

BOLETÍN VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE

Área metropolitana de Lima y Callao

Enero 2024



VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – ENERO 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 enero^{1,2} y las salidas resultantes de la aplicación del modelo Weather Research and Forecasting (WRF)³ 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 lento en el AMLC a partir de imágenes de Google Traffic⁴. 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 5P⁵.

*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.*

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

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

³ 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.).

⁴ 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 desde una categoría de rápido a lento.

⁵ 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.).

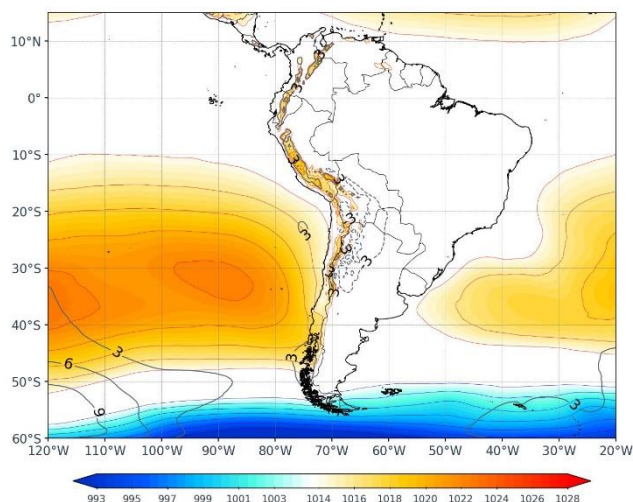
1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

Para un mejor entendimiento de las condiciones sinópticas a niveles bajos y oceánicas en el AMLC, se realizó un análisis por decadiarias (cada diez días), obteniéndose tres periodos de análisis. Es así que, para el mes de enero se conformó la decadiaria 1 (del 1 al 10), decadiaria 2 (del 11 al 20) y decadiaria 3 (del 21 al 31).

1.1. PRIMERA DECADIARIA (1 al 10 de enero)

Durante la primera decadiaria, el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) predominó ligeramente desplazado hacia el este respecto a lo climatológico con núcleo en 33°S y 90°W con valores de presión superiores a los 1022 hPa, siendo muy intenso con respecto a lo climatológico¹ (Figura N°01a). Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur, con velocidades entre 1 y 3 m/s. Por otro lado, las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) estuvieron cercanos a los +1.54°C frente a las costas de AMLC⁶, lo cual repercutió en el incremento de temperaturas máximas y mínimas del aire por encima de su normal en +2.1°C y +1.3°C respectivamente².

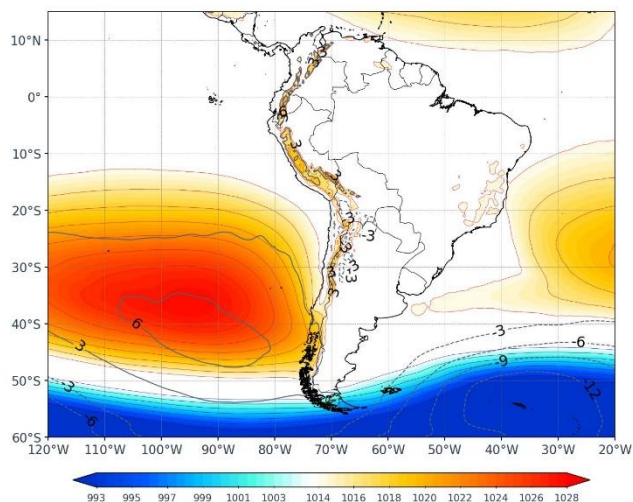
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de enero)

Para la segunda decadiaria, el APS presentó un ligero desplazamiento hacia el sureste y una fuerte intensificación respecto a lo climático con núcleo sobre los 35 ° S y 95 ° W y valores de presión superiores a los 1028 hPa¹ (Figura N° 01b). Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur suroeste y velocidades entre 4 m/s y 6 m/s. Por otro lado, respecto a las ATSM⁶ estas se encontraron alrededor de los +1.3°C frente a las costas del AMLC⁶, lo cual repercutió en el incremento de temperaturas máximas y mínimas del aire por encima de su normal en +1.7°C y +0.7°C respectivamente².

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

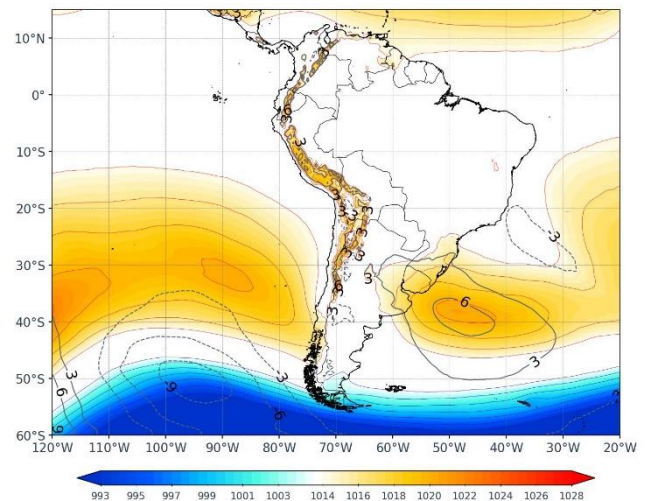


⁶ Temperatura superficial del mar y anomalías térmicas en el litoral peruano. Obtenido de: http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/index2.php?id_seccion=101780302000000000000000

1.3. TERCERA DECADIARIA (21 al 31 de enero)

Finalmente, para la tercera decadiaria, el APS predominó con una configuración zonal y con dos núcleos uno en 30°S - 90°W y el otro en 38°S - 120°W, ambos con valores de presión superiores a los 1020 hPa, intensidad ligeramente baja respecto a lo climatológico¹ (Figura N°01c). Estos vientos presentaron una dirección predominante del sureste, paralelos a la costa y velocidades entre 5 y 6 m/s. Por otro lado, respecto a las ATSM estas se encuentran en +1.76°C frente a las costas de AMLC⁶, lo cual repercutió en las temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándose por encima de su normal en 3.2°C y 1.7°C respectivamente².

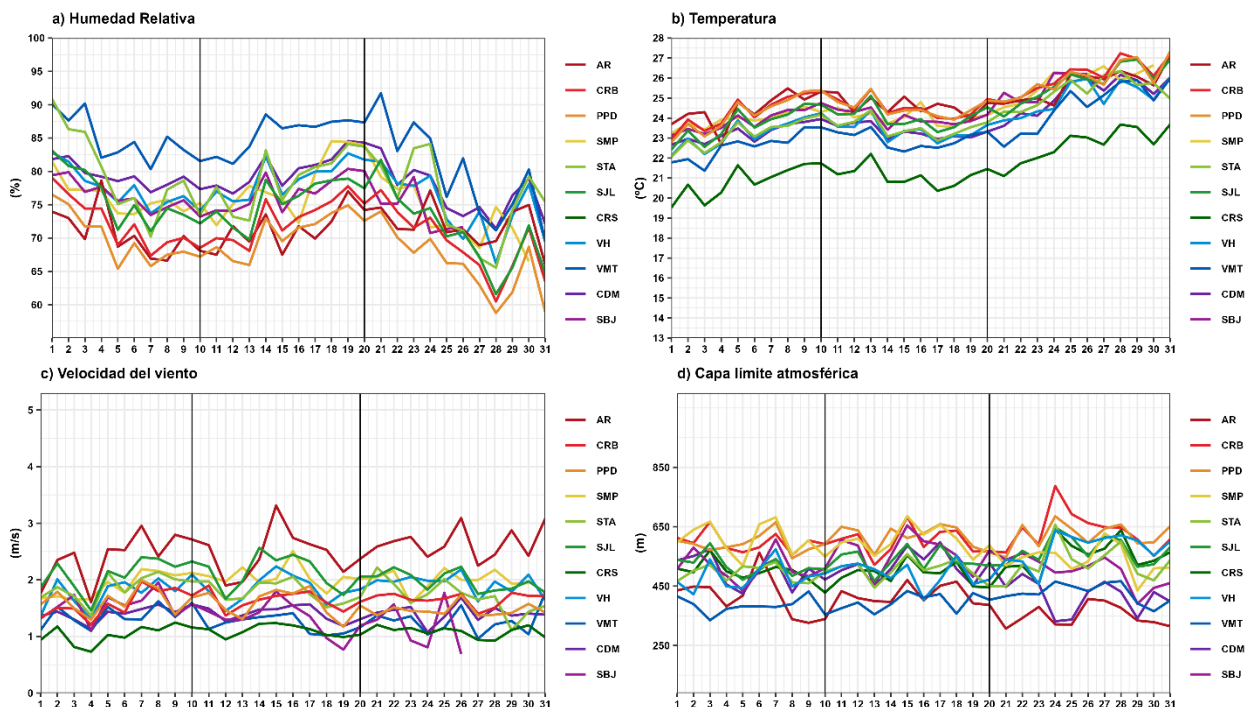
Figura N°01c. Variación del APS en la decadiaria 3.



