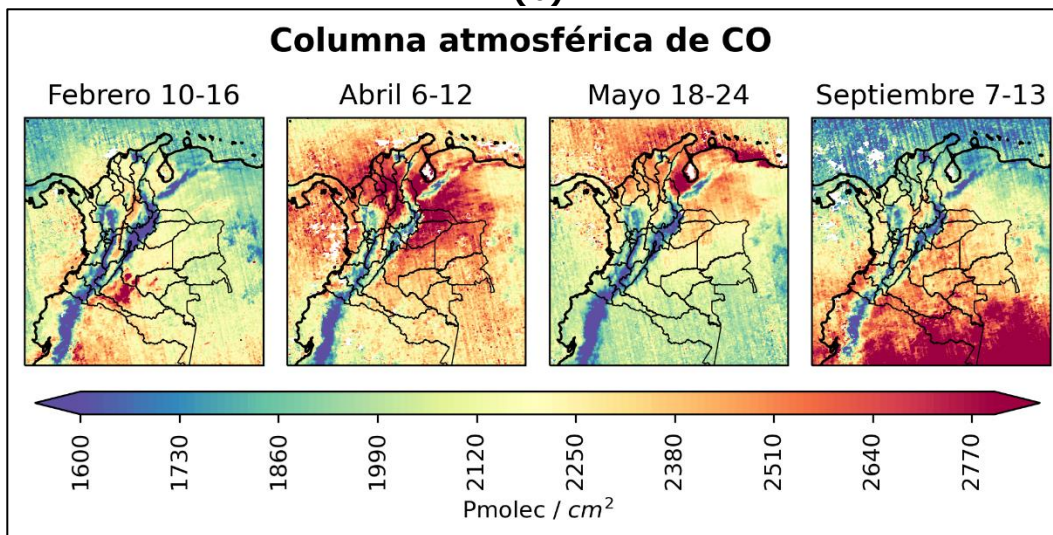
Figura 27. Imágenes satelitales relacionadas al comportamiento de la columna atmosférica promedio de contaminantes: (a) NO₂, (b) O₃, (c) CO, (d) SO₂ y (e) Índice de aerosoles sobre el departamento de Caldas durante periodos de: normalidad económica (febrero 10-16), cuarentena obligatoria (abril 6-12), reapertura económica (mayo 18-24) y "nueva normalidad" (Septiembre 7-13). Satelite TROPOMI



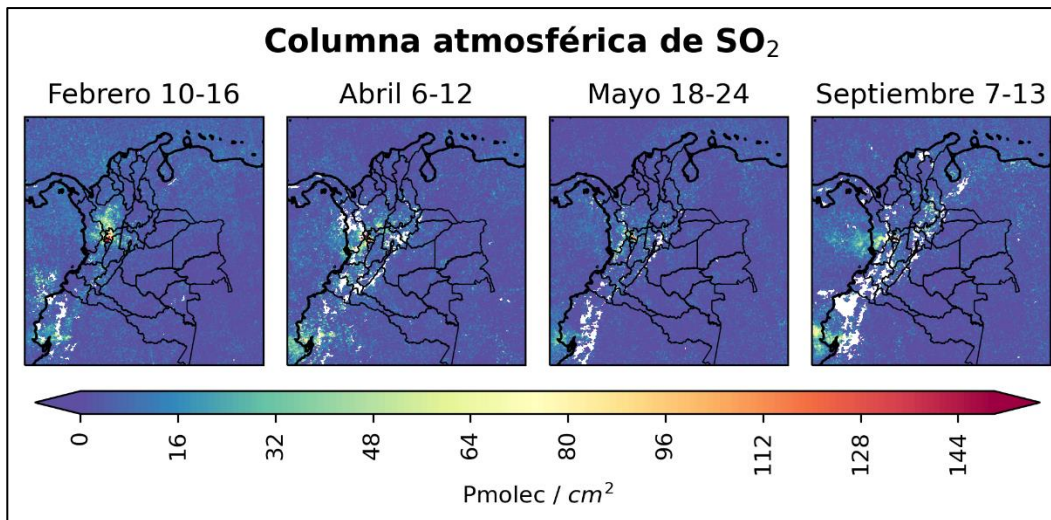
(a)



