



# Boletín Ambiental

Estación Liceo  
Fuente: propia

**Instituto de Estudios Ambientales -IDEA- Sede Manizales**

**188** | febrero de  
2022

**Diez años de monitoreo de calidad  
del aire en Manizales**

**IDEA**  
Instituto de Estudios Ambientales

## **Diez años de monitoreo de calidad del aire en Manizales**

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

Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental -GTAIHA-

Instituto de Estudios Ambientales -IDEA-  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

\*Subdirección de Evaluación y Seguimiento Ambiental -Corpocaldas-

Para descargar el boletín:

▶ [Http://idea.manizales.unal.edu.co/boletin-ambiental.html](http://idea.manizales.unal.edu.co/boletin-ambiental.html)

## 1. El Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) de Manizales

Según la Organización Mundial de la Salud (WHO, por su sigla en inglés), el aire limpio es un requisito básico para la salud y el bienestar humano; sin embargo, la contaminación del aire se constituye actualmente en uno de los principales riesgos medioambientales, en especial, en centros urbanos (WHO, 2018). Cifras de la WHO (2018) indican que nueve de cada diez personas respiran aire contaminado. Entendiéndose este último como la alteración causada por la presencia de gases en la atmósfera, o partículas sólidas o líquidas en suspensión, en proporciones distintas a las naturales que pueden poner en peligro la salud del hombre, el bienestar de las plantas y animales, atacar diferentes materiales, reducir la visibilidad o producir olores nocivos (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM-, 2006).

El rápido crecimiento poblacional en los últimos años conlleva a una tendencia hacia el incremento en las dinámicas de consumo energético. Algunas de las principales actividades generadoras de mayores emisiones contaminantes son de tipo industrial y vehicular. Como se muestra en la Figura 1, en la contaminación del aire intervienen tres componentes claves: las fuentes emisoras, la atmósfera y los receptores. En la atmósfera (especialmente a nivel de la primera capa conocida como troposfera), los contaminantes se ven afectados por fenómenos meteorológicos en relación con variables como radiación solar, precipitación, dirección y velocidad del viento, entre otras, que favorecen o no las reacciones químicas, deposición, dispersión y transporte de los contaminantes del aire.



Figura 1. Dinámica de la contaminación del aire  
Fuente: propia

Los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) son un conjunto de equipos de monitoreo de contaminantes atmosféricos que se encuentran instalados en sitios de interés con un propósito determinado (Subsistema de Información sobre Calidad del Aire -SISAIRE-, 2018). Las mediciones obtenidas permiten la toma de decisiones generando estrategias de control para la adecuada gestión de la calidad del aire. Entre los contaminantes de interés en zonas urbanas, por su afectación a la salud humana, se destaca el material particulado (PM, por su sigla en inglés), el cual puede ser clasificado de acuerdo con el diámetro de las partículas. Las fracciones más comunes monitoreadas en sistemas de vigilancia son: (1) Partículas suspendidas totales (PST), (2) Partículas con diámetro menor o igual a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ) y (3) Partículas con diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros ( $PM_{2.5}$ ), conocidas también como fracción fina respirable. Además, existen otros contaminantes de importancia, por ejemplo, los contaminantes gaseosos como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y ozono troposférico ( $O_3$ ), los cuales generan impactos negativos sobre el recurso aire en ecosistemas naturales y centros urbanos (Unal -Corpocaldas, 2020; OMS, 2018).

En este sentido, se inició en la ciudad de Manizales, desde el año 2010, el monitoreo de la calidad del aire, enfocado en el seguimiento de  $PM_{10}$ . En la actualidad, se cuenta con un SVCA compuesto por seis estaciones distribuidas en diferentes puntos de la ciudad, cuyo objetivo es cuantificar la concentración en aire ambiente de contaminantes criterio que han sido descargados a la atmósfera. Las emisiones de contaminantes provienen, en especial, de fuentes antropogénicas como las vehiculares e industriales, como también, de fuentes naturales, por ejemplo, las emisiones generadas por el volcán Nevado del Ruiz (Unal-Corporcaldas, 2019). En la Figura 2 se muestran los equipos que se encuentran en la estación Gobernación, donde se realiza la medición de material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) y gases ( $CO$ ,  $NO_x$ ,  $O_3$ ). Las mediciones obtenidas son de acceso público y se pueden consultar en los portales del SISAIRE – IDEAM y el Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC); en este último, también se incluyen boletines informativos del SVCA de Manizales publicados de forma periódica.

El objetivo de este boletín es presentar la evolución del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire de Manizales, describiendo las estaciones de monitoreo que lo conforman y algunos resultados generales obtenidos en el seguimiento de los contaminantes atmosféricos que son monitoreados. En este momento, la red de calidad del aire es operada por el Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GTAIHA) de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, mediante un convenio interadministrativo suscrito con la autoridad ambiental (Corporcaldas).



Figura 2. Estación de calidad del aire  
Gobernación

Ubicación Centro Histórico de Manizales  
Fuente: propia

## 1.1. Evolución del SVCA en Manizales

El SVCA de Manizales inició en 1997 la medición de contaminantes en tres estaciones (Gobernación, Milán y Maltería) con el monitoreo de PST y  $PM_{10}$ . La estación Maltería finalizó su funcionamiento en el año 2018 debido a que la normativa colombiana retiró el PST de la lista de contaminantes criterio y sus respectivos límites normativos para concentraciones en aire ambiente. En la Figura 3 se muestra la evolución del SVCA hasta el día de hoy; se destaca cómo se han incluido diferentes equipos y nuevas estaciones.

Hoy, el SVCA está conformado por nueve (9) equipos para el monitoreo de material particulado  $PM_{10}$  y

$PM_{2.5}$ , de los cuales, seis (6) equipos son de tipo manual para  $PM_{10}$ , un (1) equipo manual de  $PM_{2.5}$  y dos (2) equipos automáticos (nefelómetros) que miden simultáneamente  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Además, el SVCA de Manizales cuenta con una (1) estación automática para el monitoreo de los gases ozono troposférico ( $O_3$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y monóxido de carbono (CO). La Figura 4 muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo sobre el área urbana de la ciudad.

