

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

Área metropolitana de Lima y Callao

Diciembre 2025



VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – DICIEMBRE 2025

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 diciembre^{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 en el AMLC a partir de la información extraída 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 – diciembre 2025. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-130.pdf>

² Boletín climatológico de Lima – diciembre 2025. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-138.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.

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.).

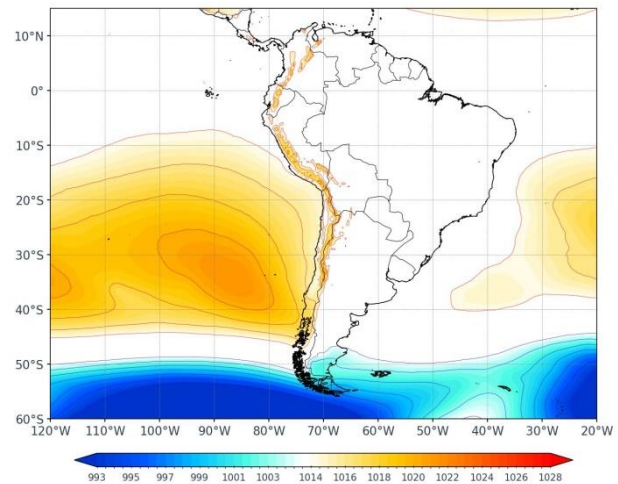
1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

Para un mejor entendimiento de las condiciones sinópticas a niveles bajos y oceánicos en el AMLC, se realizó un análisis por decadiarias (cada diez días), obteniéndose tres periodos de análisis. Es así como, para el mes de diciembre 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 diciembre)

En superficie, durante la primera decadiaria, el APS presentó un núcleo cercano a 1024–1026 hPa ubicado entre 35°S–40°S y 85°W–95°W, ligeramente más al norte y próximo al continente respecto a su climatología, reforzando la estabilidad frente a la costa central de Chile y el sur de Perú ^{6,7} (Figura N°01a). A nivel de superficie, los vientos incidentes sobre la costa del AMLC presentaron una dirección predominante del sur con velocidades entre 1 y 4 m/s. Por otro lado, las Anomalías de la Temperatura Superficial del Mar (ATSM) frente a las costas del AMLC estuvieron cercanas a 1.1°C, lo cual repercutió en las anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, encontrándose la máxima en 0.1°C por encima de lo normal, mientras que la mínima, igual a -0.4 °C ².

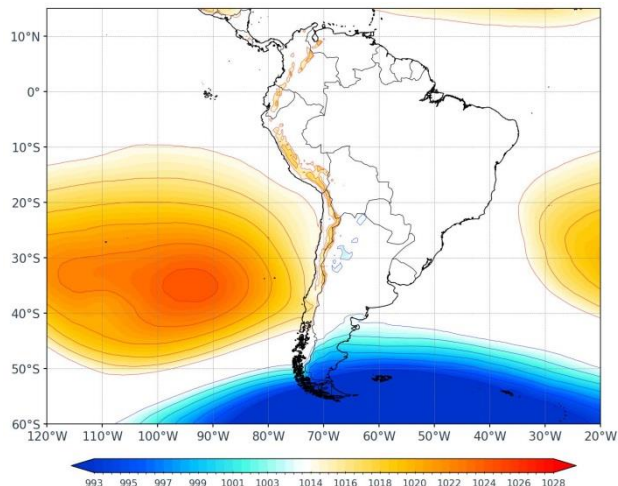
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de diciembre)

En superficie, el APS mostró un núcleo de 1024 - 1025 hPa, ubicado aproximadamente entre 32° S – 37° S y 90° W –97° W, más al norte y más próximo al continente respecto a su climatología, reforzando la estabilidad frente a las costas de Perú y norte de Chile ^{6,1} (Figura N° 01b). A nivel de superficie, los vientos incidentes sobre la costa del AMLC presentaron una dirección predominante del sur y velocidades entre 2 y 5 m/s. Por otro lado, las ATSM frente a las costas del AMLC se encontraron alrededor de los 0.7°C, con una tendencia a aumentar, lo cual repercutió en las anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándolas en 0.8°C y -1.2°C².

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



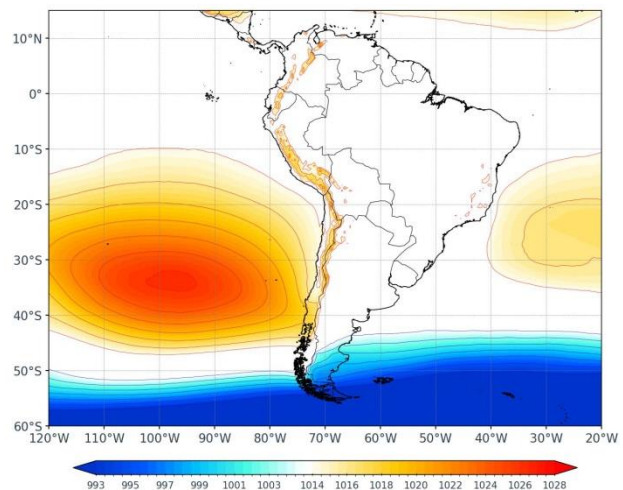
⁶ ¿Cómo responderán los anticiclones subtropicales del hemisferio sur al calentamiento global? Mecanismos y estacionalidad en las proyecciones de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Pág. 704). Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05290-7>

⁷ Temperatura superficial del mar y anomalías térmicas en el litoral peruano. Obtenido de: <https://siofen.imarpe.gob.pe/nivel3/temperatura-superficial-del-mar>

1.3. TERCERA DECADIARIA (21 al 31 de diciembre)

En superficie, el APS presentó un núcleo de 1026–1028 hPa, ubicado aproximadamente entre 32° S – 35° S y 94° W –102° W, es decir, más al norte y cercano al continente respecto a su climatología, reforzando la estabilidad frente a las costas de Perú y el norte de Chile ^{6,1} (Figura N° 01c). Asimismo, se presentaron vientos con una dirección predominante del sur, con velocidades entre 1 y 5 m/s. Por otro lado, las ATSM frente a las costas de AMLC estuvieron cerca de 0.9°C, lo que repercutió en las anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándolas en 1.1°C y -1.1°C ².

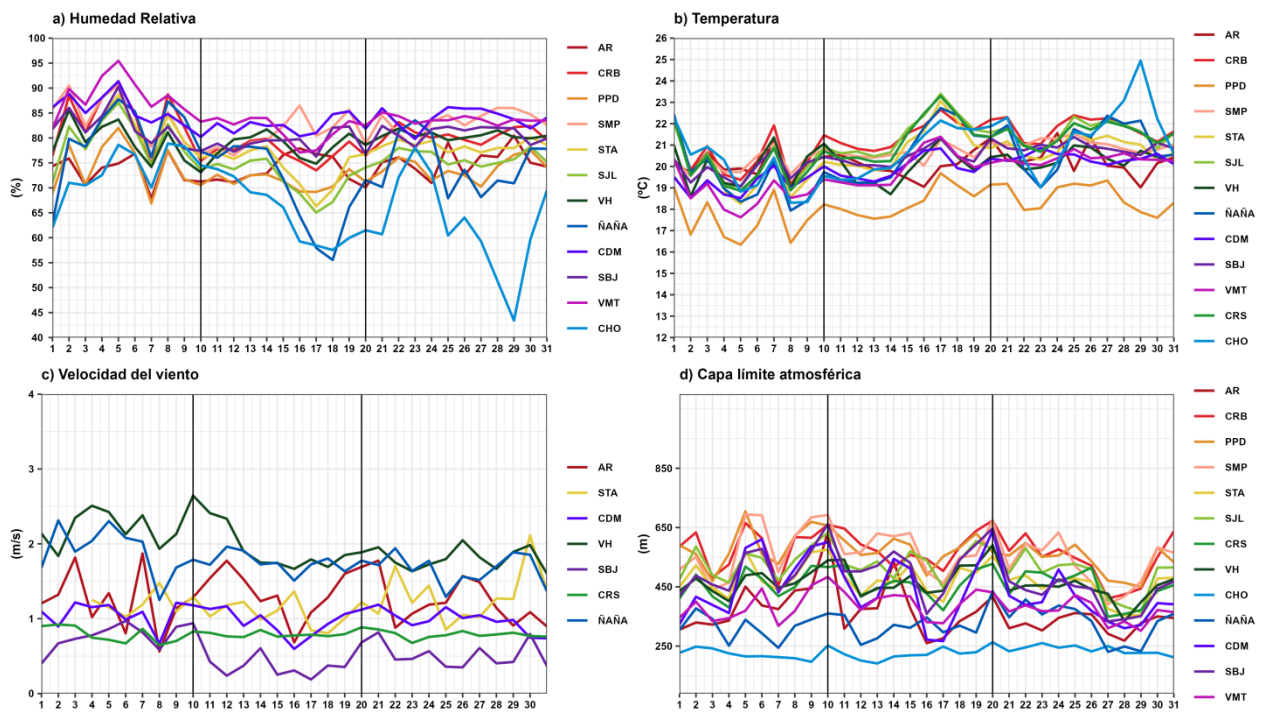
Figura N°01c. Variación del APS en la decadiaria 3.



