

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

Área metropolitana de Lima y Callao

Setiembre 2025



VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – SETIEMBRE 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 setiembre^{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 – setiembre 2025. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-127.pdf>

² Boletín climatológico de Lima – setiembre 2025. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-135.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.).

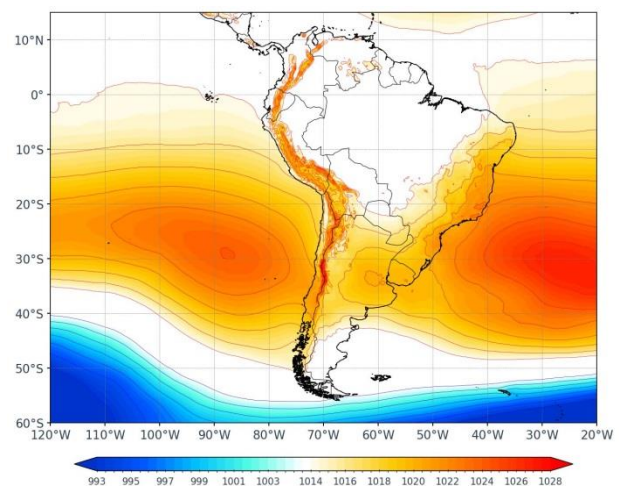
1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

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 setiembre se conformó la decadiaria 1 (del 1 al 10), decadiaria 2 (del 11 al 20) y decadiaria 3 (del 21 al 30).

1.1. PRIMERA DECADIARIA (1 al 10 de setiembre)

En superficie, el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) presentó una configuración cuasi zonal con núcleo en los 29°S y 90°W, con valores de presión alrededor de 1025 hPa y desplazado hacia el este.^{6,1} (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 5 m/s. Por otro lado, las Anomalías de la Temperatura Superficial del Mar (ATSM) frente a las costas del AMLC estuvieron cercanas a los 0.7°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 -0.5°C².

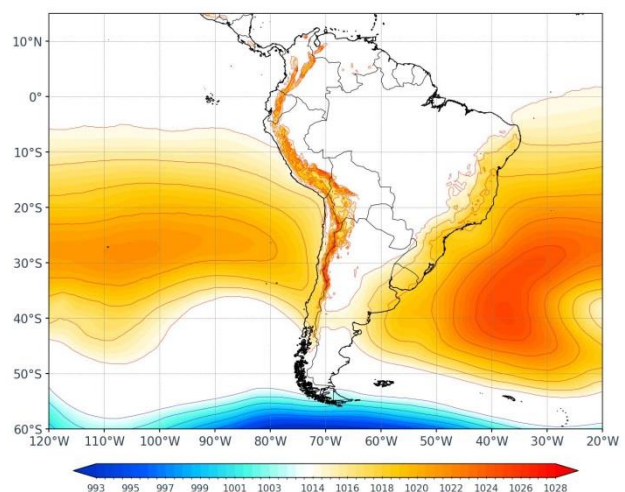
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de setiembre)

En superficie, el APS presentó una configuración más zonal, con su núcleo ubicado entre los 29° S y 105° W, ligeramente desplazado hacia el este y con valores de presión inferiores a lo normal, lo que indica un APS menos intenso.^{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 6 m/s. Por otro lado, las ATSM⁷ frente a las costas del AMLC se encontraron alrededor de los 2.0°C, con una tendencia a aumentar, lo cual repercutió en las anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándolas en 1.4°C y -0.5°C².

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

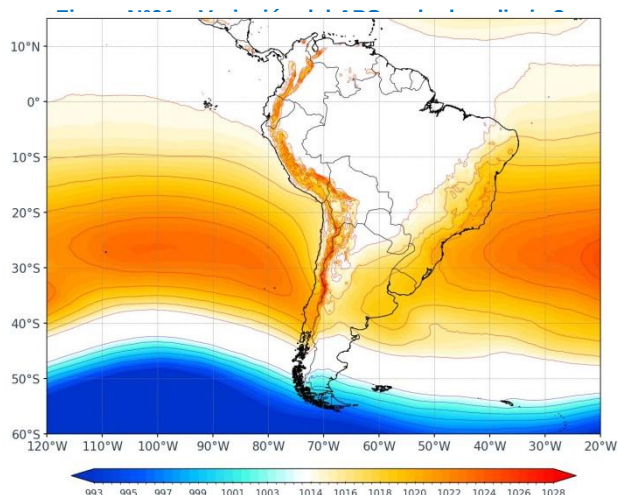


⁶ ¿Cómo responderán los anticiclones subtropicales del hemisferio sur al calentamiento global? Mecanismos y estacionalidad en las proyecciones de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Pág. 704). Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05290-7>

⁷ Temperatura superficial del mar y anomalías térmicas en el litoral peruano. Obtenido de: http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/index2.php?id_seccion=1017803020000000000000

1.3. TERCERA DECADIARIA (21 al 30 de setiembre)

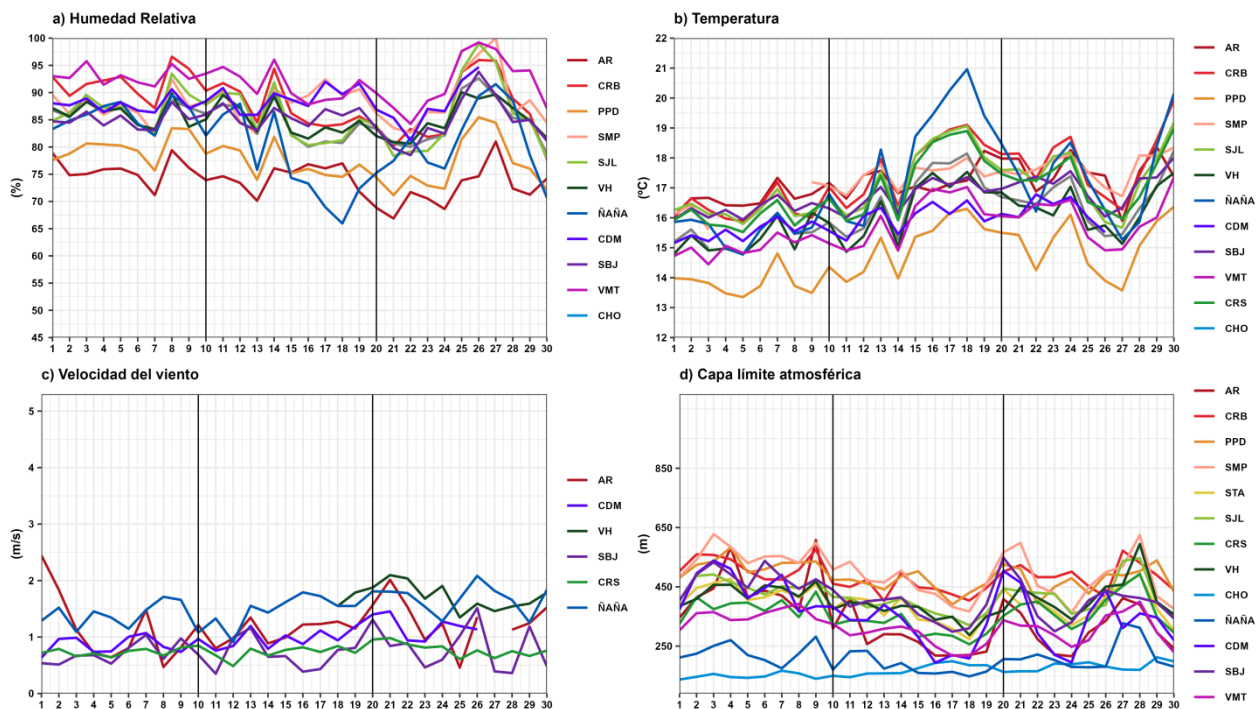
En superficie, el APS presentó una configuración zonal y núcleo en los 26°S y 100°W con valores alrededor de 1025 hPa, posicionándose más próximo al continente^{6,1} (Figura N° 01c). Asimismo, se presentaron vientos con una dirección predominante del sur, con velocidades entre 1 y 6 m/s. Por otro lado, las ATSM frente a las costas de AMLC estuvieron cerca de 1.1°C, lo que repercutió en las anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándolas en 0.9°C y -0.3°C².