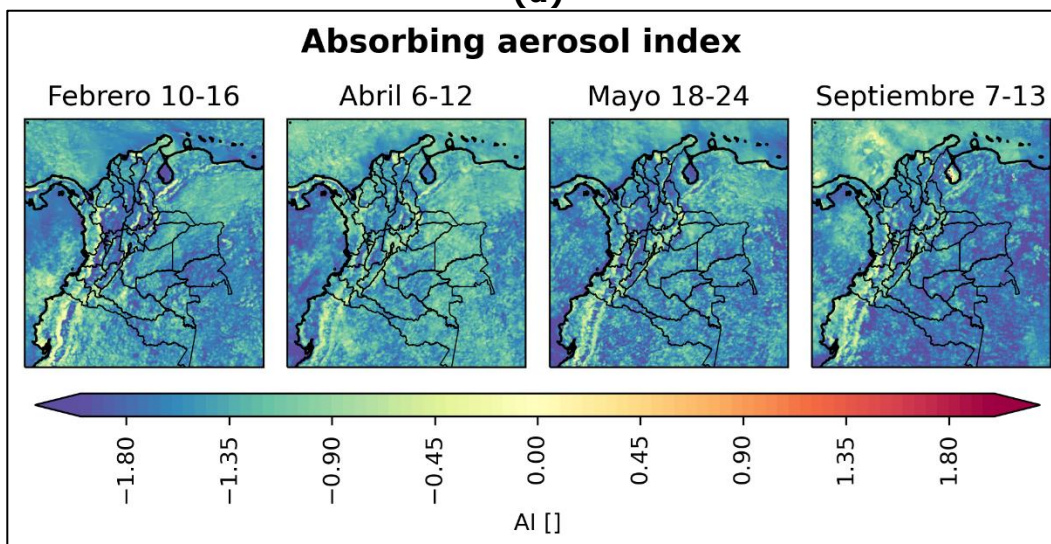
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 28. Imágenes satelitales relacionadas al comportamiento de la columna atmosférica promedio de contaminantes: (a) NO₂, (b) O₃, (c) CO, (d) SO₂ y (e) Índice de aerosoles sobre Colombia durante durante periodos de: normalidad económica (febrero 10-16), cuarentena obligatoria (abril 6-12), reapertura económica (mayo 18-24) y "nueva normalidad" (Septiembre 7-13). Satelite TROPOMI

5.5. Espacialización de datos anuales para PM₁₀ en Manizales durante el año 2020

La Figura 29 presenta la ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo de material particulado (PM₁₀) de la ciudad de Manizales y el mapa de interpolación de concentraciones anuales de este contaminante, elaborados por la herramienta "Geostatistical Analyst" de ArcGis 10.5, método predictor IDW para predecir los valores en puntos no muestreados. Se puede identificar allí que las regiones con las mayores concentraciones promedio anuales de PM₁₀ corresponden a las inmediaciones de la estación del tipo industrial Milán.