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, 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 (SJJ), Ceres (CRS), Alexander Von Humboldt (VH), Ñaña (ÑAÑA), Chosica (CHO), Villa María del Triunfo (VMT) y Campo de Marte (CDM). Adicionalmente, se representó la variabilidad diaria de la Capa Límite Atmosférica (CLA)⁸ para lo cual se usó las salidas del modelo operativo WRF con resolución espacial de 1 km y temporal de 1 h.

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



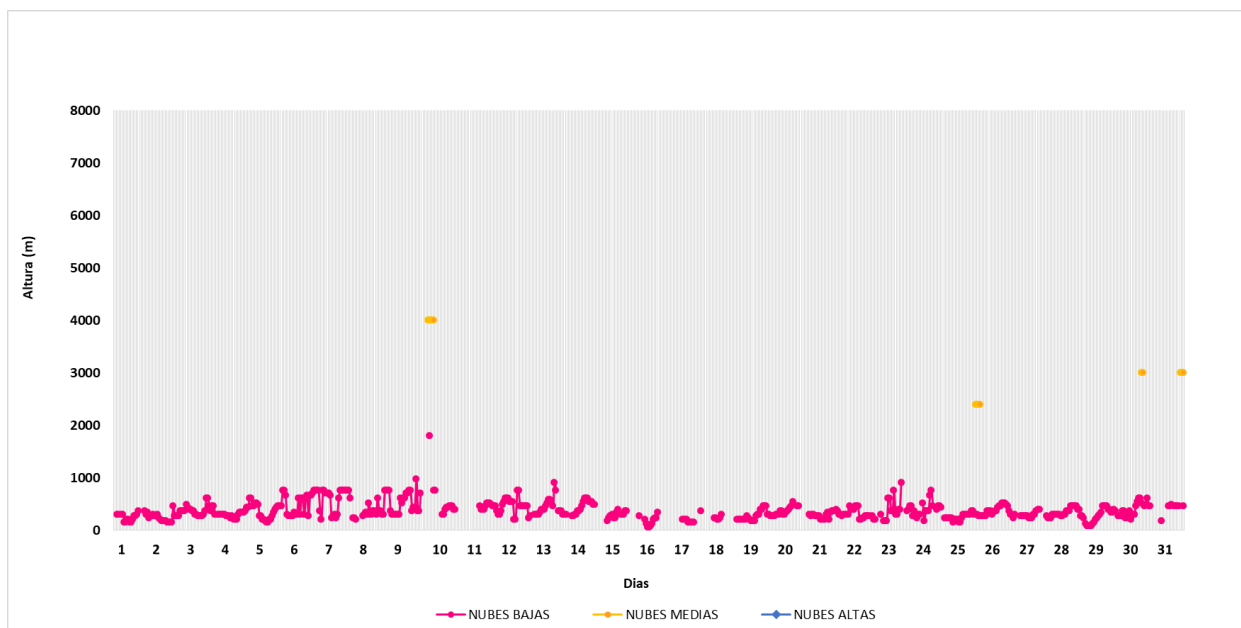
⁸ CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

Con respecto a la humedad relativa (Figura N° 02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 62% y 95%, para la segunda decadiaria entre 56% y 87% y para la tercera decadiaria entre 43% y 86%, siendo las estaciones VMT y CDM aquellas que mantuvieron los promedios de humedad más altos, de 84.4% y 84.0%, respectivamente. En relación con la temperatura (Figura N° 02b) durante la primera decadiaria se presentó valores entre 16.3°C a 22.4°C, para la segunda decadiaria entre 17.6°C a 23.4°C, y en la tercera decadiaria entre 17.6°C a 25.0°C, siendo la estación CHO la que alcanzó el valor promedio más alto de temperatura de 20.6 °C. En cuanto a la velocidad del viento (Figura N° 02c), los valores oscilaron entre 0.2 a 2.6 m/s durante todo el mes, siendo la estación VH la que alcanzó el valor promedio más alto, con una media mensual de 2.0 m/s. En el caso de la altura de la CLA (Figura N° 02d), las estaciones PPD, CRB y SMP alcanzaron los valores promedio más altos, con una altura promedio de 566.5, 566.1, 558.8 m, respectivamente, mientras que en las estaciones ÑAÑA y CHO se presentaron los valores promedio más bajos, con 322.4 y 228.7 m, respectivamente.

2.1. ALTURA DE LA BASE DE LA NUBE

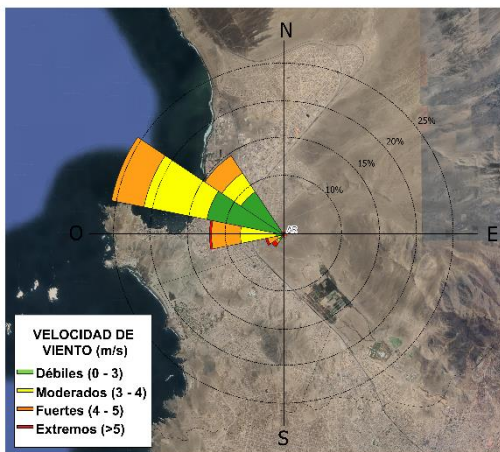
De acuerdo con el registro horario de la Altura de la Base de la Nube (ABN) obtenido por el ceilómetro de la EMA Aeropuerto Internacional Jorge Chávez ubicada en el Callao (Figura N° 03), durante el mes de diciembre, se observó que las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) se presentaron en el 80% de las horas. Las nubes medias (ABN entre 2000 m y 6000 m) se presentaron en un 0.8% de los casos. Por otro lado, durante el mes de diciembre disminuyeron las condiciones de cielo despejado, este se presentó en el 19% de las mediciones realizadas.

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



2.2. ANALISIS DEL VIENTO EN SUPERFICIE POR HORARIOS

Figura N°04. Rosa de vientos.



La rosa de vientos está definida como un gráfico circular que tiene marcado alrededor los rumbos de los vientos con las direcciones cardinales. Respecto a los vientos, se grafican las direcciones de donde provienen, así como también la frecuencia y magnitud de la velocidad⁹.

A manera de ejemplo se muestra en la Figura N° 04 una rosa de vientos para la estación Antonio Raimondi, la cual presenta una dirección predominante (con una frecuencia de vientos del 25%) del noroeste (NO) y una intensidad de extrema (>5m/s).

En la Figura N° 05 se 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) con

sus respectivas categorías de la intensidad del viento; débiles (0 – 3 m/s), moderados (3 – 4 m/s), fuertes (4 – 5 m/s) y extremos (>5m/s).

Cabe resaltar que las rosas de viento de las estaciones CHO, CRB, PPD, SMP, SJL y VMT, fueron construidas a partir de datos del modelo WRF, el cual tiene una resolución espacial de 1 km y temporal de 1 hora.

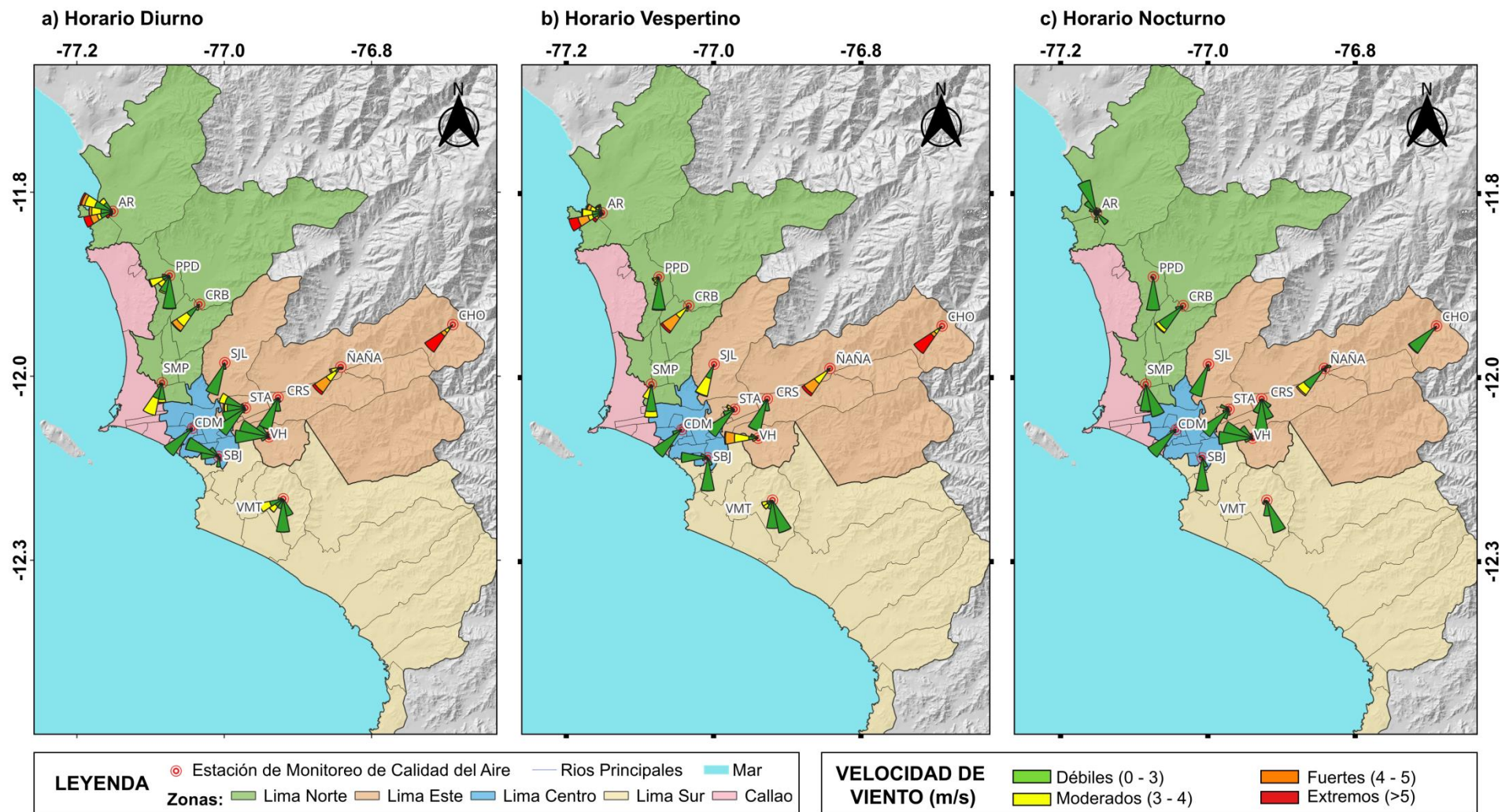
Durante el horario diurno (Figura N° 05a), las estaciones ÑAÑA, CRB y CHO registraron vientos de intensidad extrema, mientras que las estaciones CDM y STA, vientos débiles, siendo en todos los casos la dirección predominante del suroeste (SO). En las estaciones SJL y CRS se alcanzaron vientos débiles, mientras que en la estación SMP, vientos moderados, siendo la dirección predominante del sur suroeste (SSO) para las tres estaciones. En las estaciones PPD y VMT, se alcanzaron vientos moderados y débiles, respectivamente, con dirección predominante del sur (S). Las estaciones SBJ y AR registraron vientos de intensidad extrema y débil, respectivamente, siendo la dirección predominante del oeste noroeste (ONO). En la estación VH se alcanzó vientos débiles con dirección predominante del oeste (O).

Durante el horario vespertino (Figura N° 05b), las estaciones CRB, ÑAÑA y CHO registraron vientos de intensidad extrema; mientras que las estaciones CDM y STA, presentaron vientos débiles, siendo en todos los casos la dirección predominante del suroeste (SO). En las estaciones SJL y CRS se alcanzaron vientos fuertes y débiles, respectivamente, siendo la dirección predominante del sur suroeste (SSO). Las estaciones PPD y SMP registraron vientos moderados, mientras que la estación SBJ, vientos débiles, siendo la dirección predominante del sur (S) para las tres estaciones. En la estación AR y VH se registraron vientos de intensidad extrema con dirección predominante del oeste suroeste (OSO) y oeste (O), respectivamente. En la estación VMT se observaron vientos débiles con dirección del sur sureste (SSE).

Durante el horario nocturno (Figura N°05c), en las estaciones CRB y ÑAÑA se observaron vientos de intensidad fuerte; en la estación CHO, vientos moderados; mientras que en las estaciones CDM y STA, vientos débiles, siendo la dirección predominante del suroeste (SO) para todas las estaciones. En las estaciones PPD y SBJ se registraron vientos moderados, mientras que en la estación CRS, vientos débiles, siendo la dirección del sur (S) para todas las estaciones. En las estaciones SMP y VMT se registraron vientos débiles con dirección del sur sureste (SSE). En las estaciones AR, VH y SJL se registraron vientos débiles con dirección predominante del nor noroeste (NNO), oeste (O) y sur suroeste (SSO), respectivamente.

⁹ Como leer una rosa de vientos. Obtenido de: https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-01/documents/how_to_read_a_wind_rose.pdf

Figura N°05. Rosas de viento para diferentes horarios en el AMLC.



La Figura N° 05 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).

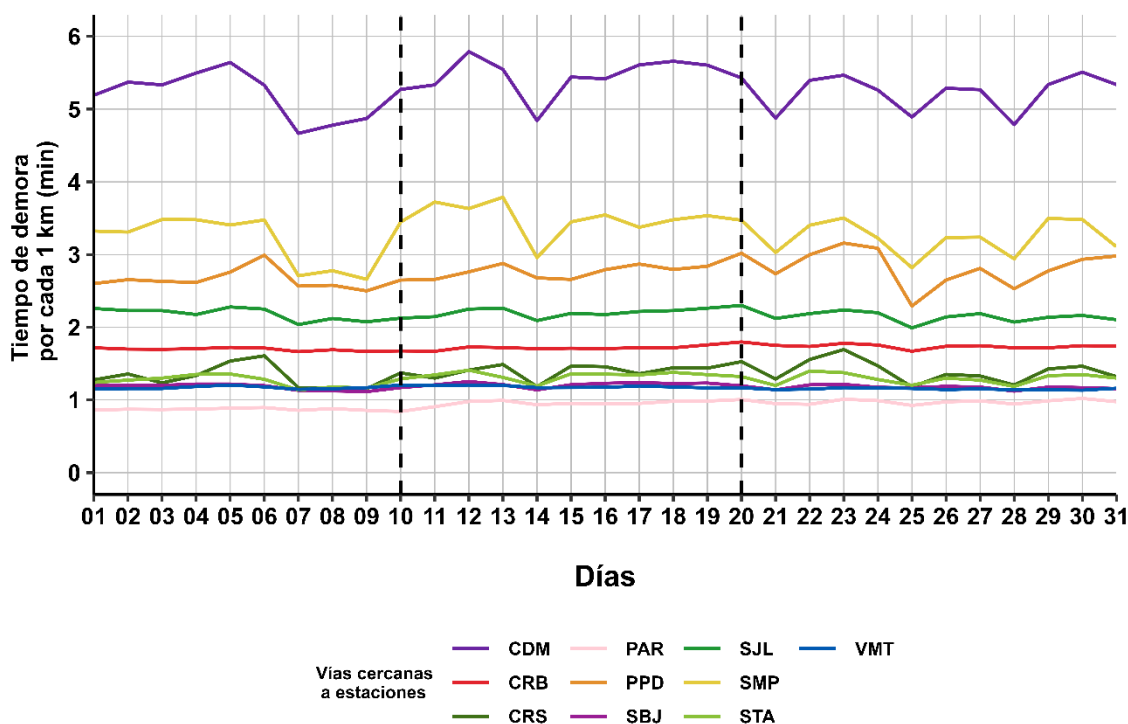
3. ACTIVIDAD VEHICULAR EN EL AMLC

La actividad vehicular tiene una contribución de más del 50% sobre la contaminación del aire en el AMLC¹⁰, asimismo, según el ranking del año 2024 de la compañía TOMTOM, en el AMLC el tiempo empleado para recorrer un tramo de 10 km es de 28 minutos¹¹. Se ha demostrado a través de investigaciones que, al aumentar el tiempo empleado para recorrer un tramo (mayor congestión vehicular), se espera un incremento en las concentraciones de los contaminantes atmosféricos^{12,13}. En relación con lo indicado, se ha desarrollado un algoritmo en Python que utiliza la técnica de web scraping¹⁴ para extraer datos sobre el tiempo de recorrido en tramos de 10 km de las principales avenidas¹⁵ del AMLC.