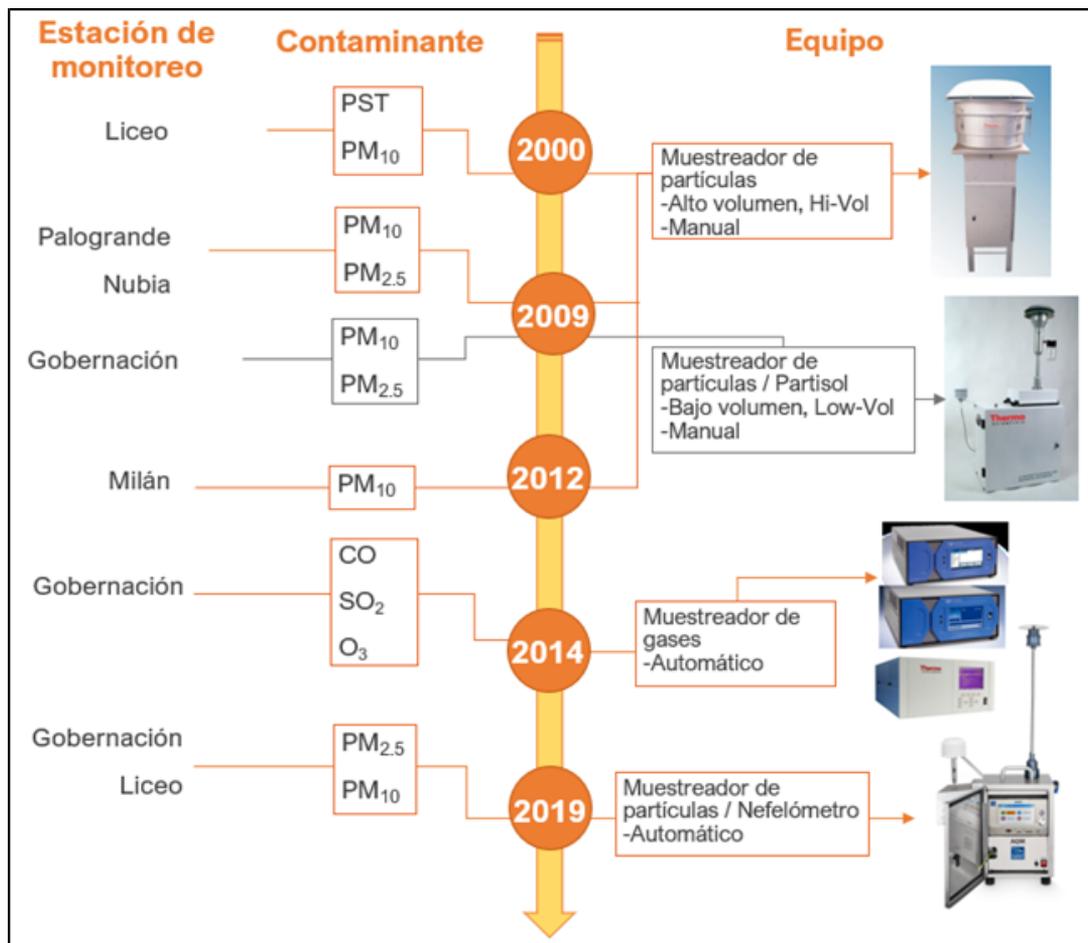


Figura 3. Cronología del SVCA de Manizales

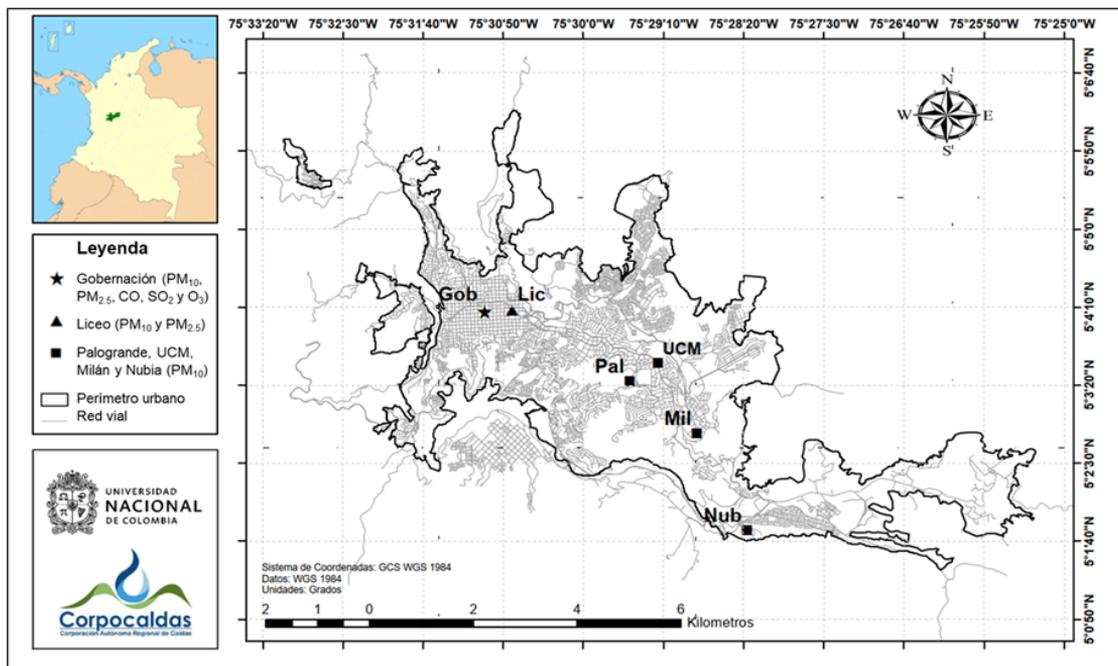


Figura 4. Mapa con ubicación de las estaciones de calidad del aire pertenecientes al SVCA de Manizales para el año 2022

Cada estación se encuentra en un lugar de interés y fue instalada con un propósito específico. En la Tabla 1 se presentan las características principales de cada una y las fuentes de emisión predominantes en el área de influencia del SVCA de Manizales. Las fuentes de emisión están relacionadas con las actividades desarrolladas en la zona circundante; además, es importante la caracterización del tipo de sector al que pertenezcan en la ciudad (residencial, comercial, industrial, entre otros). A pesar de que la ciudad tiene un área urbana pequeña (54 km<sup>2</sup> aproximadamente), se caracteriza por tener una topografía compleja, por lo cual, las estaciones presentan diferencias de altura y condiciones meteorológicas específicas. A continuación, se describe cada estación y se muestran algunos registros fotográficos.