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 (SJL), 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



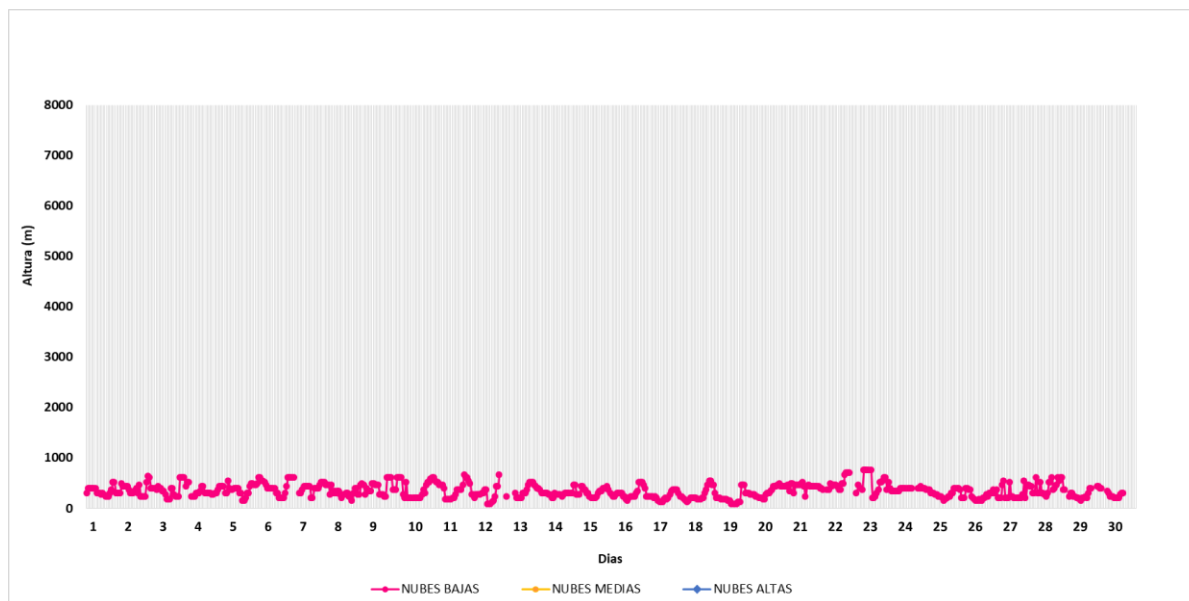
⁸ CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

Con respecto a la humedad relativa (Figura N° 02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 71% y 97%, para la segunda decadiaria entre 66% y 96% y para la tercera decadiaria entre 67% y 100%, siendo las estaciones VMT y CRB aquellas que mantuvieron los promedios de humedad más altos, de 92% y 88%, respectivamente. En relación con la temperatura (Figura N° 02b) durante la primera decadiaria se presentó valores entre 13.4°C a 17.3°C, para la segunda decadiaria entre 13.9°C a 21°C, y en la tercera decadiaria entre 13.6°C a 20.2°C, siendo la estación de CRB la que alcanzó el valor promedio más alto de temperatura de 17.4 °C. En cuanto a la velocidad del viento (Figura N° 02c), los valores oscilaron entre 0.4 a 2.4 m/s durante todo el mes, siendo la estación ÑAÑA la que alcanzó el valor promedio más alto, con una media mensual de 1.5 m/s. En el caso de la altura de la CLA (Figura N° 02d), las estaciones SMP, CRB y PPD alcanzaron los valores promedio más altos, con una altura promedio de 495.2, 484.5, 484.5 m, respectivamente, mientras que en las estaciones ÑAÑA y CHO se presentaron los valores promedio más bajos, con 208.3 y 168.3 m, respectivamente.

2.1. ALTURA DE LA BASE DE LA NUBE

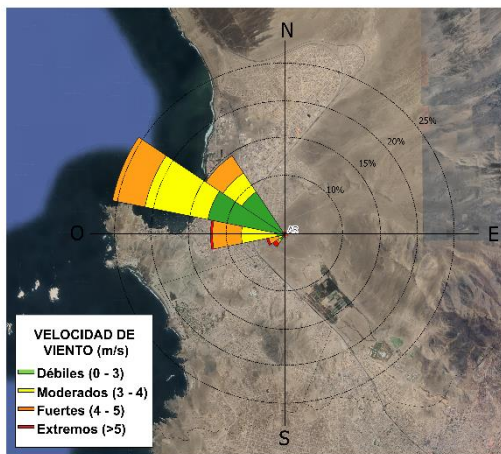
De acuerdo con el registro horario de la Altura de la Base de la Nube (ABN) obtenido por el ceilómetro de la EMA Aeropuerto Internacional Jorge Chávez ubicada en el Callao (Figura N° 03), durante el mes de setiembre, se observó que las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) se presentaron en el 94.4% de las horas. Las nubes medias (ABN entre 2000 m y 6000 m), no se presentaron durante el mes. En cuanto al cielo despejado, este se presentó en el 5.6% de las mediciones realizadas. En general, durante el mes de setiembre aumentaron las condiciones de cielo despejado.

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, VH 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.

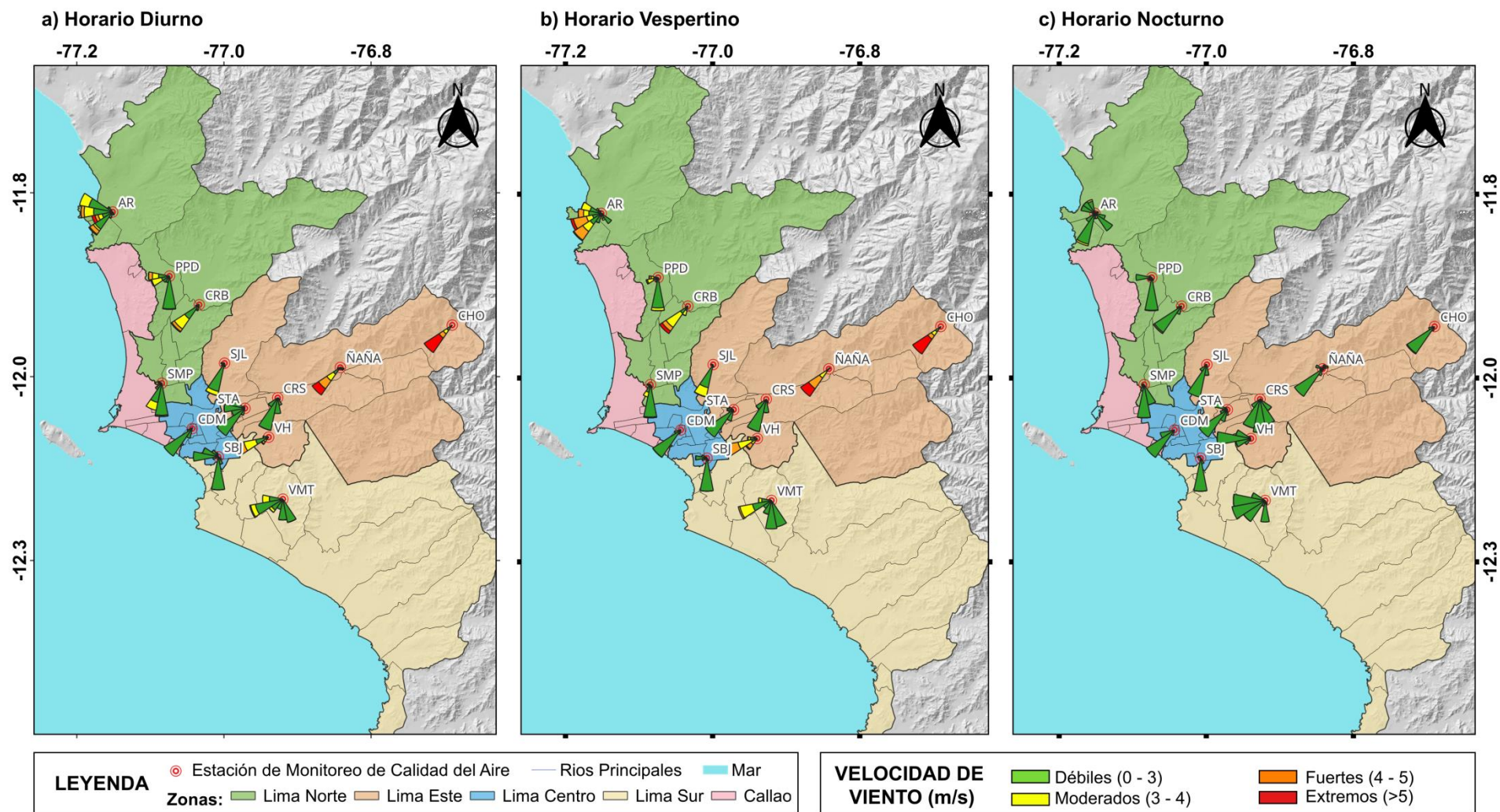
Durante el horario diurno (Figura N° 05a), las estaciones CRB, ÑAÑA y CHO registraron vientos de intensidad extrema, mientras que las estaciones STA y CDM alcanzaron vientos débiles, siendo la dirección predominante del suroeste (SO) para las cinco estaciones. Las estaciones PPD y SMP registraron vientos moderados, mientras que la estación SBJ, vientos débiles, siendo la dirección predominante del sur (S) para las 3 estaciones. En las estaciones SJL y CRS se alcanzaron vientos fuertes y débiles, respectivamente, siendo la dirección predominante del sur suroeste (SSO). En las estaciones VH y VMT se alcanzaron vientos extremos y fuertes, respectivamente, con dirección predominante del oeste suroeste (OSO). En la estación AR se presentó una dirección predominante del oeste noroeste (ONO) con una intensidad máxima moderada.