En la Figura N°06 se muestran los tiempos de demora por cada 1 km recorrido, en las vías cercanas a las estaciones de monitoreo de la REMCA. Se aprecia que los mayores tiempos de demora, se presentaron en los alrededores de la estación CDM, ubicada en la zona centro, alcanzando un promedio máximo diario de 5.8 minutos durante la segunda decadiaria (viernes 12 de diciembre).

En la Figura N° 07 se puede apreciar que, en la mayoría de los casos, se observó un notable incremento del tiempo de demora para el día viernes, los días laborables previos a los días feriados, así como una reducción durante los días domingo y feriados (8, 9 y 25 de diciembre), lo que refleja un cambio en la carga vehicular durante los días laborables y los días de descanso. Por otro lado, se presentaron incrementos en los tiempos de demora alrededor de las 6:00 horas y una reducción alrededor de las 20:00 horas, asociado al traslado de las personas debido al inicio y fin de su jornada laboral.

Figura N°06. Variación diaria del tiempo de demora por cada 1 km recorrido en el ámbito del AMLC



¹⁰ Estudio: Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y Callao (Pág. 56). Obtenido de:

<https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagnostico-gestion-calidad-ambiental-aire-lima-callao>

¹¹ Ranking 2024 "TOMTOM TRAFFIC INDEX". Obtenido de: <https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking/>

¹² La congestión aumenta significativamente las emisiones en muchas áreas localizadas dentro del dominio de estudio, lo que revela un claro potencial para reducciones significativas de emisiones al dirigir los esfuerzos de mitigación en puntos críticos clave. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749117304001?via%3Dihub>

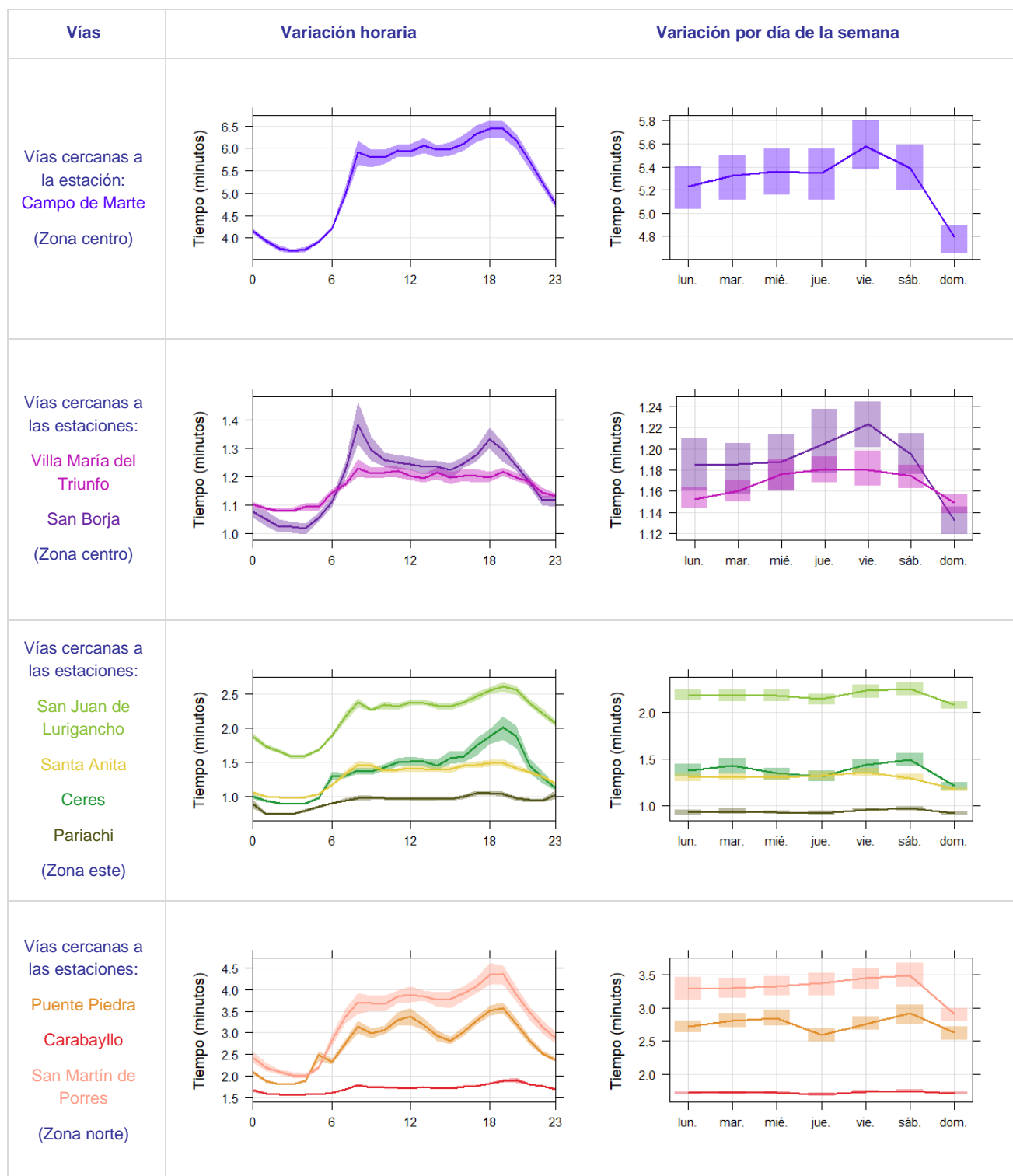
¹³ Sjödin et al. (1998) mostraron aumentos de hasta 4, 3 y 2 veces en las emisiones de CO, HC y NOx, respectivamente, en condiciones de congestión (velocidad promedio de 13 millas por hora, mph; 1 mph = 1,61 km por hora) en comparación con condiciones no congestionadas. Obtenido de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4243514/>

¹⁴ 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. Mitchell (2015). *Web Scraping with Python: Collecting More Data from the Modern Web*. O'Reilly.

¹⁵ 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

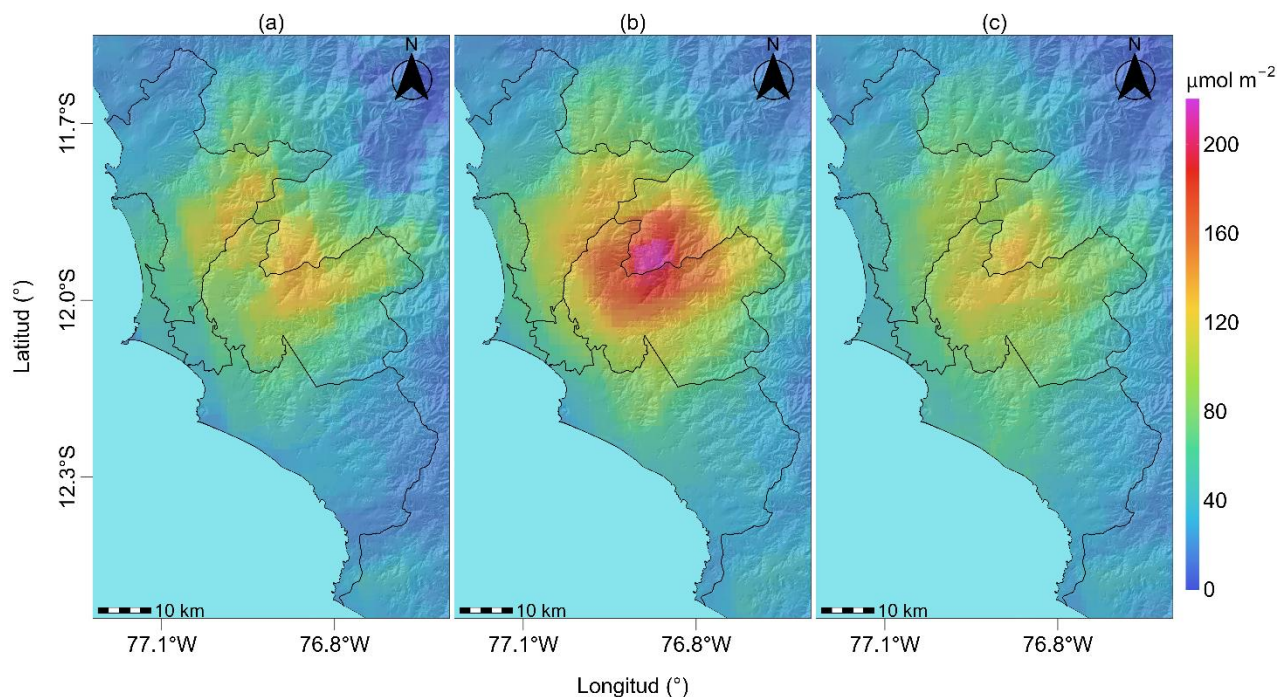
Figura N°07. Variación del tiempo de demora por cada 1 km recorrido en el ámbito del AMLC según horario y día de semana



4. VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE A TRAVÉS DE IMÁGENES SATELITALES

La Figura N° 08, 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 diciembre. Es así como, la Figura N° 08a, muestra la distribución espacial promedio de NO₂ en la primera decadiaria (1 a 10 de diciembre), la Figura N° 08b, en la segunda decadiaria (11 al 20 de diciembre) y la Figura N° 08c en la tercera decadiaria (21 al 31 de diciembre).

Figura N° 08. Distribución espacial de la columna del NO₂ (μmol/m²) en la tropósfera del AMLC.



En la Figura N° 08 se puede observar que, durante el mes de diciembre, la densidad máxima de NO₂ en la columna vertical troposférica presenta una marcada variabilidad espacial entre las distintas zonas del AMLC. En la primera decadiaria, la zona este presentó los valores más altos, alcanzando un máximo de 137.5 μmol/m². Durante la segunda decadiaria se evidenció, en términos generales, un incremento de la densidad en todas las zonas del AMLC, alcanzándose un máximo de 200.3 μmol/m², nuevamente en la zona este. En la tercera decadiaria, se observó una reducción de las densidades en todas las zonas; el valor máximo de 125.4 μmol/m² continuó presentándose en la zona este. A lo largo de las tres decadiarias, la zona sur presentó los valores más bajos.

Cabe precisar que el NO₂ se origina principalmente por la oxidación del nitrógeno atmosférico durante procesos de combustión, especialmente relacionados a la actividad vehicular^{16,17}. Debido a la dirección de viento, el NO₂ tiende a dispersarse hacia la zona este y norte del AMLC (Figura N° 05). Esta situación, combinada con la mayor circulación de vehículos de carga pesada o transporte de mercancía en dichas áreas, contribuye a que se registren los mayores valores de densidad de NO₂ en estas zonas.

¹⁶ Monitoreando el Dióxido de Nitrógeno desde el Espacio. Obtenido de: https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Inside_Look_AQ_Spanish.pdf

¹⁷ 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>

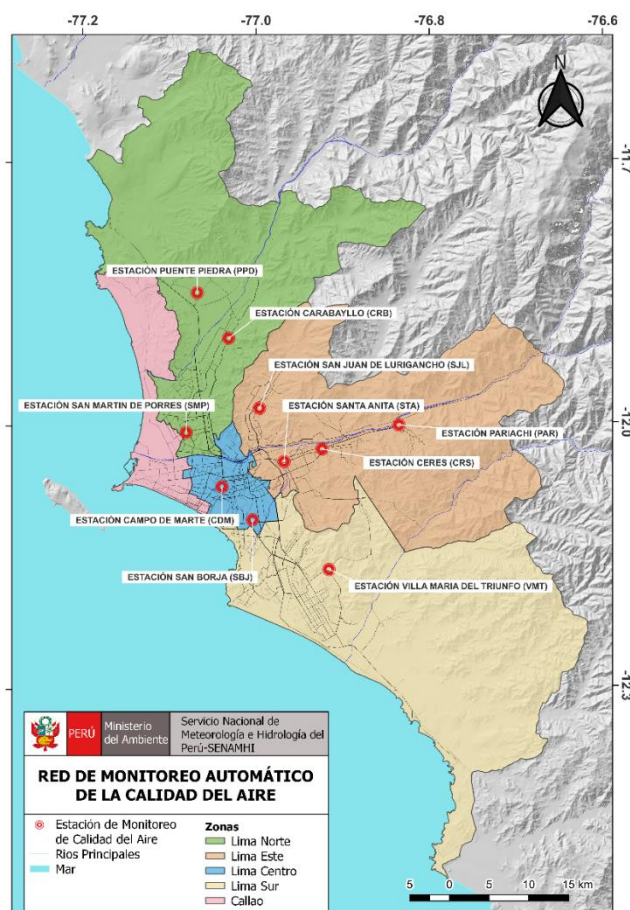
5. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

El SENAMHI realiza la vigilancia de la calidad del aire a través de 10 estaciones de monitoreo automático, las cuales miden las concentraciones horarias de los contaminantes PM₁₀ (Material Particulado con diámetro menor a 10 micras), PM_{2.5} (Material Particulado con diámetro menor a 2.5 micras), NO₂ (Dióxido de Nitrógeno), O₃ (Ozono) y CO (Monóxido de Carbono). El conjunto de estas estaciones conforma la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire (REMCA) y se encuentran en 9 distritos del AMLC tal como se indica en el Cuadro N° 01 y se observa en la Figura N° 09.

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 (SJL) 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 Langan - 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°09. 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 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.

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

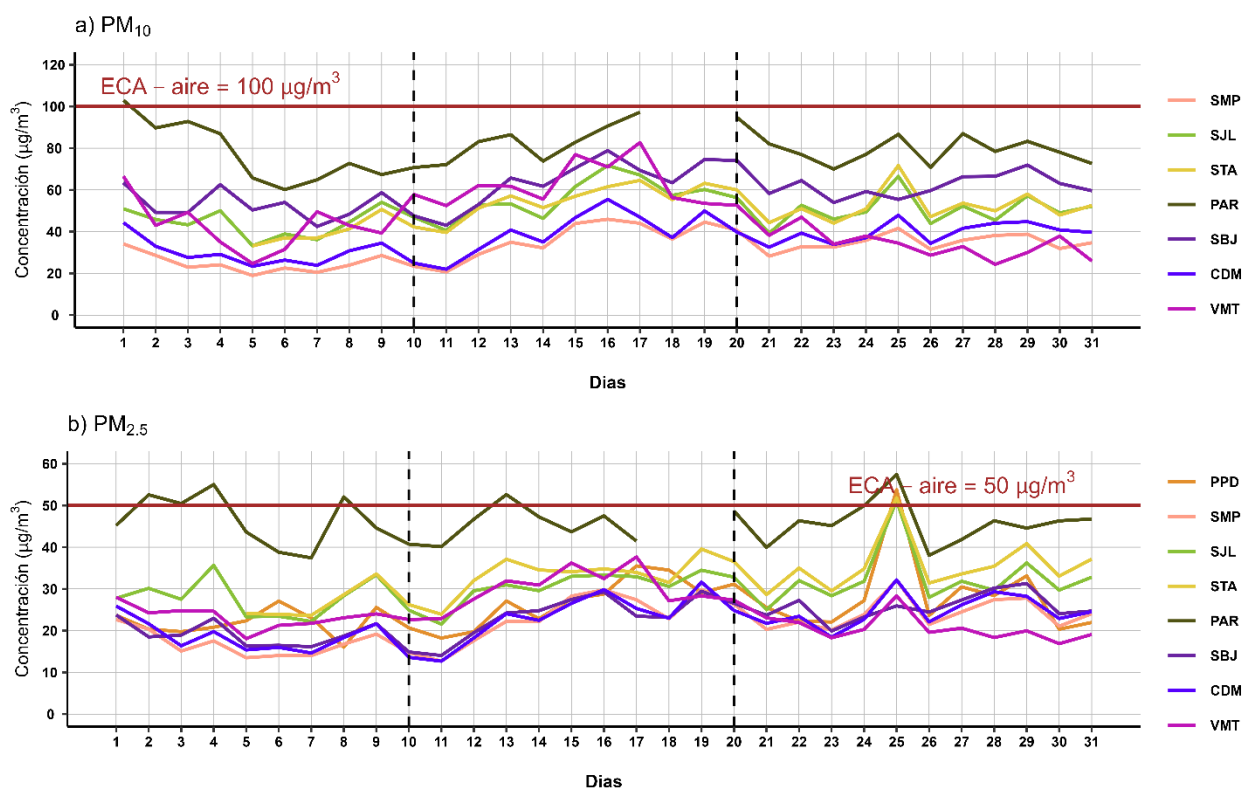
Con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el AMLC, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones del material particulado y gases. Los datos provinieron de las estaciones: Puente Piedra (PPD), Carabaylo (CRB), San Martín de Porres (SMP), San Juan de Lurigancho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