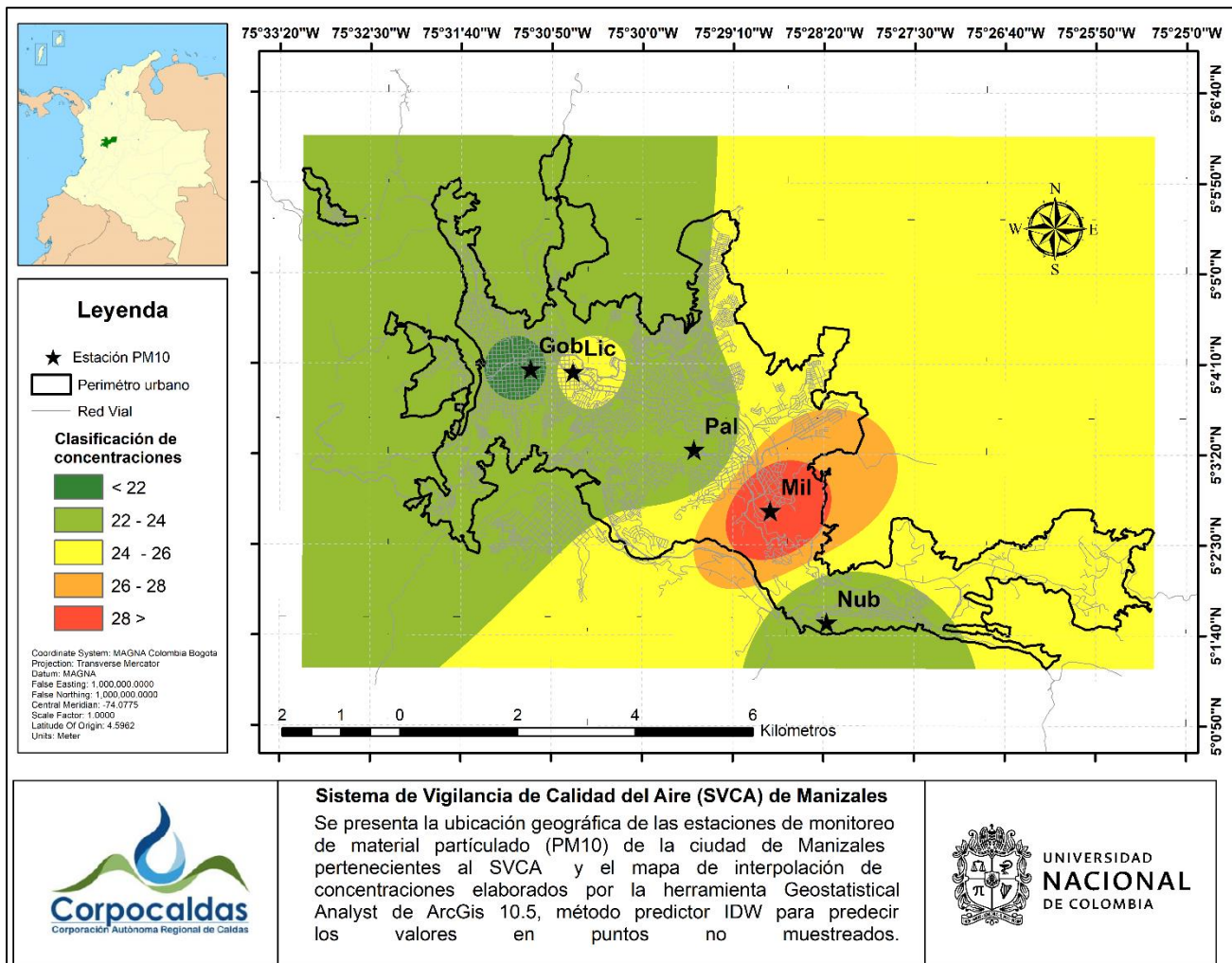


Figura 29. Mapa de interpolación de concentraciones anuales de PM₁₀. Método predictor IDW de puntos no muestreados.

5.6. Comparativo de concentraciones de CO, O₃, PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático con respecto a la línea base

La Figura 30 presenta el diagrama de cajas mensual de las concentraciones de CO y la comparación entre el año atípico 2020 y las concentraciones de línea base en la ciudad, es decir, las concentraciones en los años previos de 2018 y 2019. Se observa que, para las diferentes etapas de cuarentena existió una reducción tanto en los valores promedio de este contaminante como en la distribución de los datos, presentándose una variación de percentiles más acotada y un menor número de valores atípicos, fenómeno atribuible a la ausencia casi total de fuentes de emisión, vehículos particulares, debido al cese total de actividades y al cierre de vías próximas a la estación, que se encuentra ubicada en la carrera 21 con calle 23.