Durante el horario vespertino (Figura N°05b), las estaciones AR, CRB, ÑAÑA y CHO registraron vientos de intensidad extrema, mientras que las estaciones STA y CDM alcanzaron vientos débiles, siendo la dirección predominante del suroeste (SO) para las seis estaciones. 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 3 estaciones. En las estaciones VH y VMT se alcanzaron vientos extremos y fuertes, respectivamente, con dirección predominante del oeste suroeste (OSO).

Durante el horario nocturno (Figura N°05c), en las estaciones CRB y CHO se observaron vientos de intensidad moderada, mientras que en las estaciones CDM, STA y ÑAÑA, vientos débiles, siendo la dirección predominante del suroeste (SO) para las cinco estaciones. En las estaciones SMP, CRS y SBJ, se alcanzaron vientos débiles, mientras que en la estación PPD, vientos moderados, siendo la dirección predominante del sur (S) para las cuatro estaciones. En la estación AR y SJL se registraron vientos moderados y débiles, respectivamente, con dirección predominante del sur suroeste (SSO). En la estación VH se registraron vientos débiles del oeste (O) y en la estación VMT vientos débiles del oeste suroeste (OSO).

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).

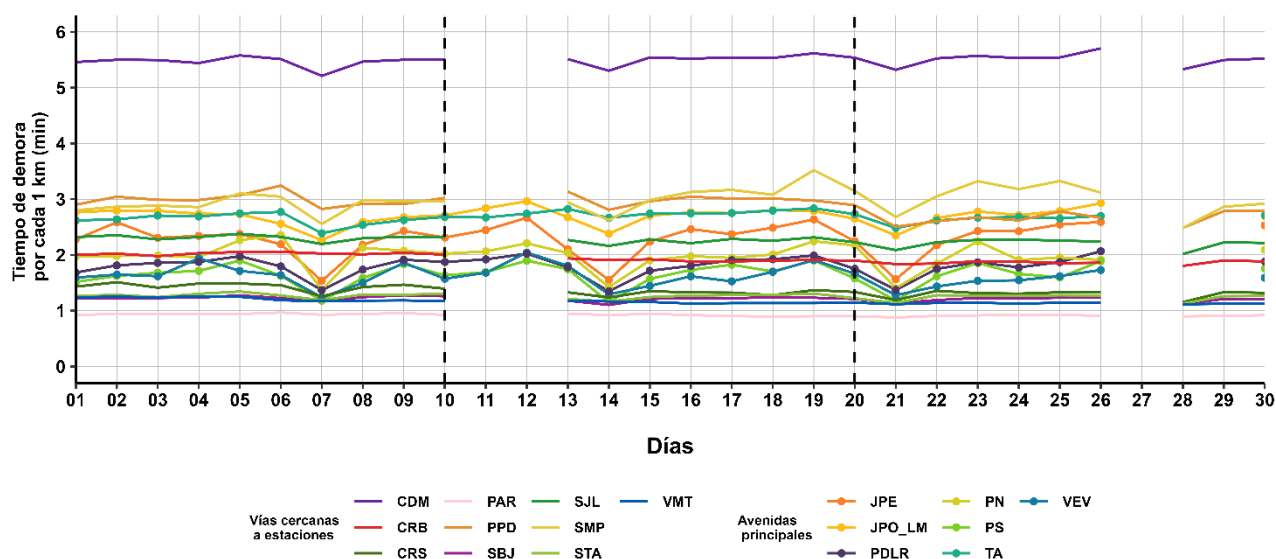
3. ACTIVIDAD VEHICULAR EN EL AMLC

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 tanto en las vías cercanas a las estaciones de monitoreo como en las avenidas principales del AMLC. Se aprecia que los mayores tiempos de demora, respecto a las vías cercanas a las estaciones, se presentaron en los alrededores de la estación CDM, ubicada en la zona centro, alcanzando un promedio máximo diario de 5.7 minutos durante la tercera decadiaria (viernes 26 de setiembre). Mientras que, respecto a las avenidas principales, los mayores tiempos de demora se registraron en la Av. Javier Prado Oeste – Av. La Marina (JPO_LM), alcanzando un valor promedio diario máximo de 3 minutos durante la segunda decadiaria (viernes 12 de setiembre).

En la Figura N° 07a y Figura N° 07b se puede apreciar que, en la mayoría de los casos, durante el mes de setiembre, se observó un notable incremento del tiempo de demora para el día lunes y una reducción durante el fin de semana, especialmente el domingo, lo que refleja un cambio en la carga vehicular durante los días laborables y los días de descanso. Por otro lado, en su mayoría se presentaron dos picos en los tiempos de demora: entre las 6:00 a 9:00 horas y entre las 17:00 a 19:00 horas.