5.1.1. MATERIAL PARTICULADO ($PM_{2.5}$ y PM_{10})

El material particulado 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 $2.5 \mu m$ y las denominadas partículas gruesas que incluyen a las partículas con diámetro menor a $10 \mu m$ ¹⁸.

En el AMLC, la principal fuente de emisión de material particulado proviene del parque automotor; sin embargo, existen otras fuentes de emisión, como las puntuales (industria del cemento, harina de pescado o la refinación de cobre y zinc) o las de área (entre las que se encuentran las pollerías)¹⁰. 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 un incremento en la humedad relativa está relacionado con un incremento de las concentraciones de $PM_{2.5}$, mientras que un incremento en la temperatura está relacionado con un incremento en las concentraciones de PM_{10} ¹⁹.

Figura N°10. Variación diaria del PM_{10} y $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) en el AMLC.



¹⁸ Determinación de componentes de aerosoles atmosféricos en una zona urbana para evaluar la calidad del aire e identificar las fuentes de contaminación. Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10967-023-08805-8>

¹⁹ Niveles de material particulado en una megaciudad sudamericana: el área metropolitana de Lima-Callao, Perú. Obtenido de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29134287/>

Tal como se muestra en la Figura N° 10a, durante el periodo de monitoreo, sólo en un día se registró una concentración de PM₁₀ superior al ECA-aire de 100 µg/m³ (como promedio diario), esto únicamente en la estación PAR de la zona este, donde se alcanzó una concentración de 103 µg/m³ el lunes 1 de diciembre (las concentraciones más altas se presentaron entre las 08:00 y 13:00 horas), y estaría asociado a un incremento en los valores de temperatura y a la actividad vehicular alrededor de la carretera central (propia de un día laborable), que estaría favoreciendo la resuspensión de polvo en esta zona. Por otro lado, en la zona centro el valor máximo se registró en la estación SBJ el 16 de diciembre, alcanzando los 78.9 µg/m³; en la zona norte, estación SMP, la concentración más alta se registró el 16 de diciembre, alcanzando los 45.9 µg/m³; y finalmente, en la zona sur, estación VMT, se alcanzó el valor máximo de 82.7 g/m³ el 17 de diciembre. A nivel decadiario, se destaca que, hacia la segunda decadiaria se ha presentado un incremento en las concentraciones de entre 10% (Estación PAR) y 50.4% (Estación SMP). Este aumento se encuentra asociado a un incremento de la temperatura y una disminución de la humedad relativa, especialmente en la segunda mitad de la decadiaria, condiciones que habrían favorecido la resuspensión de polvo. (ver Figura N° 02a y 02b).^{19, 20, 21, 22}

En la Figura N° 10b, se observa que, durante el periodo de monitoreo, se registraron concentraciones de PM_{2.5} superiores al ECA-aire de 50 µg/m³ (como promedio diario) en las estaciones PAR, STA, SJL y PPD. El valor máximo de 57.4 µg/m³ se alcanzó el jueves 25 de diciembre en la estación PAR, ubicada en la zona este (presentándose las concentraciones más altas entre la 01:00 y 09:00 horas), y estaría asociado al uso masivo de productos pirotécnicos durante las celebraciones de navidad, así como también debido a las condiciones frías del mar y vientos costeros debilitados²³, lo cual favoreció una mayor estabilidad en la atmósfera, que limitó la dispersión de los contaminantes liberados²⁴. En la zona centro, se registró el valor más alto el 16 de diciembre, alcanzando los 32.2 µg/m³ en la estación CDM. En la zona sur, la mayor concentración fue de 37.7 µg/m³, alcanzada el 17 de diciembre en la estación VMT. Finalmente, en la zona norte, se registró el valor más alto el 25 de diciembre, alcanzando los 53.8 µg/m³ en la estación PPD. A nivel decadiario, se destaca que, hacia la segunda decadiaria se ha presentado un incremento en las concentraciones de entre 11.6% (Estación SJL) y 42.5% (Estación SMP), lo cual estaría asociado a días en los que se produjo incrementos en la congestión vehicular y reducción de la altura de la CLA, lo cual favoreció la acumulación del contaminante. (ver Figura N° 02d y Figura N° 06)^{19,20,21}

5.1.2. 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 CO²⁵.

²⁰ Análisis de la relación entre el comportamiento estacional de los contaminantes sólidos sedimentables con las condiciones meteorológicas predominantes en la zona metropolitana de Lima-Callao durante el año 2004. Obtenido de: <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/995>

²¹ Factores meteorológicos que influyen en la dispersión de la contaminación del aire en la ciudad de Lima. Obtenido de: Boletín de la sociedad Geográfica de Lima, Vol. N° 113:2000

²² Temporal variation of the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio and its association with meteorological factors in a South American megacity: Metropolitan Area of Lima-Callao, Peru. Obtenido de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38613696/>

²³ Monitoreo de las temperaturas del aire en la costa peruana del 21 al 31 diciembre 2025. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02268SENA-143.pdf>

²⁴ Navidad 2025: Lima Norte registró la mayor concentración de contaminantes del aire. Obtenido de:

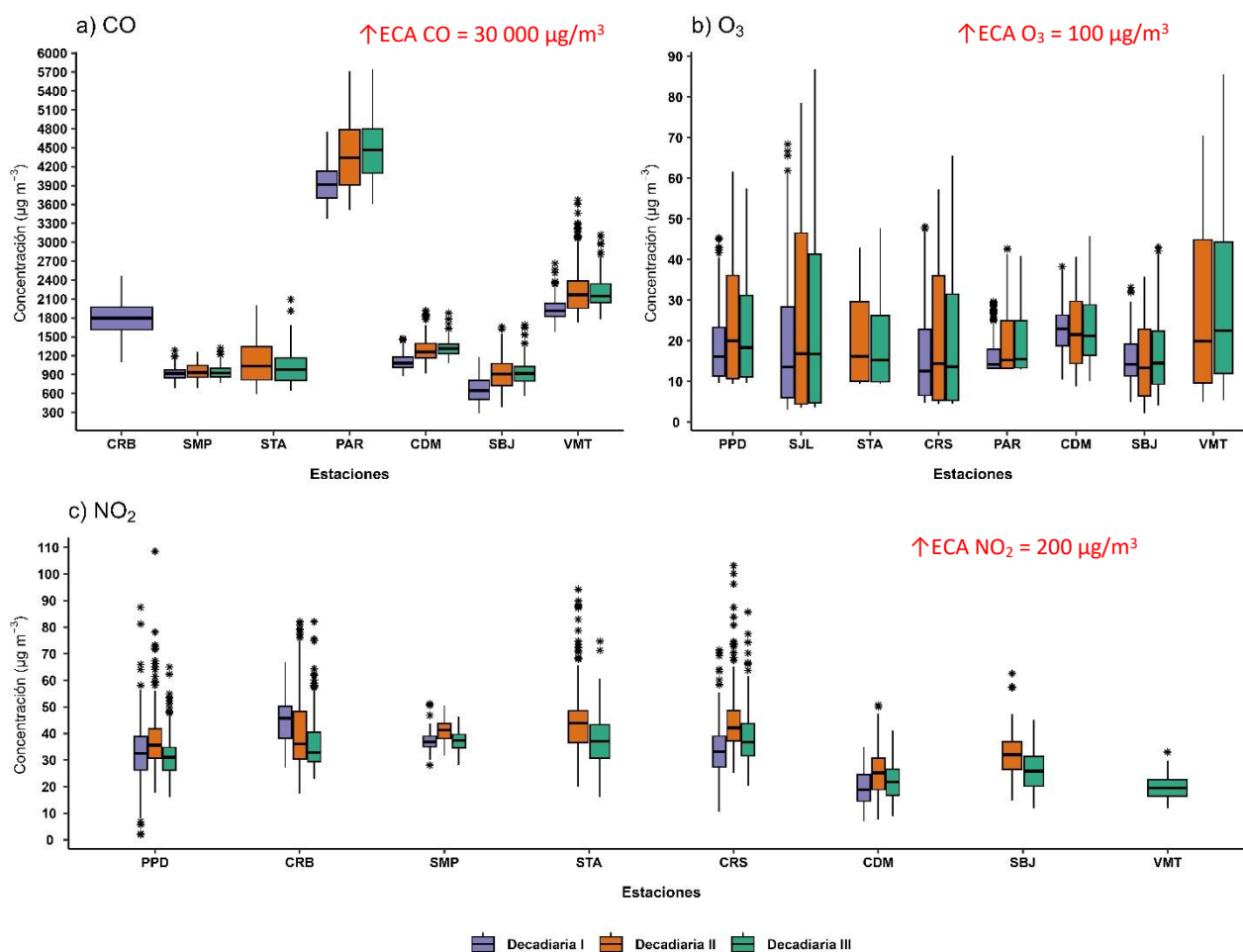
<https://www.gob.pe/institucion/senamhi/noticias/1320333-navidad-2025-lima-norte-registro-la-mayor-concentracion-de-contaminantes-del-aire>

²⁵ Variaciones de las concentraciones de monóxido de carbono en la megaciudad de São Paulo de 2000 a 2015 en diferentes escalas de tiempo. Obtenido de: <https://www.mdpi.com/2073-4433/8/5/81>

El O_3 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 ($NO + NO_2$), conocidos como precursores. Por lo tanto, suele existir una relación inversa entre las concentraciones de NO_2 y O_3 ²⁶, siendo que, el pico del ciclo del O_3 aparece aproximadamente 6 horas después del pico del NO y 5 horas después del NO_2 ²⁷. Por otro lado, se observa una estrecha relación entre los niveles elevados de O_3 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 temperatura²⁸.

El NO_2 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 amplio²⁹. El NO_2 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_2 , debido a que fomentan las reacciones que dan origen al O_3 , favoreciendo con ello el consumo de NO_2 como su precursor²⁸.

Figura N°12. Variación de las concentraciones del CO , O_3 y NO_2 ($\mu g/m^3$) por decadiaria en el AMLC.



En la Figura N° 12a, se observa que las concentraciones horarias de CO registradas en las estaciones se mantuvieron por debajo del ECA-aire de $30\,000\ \mu g/m^3$ (como promedio horario) durante todo el periodo de monitoreo. Asimismo, el valor más alto se registró durante la primera decadiaria en la zona este, estación

²⁶ Ozono y compuestos orgánicos volátiles en el área metropolitana de Lima-Callao, Perú. Obtenido de:

<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/237>

²⁷ Análisis de la Relación entre O_3 , NO y NO_2 en Tianjin, China. Obtenido de: <https://aaqr.org/articles/aaqr-10-07-0a-0055>

²⁸ Análisis temporal de los contaminantes atmosféricos (NO_2 , O_3 troposférico y CO) y su relación con la temperatura del aire y la radiación solar en Lima Metropolitana. Obtenido de: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162023000100017

²⁹ United States Environmental Protection Agency. (25 de julio de 2023). Basic Information about NO_2 . <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2>

PAR, con una máxima de 5747.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (domingo 21 de diciembre a las 07:00 horas), lo cual estaría asociado a una reducción en los valores de altura de la CLA. Por otro lado, la concentración más alta en la zona norte se presentó en la estación CRB, alcanzando los 2473.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 1 de diciembre a las 22:00 horas; en la zona centro, la concentración más alta se presentó en la estación CDM, alcanzando los 1918.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 16 de diciembre a las 22:00 horas; y en la zona sur, estación VMT, la concentración más alta fue de 3669.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 17 de diciembre a las 01:00. A nivel decadiario, se destacaron incrementos hacia la segunda decadiaria especialmente en la estación SBJ (40.4%), asociada a una reducción de la altura de la CLA (particularmente en la segunda mitad del periodo) y una reducción de la velocidad del viento, lo cual favorece la acumulación del contaminante (Ver Figura N° 02c y 02d).

En relación con el O_3 , la Figura N° 12b muestra que las concentraciones promedio móvil de 8 horas no superaron el valor del ECA-aire de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (como máxima media de 8 horas) durante los días monitoreados. Asimismo, se puede apreciar que el valor más alto se registró en la zona este, en la estación SJL, alcanzando los 86.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el jueves 25 de diciembre, lo que estaría relacionado con incrementos en los valores de temperatura. Por otro lado, en la zona norte, la estación PPD registró la concentración máxima de 61.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 15 de diciembre; en la zona centro, la mayor concentración se presentó en la estación CDM, con un valor de 45.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 29 de diciembre; mientras que, en la zona sur, estación VMT, el 25 de diciembre, se alcanzó los 85.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto al comportamiento decadiario, se destacaron incrementos hacia la segunda decadiaria especialmente en la estación PPD (24%) y SJL (23.9%). Este comportamiento estaría asociado al incremento de la temperatura, lo cual habría favorecido la formación de O_3 . (Ver Figura N° 02b).

En la Figura N° 12c, se observa que las concentraciones horarias de NO_2 registradas en las estaciones no superaron el valor de su ECA-aire de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (como promedio horario) durante todo el período de monitoreo. La mayor concentración se reportó en la zona norte, en la estación PPD (el jueves 18 de diciembre a las 10:00 horas), alcanzando un valor de 108.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto asociado a la actividad vehicular en la zona norte (89% de las emisiones de NO_x provienen de vehículos a diésel)¹⁰, lo cual habría favorecido la acumulación de NO_2 (Ver Figura N° 06). Por otro lado, la concentración más alta en la zona este se presentó en CRS, alcanzando los 103.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 16 de diciembre a las 09:00 horas; mientras que, en la zona centro, la concentración más alta se presentó en SBJ, alcanzando los 62.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 17 de diciembre a las 10:00 horas; y en la zona sur, estación VMT, la concentración más alta fue de 36.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 17 de diciembre a las 10:00 horas. En cuanto al comportamiento decadiario, destaca el incremento en las concentraciones registradas en las estaciones CDM (33.7%) y CRS (27.1%) hacia la segunda decadiaria, lo cual estaría asociado a una reducción en la altura de la CLA, especialmente durante la segunda mitad de la decadiaria, favoreciendo la acumulación del contaminante (Figura N° 02d).

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 que tan limpio o saludable está el aire y los efectos que podría causar en la salud^{30 31}.

6.1. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM₁₀

La Figura N° 13 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM₁₀ asociadas a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observó que, en la zona este, la estación PAR presentó 29 días con calidad del aire “Moderada”; mientras que SJL y STA presentaron 8 y 9 días con calidad del aire “Moderada” y 23 y 19 días con calidad del aire “Buena”, respectivamente. En la zona centro, la estación SBJ presentó 21 días con calidad del aire “Moderada” y 10 día con calidad del aire “Buena”; mientras que, la estación CDM presentó 1 día con calidad del aire “Moderada” y 30 días con calidad del aire “Buena”. En la zona sur, la estación VMT presentó 9 días con calidad del aire “Moderada” y 22 días con calidad del aire “Buena”. Finalmente, en la zona norte, la estación SMP presentó 31 días con calidad del aire “Buena”.

6.2. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM_{2.5}

La Figura N° 14 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM_{2.5} asociadas a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observó que, en la zona este, la estación PAR presentó 1 días con calidad del aire “Insalubre” y 28 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles”; mientras que, las estaciones STA y SJL presentaron 7 y 3 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 21 y 28 días con calidad del aire “Moderada”, respectivamente. En la zona centro, la estación SBJ presentó 31 días con calidad del aire “Moderada”; mientras que, la estación CDM presentó 31 días con calidad del aire “Moderada”. Por otro lado, en la zona sur, la estación VMT presentó 2 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 29 días con calidad del aire “Moderada”. Finalmente, en la zona norte, la estación PPD presentó 2 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 29 días con calidad del aire “Moderada”; mientras que, la estación SMP presentó 31 días con calidad del aire “Moderada”.

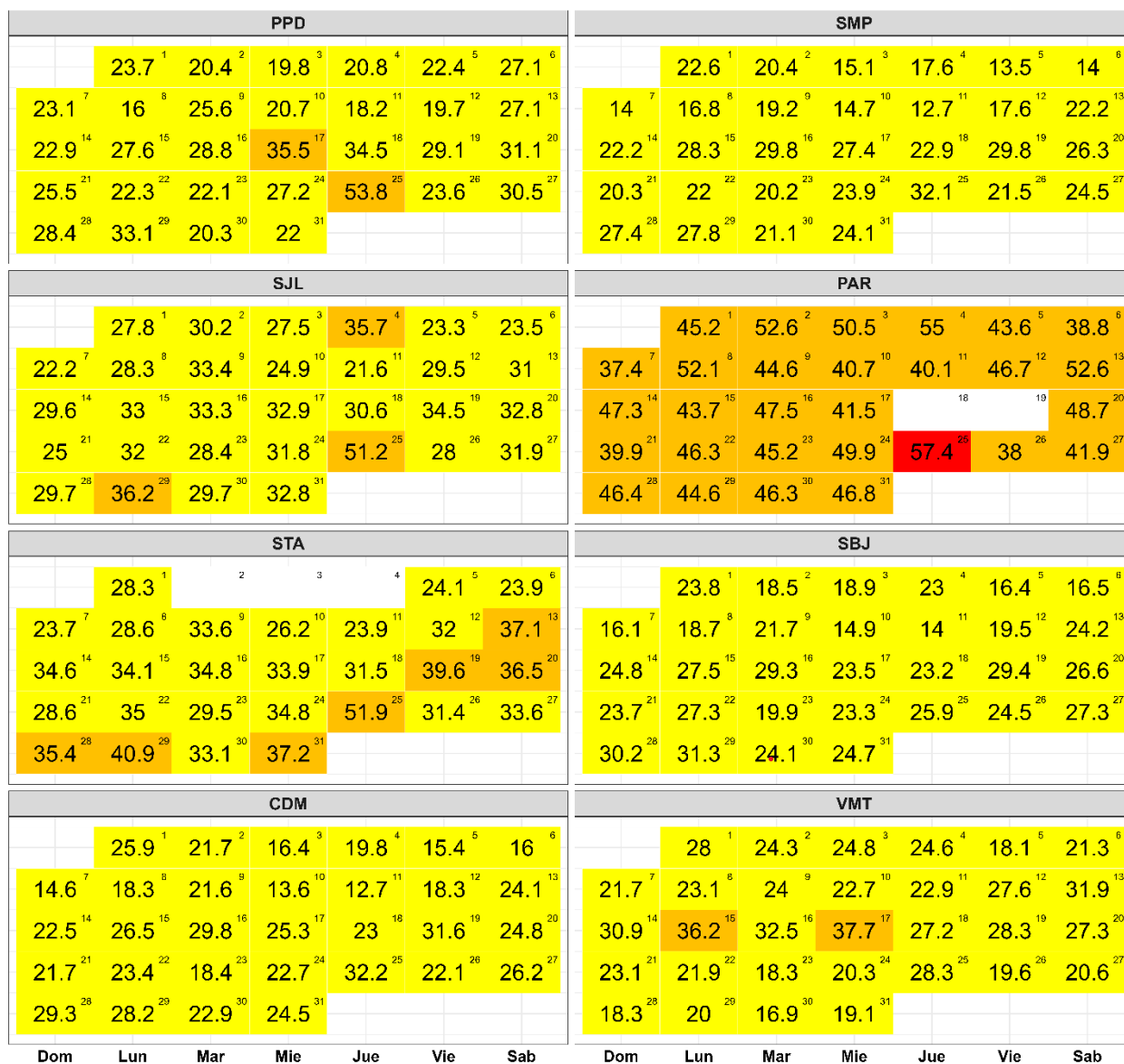
³⁰ Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/aqi_brochure_02_14_0.pdf

³¹ Final Updates to the Air Quality Index (AQI) for Particulate Matter. Obtenido de: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-02/pm-naaqs-airquality-index-fact-sheet.pdf>

Figura N° 13. Índice de la Calidad del Aire para PM₁₀


Concentración PM ₁₀ (µg/m³)		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

Figura N° 14. Índice de la Calidad del Aire para PM_{2.5}



Concentración PM _{2.5} (µg/m³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	9		0	50
9.1	35.4	Moderada	51	100
35.5	55.4	Insalubre para grupos sensibles	101	150
55.5	125.4	Insalubre	151	200

7. CONCLUSIONES

- Las condiciones meteorológicas influyeron en el comportamiento diario de los contaminantes atmosféricos en el AMLC durante el mes de diciembre. En comparación con los registros del mes anterior, se observó una ligera disminución tanto en la altura de la capa límite como en la velocidad del viento, condiciones que pudieron favorecer el incremento de las concentraciones de $PM_{2.5}$. Asimismo, se registraron episodios de estabilidad atmosférica en determinados días del mes, lo cual limitó la dispersión de los contaminantes.
- Durante el mes de diciembre, los mayores tiempos de recorrido, indicativos de una mayor congestión vehicular, se registraron principalmente en las vías cercanas a la estación CDM. Por otro lado, se observó una reducción de la congestión los días domingos y feriados y un incremento principalmente los días viernes; así como la presencia de dos picos en los tiempos de demora entre las 6:00 y 9:00 horas y entre las 17:00 y 19:00 horas.
- Respecto a la densidad del NO_2 en la columna vertical troposférica, se destaca que entre la primera y la segunda decadiaria, se presentó un incremento en todas las zonas del AMLC; mientras que, hacia la tercera decadiaria se presentó una reducción en la mayoría de las zonas. Asimismo, se observó que en las tres decadiarias, los mayores valores se presentaron en la zona este.
- Durante el periodo de análisis, el ECA – aire para PM_{10} fue superado en la estación PAR, alcanzándose la concentración de $103 \mu g/m^3$ el lunes 1 de diciembre. En el caso del $PM_{2.5}$, se superó el ECA – aire en cuatro estaciones de monitoreo (PAR, PPD, STA y SJL), alcanzándose en la estación PAR un valor máximo de $57.4 \mu g/m^3$ el jueves 25 de diciembre. Estas concentraciones estarían asociadas a las condiciones meteorológicas presentes y la quema masiva de productos pirotécnicos.
- 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 todas las estaciones. Los incrementos en las concentraciones se asociaron a días con condiciones meteorológicas favorables para la acumulación o formación de contaminantes atmosféricos.
- Con respecto al Índice de Calidad del Aire (ICA) se destaca a la estación PAR, que para el contaminante PM_{10} , se observó que, presentó el 100% de los días monitoreados una calidad del aire “Moderada”. Por otro lado, para el contaminante $PM_{2.5}$, se identificó que la estación PAR presentó una calidad del aire de “Insalubre” durante el 3% de los días monitoreados, mientras que, en los días restantes, la calidad del aire fue “Insalubre para grupos sensibles”.

8. PERSPECTIVAS DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL MES DE ENERO 2026

De acuerdo con el pronóstico climático³² para el mes de enero del 2026, se espera que en el AMLC las temperaturas máximas y mínimas se presenten dentro de sus rangos normales. Considerando el comportamiento estacional de estas variables meteorológicas, se esperaría que las concentraciones de $PM_{2.5}$, sean menores a lo registrado en el mes de diciembre.

³² Documento: Boletín climático nacional – diciembre 2025 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-150.pdf>

Para más información sobre el presente informe, contactar con:

Ing. Elvis Anthony Medina Dionicio (eamedina@senamhi.gob.pe)
Subdirector de Evaluación del Ambiente Atmosférico

Elaboración

Ing. Lourdes María Isabel Urteaga Tirado (lurteaga@senamhi.gob.pe)
Ing. José Hitoshi Inoue Velarde
Bach. Hanns Kevin Gómez Muñoz
Bach. Steven Gilber Arce Quispe

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 febrero del 2025