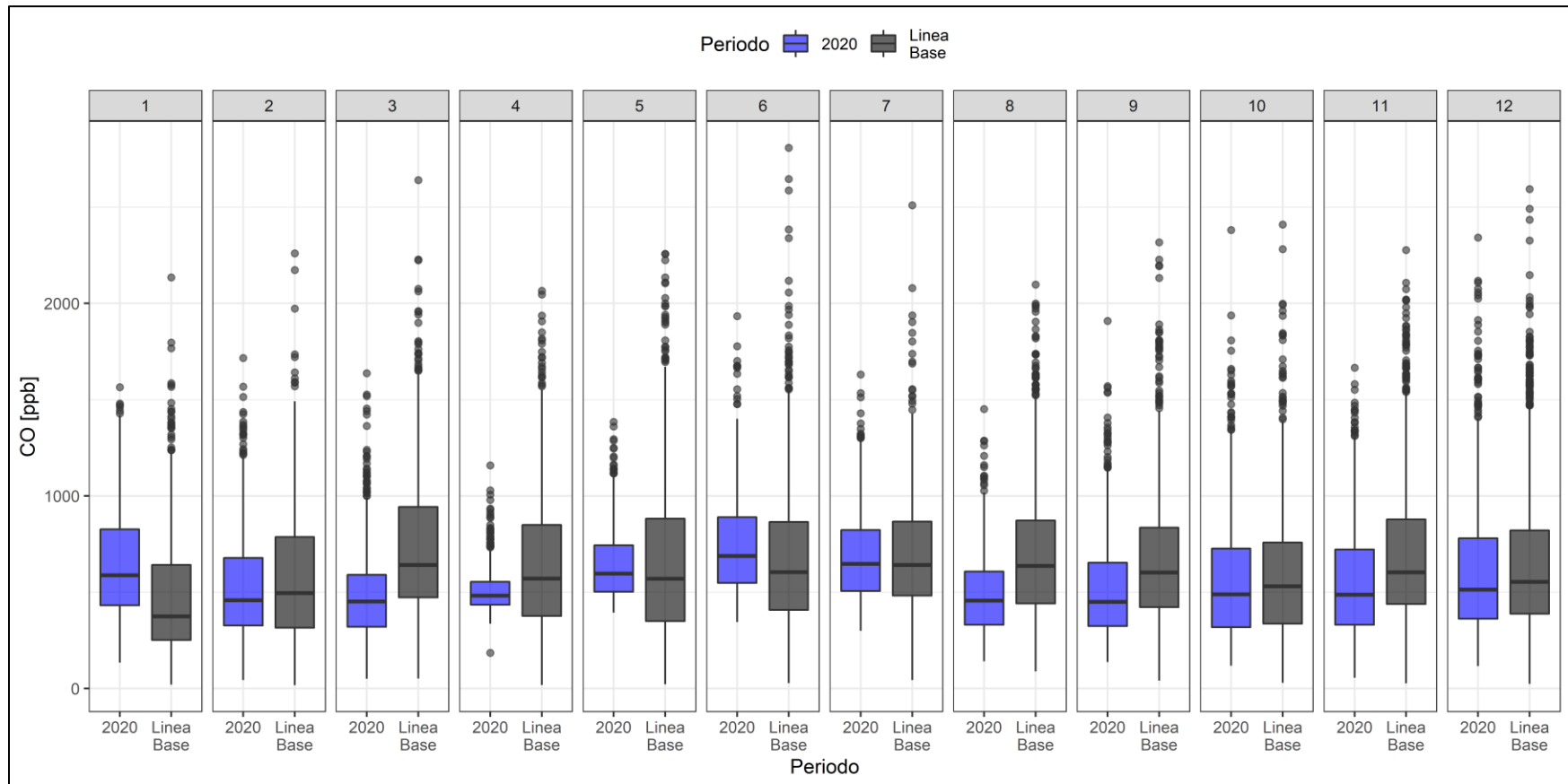


Figura 30. Diagrama de cajas mensual comparativo para concentraciones de CO entre el Año atípico 2020 de cuarentena y la línea base de concentraciones (años 2018 y 2019)

De otra parte, la Figura 31 presenta el diagrama de cajas mensual de las concentraciones de O_3 y la comparación entre el año atípico 2020 y las concentraciones de línea base en la ciudad, es decir, las concentraciones en los años previos de 2018 y 2019. Para este contaminante, se observó un comportamiento similar en los valores promedio para los meses del año 2020 con respecto a la línea base, a excepción de los meses relacionados a la cuarentena estricta, primera y segunda etapa (marzo, abril y mayo), este incremento en las concentraciones es atribuido a la disminución de emisiones de contaminantes primarios durante este periodo, lo cual es interpretado como una reducción de emisiones de precursores como el NO_x debido al bajo tráfico vehicular, lo cual a su vez altera las reacciones fotoquímicas en el ambiente desplazando el equilibrio de las reacciones hacia una mayor generación de O_3 , un consumo de COVs y una producción neta de NO_2 (Sengel y otros, 2020).