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



Avenidas principales consideradas: Javier Prado Este (JPE), Javier Prado Oeste – La Marina (JPO-LM), Paseo de la República (PDLR), Panamericana Norte (PN), Panamericana Sur (PS), Tupac Amaru (TA) y Vía de Evitamiento (VEV)

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-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 Sjodin 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.irjmet.com/uploadedfiles/paper/volume3/issue_4_april_2021/8350/1628083343.pdf

Figura N°07a. Variación del tiempo de demora por cada 1 km recorrido en vías cercanas a estaciones de monitoreo de la REMCA según horario y día de semana

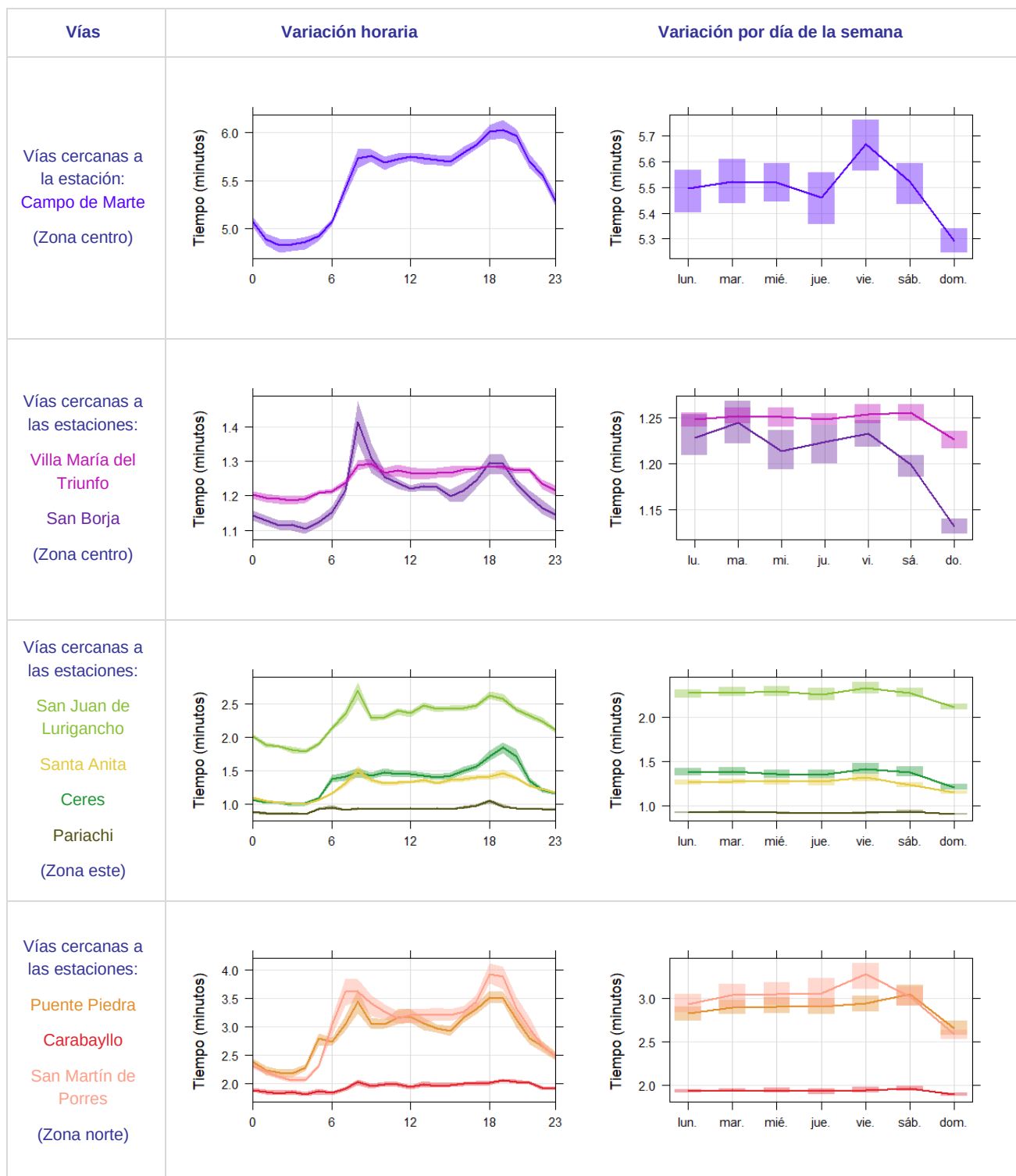
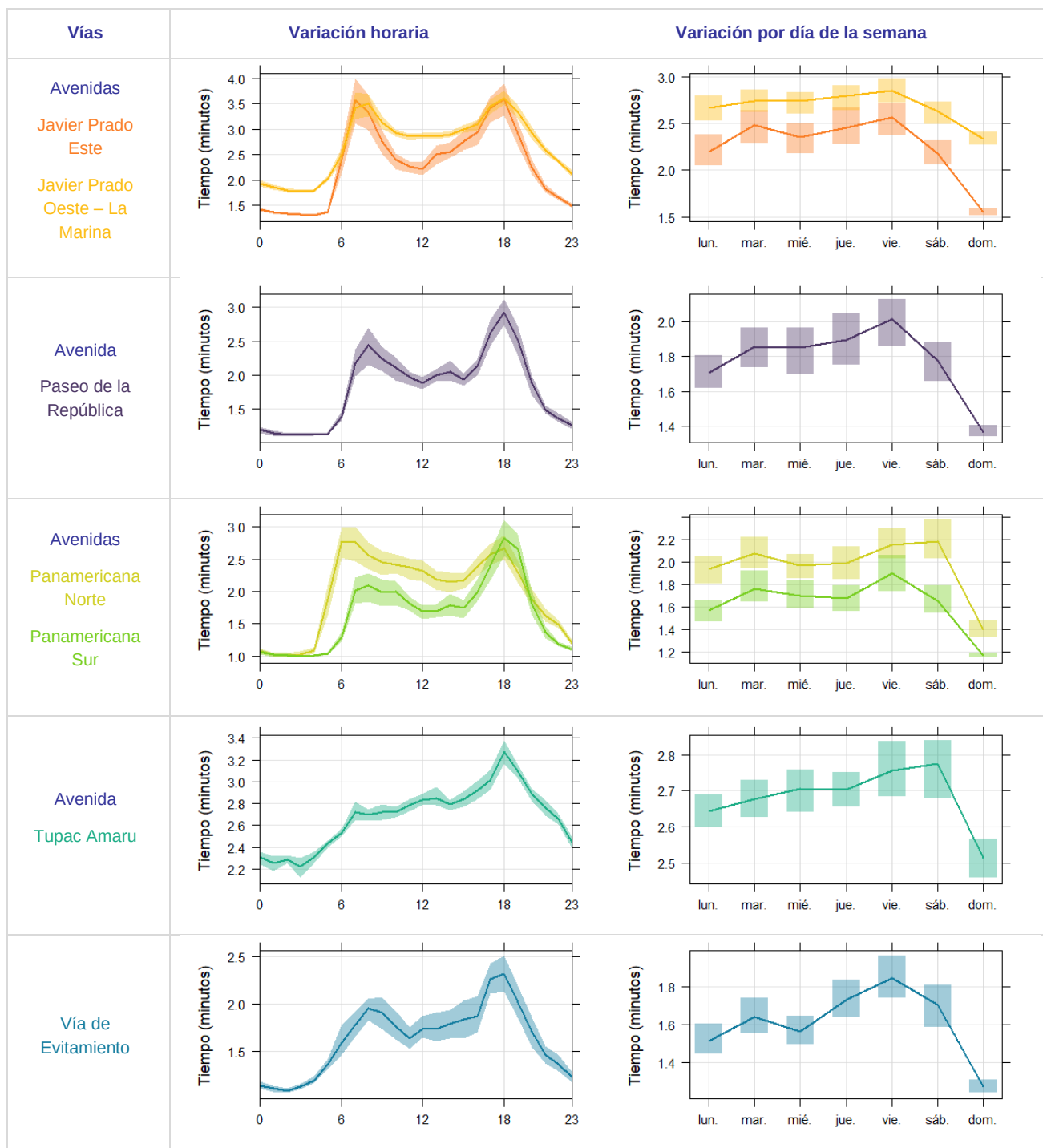