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

Estación (Abreviatura)	Características y fuentes de contaminantes*	Equipos	Propietario	Latitud / Longitud	Altitud ms.n.m.
Gobernación (Gob)	CU, SC – MTV, PAI	PM <sub>10</sub> – Manual <sup>a</sup>	Corpocaldas	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2155
		PM <sub>2.5</sub> - Manual <sup>a</sup>	Corpocaldas		
		SO <sub>2</sub> - Automático	UN		
		O <sub>3</sub> - Automático	UN		
		CO - Automático	Corpocaldas		
		PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> - Automático <sup>b</sup>	Corpocaldas		
Palogrande (Pal)	ZC, SR – BTV, SAI	PM <sub>10</sub> - Manual <sup>c</sup>	UN	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
Nubia (Nub)	ZSE, SR – BTV, SAI	PM <sub>10</sub> - Manual <sup>c</sup>	UN	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo (Lic)	CU, SC – ATV, PAI	PM <sub>10</sub> - Manual <sup>c</sup>	Corpocaldas	N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58"	2156
		PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> - Automático <sup>b</sup>	Corpocaldas		
Milán (Mil)	ZC, SR – AAI, MTV	PM <sub>10</sub> - Manual <sup>c</sup>	Corpocaldas	N 5° 2' 48.5" W 75° 28' 48.68"	2188
Católica (UCM)	CU, SC – ATV, SAI	PM <sub>10</sub> - Manual <sup>c</sup>	Corpocaldas - UCM	N 5° 3'34.13" W 75°29'13.63"	2038

a - Equipo de bajo volumen (Low-Vol)

b - Equipo automático – nefelómetro (Técnica fotométrica)

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

\*Características:

SR: Sector residencial

SC: Sector comercial

ZSE: Zona sureste

ZC: Zona central

CU: Centro urbano

ZI: Zona industrial

\*Fuentes de contaminación circundante:

ATV: Alto tráfico vehicular

MTV: Moderado tráfico vehicular

BTV: Bajo tráfico vehicular

MAI: Moderada actividad industrial

AAI: Alta actividad industrial

PAI: Pequeña actividad industrial

SAI: Sin actividad industrial

AZI: Adyacente a zona industrial

Las estaciones Gobernación (Figura 5a) y Liceo (Figura 5b) están ubicadas en el edificio La Licorera-Gobernación y en la Institución Educativa Liceo Isabel La Católica respectivamente. Ambas estaciones tienen en común los tipos de fuente de emisión. Por su ubicación sobre el centro urbano y principal sector comercial de la ciudad, las emisiones están influenciadas por un tráfico vehicular medio y alto correspondientemente, además, por una baja actividad industrial.



(a) Estación Gobernación



(b) Estación Liceo

Figura 5. Estaciones Gobernación y Liceo ubicadas en el Centro Histórico de la ciudad  
Fuente: propia

Las estaciones Católica (Figura 6a) y Palogrande (Figura 6b) están situadas en la Universidad Católica de Manizales y en la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales en el campus Palogrande, ambas en el centro geográfico de la ciudad en un sector residencial. Católica está influenciada por un tráfico vehicular alto y Palogrande por un tráfico vehicular medio.



(a) Estación Católica



(b) Estación Palogrande

Figura 6. Estaciones Católica y Palogrande ubicadas en el centro geográfico

Fuente: propia

La estación Milán (Figura 7a) se encuentra localizada hacia el nororiente de la ciudad en la empresa Invermec S.A. y la estación Nubia (Figura 7b) al sureste de la ciudad en la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales campus La Nubia. Ambas estaciones están influenciadas por el sector residencial e industrial. Milán tiene predominio de tráfico vehicular liviano y pesado primordialmente, el cual circunda la empresa donde está ubicada, mientras que Nubia tiene asociado bajo tráfico vehicular.



(a) Estación Milán

(b) Estación Nubia

Figura 7. Estaciones Milán y Nubia ubicadas al oriente y sureste de la ciudad  
Fuente: propia

## 1.2. Sistema de monitoreo activo

El seguimiento de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se realiza mediante técnicas de monitoreo activo; en el caso de los equipos manuales se obtienen registros promedio diario de la concentración en aire ambiente de dichos contaminantes (muestras de 24 horas cada tres días). Cabe mencionar que los resultados son obtenidos una vez se realiza el análisis gravimétrico en el laboratorio, que consiste en el pesaje de los filtros antes y después del monitoreo bajo condiciones controladas de humedad y temperatura. Posteriormente, se realiza el respectivo tratamiento y análisis de los datos de concentración obtenidos.

Por otra parte, tanto los equipos automáticos de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  como el seguimiento de gases ( $O_3$ ,  $SO_2$  y  $CO$ ), permiten la obtención de registros cincominutales a partir de los cuales se obtienen valores promedio horario (media aritmética) y registros promedio octohorario (media móvil a partir de registros horarios). Todos los registros obtenidos de partículas y gases en aire ambiente son comparados con los límites máximos permisibles definidos en la normativa colombiana; Resolución 2254 de 2017 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS-, 2017).

Cada equipo de monitoreo opera bajo un método de ensayo específico que admite cuantificar las concentraciones según cada tipo de contaminante. De manera general, todos estos equipos tienen una bomba de succión de aire y un medidor de volumen (con conexión eléctrica) que permite conocer el volumen de aire que ingresa al equipo, y así obtener la concentración de contaminante en términos de masa del contaminante por volumen de aire. Para ver una descripción de los equipos y el principio de funcionamiento básico de cada uno, se recomienda consultar el Boletín Ambiental 149 – IDEA ([https://idea.manizales.unal.edu.co/publicaciones/boletines\\_ambientales/boletin149.pdf](https://idea.manizales.unal.edu.co/publicaciones/boletines_ambientales/boletin149.pdf)).

Con el fin de garantizar el buen funcionamiento del SVCA, su operación se lleva a cabo por personal calificado y se realizan de forma rutinaria programas de mantenimiento preventivo y correctivo, así como el soporte de un sistema de administración de información que permite una correcta validación de los datos.

## 1.3. Procesamiento y publicación de datos

Adicional a la cuantificación de concentraciones en aire ambiente de contaminantes del aire por medio de los equipos de monitoreo hay un conjunto de actividades como el análisis, procesamiento y publicación de datos periódicos. Esta información es publicada a través de indicadores y estadísticos descriptivos en el CDIAC y el SISAIRE – IDEAM. El CDIAC, por medio de la página web <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/indicadores/public/searchAirMenu> pone a disposición de la comunidad información meteorológica, de calidad del aire (datos, boletines informativos y material educativo), y de otras redes (como sismos y aguas subterráneas) de la ciudad de Manizales y el departamento de Caldas.