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), Carabayllo (CRB), Puente Piedra (PPD), San Martín de Porres (SMP), Santa Anita (STA), San Juan de Lurigancho (S JL), Ceres (CRS), Alexander Von Humboldt (VH), Campo de Marte (CDM), San Borja (SBJ) y Villa María del Triunfo (VMT). Adicionalmente se representó la variabilidad diaria de la capa límite atmosférica (CLA)⁷ 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



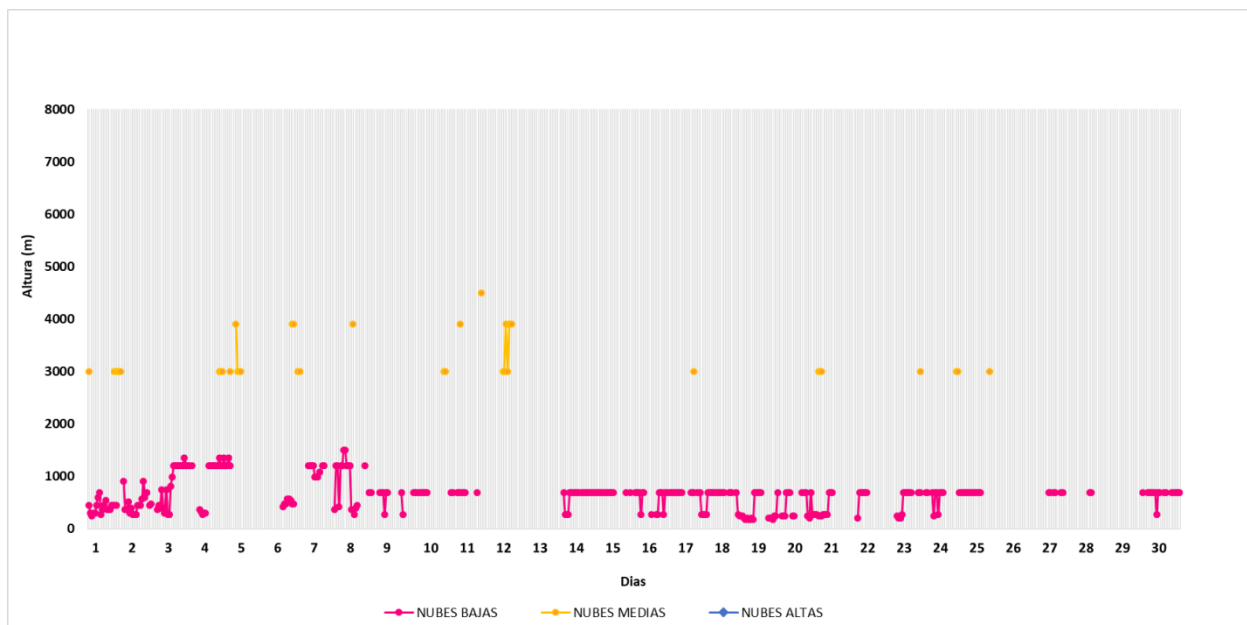
⁷ CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

Con respecto a la humedad relativa (Figura N°02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 66.62% a 90.88%, para la segunda decadiaria valores entre 67.5% a 88.54%, y en la tercera decadiaria valores entre 58.7 a 91.72%, de las cuales, las estaciones STA y VMT mantuvieron los valores más altos, con 83.2% y 77.9% en promedio. Por otro lado, en relación con la temperatura (Figura N°02b) durante la primera decadiaria presentó valores entre 19.5 a 25.5 °C, para la segunda decadiaria valores entre 20.3 a 25.4°C, y en la tercera decadiaria valores entre 21.1 a 27.3 °C, la estación de CRS presentó temperaturas menores en las tres decadiarias en comparación con las demás estaciones, en general las temperaturas presentaron un incremento hacia su tercera decadiaria. En cuanto a la velocidad del viento (Figura N° 02c), éste fue variable, lo que se refleja en sus valores, los mismos que oscilaron entre 0.72 a 3.31 m/s durante todo el mes. En el caso de la CLA (Figura N°02d) se presentó una tendencia ligera al incremento hacia la tercera decadiaria; asimismo, las estaciones CRB, PPD y SMP alcanzaron los valores más altos, mientras que, las estaciones de VMT y AR los valores más bajos.

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 ceilómetro⁸ de la EMA Aeropuerto Internacional Jorge Chávez ubicada en el Callao (Figura N°03), se observó que durante el mes de enero las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) tuvieron mayor presencia, alcanzando un 50.8%. En contraste, la presencia de nubes medias (ABN mayor a 2000 m y menor a 6000 m) fue considerablemente menor, representando un 5.3%. Es importante precisar que, según los resultados del monitoreo, estos resultados no significan que no haya ocurrido presencia de 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 33.5% de días despejados.

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



En comparación con diciembre, se presentaron más días despejados y un incremento de los días con nubes medias; pero predominó la presencia de nubes bajas, algo característico del verano, evidenciando que la estabilidad atmosférica persistió en la primera mitad de enero.

⁸ Instrumento que mide la altura de la base de la nube más cercana a superficie tomando a ésta como referencia.