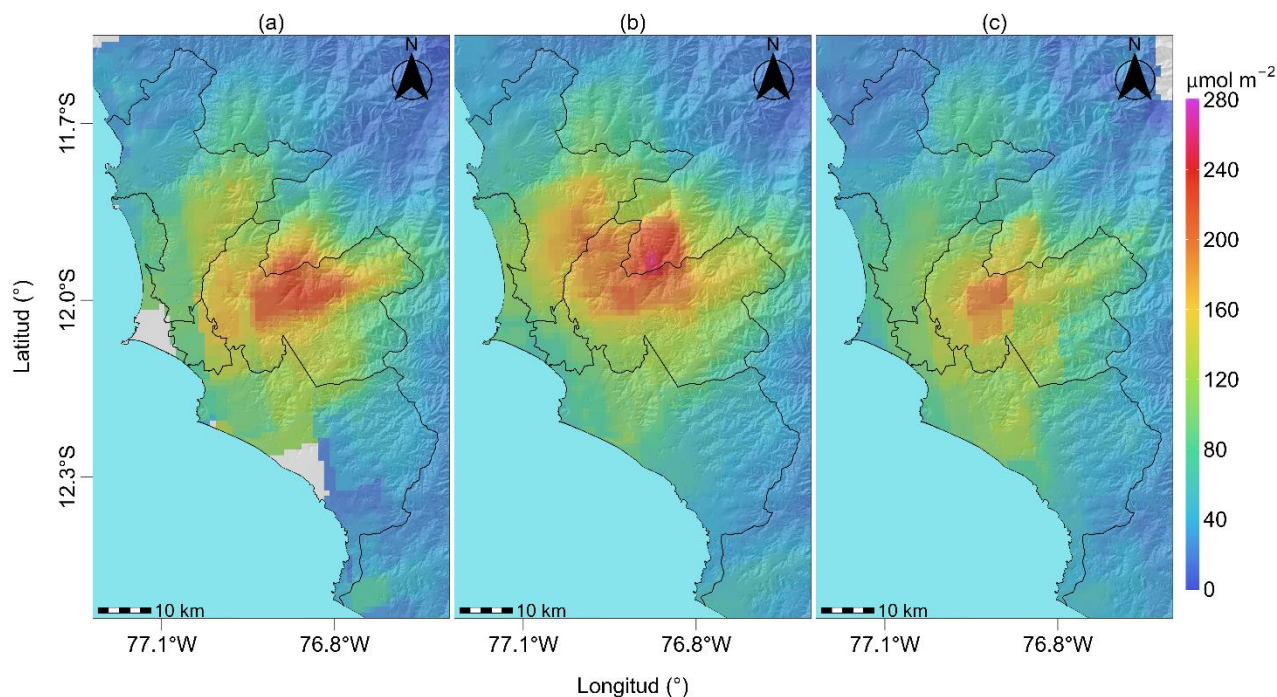
Figura N°07b. Variación del tiempo de demora por cada 1 km recorrido en las avenidas principales del AMLC según horario y día de semana



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 NO_2 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$), obtenidas del satélite Sentinel 5P (instrumento Tropomi) a una resolución aproximada de $5 \text{ km} \times 3.5 \text{ km}$ durante el mes de setiembre. Es así como, la Figura N° 08a, muestra la distribución espacial promedio de NO_2 en la primera decadiaria (1 a 10 de setiembre), la Figura N° 08b, en la segunda decadiaria (11 al 20 de setiembre) y la Figura N° 08c en la tercera decadiaria (21 al 30 de setiembre).

Figura N° 08. Distribución espacial de la columna del NO_2 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$) en la tropósfera del AMLC.



En la Figura N° 08 se puede observar que, durante el mes de setiembre, la densidad máxima de NO_2 en la columna vertical troposférica muestra una marcada variabilidad espacial entre las zonas del AMLC. En la primera decadiaria, la zona este presentó el promedio más alto ($144.8 \mu\text{mol}/\text{m}^2$), asimismo, el valor máximo de $231.4 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ también se alcanzó en la zona este; la zona sur en contraste registró los valores promedio más bajos. En la segunda decadiaria, se destaca un incremento significativo en la zona norte (29%), sin embargo, fue en la zona este donde nuevamente se presentó el valor máximo, con $250.1 \mu\text{mol}/\text{m}^2$. En la tercera decadiaria, se destaca una reducción de las densidades en la zona norte (40%), alcanzando un promedio de $59.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, por otro lado, el valor máximo de $200.9 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, se presentó también en la zona este. Es importante mencionar que en la primera decadiaria se evidenció una limitada disponibilidad de información en las zonas sur y oeste.

Cabe precisar que el NO_2 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 del viento, el NO_2 tiende a dispersarse hacia la zona norte y este del AMLC. Esta situación, combinada con la mayor circulación de vehículos de carga pesada o transporte de mercancía en dichas zonas, contribuye a que se registren los mayores valores de densidad de NO_2 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>

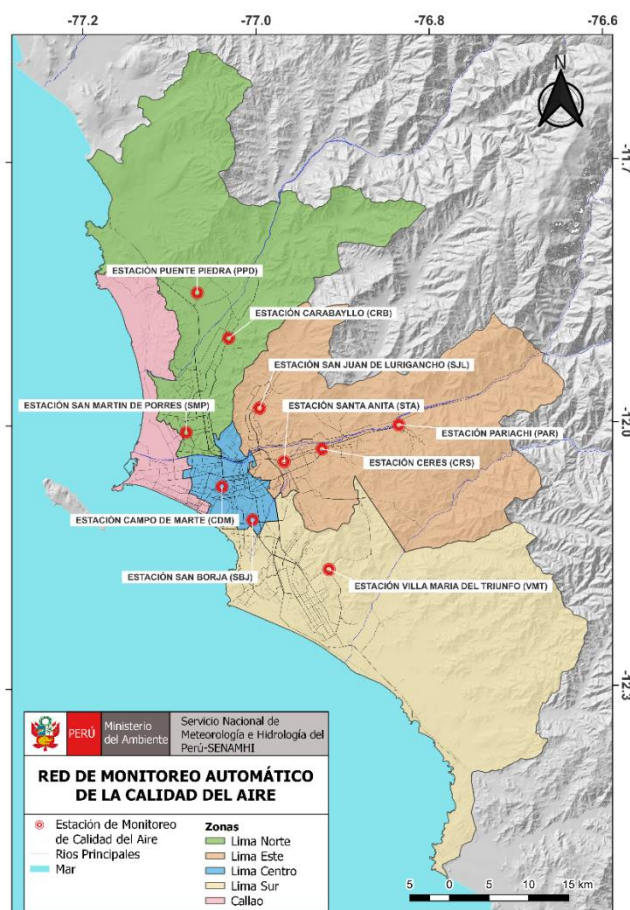
5. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

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 Lingán - 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

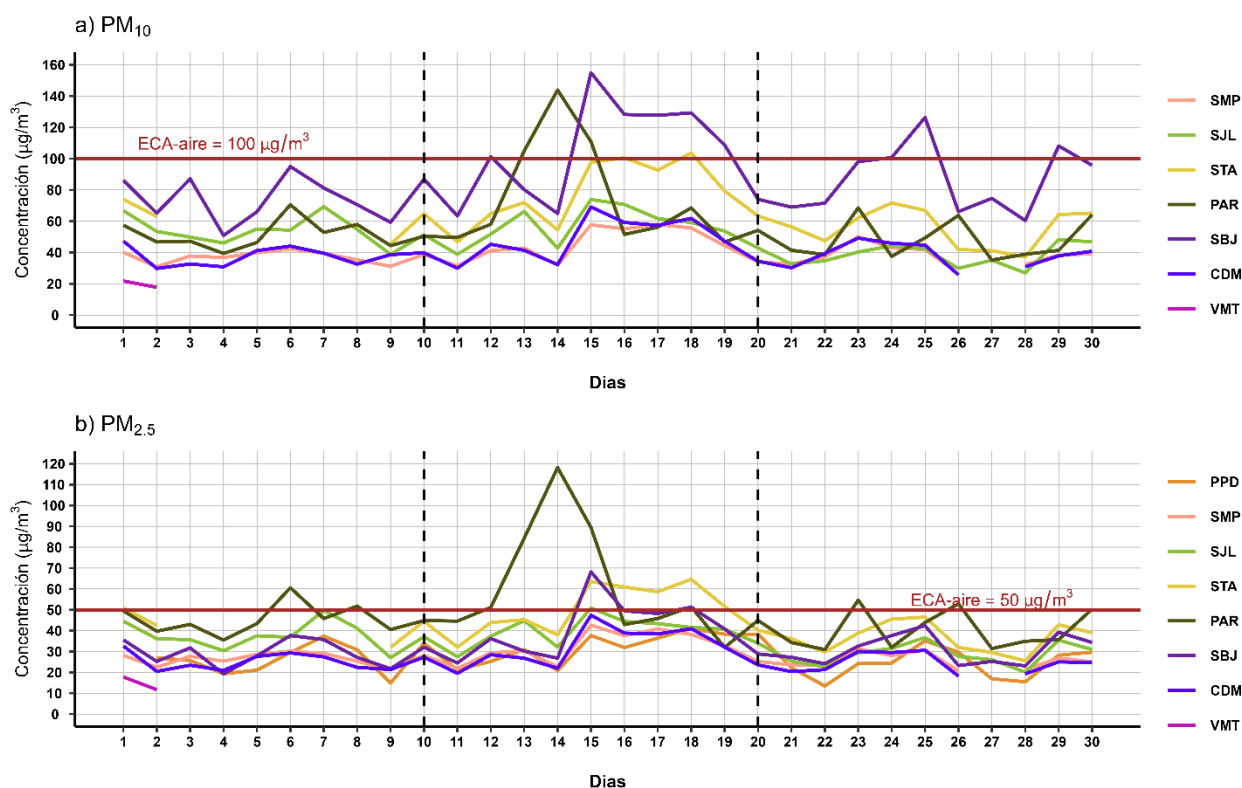
Con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el AMLC, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones del material particulado y gases. Los datos provinieron de las estaciones: Puente Piedra (PPD), Carabaylo (CRB), San Martín de Porres (SMP), San Juan de Lurigancho (SJL), 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 se observaron concentraciones de PM₁₀ superiores al ECA-aire de 100 µg/m³ (como promedio diario) en las estaciones SBJ, PAR y STA. El valor más alto registrado fue de 154.9 µg/m³ en la estación SBJ, ubicada en la zona centro, el lunes 15 de setiembre (las concentraciones más altas se registraron entre las 06:00 y 08:00 horas), y estaría asociado a condiciones meteorológicas poco favorables para la dispersión de contaminantes: una altura de la CLA baja y alta humedad relativa, condiciones que favorecen la acumulación de contaminantes en el aire, especialmente de PM_{2.5}, que al ser una fracción del PM₁₀, también contribuye al incremento de este último, así como, a las actividades de construcción que se vienen realizando en las cercanías de la estación, y a la actividad vehicular existente en un día laborable. Por otro lado, en la zona norte, la concentración más alta se registró en la estación SMP el 17 de setiembre, alcanzando los 58 µg/m³; en la zona este, el valor máximo se registró en la estación PAR el 14 de setiembre, alcanzando los 143.9 µg/m³; y finalmente, en la zona sur, la estación VMT alcanzó el valor máximo de 21.8 µg/m³ el 1 de setiembre. A nivel decadiario, de manera general se presentó un incremento hacia la segunda decadiaria, destacando la estación PAR, especialmente en la segunda mitad de la decadiaria, lo cual estaría asociado a menores alturas de la CLA (ver Figura N° 02d).^{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, SBJ y SJL. El valor máximo de 118.2 µg/m³ se alcanzó el domingo 14 de setiembre en la estación PAR, ubicada en la zona este (presentándose las concentraciones más altas entre las 01:00 y 02:00 horas y a las 07:00 horas), y estaría asociado a condiciones meteorológicas favorables para la acumulación de PM_{2.5}: niveles altos de humedad relativa y una reducción en la altura de la CLA durante las horas de mayores concentraciones, así como a la actividad vehicular en la zona este (durante días particulares). En la zona norte, se registró el valor más alto el 15 de setiembre, alcanzando los 42.6 µg/m³ en la estación SMP. En la zona centro, se registró el valor más alto el 15 de setiembre, alcanzando los 68.2 µg/m³ en la estación SBJ. Finalmente, en la zona sur, la mayor concentración fue de 17.8 µg/m³, alcanzada el 1 de setiembre en la estación VMT. A nivel decadiario, se observan incrementos en las concentraciones hacia la segunda decadiaria, destacando el incremento presentado en la estación SBJ, lo cual estaría asociado a la reducción de la altura de la CLA, que permitió la acumulación del contaminante. (ver Figura N° 02d)^{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 CO²³.

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

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

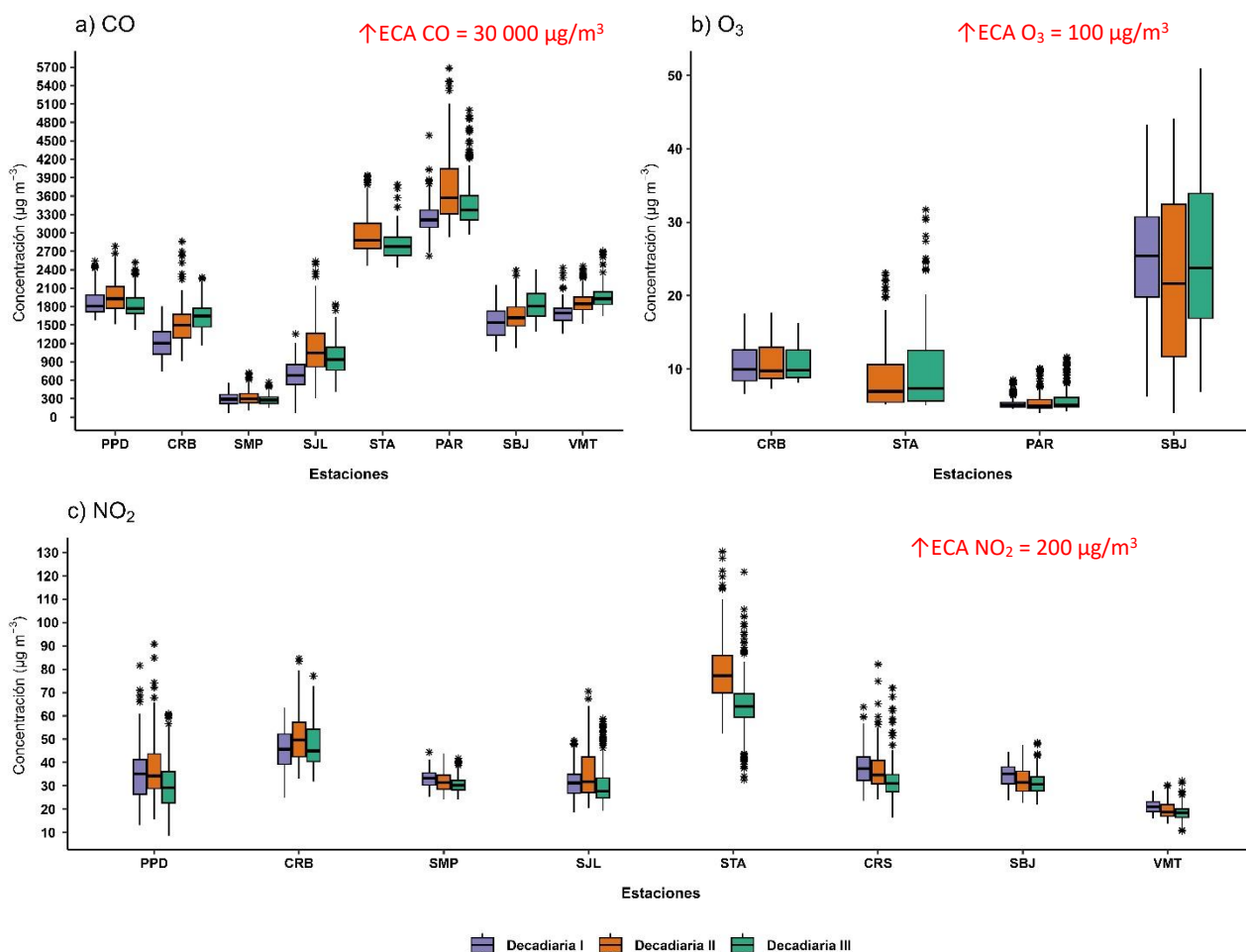
²² Temporal variation of the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio and its association with meteorological factors in a South American megacity: Metropolitan Area of Lima-Callao, Peru. Obtenido de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38613696/>

²³ 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>

fotoquímica de los COVs en presencia de óxidos de nitrógeno ($\text{NO} + \text{NO}_2$), conocidos como precursores. Por lo tanto, suele existir una relación inversa entre las concentraciones de NO_2 y O_3 ²⁴, 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 ²⁵. 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 temperatura²⁶.