Lo anterior permite a las entidades públicas, privadas y población en general acceder a la información de manera oportuna y tener conocimiento de la calidad del aire en los diferentes sectores, y si es el caso, -donde se superen los límites normativos- tener bases para establecer estrategias de control y prevención que contribuyan con esta gestión.

## 2. Algunos resultados del monitoreo histórico de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ en Manizales

### 2.1. Equipos manuales: análisis de promedios anuales, mensuales y por día de la semana

La Tabla 2 presenta los estadísticos descriptivos anuales para las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  – Manuales obtenidas en el SVCA de Manizales desde su creación a mediados del 2010. Se muestra el promedio aritmético, concentración mínima diaria, concentración máxima diaria y el porcentaje total de datos obtenidos anualmente para cada estación. Los cálculos y gráficos fueron realizados con el software R y su librería de análisis para datos de calidad del aire “Openair”, así como el uso de las bases de datos en Excel (Carslaw y Ropkins, 2015).

Los resultados muestran cómo a lo largo de los años la red ha mejorado su operatividad hasta llegar a porcentajes de datos anuales capturados

por encima del 80 %. De acuerdo con el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), el porcentaje de datos válidos permitido anualmente corresponde a un 75 %, indicando la relevancia por número de datos en los resultados (MAVDT, 2010). En general, de manera histórica, las estaciones Liceo y Milán han registrado las concentraciones promedio más altas de  $PM_{10}$  en la ciudad con valores promedio totales de 36 y 32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente; seguidos por Gobernación y Nubia con 24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Palogrande con 23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y, por último, la más reciente de las estaciones, Católica con 19  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Además, se identificó que Milán presentó el mayor de los registros históricos de concentración diaria de  $PM_{10}$  con un promedio diario de 88  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante el 2016. De otra parte, la estación Gobernación presentó el menor de los registros históricos con un valor de 4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante el 2019.

Se ha identificado que las estaciones Milán, Liceo y en menor medida Gobernación y Católica se encuentran influenciadas por tráfico vehicular (representado por un flujo importante de buses y camiones de carga, especialmente, en Liceo y Milán). De acuerdo con la actualización del inventario de emisiones de la ciudad año base 2017, estas categorías tienen mucha 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 del 56 % (351.2 ton/año) y 24 % (151.9 ton/año) de la totalidad de emisiones de  $PM_{10}$  (Unal y Corpocaldas, 2019). De otra parte, las áreas de influencia de las estaciones Nubia y Palogrande se encuentran relacionadas con la actividad de los campus universitarios, los cuales tendieron a disminuir después de la pandemia, reduciendo los niveles de concentración de estas estaciones durante los últimos años.

En lo referente al monitoreo de  $PM_{2.5}$  de la estación Gobernación, se registró un valor promedio en todo el periodo de análisis de 16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El máximo de los registros diarios fue obtenido durante el 2012 con un valor de 58  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; no obstante, es importante mencionar, como se ha observado, una reducción gradual en los promedios anuales desde los inicios de instalación de este equipo, y que, a pesar de la ausencia de datos del 2016 y 2017, cuando se retomó la medición desde el 2018, el porcentaje de datos ha mejorado de manera sustancial, generando un mayor grado de confianza en los registros obtenidos por el SVCA.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio anuales de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> – Manuales (µg/m<sup>3</sup>)

Año*	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Total
<b>Gobernación PM<sub>10</sub></b>													
Promedio	24	21	31	27	26	28	23	27	22	21	21	22	24
Min. Diario	6	7	6	15	9	10	8	12	6	4	6	8	4
Max. Diario	47	37	69	44	43	75	75	49	41	37	42	47	75
% Datos obtenidos	78%	89%	94%	64%	86%	76%	95%	72%	99%	100%	79%	100%	86%
<b>Palagrande PM<sub>10</sub></b>													
Promedio	24	26	29	25	23	30	23	21	19	20	22	18	23
Min. Diario	10	10	12	15	12	16	12	10	7	8	6	10	6
Max. Diario	37	41	46	38	49	45	34	40	34	39	41	30	49
% Datos obtenidos	42%	50%	35%	32%	44%	60%	33%	73%	97%	97%	30%	84%	56%
<b>Nubia PM<sub>10</sub></b>													
Promedio	24	26	31	30	21	29	23	22	20	20	22	18	24
Min. Diario	12	15	20	25	10	12	11	7	9	7	9	8	7
Max. Diario	45	42	52	33	45	55	40	40	45	35	37	32	55
% Datos obtenidos	44%	43%	18%	3%	39%	64%	41%	76%	97%	100%	28%	84%	53%
<b>Milán PM<sub>10</sub></b>													
Promedio	--	--	34	38	31	34	31	31	27	32	31	30	32
Min. Diario	--	--	21	16	9	10	14	13	11	11	11	17	9
Max. Diario	--	--	59	65	58	54	88	54	50	68	53	45	88
% Datos obtenidos	--	--	8%	69%	76%	60%	68%	80%	98%	98%	62%	88%	71%
<b>Liceo PM<sub>10</sub></b>													
Promedio	43	43	45	45	37	40	35	35	22	31	25	26	36
Min. Diario	24	20	18	24	13	11	13	16	6	11	7	11	1
Max. Diario	62	68	69	74	67	66	77	59	41	55	49	41	77
% Datos obtenidos	58%	71%	72%	70%	68%	61%	68%	81%	93%	80%	69%	93%	74%
<b>Gobernación PM<sub>2.5</sub></b>													
Promedio	16	15	20	18	18	19	-	-	14	15	13	15	16
Min. Diario	5	3	1	9	3	5	-	-	5	2	2	4	1
Max. Diario	32	50	58	31	37	40	-	-	30	28	26	30	58
% Datos obtenidos	86%	66%	93%	60%	87%	33%	-	-	98%	100%	79%	100%	80%
<b>Católica PM<sub>10</sub></b>													
Promedio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19	19
Min. Diario	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	9
Max. Diario	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	30
% Datos obtenidos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58%	58%

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

Adicionalmente, se presentan las figuras de evolución temporal de concentraciones anuales obtenidas para  $PM_{10}$  (Figura 8) y  $PM_{2.5}$  (Figura 9). Se destaca que en ninguna de las estaciones de monitoreo se ha superado el límite máximo anual para material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) establecido en la Resolución 2254 de 2017 con valores de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{10}$  y  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{2.5}$  (MADS, 2017). Finalmente, es importante destacar que los promedios anuales obtenidos en Manizales para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en todas las estaciones, han superado las recomendaciones recientes en términos de promedio anual propuestas por WHO de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{10}$  y  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{2.5}$  (OMS, 2021).