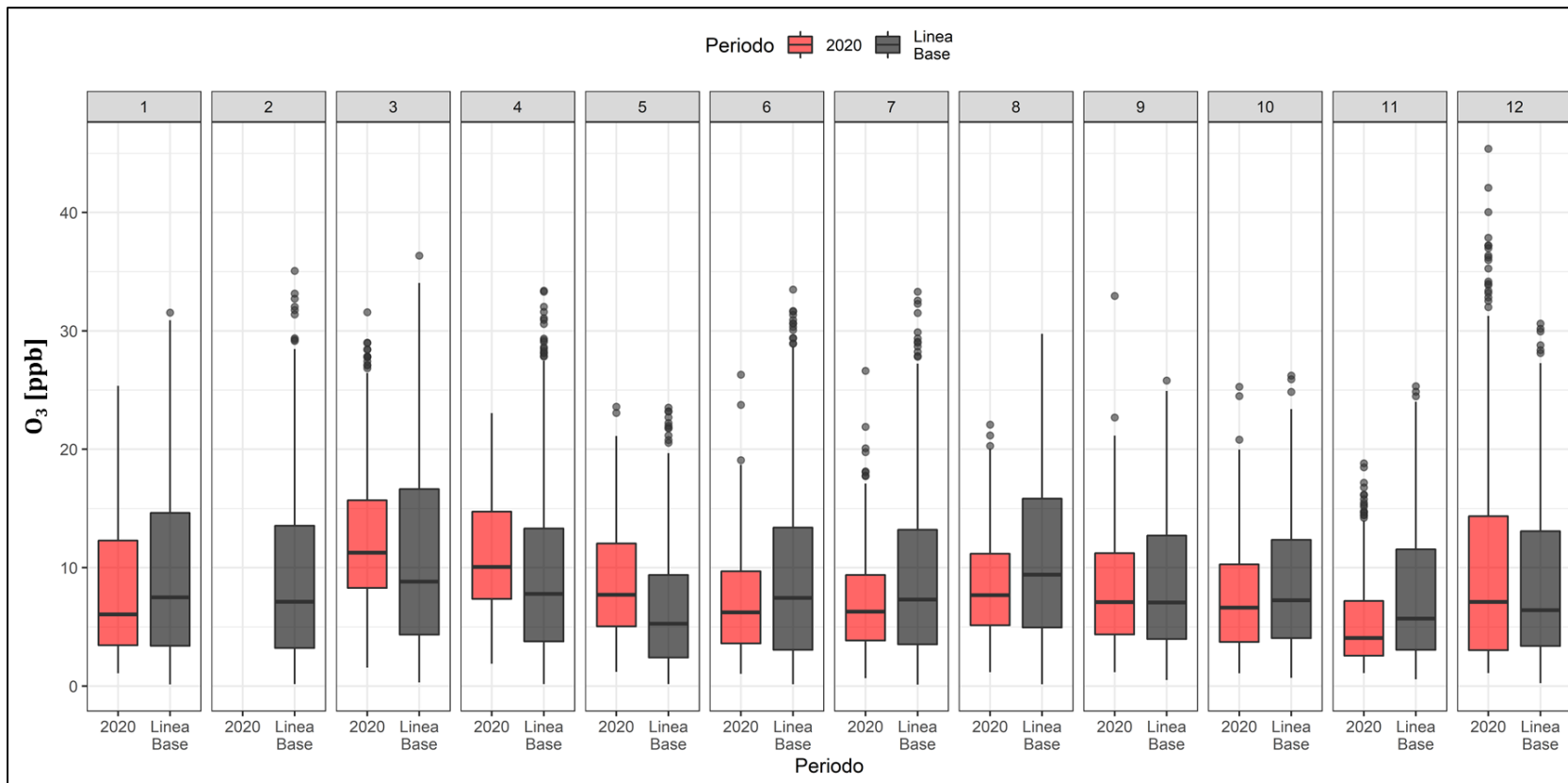


Figura 31. Diagrama de cajas mensual comparativo para concentraciones de O_3 entre el Año atípico 2020 de cuarentena y la línea base de concentraciones (años 2018 y 2019)

