

# **BOLETÍN** **VIGILANCIA DE** **CALIDAD DEL AIRE**

Área metropolitana de Lima y Callao

**Febrero 2024**



## VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – FEBRERO 2024

### PRESENTACIÓN

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) presenta el boletín mensual sobre la vigilancia de la calidad del aire en el Área Metropolitana de Lima y Callao (AMLC), donde los tomadores de decisión y público en general podrán encontrar información sobre los principales contaminantes atmosféricos a los que se encuentran expuestos.

Para un mejor entendimiento de las variaciones espaciales y temporales de los contaminantes atmosféricos, se ha utilizado información meteorológica de superficie (datos de las estaciones meteorológicas automáticas del SENAMHI). Asimismo, se realizó un análisis sinóptico y oceánico a partir de la documentación técnica del SENAMHI para el mes de febrero<sup>1,2</sup> y las salidas resultantes de la aplicación del modelo Weather Research and Forecasting (WRF)<sup>3</sup> para el ámbito del AMLC, el cual tiene una resolución espacial de 1 km y temporal de 1 hora. Por otro lado, se realizó un análisis del comportamiento del tránsito vehicular en el AMLC a partir de la información extraída de Google Traffic<sup>4</sup>. Con respecto a la información de contaminantes atmosféricos, se usaron los datos de la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire (REMCA) de SENAMHI e información del satélite Sentinel 5P<sup>5</sup>.

*Toda persona tiene derecho de gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida.  
Constitución Política del Perú. Artículo 2, inciso 22.*

<sup>1</sup> Informe de Vigilancia Sinóptica de Sudamérica – enero 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-107.pdf>

<sup>2</sup> Boletín climatológico de Lima – enero 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-115.pdf>

<sup>3</sup> Sistema de predicción meteorológica a mesoescala de última generación diseñado tanto para la investigación atmosférica como para aplicaciones de predicción operativa (Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory - NCAR, s.f.).

<sup>4</sup> Visor web de la empresa Google que muestran en tiempo real y a nivel histórico el estado del tránsito vehicular en las calles del AMLC..

<sup>5</sup> Satélite de la misión Copernicus de la Agencia Espacial Europea que realiza mediciones atmosféricas con alta resolución espacio-temporal (The European Space Agency, s.f.).

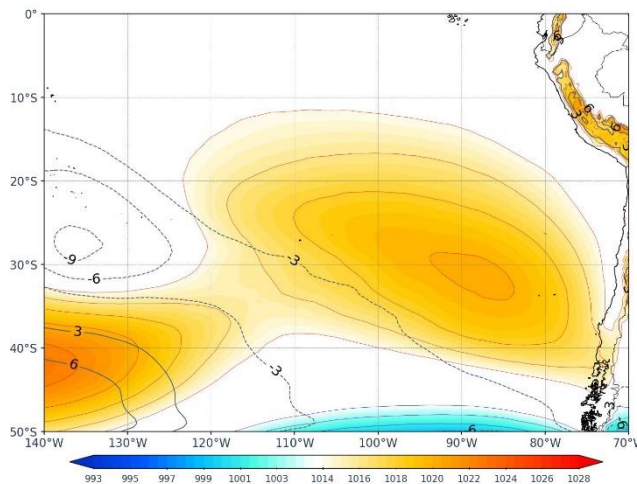
## 1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

Para un mejor entendimiento de las condiciones sinópticas a niveles bajos y oceánicos en el AMLC, se realizó un análisis por decadiarias (cada diez días), obteniéndose tres periodos de análisis. Es así que, para el mes de febrero se conformó la decadiaria 1 (del 1 al 10), decadiaria 2 (del 11 al 20) y decadiaria 3 (del 21 al 29).

### 1.1. PRIMERA DECADIARIA (1 al 10 de febrero)

En superficie, el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) presentó una configuración cuasi zonal y ligeramente desplazada hacia el este respecto a lo climatológico<sup>6</sup> con núcleo en 33°S y 88°W con valores de presión alrededor de los 1020 hPa, ligeramente débil comparado con lo climatológico<sup>1</sup> (Figura N°01a). Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur sureste, con velocidades entre 1 y 4 m/s. Por otro lado, las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) estuvieron cercanos a los +2.2°C frente a las costas de AMLC, lo cual repercutió en el incremento de temperaturas máximas y mínimas del aire por encima de su normal en +4.1°C y +2.3°C respectivamente<sup>2</sup>.

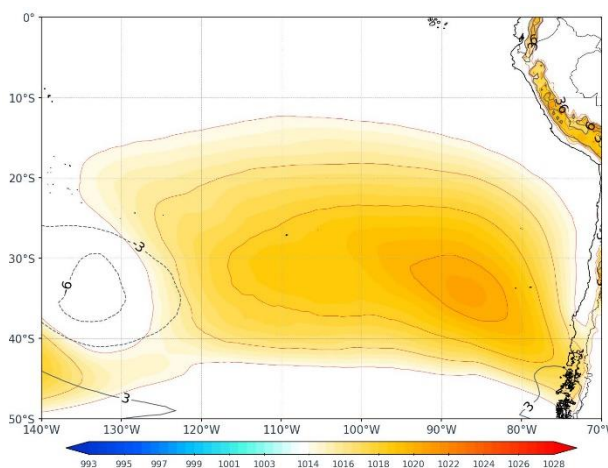
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



### 1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de febrero)

Para la segunda decadiaria, el APS presentó un ligero desplazamiento hacia el sureste manteniendo su intensidad de 1020 hPa respecto a lo climático con un núcleo sobre los 33 ° S y 87 ° W.<sup>1</sup> (Figura N° 01b). Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur y velocidades entre 3 m/s y 5 m/s. Por otro lado, respecto a las ATSM<sup>6</sup> estas se encontraron alrededor de los +1.9°C frente a las costas del AMLC<sup>7</sup>, lo cual repercutió en el incremento de temperaturas máximas y mínimas del aire por encima de su normal en +3.1°C y +1.6°C respectivamente<sup>2</sup>.

Figura N°01b. Variación del APS en la decadiaria 2.



<sup>6</sup> Referido a clima: [https://www.senamhi.gob.pe/usr/cmn/pdf/PROCLIM\\_09.pdf](https://www.senamhi.gob.pe/usr/cmn/pdf/PROCLIM_09.pdf)

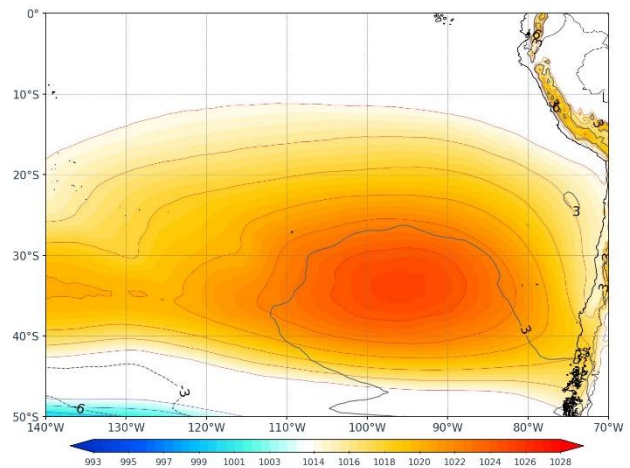
<sup>7</sup> Temperatura superficial del mar y anomalías térmicas en el litoral peruano. Obtenido de: [http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/index2.php?id\\_seccion=1017803020000000000000](http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/index2.php?id_seccion=1017803020000000000000)



### 1.3. TERCERA DECADIARIA (21 al 29 de febrero)

Finalmente, para la tercera decadiaria, el APS predominó con una configuración zonal sobre su posición climática y núcleo en los 34°S - 96°W con valores de presión superiores a los 1025 hPa, intensidad alta respecto a lo climatológico, que se vio reflejado con valores anómalos positivos sobre el APS<sup>1</sup> (Figura N°01c). Estos vientos presentaron una dirección predominante del sur sureste, ligeramente paralelos a la costa y velocidades entre 2 y 5 m/s. Por otro lado, respecto a las ATSM estas se encuentran en +1.2°C frente a las costas de AMLC, lo cual repercutió en las temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándose por encima de su normal en 2.4°C y 1.1°C respectivamente<sup>2</sup>.