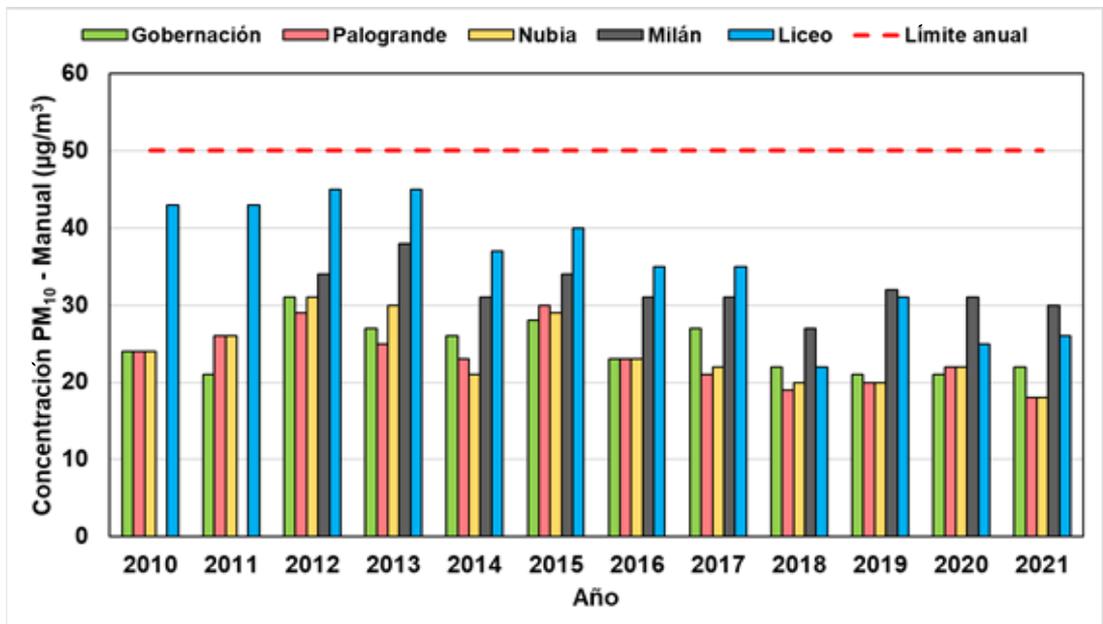


Figura 8. Evolución temporal de concentraciones anuales de  $PM_{10}$  - Manuales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio anual de  $PM_{10}$  establecido en la Resolución 2254 de 2017:  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

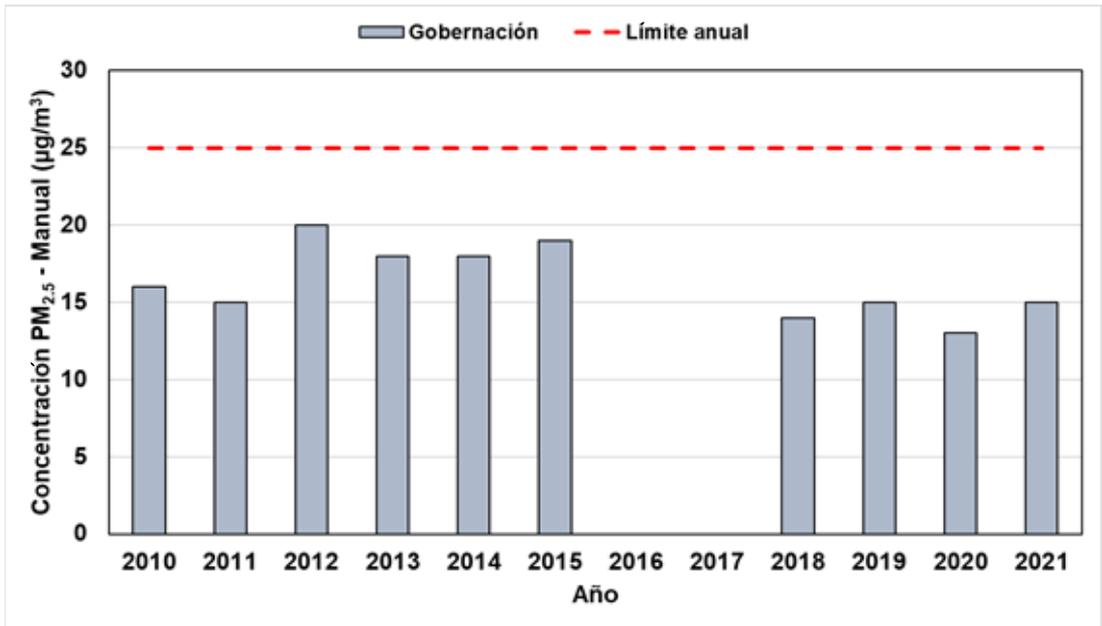


Figura 9. Evolución temporal de concentraciones anuales de PM<sub>2.5</sub> - Manual  
 La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM<sub>2.5</sub>  
 establecido en la Resolución 2254 de 2017: 25 µg/m<sup>3</sup>

Finalmente, en los diferentes boletines anuales generados por el SVCA se ha identificado que la variación por días de la semana de concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> - Manuales tienden a disminuir los días domingo, especialmente, en estaciones con influencia de tráfico vehicular. Este fenómeno es más evidente en las estaciones Liceo y Católica, debido a su ubicación próxima a una de las avenidas de mayor tráfico en la ciudad, la Avenida Santander - carrera 23. Para más información sobre este comportamiento se recomienda revisar los diferentes boletines disponibles en la sección de "Publicaciones - Boletines de Calidad del Aire (CA)" de la página del CDIAC: <https://cdiac.manizales.unal.edu.co/publicaciones.php>.

## 2.2. Equipos automáticos: análisis de promedios anuales y horarios

La Tabla 3 presenta los estadísticos descriptivos comparativos de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ -Automáticos en las estaciones Gobernación y Liceo. Desde su instalación en las estaciones que ya poseían métodos manuales, se logró la identificación de patrones de comportamiento de estos contaminantes en la ciudad; además, se mejoró la cobertura en la captura de datos diarios de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . En general, se ha observado una buena respuesta en los equipos automáticos con respecto a su homólogo manual, presentando similitudes en los datos por encima del 60 %.