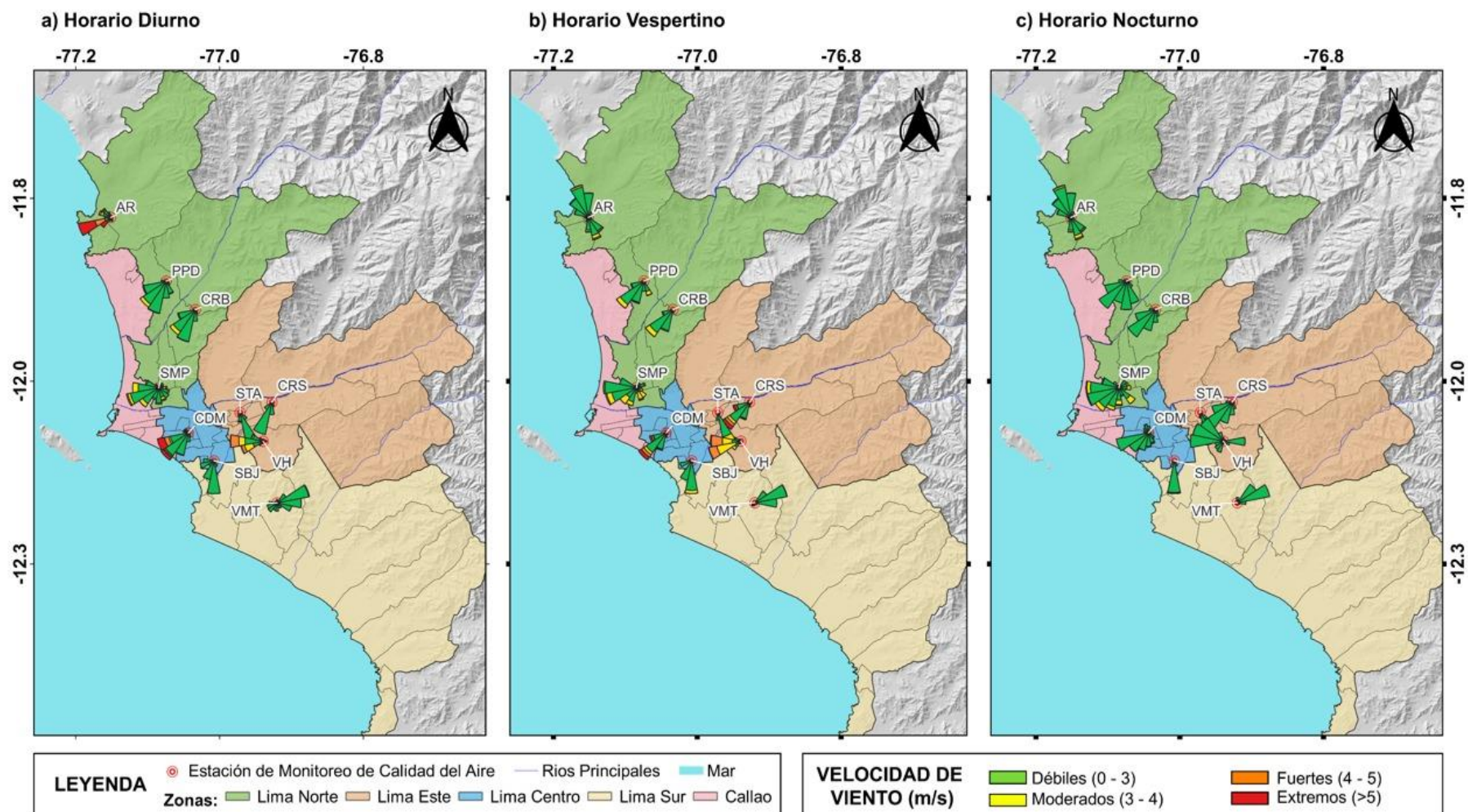
2.2. ANÁLISIS DEL VIENTO EN SUPERFICIE POR HORARIOS

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 CRS, PPD, CRB y CDM presentaron vientos con una predominancia del suroeste (SO). La estación CRS registró una intensidad de categoría débil (0 - 3 m/s), las estaciones de PPD y CRB intensidades de categoría moderada (3 - 4 m/s) y finalmente CDM registró una intensidad de categoría extrema (>5m/s). Por otro lado, las estaciones de SMP, AR y VH, presentaron vientos con una predominancia del oeste (O), donde la estación SMP alcanzó intensidades de categoría fuerte (4 - 5 m/s), mientras que las estaciones AR y VH, alcanzaron intensidades de categoría fuerte (4 - 5 m/s). Asimismo, la estación STA, presentó vientos con una dirección predominante del sur sureste (SSE) e intensidades de categoría débil (0 - 3 m/s). En el caso de la estación VMT presentó vientos con una dirección predominante del este (E), alcanzando intensidades de categoría débil (0 - 3 m/s).

Para el horario vespertino (Figura N°04b), las estaciones PPD, CRB, CRS y CDM presentaron vientos con una predominancia del suroeste (SO), con intensidades de categoría moderada (3 - 4 m/s) para las estaciones de PPD y CRB; y extrema (>5 m/s) para CRS y CDM. Por otro lado, en las estaciones SMP y VH, se tuvo una dirección predominante del oeste (O) y oeste suroeste (OSO) y una intensidad de categoría moderada (3 - 4 m/s) y fuerte (4 - 5 m/s), respectivamente. Asimismo, la estación STA presentó vientos con una predominancia del sur sureste (SSE) alcanzando una intensidad de categoría moderada (3 - 4 m/s). Con respecto a la estación AR presentó vientos con una dirección predominante del nor noroeste (NNO) con intensidad de categoría moderada (3 - 4 m/s); la estación VMT presentó vientos con una dirección predominante del este noreste (ENE) con intensidad de categoría débil (0 - 3 m/s).

Para el horario nocturno (Figura N°04c), las estaciones CDM y SMP presentaron vientos con una predominancia del oeste suroeste (OSO) y con intensidades de categoría débil (0 - 3 m/s) y moderada (3 - 4 m/s), respectivamente. Asimismo, las estaciones CRS, CRB y PPD presentaron vientos con una predominancia del suroeste (SO) e intensidad de categoría débil (0 - 3 m/s). Por otro lado, las estaciones AR y VMT presentaron vientos con predominancia del nor noroeste (NNO) y este noreste (ENE) con intensidades de categoría moderada (3-4 m/s) y débil (0 - 3 m/s), respectivamente. Con respecto a la estación SBJ, se tuvo una dirección predominante del sur (S) y la estación VH presentó vientos con una predominancia del oeste (O), ambas con intensidad de categoría débil (0 - 3 m/s).

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



Las 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).

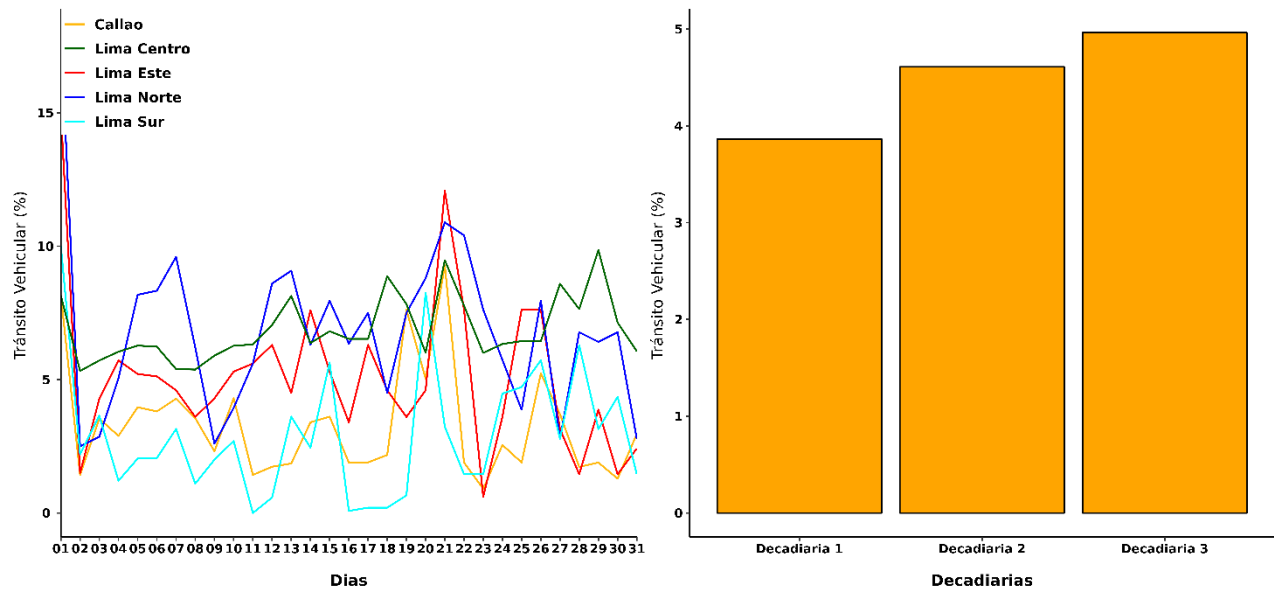
3. ACTIVIDAD VEHICULAR EN EL AMLC

La actividad vehicular tiene una contribución de más del 50% sobre la contaminación del aire en el AMLC.⁹ De esta manera, un alto porcentaje de tránsito vehicular lento está estrechamente relacionado con el incremento de emisiones de contaminantes atmosféricos, mientras que un bajo porcentaje de éste, se relaciona a una disminución de emisiones.