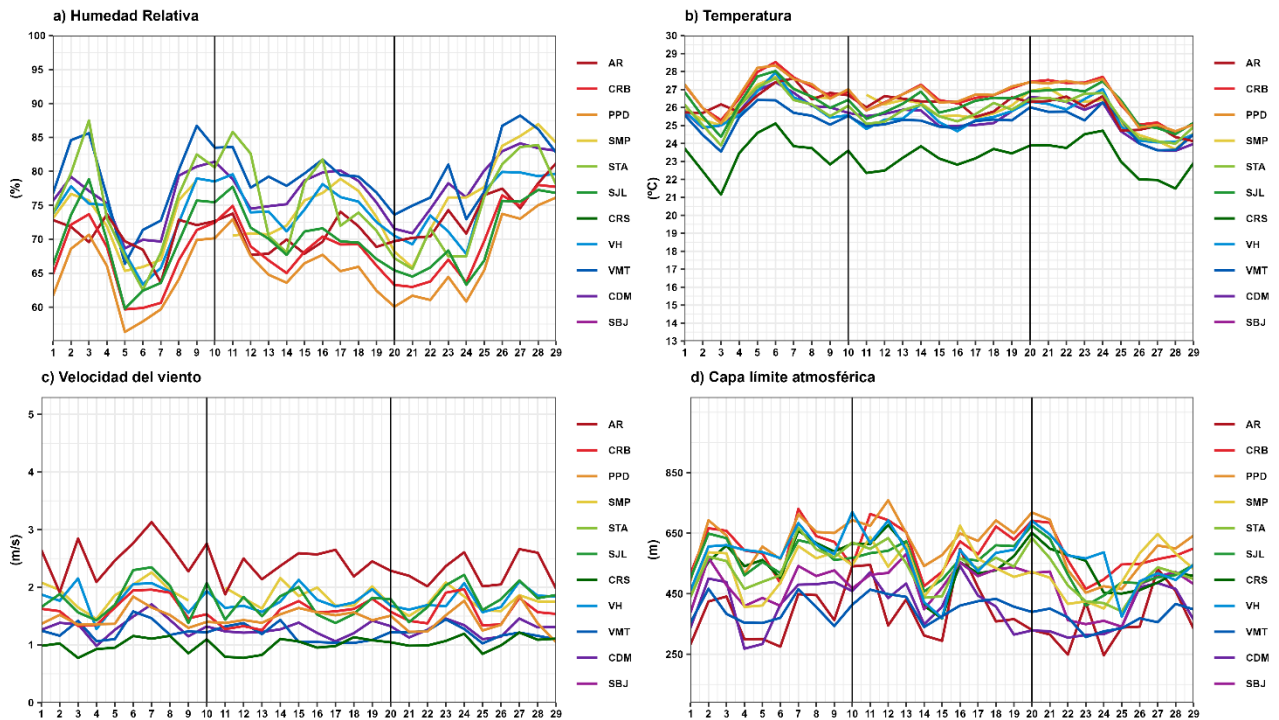
Figura N°01c. Variación del APS en la decadiaria 3.



## 2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS LOCALES EN EL AMLC

Con los datos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) ubicadas en el AMLC, se realizó un análisis de la variabilidad diaria de la humedad relativa y la temperatura a 2 metros de la superficie, y la velocidad del viento a 10 metros de la superficie. Los datos provinieron de las estaciones: Antonio Raimondi (AR), Carabaylo (CRB), Puente Piedra (PPD), San Martín de Porres (SMP), Santa Anita (STA), San Juan de Lurigancho (SJM), Ceres (CRS), Alexander Von Humboldt (VH), Villa María del Triunfo (VMT), Campo de Marte (CDM) y San Borja (SBJ). Adicionalmente se representó la variabilidad diaria de la capa límite atmosférica (CLA)<sup>8</sup> para lo cual se usó datos del modelo operativo WRF.

Figura N°02. Variación diaria de las variables meteorológicas en el AMLC dividido en 3 decadiarias



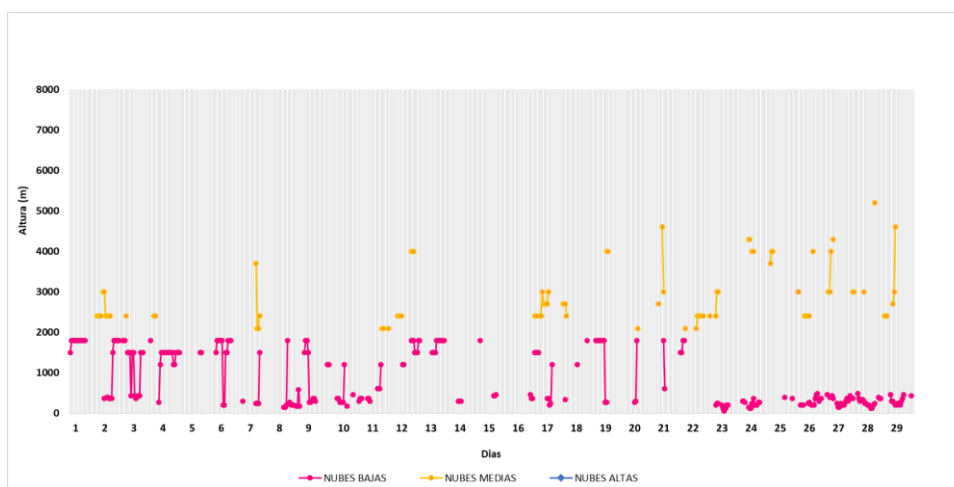
<sup>8</sup> CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

Con respecto a la humedad relativa (Figura N°02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 56.3% a 87.5%, para la segunda decadiaria valores entre 60.0% y 85.8%, y en la tercera decadiaria valores entre 60.8% a 86.9%, de las cuales, la estación VMT mantuvo los valores más altos y registró un promedio mensual de 79.2%. Por otro lado, en relación con la temperatura (Figura N°02b) durante la primera decadiaria se presentó valores entre 21.1 y 28.5 °C, para la segunda decadiaria valores entre 22.3 y 27.4°C, y en la tercera decadiaria valores entre 21.4 y 27.7 °C, siendo las estaciones CRB y PPD las que alcanzaron los máximos valores de temperatura y registraron un promedio de 26.6°C ambas. En cuanto a la velocidad del viento (Figura N° 02c), éste llegó a ser muy variable, lo cual se refleja en sus valores, los mismos que oscilaron entre 0.7 a 3.1 m/s durante todo el mes, siendo la estación AR la que alcanzó los mayores valores de viento, con un promedio de 2.4m/s. En el caso de la CLA (Figura N°02d) se presentó una tendencia ligera al incremento hacia la tercera decadiaria; asimismo, las estaciones PPD y CRB alcanzaron los valores más altos, con una altura promedio de 612.8 y 597.7 m respectivamente, además, las estaciones CDM y AR registran los valores más bajos, con 246.3 m y 268.1 m.

## 2.1. ALTURA DE LA BASE DE LA NUBE

De acuerdo con el comportamiento horario de la Altura de la Base de la Nube (ABN) registrada por el ceilómetro<sup>9</sup> de la EMA Aeropuerto Internacional Jorge Chávez ubicada en el Callao (Figura N°03), se observó que las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) tuvieron mayor presencia (44.8%) durante el mes de febrero, seguido de una mucho menor presencia (12.5%) de nubes medias (ABN mayor a 2000 m y menor a 6000 m). Esto último no significa que no se hayan presentado nubes altas (ABN mayor a 6000 m), sino más bien que sólo se registra la altura de la base de la nube más cercana a la superficie, por lo que podría haber nubes medias y altas por encima de éstas. Además, se tuvo un porcentaje de 42.6% de días despejados.

Figura N°03. Altura de base de la nube registrada en la estación Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (JCH).



En comparación con enero, se presentó una mayor frecuencia de días despejados y un aumento de los días con nubes medias; sin embargo, predominó la presencia de nubes bajas, situación característica de mediados de verano.

<sup>9</sup> Instrumento que mide la altura de la base de la nube más cercana a superficie tomando a ésta como referencia.

## 2.2. ANALISIS DEL VIENTO EN SUPERFICIE POR HORARIOS

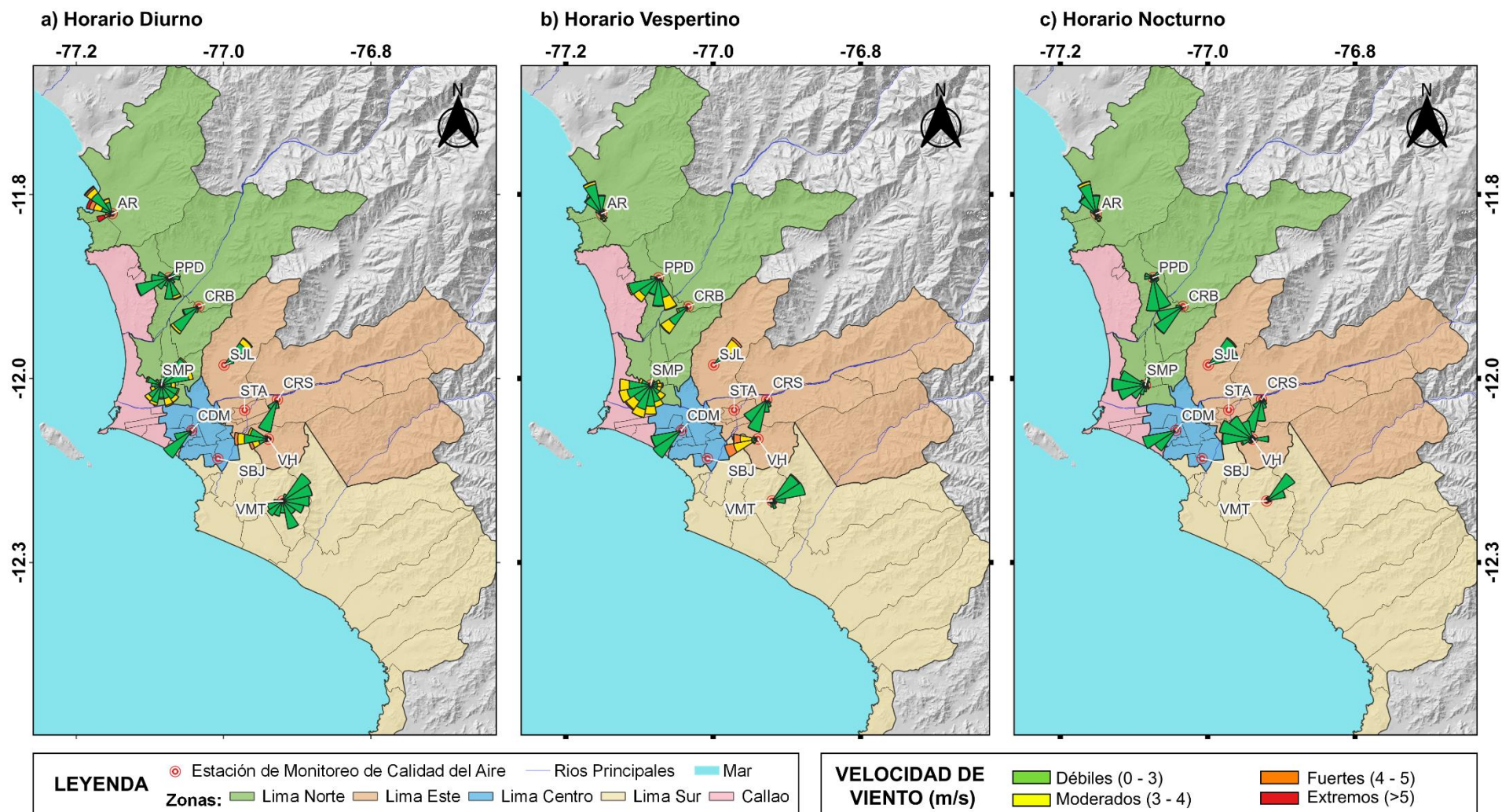
A partir de la información de velocidad y dirección de viento de las EMA ubicadas en el AMLC, se observó que, en el horario diurno (Figura N°04a), las estaciones PPD y CRB presentaron vientos con una predominancia del suroeste (SO) y con intensidades de categoría moderada (3-4 m/s). Por otro lado, las estaciones de CRS y CDM tuvieron una predominancia de dirección sur suroeste (SSO) y con una intensidad de categoría débil (0 – 3 m/s). En cuanto a las estaciones de SJL, SMP y VMT estas presentaron una dirección predominante del noreste (NE) con una intensidad de categoría variada, siendo fuerte (4 – 5 m/s) para SJL, moderada (3 – 4 m/s) para SMP y débil (0 – 3 m/s) para VMT. Finalmente, la estación AR presentó una dirección predominante del nor noroeste (NNO) con una intensidad de categoría extrema (>5m/s) y para VH se tuvo una dirección predominante del oeste (O) e intensidad de categoría fuerte (4 – 5 m/s).

Para el horario vespertino (Figura N°04b), las estaciones CDM y CRB presentaron vientos con una predominancia del suroeste (SO) e intensidad de categoría débil (0 – 3 m/s) y fuerte (4 - 5 m/s) respectivamente, por otro lado, las estaciones de CRS y SMP presentaron una dirección predominante de sur suroeste (SSO) con una intensidad de categoría débil (0 - 3 m/s) y moderado (3 – 4 m/s), respectivamente. En cuanto a la estación de PPD esta presentó predominancia del sur sureste (SSE) con una intensidad de categoría fuerte (4 – 5 m/s), por otro lado, la estaciones de SJL y VMT presentaron una dirección predominante del noreste (NE) con intensidad de categoría fuerte (4 – 5 m/s) y moderada (3 – 4 m/s), respectivamente. Finalmente, la estación de VH tuvo una dirección predominante del oeste suroeste (OSO) con una intensidad de categoría fuerte (4- 5 m/s) y la estación de AR registró una predominancia del nor noroeste (NNO) con una intensidad de categoría fuerte (4- 5 m/s).

Para el horario nocturno (Figura N°04c), se observó que la estación de CRB presentó una dirección predominante de suroeste (SO), CDM tuvo predominancia de vientos de oeste suroeste (OSO) y CRS de dirección sur suroeste (SSO), para las tres estaciones se registró una intensidad de categoría débil (0 – 3 m/s). La estación de PPD tuvo una predominancia del sur (S) con intensidad de categoría débil (0 – 3 m/s). Por otro lado, la estación de SMP tuvo una predominancia del oeste (O) con una intensidad de categoría moderada (3 – 4 m/s) y en VH predominaron los vientos del oeste noroeste (ONO) con una intensidad de categoría débil (0 – 3 m/s). Por otro lado, la estación de VMT tiene una predominancia del noreste (NE) de intensidad de categoría débil (0 – 3 m/s), en cambio la estación de AR tiene una predominancia del nor noroeste (NNO) de intensidad de categoría fuerte (4 – 5 m/s).



Figura N°04. Rosas de viento para diferentes horarios en el AMLC.



La Figura N° 04 muestra el comportamiento de la dirección y velocidad del viento en cada una de las EMA para los horarios diurnos (07:00 - 12:59 horas), vespertinos (13:00 - 18:59 horas) y nocturnos (19:00 - 06:59 horas).

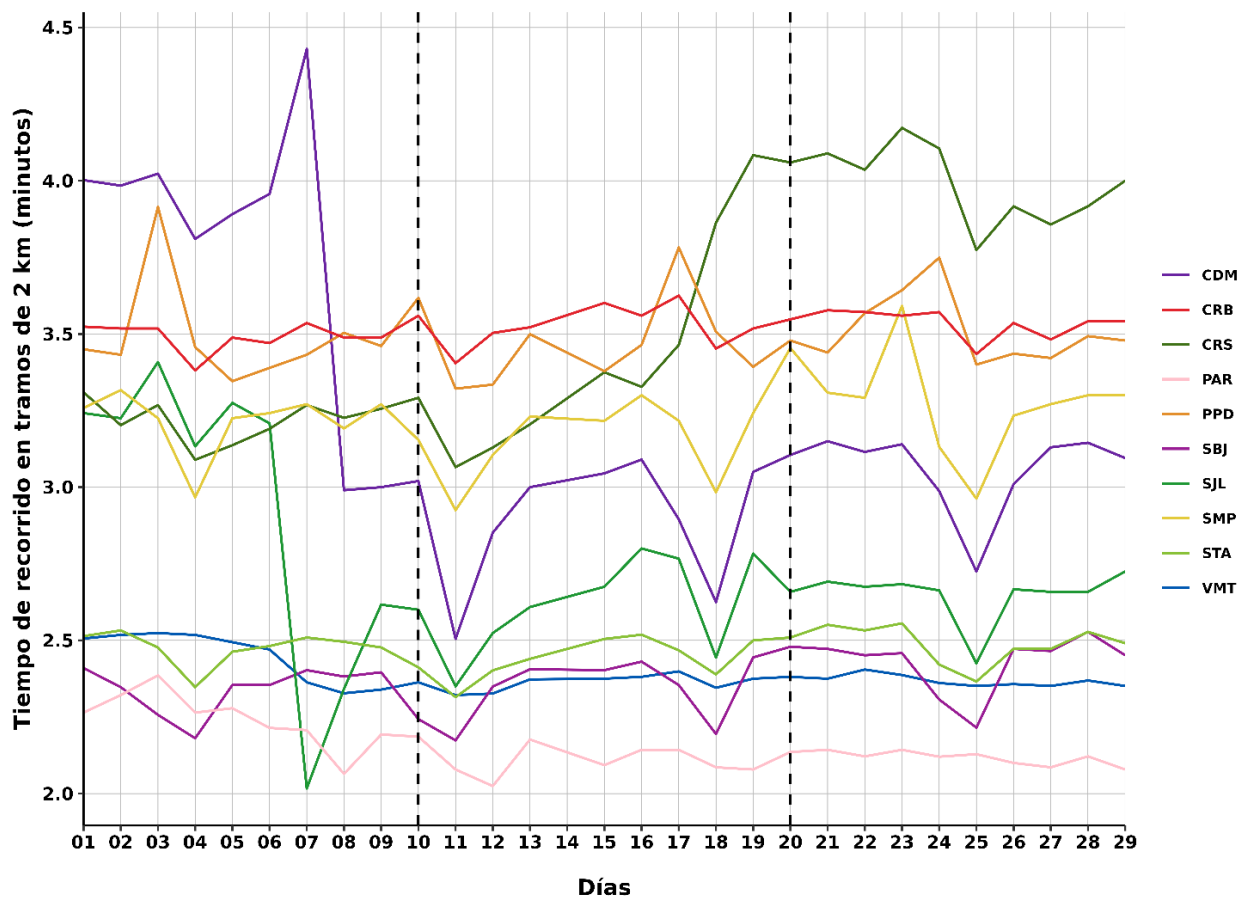
### 3. ACTIVIDAD VEHICULAR EN EL AMLC

La actividad vehicular tiene una contribución de más del 50% sobre la contaminación del aire en el AMLC.<sup>10</sup> Por lo tanto, a medida que aumenta el tiempo empleado para recorrer un tramo (mayor congestión vehicular), se espera un incremento en las concentraciones de los contaminantes atmosféricos. Por otro lado, un menor tiempo de recorrido (menor congestión vehicular) se relaciona con una disminución en las concentraciones de los contaminantes atmosféricos<sup>11</sup>.

En relación con lo indicado, se ha desarrollado un algoritmo en Python que utiliza la técnica de web scraping<sup>12</sup> para extraer datos sobre el tiempo de recorrido en tramos de 2 km de las principales avenidas<sup>13</sup>, específicamente en el área de influencia de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la REMCA del SENAMHI.

En la Figura N°05 se aprecia que durante la primera decadiaria se registraron los tiempos de recorrido más altos en tramos de 2 km, destacando los valores más elevados en las estaciones CDM y PPD, con 4.4 y 3.8 minutos, respectivamente. Durante la segunda decadiaria, se observa una reducción en los tiempos de recorrido, particularmente en las estaciones PAR y SBJ, donde se registraron 2.1 y 2.25 minutos, respectivamente. Por último, en la tercera decadiaria, se evidencia un incremento en los tiempos de recorrido, siendo más notables en las estaciones CRS y PPD, con valores de 4.25 y 3.65 minutos, respectivamente.

Figura N°05. Variación diaria del tiempo de recorrido en tramos de 2 km en el ámbito de la REMCA



<sup>10</sup> Estudio: Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y Callao. Obtenido de: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagnostico-gestion-calidad-ambiental-aire-lima-callao>

<sup>11</sup> Urban emissions hotspots: Quantifying vehicle congestion and air pollution using mobile phone GPS data <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749117304001?via%3Dihub#sec3>

<sup>12</sup> El web scraping es la práctica de recopilar datos de Internet de forma automatizada, mediante la escritura de programas que consultan servidores web y extraen información, usualmente en forma de archivos HTML, sin necesidad de interactuar con una interfaz de programación de aplicaciones (API) o navegadores web. Esta técnica ha sido conocida por diversos términos a lo largo del tiempo, pero actualmente se prefiere el término "web scraping" (Mitchell, 2015).

<sup>13</sup> Estudio: Extracción y Minería de Datos de Tráfico en Google Maps. Obtenido de: [https://www.irimets.com/uploadedfiles/paper/volume3/issue\\_4\\_april\\_2021/8350/1628083343.pdf](https://www.irimets.com/uploadedfiles/paper/volume3/issue_4_april_2021/8350/1628083343.pdf)



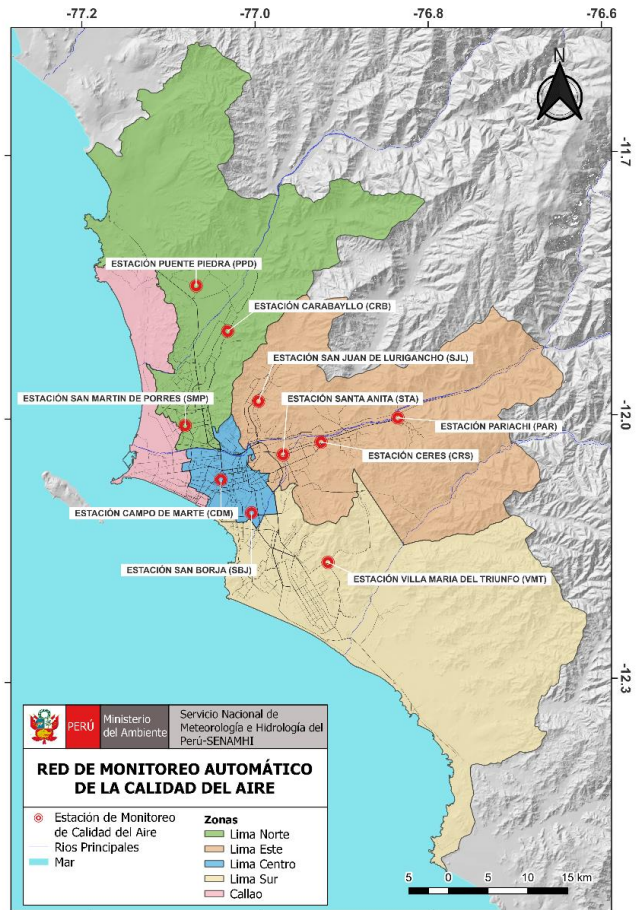
## 4. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

El SENAMHI realiza la vigilancia a través de una Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire (REMCA), la cual mide las concentraciones horarias de los contaminantes PM<sub>10</sub> (Material Particulado con diámetro menor a 10 micras), PM<sub>2,5</sub> (Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras), NO<sub>2</sub> (Dióxido de Nitrógeno), O<sub>3</sub> (Ozono) y CO (Monóxido de Carbono).

**Cuadro N° 01. Zonas, nombres y ubicación de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire.**

ZONA	NOMBRE/UBICACIÓN
Norte	Estación Puente Piedra (PPD) Complejo Municipal "El gallo de oro" del distrito de Puente Piedra
	Estación Carabayllo (CRB) Piscina Municipal del distrito de Carabayllo
	Estación San Martín de Porres (SMP) Parque Ecológico del distrito de San Martín de Porres
Este	Estación San Juan Lurigancho (S JL) Universidad César Vallejo en el distrito de San Juan de Lurigancho
	Estación Ceres (CRS) Plaza Cívica de Ceres distrito de Ate
	Estación Pariachi (PAR) Parque Barrantes Lingan - Pariachi 2a etapa distrito de Ate
	Estación Santa Anita (STA) Palacio Municipal del distrito de Santa Anita
Sur	Estación Villa María del Triunfo (VMT) Parque Virgen de Lourdes Zona Nueva Esperanza en el distrito de Villa María del Triunfo
Centro	Estación San Borja (SBJ) Polideportivo Limatambo del distrito de San Borja
	Estación Campo de Marte (CDM) Parque Campo de Marte en el distrito de Jesús María.

**Figura N°06. Ubicación de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en el AMLC.**



### Estándar de Calidad Ambiental (ECA)

La Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente define al estándar de calidad ambiental (ECA) como **“la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el aire, agua y suelo en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente”**. Por lo tanto, para el caso de los contaminantes atmosféricos, las concentraciones de cada uno de estos no deben superar su respectivo Estándar de Calidad Ambiental para Aire (ECA-aire) a fin de evitar problemas en la salud de las personas y el ambiente. Asimismo, los valores de los ECA-aire son establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM) y estipulados en el D.S. N° 003-2017-MINAM.

---

## 4.1. VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE A TRAVÉS DE ESTACIONES DE MONITOREO EN EL AMLC

Con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el AMLC, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones del material particulado y gases durante el mes de febrero. Los datos provinieron de las estaciones: Puente Piedra (PPD), Carabaylo (CRB), San Martín de Porres (SMP), San Juan de Lurigancho (SJL), Ceres (CRS), Pariachi (PAR), Santa Anita (STA), San Borja (SBJ), Campo de Marte (CDM) y Villa María del Triunfo (VMT).

### 4.1.1. MATERIAL PARTICULADO (PM)

El material particulado (PM) hace referencia a partículas sólidas o líquidas, cuyo tamaño es más grande que una molécula, pero suficientemente pequeño para mantenerse suspendido en el aire. Pueden contener en su estructura iones inorgánicos, compuestos metálicos, carbono elemental, compuestos orgánicos y compuestos provenientes de la corteza terrestre. Usualmente se evalúan dos tipos de material particulado, las denominadas partículas finas, que incluyen a las partículas con diámetro menor a 2,5  $\mu\text{m}$ , y las denominadas partículas gruesas que incluyen a las partículas con diámetro menor a 10  $\mu\text{m}$ .<sup>14</sup>

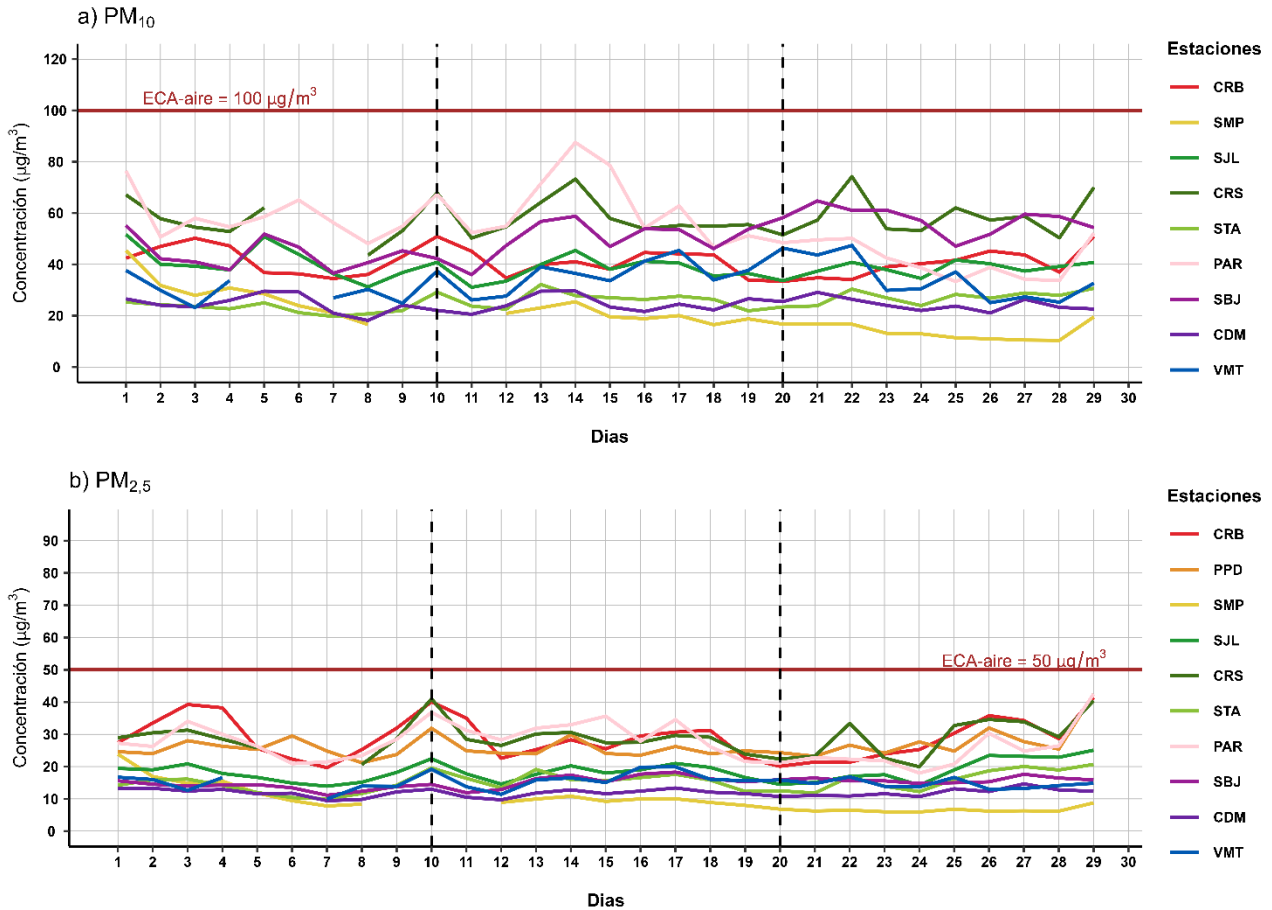
En el AMLC, la principal fuente de PM está relacionada al crecimiento del parque automotor y el uso de combustibles fósiles; sin embargo, existen otras fuentes, como las actividades industriales y la quema al aire libre de residuos municipales. Asimismo, las concentraciones de material particulado pueden variar en función de las condiciones meteorológicas, es así como, en estudios realizados en el área de Lima metropolitana, se ha visto que bajas temperaturas están relacionadas con el incremento de las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> y la disminución de las concentraciones de PM<sub>10</sub>, mientras que una reducción en la humedad relativa coincide con la disminución del PM<sub>2,5</sub> e incremento de PM<sub>10</sub>.<sup>15</sup>

---

<sup>14</sup> Bedregal, P., Ubillus, M., Cáceres-Rivero, C., Olivera, P., Garay, R., Rojas, J., ... & Urdanivia, R. (2023). Determination of atmospheric aerosol components in an urban area to evaluate the air quality and identify the sources of contamination. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 332(8), 3507-3514.

<sup>15</sup> Silva, J., Rojas, J., Norabuena, M., Molina, C., Toro, R. A., & Leiva-Guzmán, M. A. (2017). Particulate matter levels in a South American megacity: the metropolitan area of Lima-Callao, Peru. *Environmental monitoring and assessment*, 189, 1-18.

Figura N°07. Variación diaria del PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> (µg/m<sup>3</sup>) en el AMLC.



En la Figura N° 07a, se observa que las concentraciones diarias de PM<sub>10</sub> registradas en las estaciones no excedieron el ECA-aire de 100 µg/m<sup>3</sup> (como promedio diario) durante el periodo de monitoreo. Se destaca que, en la zona norte, las mayores concentraciones se reportaron en la estación CRB, específicamente durante la primera decadiaria y tercera decadiaria; en el primer caso se alcanzó el valor de 50.89 µg/m<sup>3</sup> el sábado 10, lo cual estaría relacionado a la reducción de la altura de la CLA (ver Figura N° 02d), mientras que en el segundo caso se alcanzó el valor de 50.88 µg/m<sup>3</sup> el jueves 29, y estaría relacionado con un ligero incremento en el tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular, ver Figura N° 05). En la zona este, la mayor concentración se reportó en la estación PAR, específicamente durante la segunda decadiaria; alcanzando el valor de 87.52 µg/m<sup>3</sup> el miércoles 14, lo cual estaría relacionado con las actividades industriales que se desarrollan en el área de influencia de la estación<sup>16</sup>, entre las que se encuentran actividades de fundición de hierro y acero<sup>17</sup>. En la zona centro, la mayor concentración se reportó en la estación SBJ, específicamente durante la segunda decadiaria; alcanzando el valor de 64.73 µg/m<sup>3</sup> el miércoles 21, situación que podría vincularse con un incremento en el tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular, ver Figura N° 05). Por último, en la zona sur, la estación VMT reportó la mayor concentración durante la segunda decadiaria; alcanzando el valor de 47.37 µg/m<sup>3</sup> el jueves 22, lo cual estaría relacionado a las actividades industriales que se desarrollan en los alrededores de la zona<sup>16</sup>, entre las que se encuentran la producción de cemento<sup>18</sup>.

En la Figura N° 07b, se evidencia que las concentraciones diarias de PM<sub>2.5</sub> registradas en las estaciones no superaron el ECA-aire de 50 µg/m<sup>3</sup> (como promedio diario) durante el periodo monitoreado. Se destaca que,

<sup>16</sup> Actividades industriales. Obtenido de: <https://pifa.oefa.gob.pe/mfiscamb/index.html#>

<sup>17</sup> "[...] Como sector intensivo en energía y contaminación, la industria del hierro y el acero es una de las fuentes más importantes de emisiones de partículas [...]". Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1309104221003342?via%3Dihub>

<sup>18</sup> "[...] Las fuentes potenciales de emisiones de partículas fugitivas en las plantas de cemento incluyen el manejo de materias primas, molienda, mezcla y entrega, almacenamiento de clínker, molienda, almacenamiento de cemento, carga a granel y empaque del producto final, lo que convierte a la industria del cemento en un importante emisor de partículas [...]". Obtenido de: [https://www.researchgate.net/profile/Deepanjan-Majumdar-2/publication/257210587\\_Part particulate\\_matter\\_and\\_elemental\\_emissions\\_from\\_a\\_cement\\_kiln/links/5a5c9d8aaca2727d608a920e/Particulate-matter-and-elemental-emissions-from-a-cement-kiln.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Deepanjan-Majumdar-2/publication/257210587_Part particulate_matter_and_elemental_emissions_from_a_cement_kiln/links/5a5c9d8aaca2727d608a920e/Particulate-matter-and-elemental-emissions-from-a-cement-kiln.pdf)



en la zona norte, la mayor concentración se reportó en la estación PPD, específicamente durante la tercera decadiaria; alcanzándose el valor de  $42.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el jueves 29, lo cual estaría relacionado con una reducción en los valores de temperatura (ver Figura N° 02b), un incremento en los valores de humedad relativa (ver Figura N° 02a) y una disminución en la velocidad del viento (ver Figura N° 02c). Por otro lado, en la zona Este, la mayor concentración se reportó en la estación PAR, específicamente durante la tercera decadiaria; registrando un valor de  $42.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el jueves 29, lo cual podría estar relacionado a las actividades industriales que se desarrollan en los alrededores de la zona<sup>16</sup>, como la fundición de hierro y acero<sup>15</sup>. En la zona centro, la mayor concentración se reportó en la estación SBJ, específicamente durante la segunda decadiaria; alcanzando el valor de  $18.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el sábado 17, lo cual estaría relacionado con una reducción de la altura de la CLA (ver Figura N° 02d). Finalmente, en la zona sur, la estación VMT, reportó la mayor concentración durante la segunda decadiaria; alcanzándose el valor de  $19.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el lunes 17; este comportamiento estaría relacionado con un ligero incremento en el tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular, ver Figura N° 05) y la disminución de la velocidad de viento durante esta fecha, condición que no favorecería la dispersión de los contaminantes (ver Figura N° 02c).

#### 4.1.2. GASES (CO, O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub>)

El CO es un gas incoloro, insípido e inodoro, inflamable y peligroso para la salud humana. Las principales fuentes antropogénicas de CO son los procesos de combustión relacionados con la energía, la calefacción, el transporte de vehículos, la quema de biomasa, la oxidación del metano y los compuestos orgánicos volátiles (COV), mientras que las fuentes naturales son la actividad volcánica, las descargas eléctricas y las emisiones de gases naturales. Las condiciones de alta velocidad de viento favorecen la turbulencia e incrementan la dispersión y el transporte de CO, con lo cual se reducen las concentraciones de este contaminante; por otro lado, las bajas temperaturas no favorecen los movimientos verticales térmicamente inducidos, manteniendo los contaminantes atmosféricos en los niveles más bajos, sumado a ello, los motores funcionan con menor eficiencia cuando el aire está frío, lo cual da lugar a la formación de productos de combustión incompleta entre los que se encuentra el CO<sup>19</sup>.

El O<sub>3</sub> desempeña un papel crucial en la química atmosférica, y a nivel superficial, se considera uno de los principales contaminantes antropogénicos. Este gas secundario se forma a través de la oxidación fotoquímica de COV en presencia de óxidos de nitrógeno (NO + NO<sub>2</sub>), conocidos como precursores. Por lo tanto, suele existir una relación inversa entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>.<sup>20</sup> Asimismo, el ciclo diario del NO, NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> sigue una tendencia de onda doble, siendo que el pico del ciclo del O<sub>3</sub> aparece aproximadamente 6 horas después del pico del NO y 5 horas después del NO<sub>2</sub>.<sup>21</sup> Por otro lado, se observa una estrecha relación entre los niveles elevados de O<sub>3</sub> y la temperatura. Esto se debe a que uno de los factores más significativos que favorecen la formación de ozono fotoquímico es la intensidad de la luz solar, la cual está asociada con valores relativamente altos de temperatura.<sup>22</sup>

El NO<sub>2</sub> está considerado dentro del grupo de gases altamente reactivos conocidos como óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), siendo usado como un indicador de la presencia de este grupo más amplio.<sup>23</sup> El NO<sub>2</sub> se origina durante los procesos de combustión en los vehículos, por lo cual los valores máximos se pueden relacionar con las horas de máxima congestión vehicular. Asimismo, la temperatura y la radiación solar suelen mantener una relación inversa con las concentraciones de NO<sub>2</sub>, debido a que fomentan las reacciones que dan origen al O<sub>3</sub>, favoreciendo con ello el consumo de NO<sub>2</sub> como su precursor.<sup>24</sup>

<sup>19</sup> Rozante, J. R., Rozante, V., Souza Alvim, D., Ocimar Manzi, A., Barboza Chiquetto, J., Siqueira D'Amelio, M. T., & Moreira, D. S. (2017). Variations of carbon monoxide concentrations in the megacity of São Paulo from 2000 to 2015 in different time scales. *Atmosphere*, 8(5), 81.

<sup>20</sup> Silva, J. S., Rojas, J. P., Norabuena, M., & Seguel, R. J. (2018). Ozone and volatile organic compounds in the metropolitan area of Lima-Callao, Peru. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11(8), 993-1008.

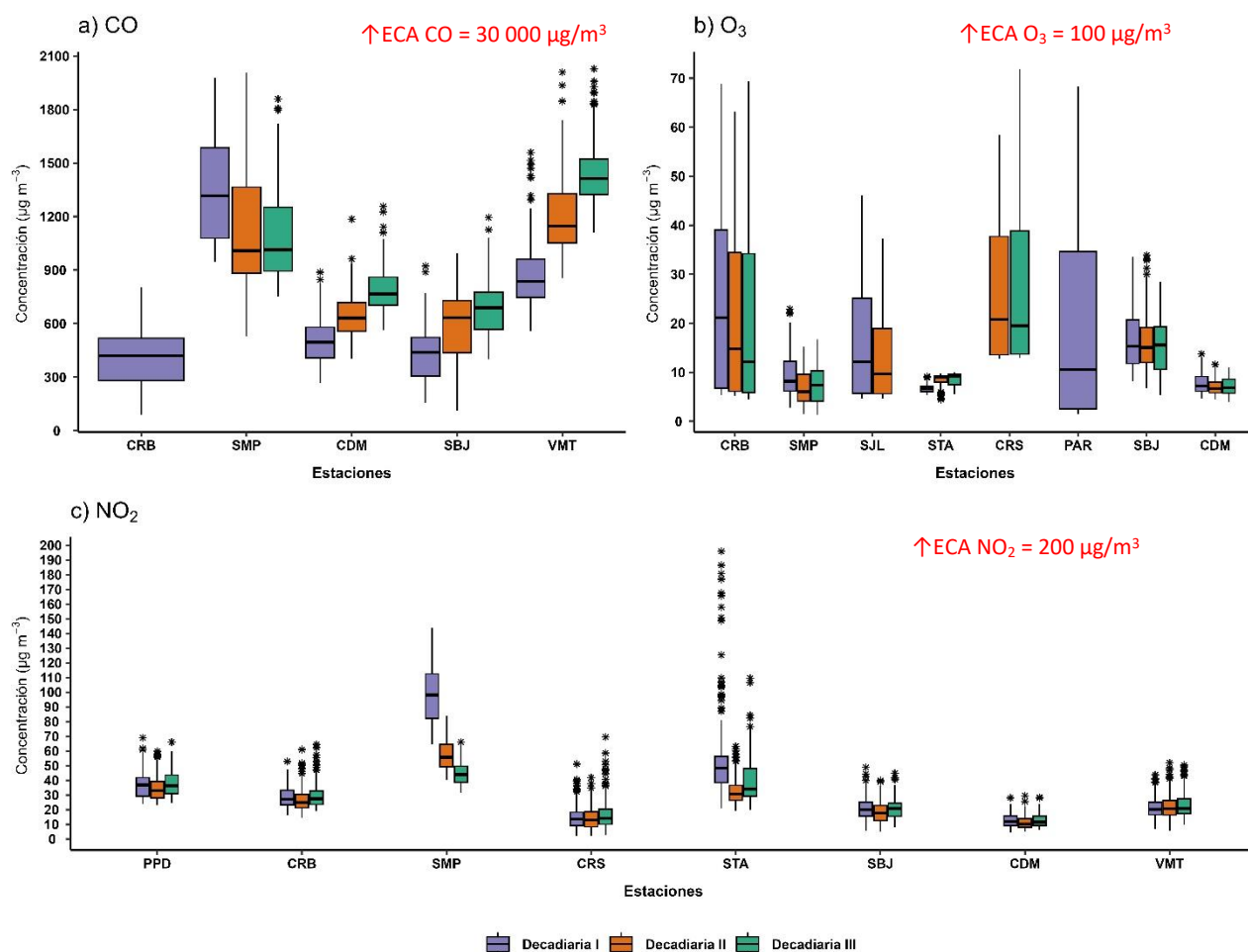
<sup>21</sup> Han, S., Bian, H., Feng, Y., Liu, A., Li, X., Zeng, F., & Zhang, X. (2011). Analysis of the relationship between O<sub>3</sub>, NO and NO<sub>2</sub> in Tianjin, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 11(2), 128-139.

<sup>22</sup> Benites-Morales, O. F., y Pacsi-Valdivia, S. A. (2023). Análisis temporal de los contaminantes atmosféricos (NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> troposférico y CO) y su relación con la temperatura del aire y la radiación solar en Lima Metropolitana. *Ecología aplicada*, 22(1), 17-25.

<sup>23</sup> United States Environmental Protection Agency. (25 de julio del 2023). *Basic Information about NO<sub>2</sub>*. <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2>

<sup>24</sup> Benites-Morales, O. F., y Pacsi-Valdivia, S. A. (2023). Análisis temporal de los contaminantes atmosféricos (NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> troposférico y CO) y su relación con la temperatura del aire y la radiación solar en Lima Metropolitana. *Ecología aplicada*, 22(1), 17-25.

Figura N°08. Variación de las concentraciones del CO, O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) por decadiaria en el AMLC.



En la Figura N° 08a, se observa que las concentraciones horarias de CO registradas en las estaciones se mantuvieron por debajo del límite establecido por su respectivo ECA-aire de 30 000 µg/m<sup>3</sup> (como promedio horario) durante el periodo de monitoreo. Asimismo, se destaca que, en la zona norte, la mayor concentración se reportó en la estación SMP durante la segunda decadiaria, alcanzando el valor de 2008.2 µg/m<sup>3</sup> el 20 de febrero a las 17:00 horas, lo cual estaría relacionado al incremento en el tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular, ver Figura N° 05). Respecto a la zona centro, la mayor concentración se reportó en la estación CDM durante la tercera decadiaria, alcanzando el valor de 1256.9 µg/m<sup>3</sup> el 22 de febrero a las 08:00 horas, coincidiendo con una reducción de la velocidad del viento (ver Figura N° 02c) y en la altura de la CLA (ver Figura N° 02d), lo cual limitó la dispersión del contaminante. Finalmente, en la zona sur, la estación VMT presentó una concentración máxima en la tercera decadiaria, alcanzando el valor de 2027.4 µg/m<sup>3</sup> el 22 de febrero a las 09:00 horas, lo cual estaría relacionado con un ligero incremento en el tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular, ver Figura N° 05).

Respecto a la Figura N° 08b, las concentraciones promedio móvil de cada 8 horas de O<sub>3</sub> registradas en las estaciones no superaron el valor de su ECA-aire de 100 µg/m<sup>3</sup> (como máxima media de 8 horas) durante los días monitoreados. Para la zona norte y la zona este, la mayor concentración se reportó el 29 de febrero durante la tercera decadiaria, alcanzando un valor de 69.4 µg/m<sup>3</sup> en la estación CRB y 71.9 µg/m<sup>3</sup> en la estación CRS, lo cual podría estar relacionado con una disminución de la velocidad del viento (ver Figura N° 02c). Por otro lado, en la zona centro, la mayor concentración se reportó en la estación SBJ durante la segunda decadiaria, alcanzando el valor de 33.9 µg/m<sup>3</sup> el 18 de febrero, lo cual podría estar influenciado por una reducción del tiempo de recorrido (menor congestión vehicular, ver Figura N° 05) lo que estaría relacionado con una disminución en las concentraciones de material particulado (típico de los días domingos)<sup>15</sup> y por lo tanto una menor dispersión y absorción de la radiación solar; esta mayor radiación que

llega a la superficie terrestre permitiría la mayor formación de O<sub>3</sub>.<sup>25</sup> En todos los casos, las mayores concentraciones se registraron en los horarios posteriores al periodo de máxima radiación solar<sup>20</sup> (comprendido entre las 11:00 horas y 15:00 horas).

En la Figura N° 08c, se observa que las concentraciones horarias de NO<sub>2</sub> registradas en las estaciones no sobrepasaron los límites establecidos por su respectivo ECA-aire de 200 µg/m<sup>3</sup> (como promedio horario) durante el período de monitoreo. No obstante, se destacó que, en la zona norte, la mayor concentración se reportó en la estación SMP durante la primera decadiaria, alcanzando el valor de 143.7 µg/m<sup>3</sup> el 6 de febrero a las 16:00 horas, posiblemente asociada al incremento en el tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular, ver Figura N° 05) y a una disminución en la altura de la CLA (ver Figura N° 02d). En la zona este, la mayor concentración se reportó en la estación STA durante la primera decadiaria, alcanzando el valor de 195.9 µg/m<sup>3</sup> el 7 de febrero a las 13:00 horas, este incremento estaría relacionado a un ligero incremento en el tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular, ver Figura N° 05), así como, a las actividades industriales que se desarrollan en el área de influencia de la estación STA<sup>16</sup>, entre las que se encuentran la fabricación de pasta de madera, papel y cartón<sup>26</sup>. En la zona centro, la mayor concentración se reportó en la estación SBJ durante la primera decadiaria, alcanzando el valor de 48.8 µg/m<sup>3</sup> el 6 de febrero a las 09:00 horas, lo cual podría estar relacionado con el incremento en el tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular, ver Figura N° 05). Por último, en la zona sur, la estación VMT registró una concentración máxima durante la segunda decadiaria, alcanzando el valor de 52.0 µg/m<sup>3</sup> el 16 de febrero a las 23:00 horas, que coincide con una reducción de la temperatura (ver Figura N° 02b) y de la velocidad del viento (ver Figura N° 02c).

<sup>25</sup> Liu, T., Sun, J., Liu, B., Li, M., Deng, Y., Jing, W., & Yang, J. (2022). Factors influencing O<sub>3</sub> concentration in traffic and urban environments: A case study of Guangzhou city. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12961.

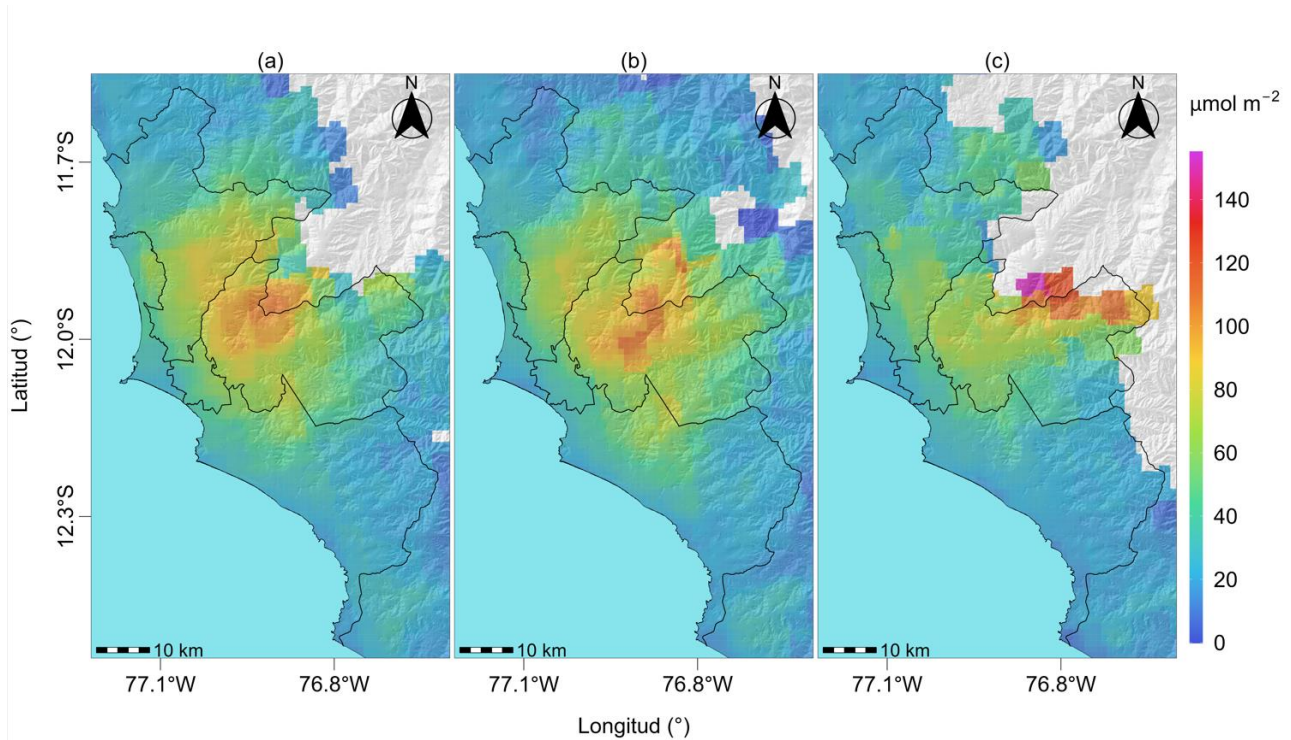
<sup>26</sup> \* [...] las principales fuentes de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> en las fábricas de pulpa y papel, que son calderas y turbinas de gas utilizadas para generar vapor de proceso y electricidad, hornos de recuperación de fábricas de pulpa que queman el licor de pulpa usado para recuperar químicos, hornos de cal que producen óxido de calcio a partir de carbonato de calcio (parte del proceso de recuperación química en las fábricas de pulpa kraft) y dispositivos de combustión que oxidan los compuestos de azufre reducidos presentes en los gases no condensables generados durante la fabricación de pulpa kraft [...]. Obtenido de: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3155/1047-3289.57.8.901>



## 5. VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE A TRAVÉS DE IMÁGENES SATELITALES

La Figura N° 09, muestra la distribución espacial de la densidad de la columna vertical troposférica del NO<sub>2</sub> (μmol/m<sup>2</sup>), obtenidas del satélite Sentinel 5P (instrumento Tropomi) a una resolución aproximada de 5 km x 3.5 km durante el mes de febrero. Es así como, la Figura N°09a, muestra la distribución espacial promedio de NO<sub>2</sub> en la primera decadiaria (1 a 10 de febrero), la Figura N°09b, en la segunda decadiaria (11 al 20 de febrero) y la Figura N°09c en la tercera decadiaria (21 al 29 de febrero).

Figura N°09. Distribución espacial de la columna del NO<sub>2</sub> (μmol/m<sup>2</sup>) en la troposfera del AMLC.



Durante la primera decadiaria, la mayor densidad del NO<sub>2</sub> en la columna vertical troposférica se registró principalmente en la zona de Lima Norte y Este, alcanzando valores máximos entre 87 y 107 μmol/m<sup>2</sup>, lo cual pudo estar relacionado al incremento en el tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular, ver Figura N° 05) durante la segunda mitad de esta decadiaria. Durante la segunda decadiaria se presentó una disminución en promedio de la densidad del NO<sub>2</sub> con respecto a la primera decadiaria de hasta 14%, alcanzando sus mayores densidades principalmente en la zona de Lima Norte y Este con valores entre 87 y 112 μmol/m<sup>2</sup>, lo cual pudo estar relacionado a la disminución de los valores del tiempo de recorrido (menor congestión vehicular, ver Figura N° 05). Finalmente, para la tercera decadiaria hubo un incremento en promedio de los valores con respecto a la segunda decadiaria de hasta 18%, siendo la zona de Lima Este la que presentó un valor máximo de 123 μmol/m<sup>2</sup>, lo cual pudo estar relacionado al incremento del tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular, ver Figura N° 05). Cabe precisar, que el origen del NO<sub>2</sub> está vinculado a la oxidación del nitrógeno atmosférico por combustión, principalmente de la actividad vehicular.<sup>27,28</sup>

<sup>27</sup> Monitoreando el Dióxido de Nitrógeno desde el Espacio. Obtenido de: [https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Inside\\_Look\\_AQ\\_Spanish.pdf](https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Inside_Look_AQ_Spanish.pdf)

<sup>28</sup> Óxidos de Nitrógeno. Obtenido de: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos-nitrogeno.html>

## 6. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL AMLC

El índice de calidad del aire (ICA), está basado en valores establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA por sus siglas en inglés). Los ICAs son valores que permiten informar el estado de la calidad del aire, permitiendo a la población conocer sobre qué tan limpio o saludable está el aire y que efectos podría causar en la salud<sup>29</sup>.

### 6.1. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM<sub>10</sub>

La Figura N° 10 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM<sub>10</sub> asociados a su respectivo estado de la calidad del aire, en la cual se observa que las estaciones CRB, SJL, STA y CDM presentaron 29 días con calidad del aire “Buena”. La estación SMP presentó 26 días con calidad del aire “Buena”. La estación VMT presentó 27 días con calidad del aire “Buena”. La estación CRS presentó 15 días con calidad del aire “Moderada” y 12 días con calidad del aire “Buena”. La estación PAR y SBJ presentó 10 días con calidad del aire “Moderada” y 19 días con calidad del aire “Buena”.

Figura N° 10. Índice de la Calidad del Aire para PM<sub>10</sub>



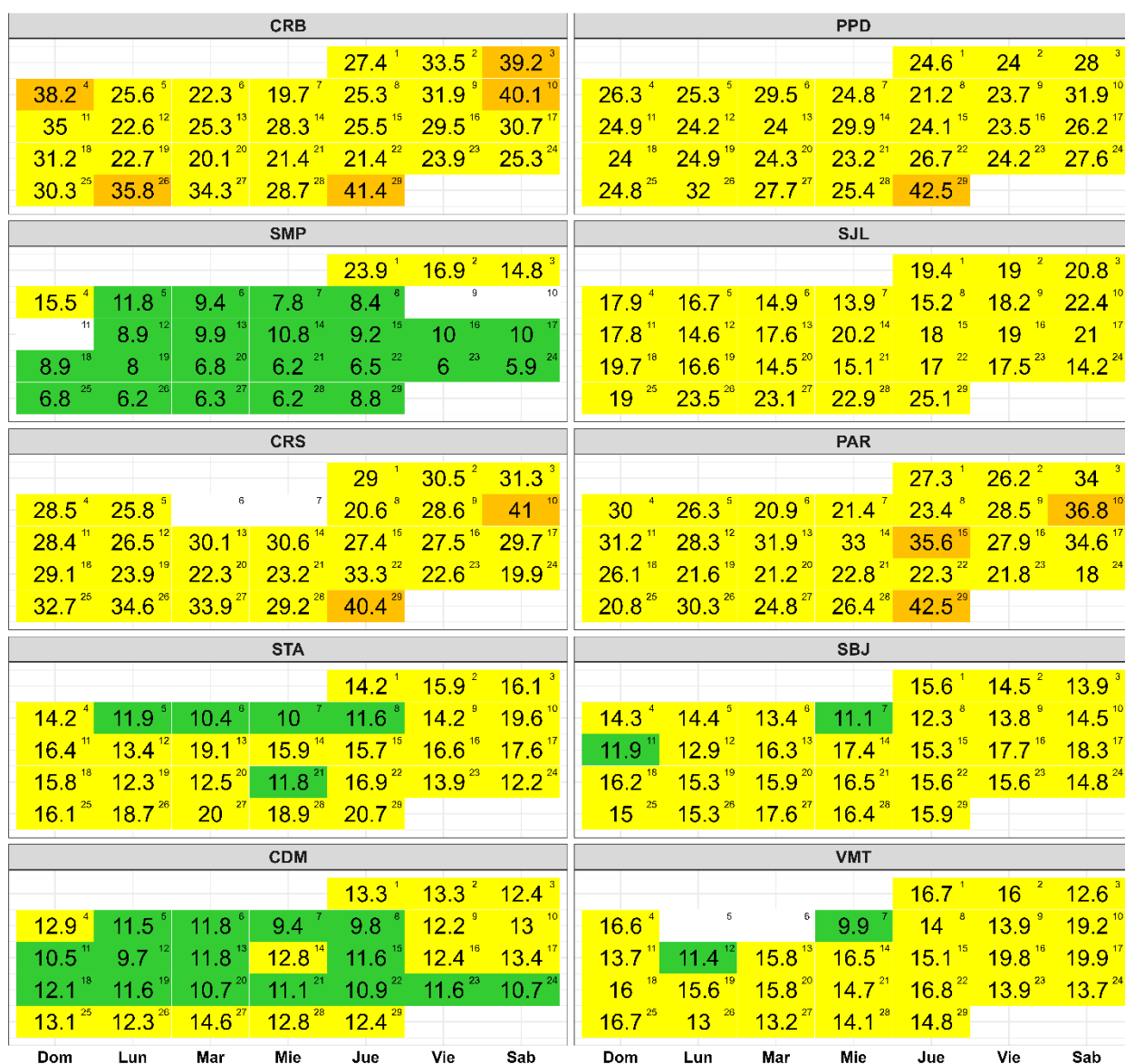
Concentración PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	54	Buena	0	50
55	154	Moderada	51	100
155	254	Insalubre para grupos sensibles	101	150
255	354	Insalubre	151	200

<sup>29</sup> Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: [https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/air\\_quality\\_brochure\\_02\\_14\\_0.pdf](https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/air_quality_brochure_02_14_0.pdf)

## 6.2. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM<sub>2,5</sub>

La Figura N° 11 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM<sub>2,5</sub> asociados a su respectivo estado de la calidad del aire, en la cual se observó que la estación CRB presentó 5 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 24 días con calidad del aire “Moderada”. La estación PPD presentó 1 día con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 28 días con calidad del aire “Moderada”. La estación SMP presentó 4 días con calidad de aire “Moderada” y 22 días con calidad de aire “Buena”. La estación SJL presentó 29 días con calidad del aire “Moderada”. La estación CRS presentó 2 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 25 días con calidad del aire “Moderada”. La estación PAR presentó 3 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 26 días con calidad del aire “Moderada”. La estación STA presentó 24 días con calidad del aire “Moderada” y 5 días con calidad del aire “Buena”. La estación SBJ presentó 27 días con calidad del aire “Moderada” y 2 días con calidad del aire “Buena”. La estación CDM presentó 14 días con calidad del aire “Moderada” y 15 días con calidad del aire “Buena”. La estación VMT presentó 25 días con calidad del aire “Moderada” y 2 días con calidad del aire “Buena”.

Figura N° 11. Índice de la Calidad del Aire para PM<sub>2,5</sub>



Concentración PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	12	Buena	0	50
12.1	35.4	Moderada	51	100
35.5	55.4	Insalubre para grupos sensibles	101	150
55.5	150.4	Insalubre	151	200



## 7. CONCLUSIONES

- Las condiciones meteorológicas influyeron en el comportamiento diario de los contaminantes atmosféricos en el AMLC durante el mes de febrero. La persistencia de temperaturas altas y el incremento de vientos favorecieron el incremento del  $PM_{10}$ . Asimismo, el incremento de los valores de humedad relativa y tráfico vehicular estuvieron vinculados a concentraciones altas de  $PM_{2,5}$ .
- Durante el mes de febrero, los valores más altos de tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular), se presentaron en la decadiaria 1 y 3, estos influyeron en el incremento de las concentraciones de  $PM_{2,5}$  de acuerdo con los registros de la REMCA. En el caso de los contaminantes gaseosos como el  $CO$ ,  $O_3$  y  $NO_2$  se presentaron altos registros de concentración para los horarios y días con incrementos en el tiempo de recorrido.
- En ninguno de los casos las concentraciones de  $PM_{2,5}$  y  $PM_{10}$  superaron su respectivo ECA – aire. En el caso del  $PM_{10}$ , el mayor valor se registró en la zona este del AMLC durante la segunda decadiaria, específicamente en la estación PAR, lo cual estaría principalmente relacionado con las actividades industriales que se desarrollan en los alrededores del punto de monitoreo. Mientras que en el caso del  $PM_{2,5}$ , el mayor valor se registró en la zona norte, durante la tercera decadiaria, específicamente en la estación PPD, lo cual estaría principalmente relacionado con las condiciones meteorológicas presentadas durante el mes de febrero.
- Durante el período de análisis, las concentraciones diarias de  $CO$ ,  $NO_2$  y  $O_3$  se mantuvieron dentro de los límites establecidos por sus respectivos ECA – aire en todos los casos. Las concentraciones máximas se asociaron con días en los que se registró un aumento en el tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular), condiciones meteorológicas favorables para la acumulación de contaminantes atmosféricos, así como actividades industriales cercanas a las estaciones de monitoreo
- La densidad de  $NO_2$  en la columna vertical troposférica mostró sus mayores valores durante la decadiaria 1 y 3 principalmente en las zonas Norte y Este. Estos valores también se vieron reflejados en los valores de las concentraciones en superficie registradas por las estaciones de la REMCA.
- Con respecto al ICA para el contaminante  $PM_{10}$ , se pudo apreciar que las estaciones CRB, SMP, SJL, STA, CDM y VMT presentaron todos o casi todos los días calidad del aire “Buena”. Por otro lado, para el contaminante  $PM_{2,5}$ , la estación CRB presentó mayor cantidad de días con el estado de calidad del aire de “Insalubre para grupos sensibles” (5 días), seguido de la estación PAR (3 días) y CRS (2 días).

## 8. PERSPECTIVAS DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL MES DE MARZO 2024

De acuerdo al pronóstico climático<sup>30</sup> para el mes de marzo del 2024, se espera que en el AMLC las temperaturas máximas y mínimas estén se ubiquen dentro de lo normal. Considerando el comportamiento estacional de estas variables meteorológicas, se esperaría un ligero incremento de las concentraciones de  $PM_{10}$  y que las de  $PM_{2,5}$  se mantengan en un rango similar a las registradas en febrero del 2024.

<sup>30</sup> Documento: Boletín climático nacional – diciembre 2023 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-126.pdf>

---

**Para más información sobre el presente informe, contactar con:**

Ing. Jhojan Pool Rojas Quincho

[jprojas@senamhi.gob.pe](mailto:jprojas@senamhi.gob.pe)

**Subdirector de Evaluación del Ambiente Atmosférico**

**Elaboración**

Ing. Lourdes María Isabel Urteaga Tirado ([lurteaga@senamhi.gob.pe](mailto:lurteaga@senamhi.gob.pe))

Ing. Dayana Lucero Acuña Valverde

Ing. José Hitoshi Inoue Velarde

Ing. Elvis Anthony Medina Dionicio

Bach. Hanns Kevin Gómez Muñoz

**Apoyo**

Tec. Rosalinda Aguirre Almeyda

---

Para estar informado permanentemente sobre la **EVOLUCIÓN HORARIA DE LOS CONTAMINANTES PRIORITARIOS DEL AIRE** en Lima Metropolitana visita este enlace:

<http://www.senamhi.gob.pe/?p=calidad-de-aire>

---

Encuentra los últimos **6 BOLETINES MENSUALES DE LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE** de Lima Metropolitana en el siguiente enlace:

<http://www.senamhi.gob.pe/?p=boletines>

Suscríbete al **BOLETÍN MENSUAL DE LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE** de Lima Metropolitana en el siguiente enlace:

<https://forms.gle/a4hpxqSc8KLj47sQ6>

---

**Próxima actualización:** 15 de marzo del 2024