En términos generales, las concentraciones promedio (medianas<sup>1</sup>) de Gobernación para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se encontraron alrededor de los  $20.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Por otra parte, las concentraciones promedio medianas de Liceo para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se encontraron alrededor de los  $19.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $10.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de forma respectiva.

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

Tabla 3. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio anuales de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> – Automático (µg/m<sup>3</sup>)

Año	2019	2020	2021	Total
<b>Gobernación PM<sub>10</sub></b>				
Mediana	22.1	18.8	20.9	<b>20.6</b>
Min. Diario	7.8	4.6	5.6	<b>4.6</b>
Max. Diario	50.2	47.8	47.7	<b>50.2</b>
% Datos obtenidos	44 %	94 %	97 %	<b>78 %</b>
<b>Liceo PM<sub>10</sub></b>				
Mediana	21.9	19.1	18.6	<b>19.9</b>
Min. Diario	9.3	4.1	4	<b>4.0</b>
Max. Diario	44.5	63	55.7	<b>63</b>
% Datos obtenidos	64 %	96 %	96 %	<b>85 %</b>
<b>Gobernación PM<sub>2.5</sub></b>				
Mediana	12.5	11	12.4	<b>12.0</b>
Min. Diario	3.7	2.5	3.8	<b>2.5</b>
Max. Diario	37.9	30.7	22.1	<b>37.9</b>
% Datos obtenidos	44 %	92 %	97 %	<b>77 %</b>
<b>Liceo PM<sub>2.5</sub></b>				
Mediana	13.8	8.4	10.5	<b>10.9</b>
Min. Diario	4.8	1.1	2.8	<b>1.1</b>
Max. Diario	27.8	34.2	24.3	<b>34.2</b>
% Datos obtenidos	61 %	93 %	96 %	<b>83 %</b>

En boletines de divulgación generados por el SVCA, se ha identificado que la evolución promedio horaria de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  – Automáticas en la ciudad son caracterizadas por presentar máximos de concentración horaria en las horas de alto flujo vehicular (entre las 6 a.m. y las 8 a.m. y las 6 p.m. y las 8 p.m. aproximadamente), como se muestra en la Figura 10. Lo anterior coincide con lo determinado en el 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 del inicio de la mañana (entre las 6.30 a.m. y 7.30 a.m.); la del medio día (de 11.45 a.m. a 12:45 p.m. y de 1.30 p.m. a 2.30 p.m.) y al final de la tarde (de 05.30 p.m. a 6.30 p.m.).

Para más información acerca de los patrones en los datos, registros máximos, registros atípicos, posibles influencias de gases volcánicos, efectos de polvo del Sahara, índices de calidad del aire (ICA), entre otros comportamientos típicos de estos contaminantes en la ciudad, se recomienda revisar los diferentes boletines disponibles en la sección de “Publicaciones – Boletines de Calidad del Aire (CA)” de la página del CDIAC: <https://cdiac.manizales.unal.edu.co/publicaciones.php>.

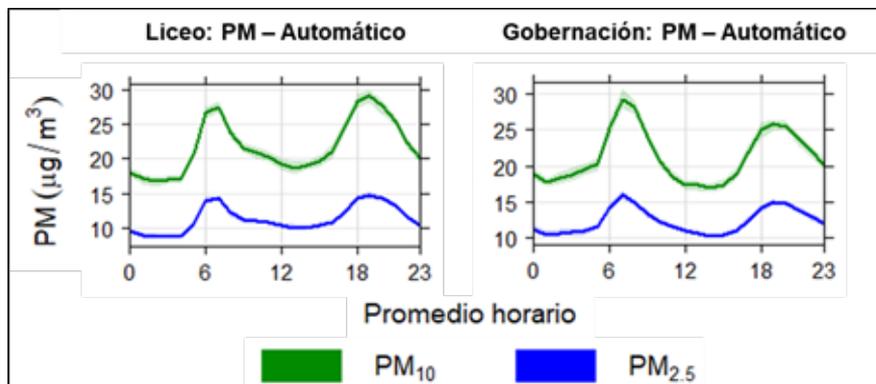


Figura 10. Promedio horario de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  – Automáticos Estaciones Liceo (izquierda) y Gobernación (derecha)

## 3. Monitoreo de gases: monóxido de carbono (CO), ozono troposférico (O<sub>3</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

La Tabla 4 presenta los estadísticos descriptivos para las concentraciones promedio anuales de CO, O<sub>3</sub> y SO<sub>2</sub> reportadas por el SVCA de Manizales. Se observan concentraciones históricas con valores promedio medianos alrededor de 690.4 µg/m<sup>3</sup> para CO, 15.7 µg/m<sup>3</sup> para O<sub>3</sub> y 4.7 µg/m<sup>3</sup> para SO<sub>2</sub>. Al comparar los registros del 2021 de todos los contaminantes con respecto a los años anteriores, se observan aumentos de hasta un 40 % en los datos, valores probablemente relacionados con las dinámicas de emisión pospandemia de estos contaminantes, los cuales han sido identificados en los reportes del SVCA como altamente dependientes de las fuentes de emisión, en donde, por ejemplo, el CO y SO<sub>2</sub> son mayoritariamente dominados por la combustión de gasolina y diésel provenientes de motocicletas, vehículos particulares y buses (Unal – Corpocaldas, 2020; Unal - Corpocaldas, 2019). De forma similar, el O<sub>3</sub> se relaciona con la presencia de vehículos en inmediaciones de la estación, ya que estos generan contaminantes como los óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub> que posteriormente inducen la generación de este contaminante secundario.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos anuales para concentraciones de CO, O<sub>3</sub> y SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>)

Año	2018	2019	2020	2021	Total
<b>Monóxido de carbono</b>					
Mediana	539.7	736.2	598.5	887.2	690.4
Min. horario	3.4	19.48	49.7	151.1	3.4
Max. horario	3201.9	3200	2714.2	3819	3819
% Datos obtenidos	63 %	97 %	99 %	100 %	90 %
<b>Ozono troposférico</b>					
Mediana	13.05	14.8	14.2	20.8	15.7
Min. horario	0.1	0.1	1.3	0.4	0.1
Max. horario	59.9	71.2	64.6	92.2	92.2
% Datos obtenidos	83 %	80 %	85 %	93 %	85 %
<b>Dióxido de azufre SO<sub>2</sub></b>					
Mediana	--	4.4	2.3	6.2	4.3
Min. horario	--	0.6	0.1	2.1	0.1
Max. horario	--	14.5	38.8	28.1	38.8
% Datos obtenidos	--	43 %	55 %	88 %	62 %

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

De manera complementaria, las Figuras 11, 12 y 13 presentan la evolución de concentraciones octohorarias de CO y O<sub>3</sub>, así como las concentraciones horarias de SO<sub>2</sub>. Se resalta que las concentraciones de estos contaminantes se encontraron por debajo de los límites normativos de cada contaminante, establecidos en la Resolución 2254 de 2017 con valores de 5000 µg/m<sup>3</sup> para promedio octohorario de CO, 100 µg/m<sup>3</sup> para promedio octohorario de O<sub>3</sub> y 100 µg/m<sup>3</sup> para promedio horario de SO<sub>2</sub>.