De acuerdo a lo mencionado, se han utilizado imágenes de Google *Traffic* y técnicas de inteligencia artificial como la visión por computadora¹⁰ a fin de cuantificar en porcentaje los estados del tránsito vehicular para cada una de las zonas del AMLC (Lima Norte, Lima Este, Lima Centro, Lima Sur y Callao).

En la Figura N°05 se puede observar que durante la primera decadiaria se presentaron los menores porcentajes de tránsito vehicular lento del mes de enero. En contraste, para la segunda y tercera decadiaria se evidenció una tendencia al incremento, siendo las zonas de Lima Norte, Lima Centro y Lima Este las que presentaron los mayores valores del porcentaje de tránsito vehicular lento.

Figura N°05. Variación diaria del tránsito vehicular en el AMLC.



⁹ 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>

¹⁰ La visión por computadora es una rama de la inteligencia artificial y la informática asociado al análisis de imágenes, la cual incorpora un conjunto de técnicas, algoritmos y sistemas que facultan a una computadora con la capacidad de "ver" y extraer información a partir de lo que han "visto", la cual puede ser reconocer patrones, objetos o personas, entre otras tareas visuales. Obtenido de: <https://iaarbook.github.io/vision-por-computadora/>, <https://www.ibm.com/mx-es/topics/computer-vision>

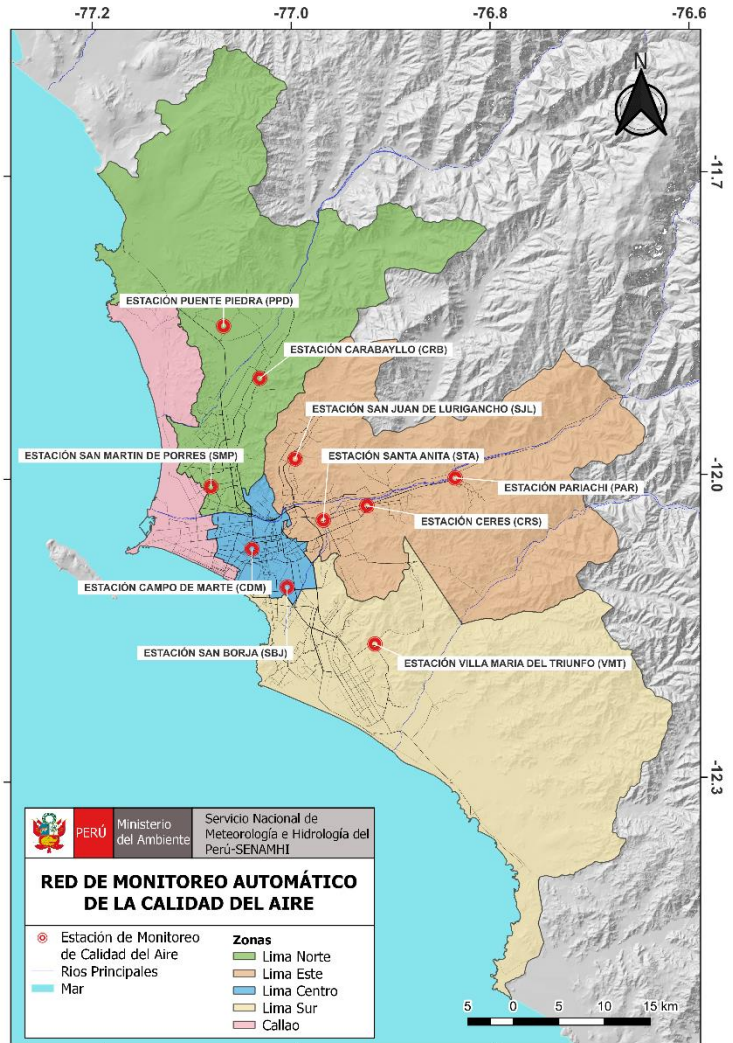
4. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

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 PM₁₀ (Material Particulado con diámetro menor a 10 micras), PM_{2,5} (Material Particulado menor a 2,5 micras), NO₂ (Dióxido de Nitrógeno), O₃ (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
Lima 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
Lima 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
Lima Sur	Estación Villa María del Triunfo (VMT) Parque Virgen de Lourdes Zona Nueva Esperanza en el distrito de Villa María del Triunfo
Lima 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 los contaminantes atmosféricos, las concentraciones de cada uno no deben superar su respectivo Estándar de Calidad Ambiental para Aire (ECA-aire) para 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

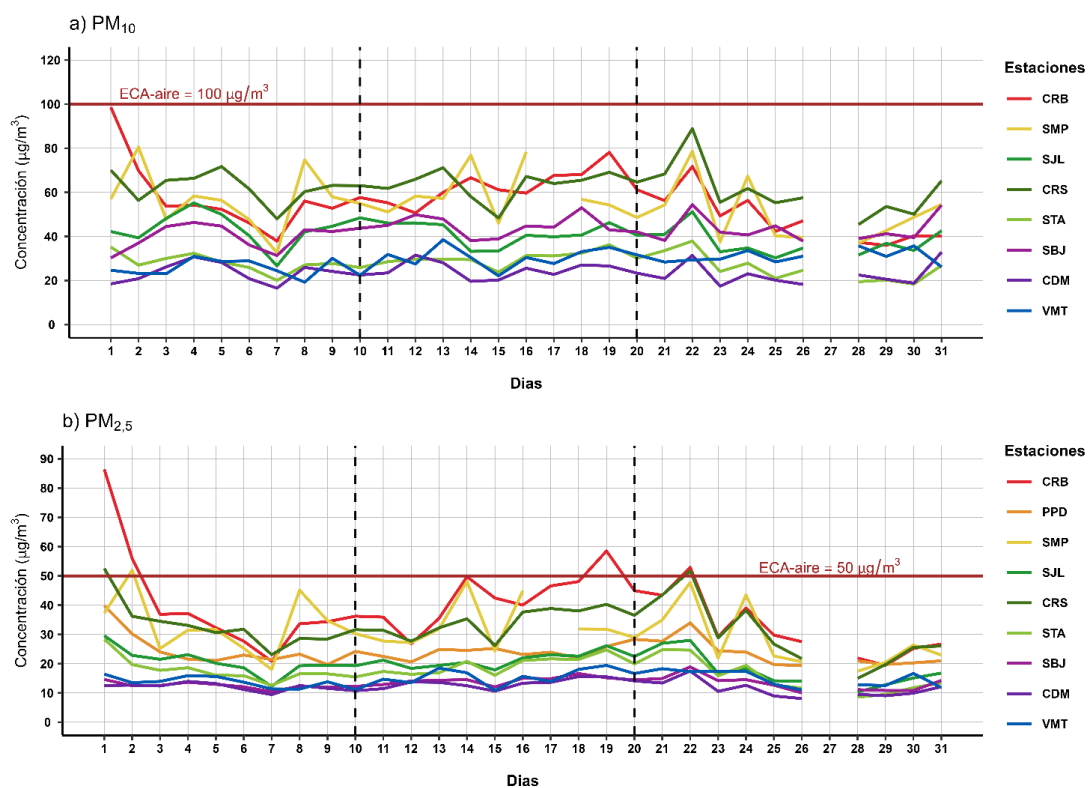
Con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el AMLC, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones del material particulado y gases durante el mes de enero. Los datos provinieron de las estaciones: Puente Piedra (PPD), Carabayllo (CRB), San Martín de Porres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

4.1.1. MATERIAL PARTICULADO

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 μm , y las denominadas partículas gruesas que incluyen a las partículas con diámetro menor a 10 μm .¹¹

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 AMLC, se ha visto que bajas temperaturas están relacionadas con el incremento de las concentraciones de $\text{PM}_{2,5}$ y la disminución de las concentraciones de PM_{10} , mientras que una reducción en la humedad relativa coincide con la disminución del $\text{PM}_{2,5}$ e incremento de PM_{10} .¹²

Figura N°07. Variación diaria del PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el AMLC.



¹¹ 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.

¹² 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.

En la Figura N° 07a, se observa que las concentraciones diarias de PM₁₀ registradas en las estaciones no excedieron el límite establecido por su ECA-aire de 100 µg/m³ como promedio diario durante el período de monitoreo. Se destaca que, en la zona norte, la mayor concentración fue reportada en la estación CRB durante la primera decadiaria, alcanzando 98.64 µg/m³ el lunes 1, lo cual sería posiblemente atribuible a la quema de juegos pirotécnicos. En la zona este, la mayor concentración fue reportada en la estación CRS durante la tercera decadiaria, alcanzando 88.92 µg/m³ el lunes 22, lo cual podría correlacionarse con un aumento en tránsito vehicular (ver Figura N° 05). En la zona centro, la mayor concentración se registró en la estación SBJ con 54.41 µg/m³ también el lunes 22, situación que podría vincularse al ascenso de la temperatura (ver Figura N° 02b), el aumento de la velocidad del viento (ver Figura N° 02c) y la disminución de la humedad relativa (ver Figura N° 02a). Por último, en la zona sur, la estación VMT presentó su concentración máxima durante la segunda decadiaria con 38.52 µg/m³ el sábado 13, lo cual podría relacionarse con un incremento de la temperatura para esta fecha.

En la Figura N° 07b, se evidencia que las concentraciones diarias de PM_{2.5} registradas en las estaciones superaron el ECA-aire para PM_{2.5} (50 µg/m³ como promedio diario) en ciertos días monitoreados. En la estación SMP, se excedió este estándar durante la primera decadiaria, alcanzando 51.9 µg/m³ el día martes 2, este incremento podría estar relacionado a las actividades industriales que se desarrollan en el área de influencia de la estación¹³, como la fundición de hierro, acero y metales no ferrosos, entre otras¹⁴. Por otro lado, la estación CRS presentó superaciones en la primera y tercera decadiaria, registrando 52.5 µg/m³ el día lunes 1 y 51.7 µg/m³ el día lunes 22; el primer caso podría estar relacionado con la quema de juegos pirotécnicos en las festividades de inicio de año, mientras que el segundo caso estaría relacionado con el aumento del tránsito vehicular lento alrededor de esa fecha (ver Figura N° 05). Finalmente, en la estación CRB, se excedió el ECA en todas las decadiarias, con concentraciones máximas de 86.5 µg/m³ el día lunes 1 y 56.0 µg/m³ el día martes 2 para la primera decadiaria, 58.5 µg/m³ el día viernes 19 para la segunda decadiaria, y 52.9 µg/m³ el día lunes 22 para la tercera decadiaria; este comportamiento podría estar relacionado con la continuación de la quema de juegos pirotécnicos por las festividades de inicio de año en el caso de las fechas que superaron el ECA - aire en la primera decadiaria, mientras que para la otras fechas los valores registrados podrían estar relacionados con un incremento de la humedad relativa (ver Figura N° 02a).

4.1.2. GASES (CO, O₃ y NO₂)

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.¹⁵

El O₃ 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 + NO₂), conocidos como precursores. Por lo tanto, suele existir una relación inversa entre las concentraciones de NO₂ y O₃¹⁶. Asimismo, el ciclo diario del

¹³ Actividades industriales. Obtenido de: <https://pifa.oefa.gob.pe/mfiscamb/index.html#>

¹⁴ 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.

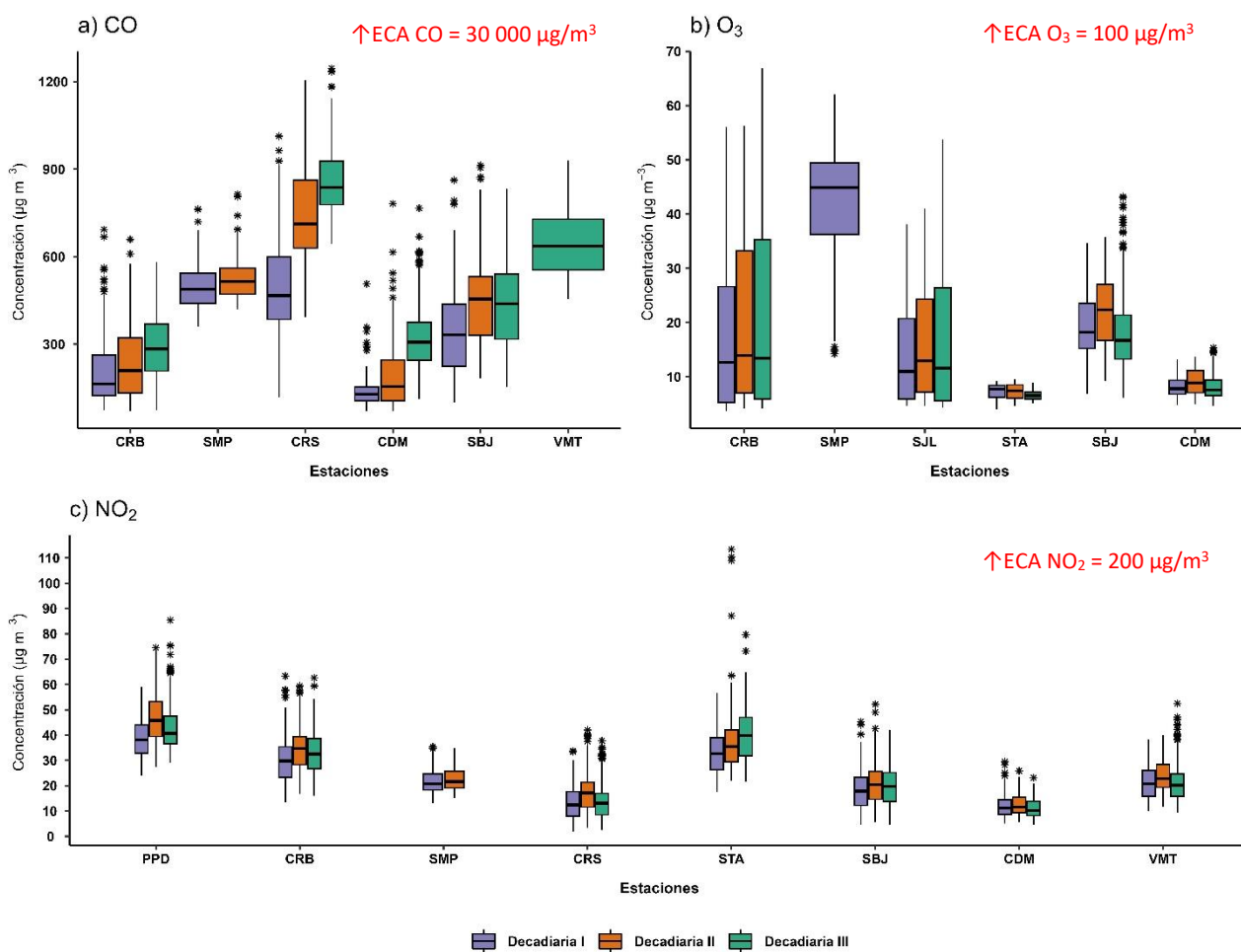
¹⁵ Rozante, J. R., Rozante, V., Souza Alvim, D., Ocimar Manzi, A., Barboza Chiquetto, J., Siqueira D'Amelio, M. T., & Moreira, D. S. (2017). Variations of carbon monoxide concentrations in the megacity of São Paulo from 2000 to 2015 in different time scales. *Atmosphere*, 8(5), 81.

¹⁶ 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.

NO, NO₂ y NO_x sigue una tendencia de onda doble, siendo que el pico del ciclo del O₃ aparece aproximadamente 6 horas después del pico del NO y 5 horas después del NO₂ ¹⁷. Por otro lado, se observa una estrecha relación entre los niveles elevados de O₃ 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 ¹⁸.

El NO₂ está considerado dentro del grupo de gases altamente reactivos conocidos como óxidos de nitrógeno (NO_x), siendo usado como un indicador de la presencia de este grupo más amplio ¹⁹. El NO₂ 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 NO₂, debido a que fomentan las reacciones que dan origen al O₃, favoreciendo con ello el consumo de NO₂ como su precursor ²⁰.

Figura N°08. Variación de las concentraciones del CO, O₃ y NO₂ (µg/m³) 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/m³ (como promedio

¹⁷ Han, S., Bian, H., Feng, Y., Liu, A., Li, X., Zeng, F., & Zhang, X. (2011). Analysis of the relationship between O₃, NO and NO₂ in Tianjin, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 11(2), 128-139.

¹⁸ Stathopoulou, E., Mihalakakou, G., Santamouris, M., & Bagiorgas, H. S. (2008). On the impact of temperature on tropospheric ozone concentration levels in urban environments. *Journal of Earth System Science*, 117, 227-236.

¹⁹ United States Environmental Protection Agency. (25 de julio del 2023). *Basic Information about NO₂*. <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2>

²⁰ Benites-Morales, O. F., y Pacsi-Valdivia, S. A. (2023). Análisis temporal de los contaminantes atmosféricos (NO₂, O₃ troposférico y CO) y su relación con la temperatura del aire y la radiación solar en Lima Metropolitana. *Ecología aplicada*, 22(1), 17-25.

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 814.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 12 de enero a las 09:00 horas, lo cual estaría posiblemente influenciado por el aumento del tránsito vehicular lento en esa fecha (ver Figura N° 05). En la zona este, la mayor concentración se reportó en la estación CRS durante la tercera decadiaria, alcanzando el valor de 1245.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 30 de enero a las 01:00 horas, lo cual estaría asociado a la reducción de los valores de temperatura (ver Figura N° 02b). Respecto a la zona centro, la mayor concentración se registró en la estación SBJ durante la segunda decadiaria, alcanzando el valor de 913.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 12 de enero a las 09:00 horas, lo cual estaría coincidiendo con una reducción en la velocidad del viento, que limitaría la difusión del contaminante (ver Figura N° 02c). Finalmente, en la zona sur, la estación VMT presentó una concentración máxima en la tercera decadiaria de 929.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 31 de enero a las 20:00 horas, lo cual estaría influenciado por la disminución de la altura de la CLA (ver Figura N° 02d).

Respecto a la Figura N° 08b, se observa que las concentraciones promedio móvil de cada 8 horas de O_3 registradas en las estaciones no superaron el valor de su ECA-aire de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (como máxima media diaria de 8 horas) durante los días monitoreados. En todas las zonas estudiadas se alcanzó la máxima concentración durante la tercera decadiaria. Para la zona norte y la zona centro, la mayor concentración se registró el 24 de enero, alcanzando el valor de 66.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación CRB y 43.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación SBJ, lo cual pudo estar condicionado al incremento en la temperatura (ver Figura N° 02b). Por otro lado, en la zona este, la mayor concentración se registró en la estación SJL, alcanzando el valor de 53.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 21 de enero, lo cual estaría relacionado a las actividades industriales que se desarrollan en el área de influencia de la estación SJL. En todos los casos, las mayores concentraciones se registraron en los horarios posteriores al periodo de máxima radiación solar²¹ (comprendido entre las 11:00 horas y 15:00 horas).

En la Figura N° 08c, se observa que las concentraciones horarias de NO_2 registradas en las estaciones no sobrepasaron los límites establecidos por su respectivo ECA-aire de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (como promedio horario) durante el periodo de monitoreo. No obstante, se destacó que, en la zona norte, la mayor concentración se registró en la estación PPD durante la tercera decadiaria, alcanzando el valor de 85.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 22 de enero a las 14:00 horas, lo cual estaría asociado al aumento del tránsito vehicular lento durante ese día (ver Figura N° 05). En la zona este, la mayor concentración se registró en la estación STA durante la segunda decadiaria, alcanzando el valor de 113.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 13 de enero a las 14:00 horas, este incremento estaría relacionado a las actividades industriales que se desarrollan en el área de influencia de la estación STA²², entre las que se encuentran la fabricación de pasta de madera, papel y cartón²³. En la zona centro, la mayor concentración se registró en la estación SBJ durante la segunda decadiaria, alcanzando el valor de 52.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 12 de enero a las 09:00 horas, lo cual se encontraría posiblemente relacionada con la reducción de la velocidad del viento durante ese periodo (ver Figura N° 02c). Por último, en la zona sur, la estación VMT registró una concentración máxima durante la tercera decadiaria de 52.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 24 de enero a las 15:00 horas, lo cual también estaría relacionado con una reducción de la velocidad del viento alrededor de ese periodo (ver Figura N° 02c), así como, con un aumento del tránsito vehicular lento (ver Figura N° 05).

²¹ Ozone and volatile organic compounds in the metropolitan area of Lima- Callao, Perú. Obtenido de: <https://rdcu.be/3z8c>

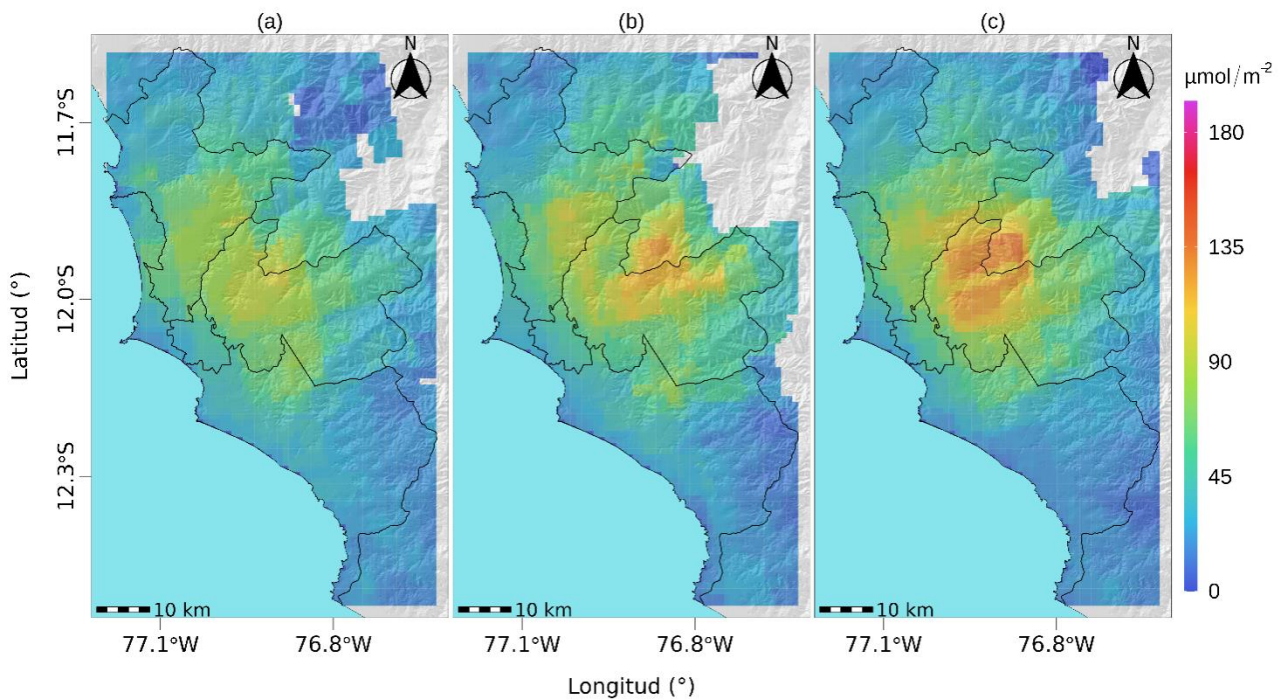
²² Actividades industriales. Obtenido de: <https://pifa.oefa.gob.pe/mfiscamb/index.html#>

²³ [...] las principales fuentes de SO_2 y NO_x 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 NO₂ (μmol/m²), obtenidas del satélite Sentinel 5P (instrumento Tropomi) a una resolución aproximada de 5 km x 3.5 km durante el mes de enero. Es así como, la Figura N°09a, muestra la distribución espacial promedio de NO₂ en la primera decadiaria (1 a 10 de enero), la Figura N°09b, en la segunda decadiaria (11 al 20 de enero) y la Figura N°09c en la tercera decadiaria (21 al 31 de enero).

Figura N°09. Distribución espacial de la columna del NO₂ (μmol/m²) en la troposfera del AMLC.



Durante la primera decadiaria, la mayor densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica se registró principalmente en la zona de Lima Norte y Este, alcanzando valores máximos entre 93 y 100 μmol/m², lo cual pudo estar relacionado al incremento del tránsito vehicular lento durante la segunda mitad de esta decadiaria (ver Figura N° 05). Durante la segunda decadiaria se presentó un incremento de la densidad del NO₂ con respecto a la primera decadiaria de hasta 29%, alcanzando sus mayores densidades principalmente en la zona de Lima Norte y Este con valores entre 101 y 124 μmol/m², lo cual pudo estar relacionado a los altos valores del tránsito vehicular lento durante toda la decadiaria (ver Figura N° 05). Finalmente, para la tercera decadiaria hubo un nuevo incremento de los valores con respecto a la segunda decadiaria de hasta 17%, alcanzando sus mayores densidades principalmente en la zona de Lima Norte y Este con valores entre 102 y 135.7 μmol/m², lo cual pudo estar relacionado a incrementos del tránsito vehicular lento para los últimos días (ver Figura N° 05). Cabe precisar que el origen del NO₂ está vinculado a la oxidación del nitrógeno atmosférico por combustión, principalmente de la actividad vehicular.^{24,25}

²⁴ Monitoreando el Dióxido de Nitrógeno desde el Espacio. Obtenido de: https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Inside_Look_AQ_Spanish.pdf

²⁵ 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>

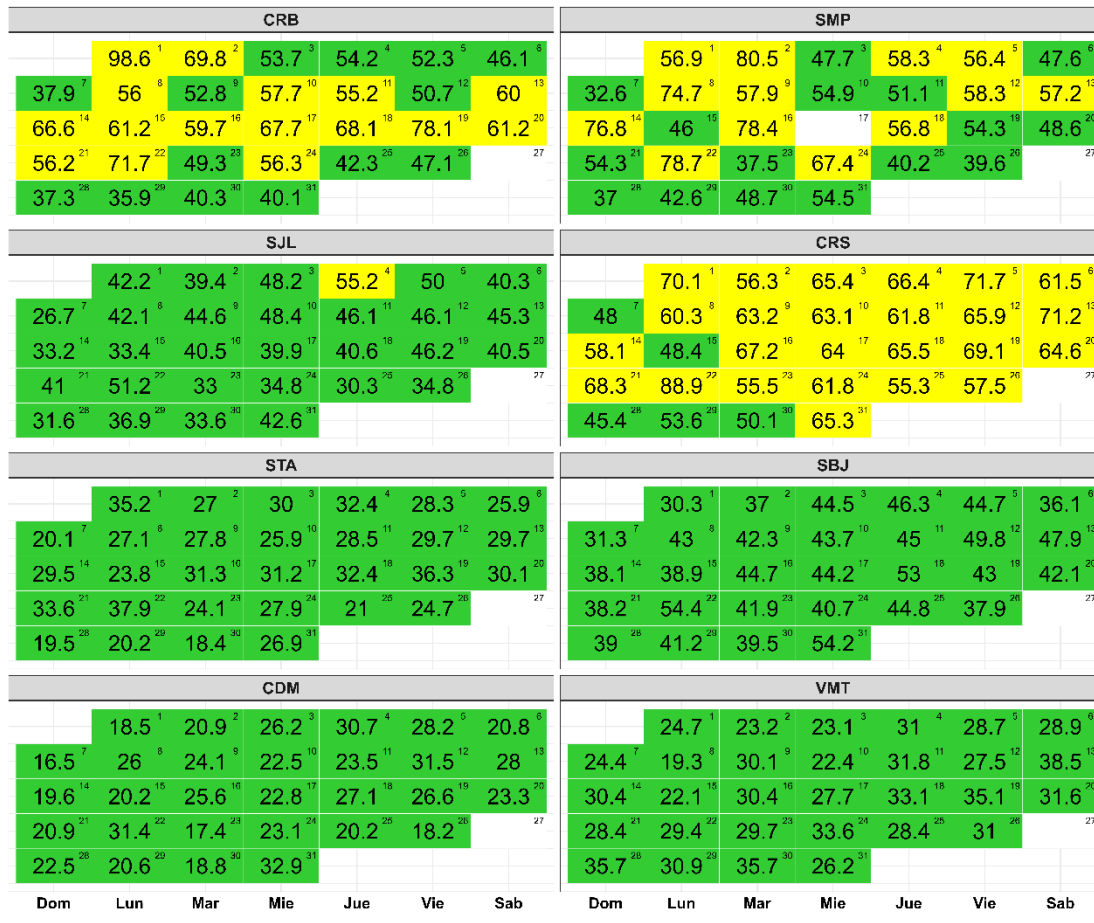
6. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL AMLC

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 salud²⁶.

6.1. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM₁₀

La Figura N° 10 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM₁₀ asociados a su respectivo ICA, en la cual se observa que la estación CRB presentó 16 días con calidad del aire “Moderada” y 14 días con calidad del aire “Buena”. La estación SMP presentó 13 días con calidad del aire “Moderada” y 16 días con calidad del aire “Buena”. La estación SJL presentó 1 día con calidad del aire “Moderada” y 29 días con calidad del aire “Buena”. La estación CRS presentó 25 días con calidad del aire “Moderada” y 5 días con calidad del aire “Buena”. La estación STA, SBJ, CDM y VMT presentaron 30 días con calidad del aire “Buena”.

Figura N° 10. Índice de la Calidad del Aire para PM₁₀



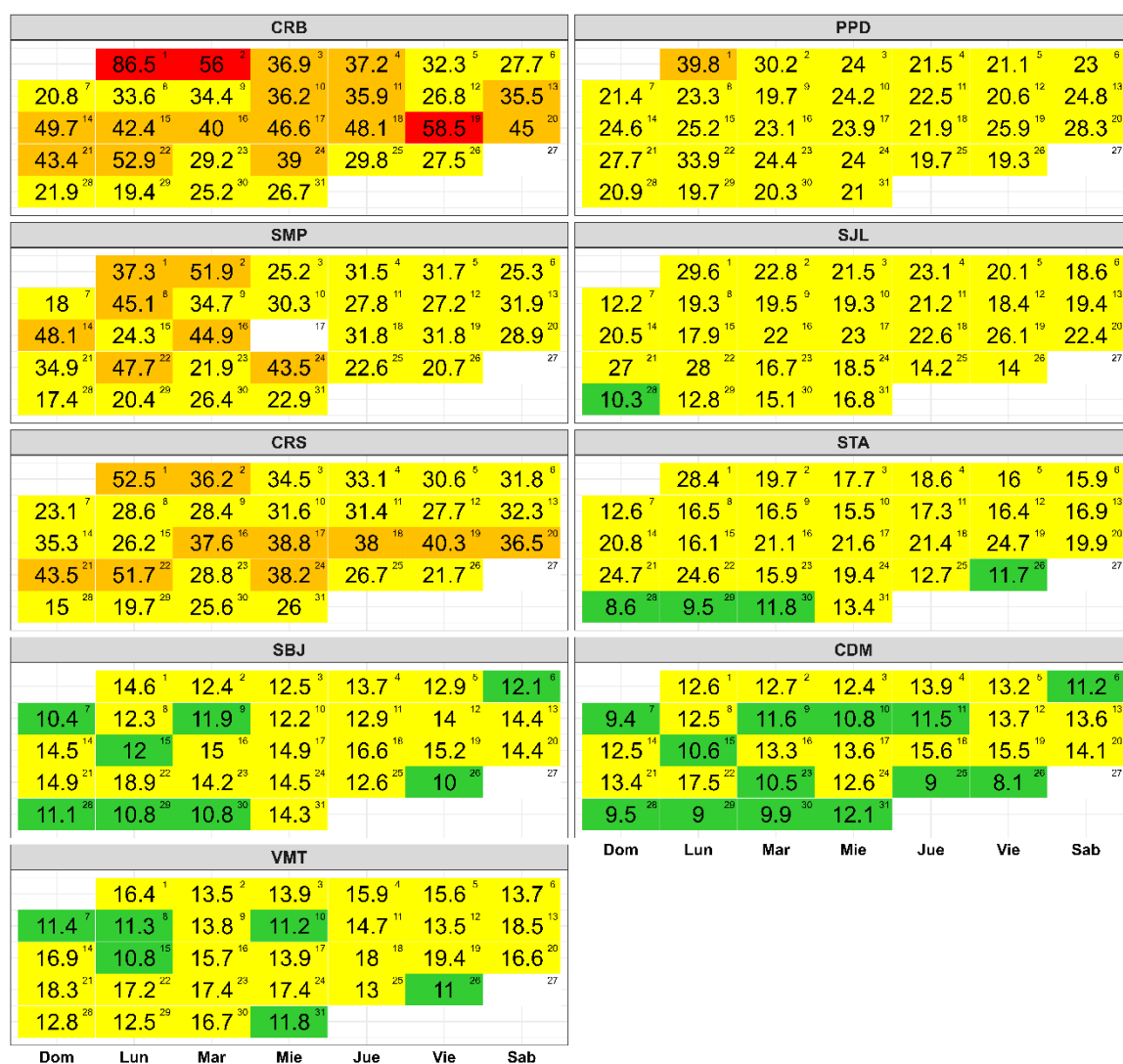
Concentración PM ₁₀ (µg/m ³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	54	Buena	0	50
55	154	Moderada	51	100
155	254	Insalubre para grupos sensibles	101	150
255	354	Insalubre	151	200

²⁶ Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/aji_brochure_02_14_0.pdf

6.2. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM_{2,5}

La Figura N° 11 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM_{2,5} asociados a su respectivo ICA, en la cual se observó que la CRB presentó 3 días con calidad del aire “Insalubre”, 14 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 13 días con calidad del aire “Moderada”. La estación PPD presentó 1 día con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 29 días con calidad del aire “Moderada”. La estación SMP presentó 7 días con calidad de aire “Insalubre para grupos sensibles” y 22 días con calidad de aire “Moderada”. La estación SJL presentó 29 días con calidad del aire “Moderada” y 1 día con calidad del aire “Buena”. La estación CRS presentó 10 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 20 días con calidad del aire “Moderada”. La estación STA presentó 26 días con calidad del aire “Moderada” y 4 días con calidad del aire “Buena”. La estación SBJ presentó 22 días con calidad del aire “Moderada” y 8 días con calidad del aire “Buena”. La estación CDM presentó 17 días con calidad del aire “Moderada” y 13 días con calidad del aire “Buena”. La estación VMT presentó 24 días con calidad del aire “Moderada” y 6 días con calidad del aire “Buena”.

Figura N° 11. Índice de la Calidad del Aire para PM_{2,5}



Concentración PM _{2,5} (µg/m ³)		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 enero. El incremento de la temperatura, favoreció al incremento del PM₁₀. Asimismo, el incremento en el tránsito vehicular y en los valores de humedad relativa, generaron condiciones para un incremento del PM_{2,5}.
- Los valores altos del tránsito vehicular lento que se presentaron en la decadiaria 2 y 3 influyeron en el incremento de las concentraciones de PM_{2,5} de acuerdo a los registros de la REMCA. En el caso de los contaminantes gaseosos como el CO, O₃ y NO₂ se presentaron altos registros de concentración para los horarios y días con incrementos del tránsito vehicular lento.
- Durante el período de análisis, las concentraciones diarias de PM₁₀ no sobrepasaron los límites establecidos por sus respectivos ECA-aire en ninguno de los casos. La máxima concentración se registró el lunes 1 de enero en la estación CRB. Por otro lado, las concentraciones diarias de PM_{2,5} excedieron los ECA-aire en la estación SMP (en la primera decadiaria), CRS (en la primera y tercera decadiaria) y en la estación CRB (en las tres decadiarias). Los picos más elevados de PM_{2,5} podrían estar vinculados a la quema de juegos pirotécnicos durante las celebraciones de Año Nuevo, así como a la intensificación del tránsito vehicular y a variaciones en variables meteorológicas como la temperatura y la humedad relativa.
- Durante el período de análisis, las concentraciones diarias de CO, NO₂ y O₃ 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 la actividad vehicular, condiciones meteorológicas favorables en términos de temperatura y velocidad del viento, así como actividades industriales cercanas a las estaciones de monitoreo.
- La densidad de NO₂ en la columna vertical troposférica mostró sus mayores valores durante la decadiaria 2 y 3 principalmente en las zonas Norte y Este. Estos valores también se vieron reflejados en los valores altos de las concentraciones en superficie registradas por las estaciones de la REMCA.
- Con respecto a los ICA para el contaminante PM₁₀, se pudo apreciar que las estaciones CRS, CRB y SMP presentaron la mayor cantidad de días con calidad del aire de “Moderada”. Por otro lado, para el contaminante PM_{2,5}, la estación CRB alcanzó 3 días con calidad del aire de “Insalubre” y además presentó la mayor cantidad de días con calidad del aire de “Insalubre para grupos sensibles”, seguido de la estación CRS y SMP.

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

De acuerdo al pronóstico climático²⁷ para el mes de febrero del 2024, se espera que en el AMLC las temperaturas máximas y mínimas estén por encima de lo normal. Asimismo, teniendo en cuenta el comportamiento estacional de estas variables, se esperaría un ligero incremento de las concentraciones de PM₁₀ y que las concentraciones de PM_{2,5} se mantengan en un rango similar a las registradas en el mes de enero de 2024.

²⁷ Documento: Boletín climático nacional – enero 2024 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-127.pdf>

Para más información sobre el presente informe, contactar con:

Ing. Jhojan Pool Rojas Quincho

jprojas@senamhi.gob.pe

Subdirector de Evaluación del Ambiente Atmosférico

Elaboración

Ing. Lourdes María Isabel Urteaga Tirado (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

industrias

parque
automotor