La Figura 32 presenta el diagrama de barras mensual de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático de la estación Gobernación, así como la comparación entre el año atípico 2020 y las concentraciones de línea base en la ciudad, es decir, las concentraciones del 2019. Se observa que, para todos los meses existió una reducción en los valores promedio de estos contaminantes, presentándose reducciones hasta del 42% en los promedios mensuales de ambos contaminantes, fenómeno atribuible a la ausencia casi total de fuentes de emisión, vehículos de transporte público, debido al cese total de actividades y al cierre de vías próximas a la estación, que se encuentra ubicada en la carrera 21 con calle 23.

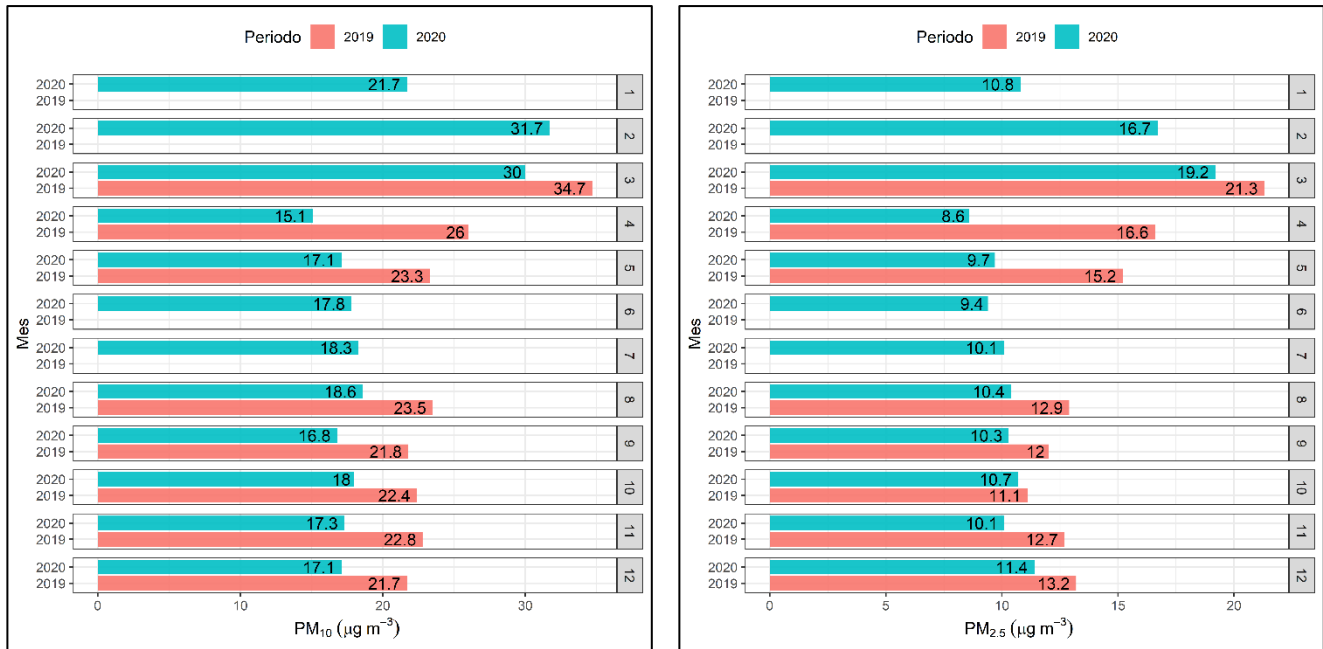


Figura 32. Diagrama de barras mensual comparativo para concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático de la estación Liceo, entre el Año atípico 2020 de cuarentena y la línea base de concentraciones (año 2019)

La Figura 33 presenta el diagrama de barras mensual de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático de la estación Liceo, así como la comparación entre el año atípico 2020 y las concentraciones de línea base en la ciudad, es decir, las concentraciones del 2019. Se observa que, para el mes de marzo las concentraciones registradas tanto de PM₁₀ y PM_{2.5} fueron mayores durante el año 2020, un patrón similar a lo observado en las estaciones de PM₁₀ – Manuales. Para los demás meses del año, caracterizados por restricciones de movilidad, existió una reducción en los valores promedio de estos contaminantes, presentándose reducciones hasta del 85% en septiembre para PM_{2.5}, fenómeno atribuible a la ausencia casi total de fuentes de emisión, vehículos de transporte público, debido al cese total de actividades y al cierre de vías próximas a la estación.

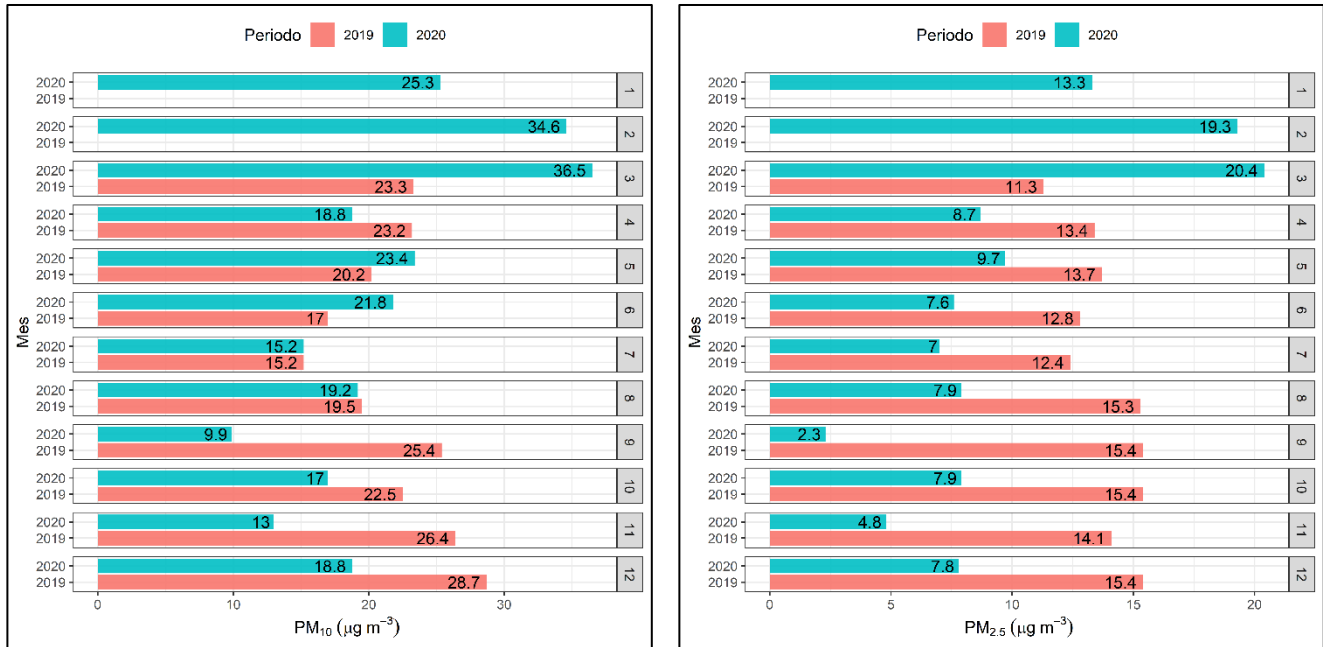


Figura 33. Diagrama de barras mensual comparativo para concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático de la estación Gobernación, entre el Año atípico 2020 de cuarentena y la línea base de concentraciones (año 2019)

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 – open source 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>