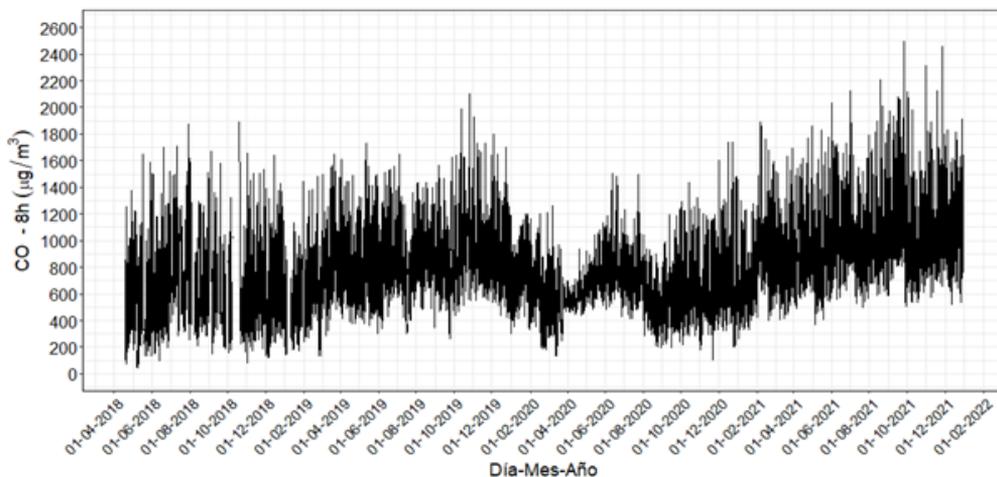


Figura 11. Evolución temporal de concentraciones promedio octohoraria de CO  
El nivel máximo permisible octohorario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a 5000 µg/m<sup>3</sup> no fue superado en ningún día

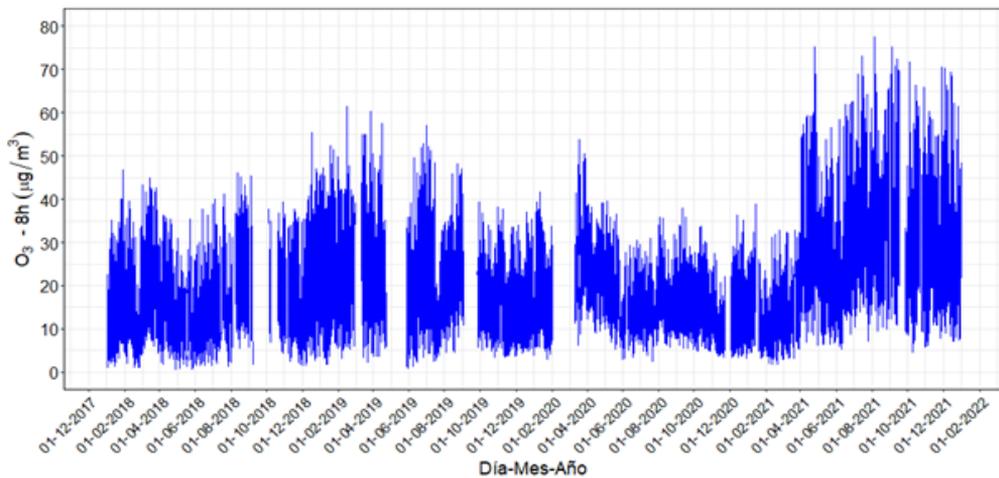


Figura 12. Evolución temporal de concentraciones promedio octohorario de O<sub>3</sub>. El nivel máximo permisible octohorario de la Res. 2254 de 2017 equivalente a 100 µg/m<sup>3</sup>, no fue superado

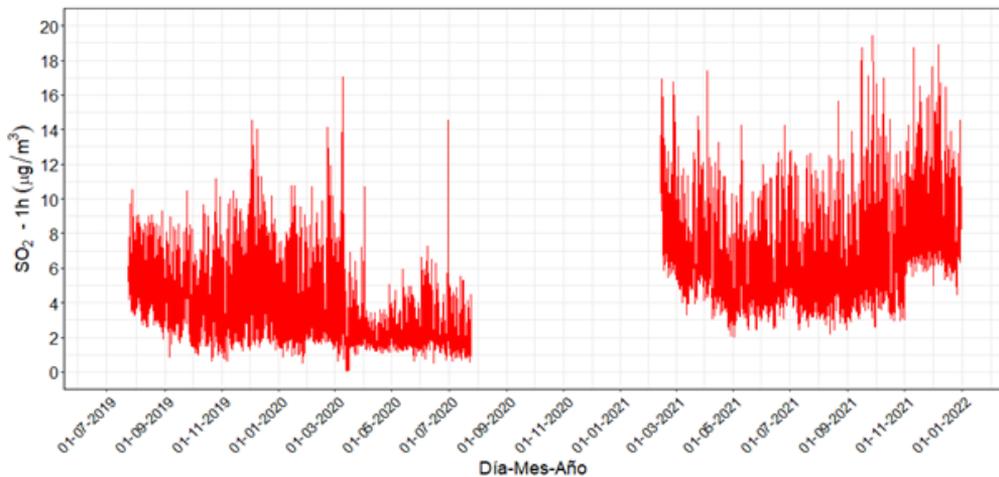


Figura 13. Evolución temporal de concentraciones promedio horario de SO<sub>2</sub>. El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a 100 µg/m<sup>3</sup> no fue superado en ningún día

En los diferentes boletines anuales generados por el SVCA, se ha identificado que los contaminantes  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{CO}$  poseen un comportamiento similar a lo largo del día, como muestra la Figura 14, presentando picos de máxima concentración en las mismas franjas horarias caracterizadas como horas de alto tráfico vehicular; comportamiento asociado directamente con las fuentes de emisión cercanas a la estación. Por su parte, el  $\text{O}_3$  presenta un comportamiento con máximos alrededor del mediodía; horas en que se presenta la mayor radiación solar, fenómeno que favorece las reacciones fotoquímicas de formación de  $\text{O}_3$ .