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 amplio²⁷. 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 precursor²⁶.

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



²⁴ 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>

²⁵ Análisis de la Relación entre O_3 , NO y NO_2 en Tianjin, China. Obtenido de: <https://aagr.org/articles/aagr-10-07-0a-0055>

²⁶ 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

²⁷ United States Environmental Protection Agency. (25 de julio del 2023). Basic Information about NO_2 . <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2>

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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (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 PAR, con una máxima de 5682.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (jueves 18 de setiembre, a las 08:00 horas), lo cual estaría asociado a bajos valores de la altura de la CLA. Por otro lado, la concentración más alta en la zona norte se presentó en la estación PPD, alcanzando los 2779.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 13 de setiembre a las 00 horas; en la zona centro, la concentración más alta se presentó en la estación SBJ, alcanzando los 2409.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 30 de setiembre a las 08:00 horas; mientras que en la estación VMT, ubicada en la zona sur, la concentración más alta fue de 2703.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 30 de setiembre a las 10:00 horas. Cabe mencionar que, a nivel decadiario, se registró un incremento en las concentraciones registradas hacia la segunda decadiaria, pudiendo destacar el incremento en la estación SJL, la cual estaría asociada a una reducción en los valores de altura de la CLA (especialmente en la segunda mitad de la segunda decadiaria), condición favorable para la acumulación del contaminante (Ver Figura N° 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 aprecia que el valor más alto se registró en la estación SBJ, alcanzando los 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el lunes 22 de setiembre. Este incremento estuvo asociado a un ligero aumento de la temperatura y a una reducción en la altura de CLA, condiciones que favorecieron el aumento de las concentraciones de O_3 . Por otro lado, la concentración más alta en la zona norte se presentó en la estación CRB, alcanzando los 17.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 16 de setiembre; mientras que, en la zona este, la concentración más alta se presentó en la estación STA el 22 de setiembre, alcanzando los 31.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto al comportamiento decadiario, de manera general se presentó un ligero incremento en las concentraciones registradas, destacando el incremento de la segunda a la tercera decadiaria en la estación STA, lo cual estaría principalmente asociado a un incremento en los valores de temperatura (a mediados y fines de la tercera decadiaria) (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 periodo de monitoreo. La mayor concentración se reportó en la zona este, en la estación STA (el jueves 18 de setiembre a las 11:00 horas), alcanzando 130.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual estaría asociado a valores bajos de la altura de la CLA y al incremento de la actividad vehicular en la zona este (89% de las emisiones de NO_x provienen de vehículos a diésel)¹⁰. Por otro lado, la concentración más alta en la zona norte se presentó en PPD, alcanzando los 90.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 12 de setiembre a las 18:00 horas; mientras que, en la zona centro, la concentración más alta se presentó en SBJ, alcanzando los 48.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 23 de setiembre a las 15:00 horas; y en la zona sur, la concentración más alta se presentó en VMT, alcanzando los 32.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 23 de setiembre a las 16:00 horas. Asimismo, no se observan variaciones significativas en el análisis decadiario, sin embargo, se podría destacar un ligero incremento de las concentraciones en la estación SJL hacia la segunda decadiaria (especialmente en la segunda mitad), lo cual estaría asociado a una reducción en los niveles de la altura de la CLA (ver Figura N° 02b y 02c).

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^{28 29}.

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 centro, la estación SBJ presentó 1 día con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles”, 28 días con calidad del aire “Moderada”, 1 día con calidad del aire “Buena”; mientras que, la estación CDM presentó 4 días con calidad del aire “Moderada” y 25 días con calidad del aire “Buena”. En la zona este, las estaciones PAR, SJL y STA presentaron 12, 8 y 17 días con calidad del aire “Moderada” y 18, 22 y 7 días con calidad del aire “Buena”, respectivamente. En la zona norte, la estación SMP presentó 4 días con calidad del aire “Moderada” y 25 días con calidad del aire “Buena”. Finalmente, en la zona sur, la estación VMT presentó 2 días con calidad del aire “Buena”.

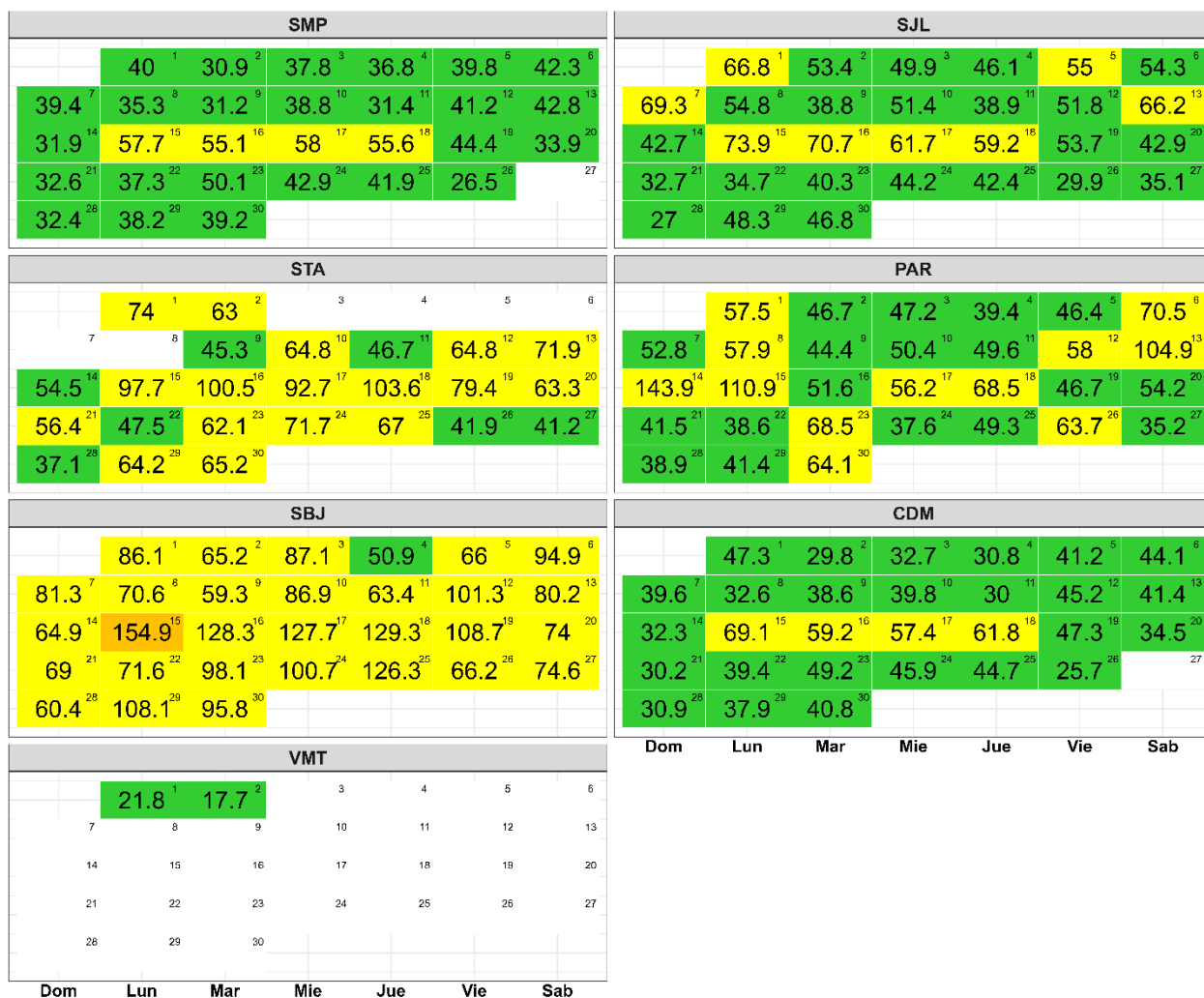
6.2. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM_{2.5}

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 y STA presentaron 4 días con calidad del aire “Insalubre”, 20 y 14 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y en ambos casos 6 días con calidad del aire “Moderada”; mientras que, la estación SJL presentó 17 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 13 días con calidad del aire “Moderada”. Por otro lado, en la zona centro, la estación SBJ presentó 1 día con calidad del aire “Insalubre”, 11 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 18 días con calidad del aire “Moderada”; mientras que, la estación CDM presentó 4 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 25 días con calidad del aire “Moderada”. En la zona norte, las estaciones PPD y SMP presentaron 6 y 4 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 23 y 25 días con calidad del aire “Moderada”, respectivamente. Finalmente, en la zona sur, la estación VMT presentó 2 días con calidad del aire “Moderada”.

²⁸ Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/airquality_brochure_02_14_0.pdf

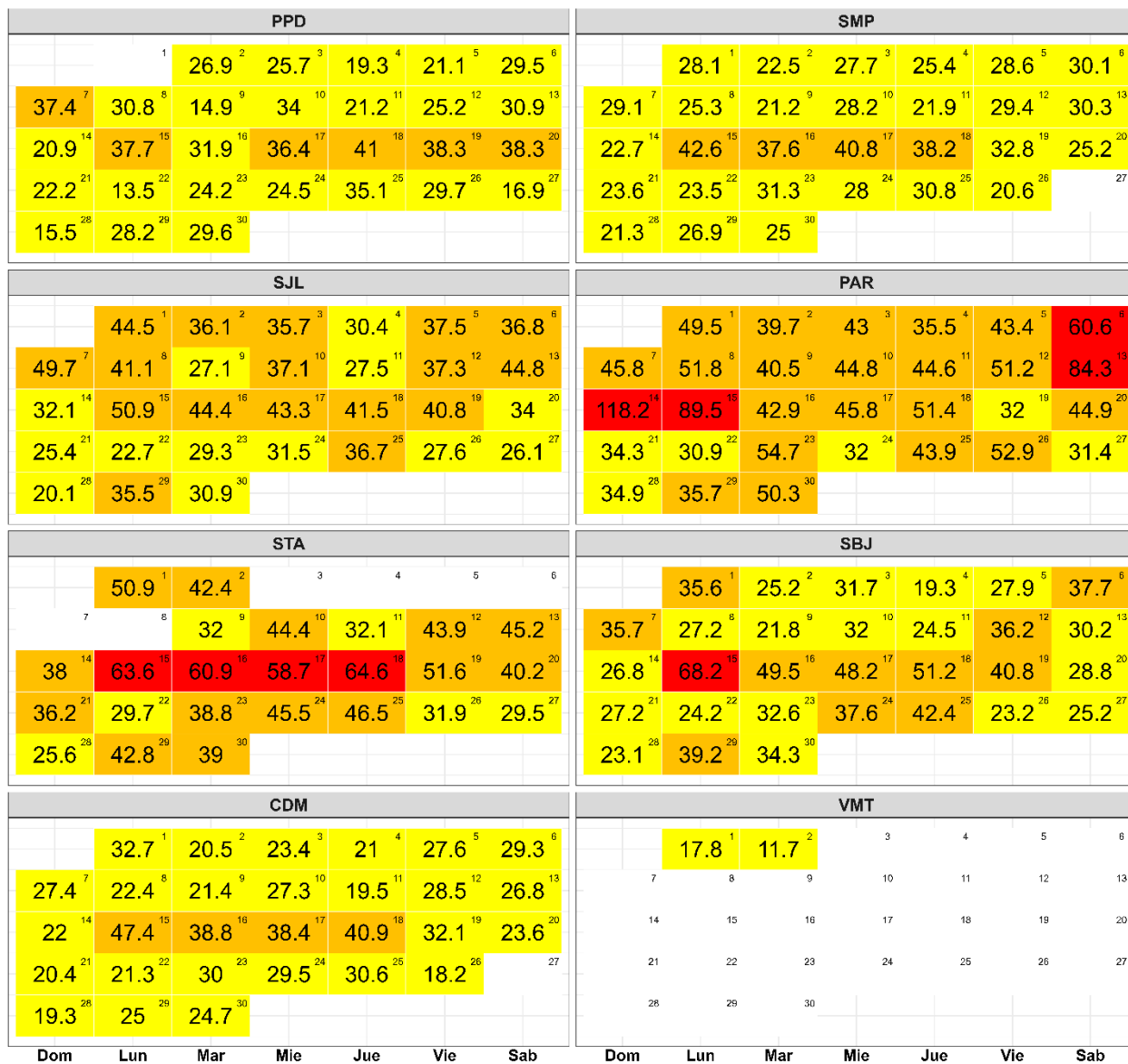
²⁹ Final Updates to the Air Quality Index (AQI) for Particulate Matter. Obtenido de: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-02/pm-naaqs-airquality-index-fact-sheet.pdf>

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}



7. CONCLUSIONES

- Las condiciones meteorológicas influyeron en el comportamiento diario de los contaminantes atmosféricos en el AMLC durante el mes de setiembre. En comparación con los registros del mes anterior, se observó una ligera tendencia a la disminución de la humedad relativa, así como un incremento de la temperatura y ligeramente de la velocidad del viento, lo que pudo haber contribuido a la ligera reducción de las concentraciones de $PM_{2.5}$.
- Durante el mes de setiembre, 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 domingo y un incremento los días lunes y 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 la zona norte; mientras que, para la tercera decadiaria, se destaca una reducción de los valores de densidad en esta zona. Asimismo, durante las tres decadiarias, los mayores valores se observaron en la zona este.
- En el periodo de análisis, se superó el ECA – aire para PM_{10} en tres estaciones de monitoreo (SBJ, PAR y STA), alcanzándose en la estación SBJ la concentración más alta, $154.9 \mu g/m^3$ (el lunes 15 de setiembre). En el caso del $PM_{2.5}$, se superó el ECA – aire en cuatro estaciones de monitoreo (PAR, STA, SBJ y SJL), alcanzándose en la estación PAR un valor máximo de $118.2 \mu g/m^3$ (el domingo 14 de setiembre). Estas concentraciones estarían asociadas a las condiciones de actividad vehicular y meteorológicas presentes.
- Durante el periodo 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) para el contaminante PM_{10} , se observó que, la estación SBJ presentó el 93% de los días monitoreados una calidad del aire de “Moderada”. Por otro lado, respecto al contaminante $PM_{2.5}$, se observó que la estación STA y PAR presentaron una calidad del aire “Insalubre” durante el 17% y 13% de los días monitoreados, una calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” durante el 58% y 67% de los días monitoreados y el resto de los días una calidad del aire “Moderada”.

8. PERSPECTIVAS DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL MES DE OCTUBRE 2025

De acuerdo con el pronóstico climático³⁰ para el mes de octubre del 2025, 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 setiembre.

³⁰ Documento: Boletín climático nacional – setiembre 2025 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-147.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 noviembre del 2025