Para más información acerca de los patrones en los datos, registros máximos, registros atípicos, posibles influencias de gases volcánicos, índices de calidad del aire (ICA), imágenes satelitales de calidad del aire, entre otros comportamientos típicos de estos contaminantes en la ciudad, se recomienda revisar los diferentes boletines disponibles en la sección de “Publicaciones – Boletines de Calidad del Aire (CA)” de la página del CDIAC: <https://cdiac.manizales.unal.edu.co/publicaciones.php>.

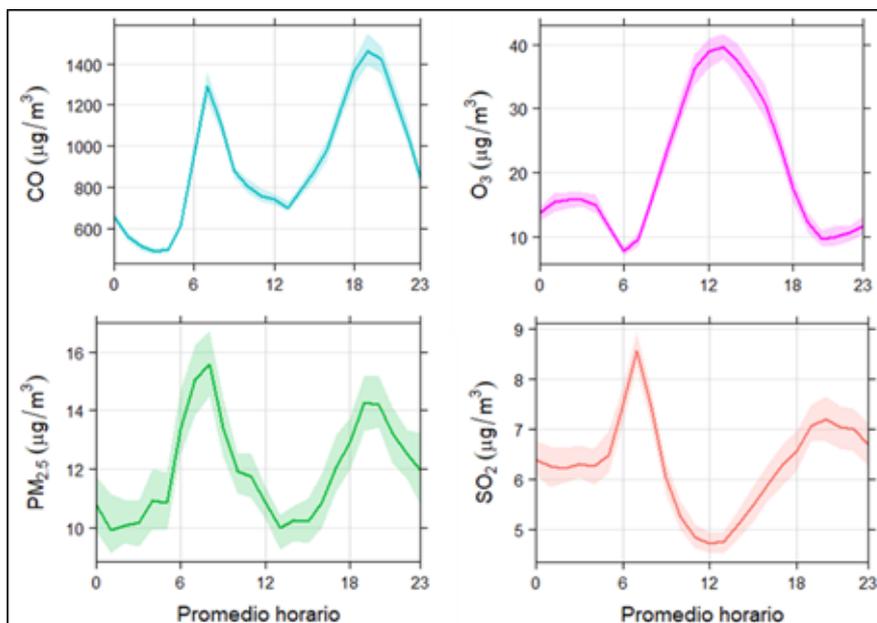


Figura 14. Comportamiento horario típico de los contaminantes  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  - Automático y en la ciudad de Manizales

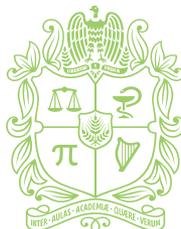
## 4. Agradecimientos

Agradecemos especialmente a la Corporación Autónoma Regional de Caldas -Corpocaldas -, asimismo, a los integrantes del Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental -GTAIHA- y al Instituto de Estudios Ambientales IDEA, de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Un reconocimiento para las instituciones que han colaborado disponiendo sus instalaciones para el montaje de las estaciones de calidad del aire de la ciudad: Universidad Católica de Manizales, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, empresa Invermec S.A., Institución Educativa Liceo Isabel La Católica y Gobernación de Caldas.

## 5. REFERENCIAS

- Carslaw, D.C. y Ropkins K., 2015. The openair manual – opensource tools for analysing air pollution data. Manual for version 1.1-4. King's college London.
- IDEA – Instituto de Estudios Ambientales. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Disponible en: [https://idea.manizales.unal.edu.co/publicaciones/boletines\\_ambientales/boletin149.pdf](https://idea.manizales.unal.edu.co/publicaciones/boletines_ambientales/boletin149.pdf)
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Contaminación atmosférica. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/contaminacion-atmosferica>
- Minambiente - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Contaminación Atmosférica Disponible en: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/gestion-del-aire/contaminacion-atmosferica>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2017. Resolución 2254 de 2017. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. Bogotá, D.C., Colombia.

- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), 2010. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Bogotá, D.C., Colombia.
- Organización Mundial de la Salud – OMS, 2018. [En línea] Disponible en: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Organización Mundial de la Salud – OMS, 2021. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.
- Our World in Data, “Indoor Air Pollution” Hannah Ritchie and Max Roser, 11 2019. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/indoor-air-pollution>. [Último acceso: 23/10/2020].
- SISAIRES – Sistema de Información sobre Calidad del Aire. ¿Cómo opera un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire? Disponible en: [http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/informacion.xhtml?de=como\\_opera](http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/informacion.xhtml?de=como_opera)
- Steer Davies Gleave. (2017). Manizales plan maestro de movilidad. Manizales: Gaceta del concejo de Manizales. Recuperado el 06 de 17 de 2019, de <http://concejodemanzales.gov.co/wp-content/uploads/2018/06/GACETA-188-DE-2018-PLAN-MAESTRO-DE-MOVILIDAD-DEFINITIVA.pdf>
- Unal – Corpocaldas, 2019a. Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en la ciudad de Manizales año base 2017. Boletín de resultados. Disponible en: <http://cdiac.manizales.Unal.edu.co/inicio/publicaciones.php>
- Unal – Corpocaldas, 2019b. Boletín CA Manizales año 2019. Disponible en: [http://cdiac.manizales.unal.edu.co/inicio/publicaciones/Bolet%C3%ADn\\_CA\\_Manizales\\_a%C3%B1o\\_2020.pdf](http://cdiac.manizales.unal.edu.co/inicio/publicaciones/Bolet%C3%ADn_CA_Manizales_a%C3%B1o_2020.pdf)
- Unal – Corpocaldas, 2020. Boletín CA Manizales año 2020. Disponible en: [https://cdiac.manizales.unal.edu.co/publicaciones/Boletin\\_calidad\\_aire\\_Manizales\\_a%C3%B1o\\_2019.pdf](https://cdiac.manizales.unal.edu.co/publicaciones/Boletin_calidad_aire_Manizales_a%C3%B1o_2019.pdf)



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

Instituto de Estudios Ambientales - IDEA -  
Teléfono: 8879300 Ext. 50190  
Cra 27 #64-60 / Manizales - Caldas  
<http://idea.manizales.unal.edu.co>  
[idea\\_man@unal.edu.co](mailto:idea_man@unal.edu.co)

**Edición, Diseño y Diagramación:** IDEA Sede Manizales  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales