



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

BOLETÍN VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE

Área metropolitana de Lima y Callao

Febrero 2025





PERÚ

Ministerio
del Ambiente

VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – FEBRERO 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 febrero^{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 – febrero 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-120.pdf>

² Boletín climatológico de Lima – febrero 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-128.pdf>

³ Sistema de predicción meteorológico a mesoscala 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.).



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

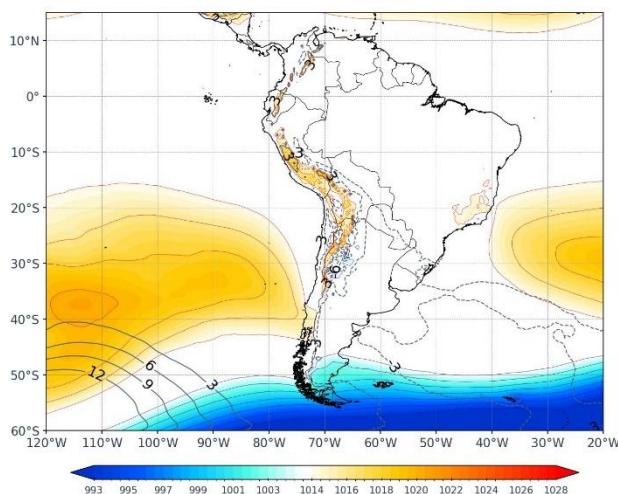
1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

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 períodos de análisis. Es así como, para el mes de febrero se conformó la decadiaria 1 (del 1 al 10), decadiaria 2 (del 11 al 20) y decadiaria 3 (del 21 al 28).

1.1. PRIMERA DECADIARIA (1 al 10 de febrero)

En la primera decadiaria, el APS presentó una configuración zonal con dos núcleos, el más intenso en los 38°S y 115°W , con valores de presión alrededor de los 1020 hPa, similar respecto a lo climático y desplazado ligeramente hacia el suroeste^{6,1} (Figura N°01a). Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur con velocidades entre 0 y 2 m/s. Por otro lado, las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) estuvieron cercanos a los -0.8°C frente a las costas del AMLC, lo cual repercutió en las anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, encontrándose ligeramente la máxima por encima de lo normal, en 2.2°C y la mínima se mantuvo en su normal climática².

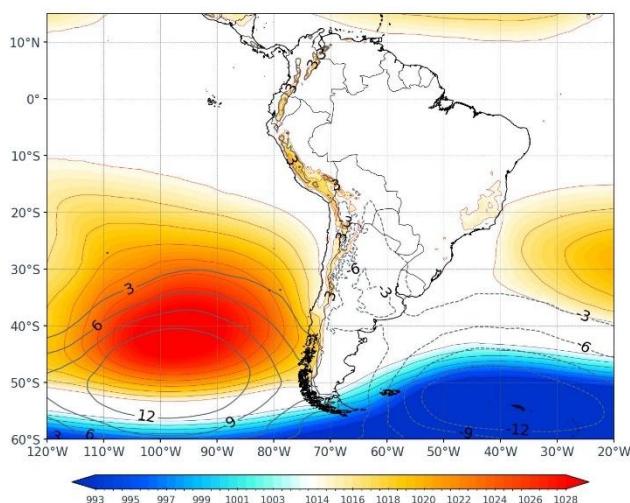
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de febrero)

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

En la segunda decadiaria, el APS presentó una configuración casi meridional con núcleo en los 40°S y 95°W , con valores de presión superiores a los 1024 hPa, más intenso respecto al climático y desplazado hacia el sur^{6,1} (Figura N° 01b), esta intensificación del APS genera un incremento en la intensidad de los vientos hacia la costa. De esta manera, los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur y velocidades entre 2 y 5 m/s. Por otro lado, respecto a las ATSM⁷, estas se encontraron alrededor de los -0.6°C frente a las costas del AMLC, lo cual repercutió en el aumento de las temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándolas por encima de su normal para la máxima y la mínima en 2°C y 0.6°C , respectivamente².



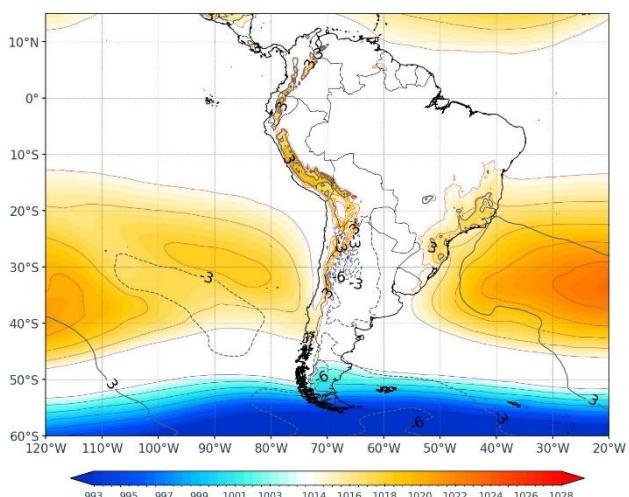
⁶ ¿Cómo responderán los anticiclones subtropicales del hemisferio sur al calentamiento global? Mecanismos y estacionalidad en las proyecciones de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Pág. 704). Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05290-7>

⁷ Temperatura superficial del mar y anomalías térmicas en el litoral peruano. Obtenido de: http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/index2.php?id_seccion=I0178030200000000000000

1.3. TERCERA DECADIARIA (21 al 28 de febrero)

Finalmente, el APS presentó una configuración zonal y núcleo en los 38°S y 120°W con valores de presión alrededor de los 1020 hPa, similar respecto a lo climático y desplazado hacia el noreste^{6,1} (Figura N° 01c). Asimismo, se presentaron vientos con una dirección predominante del sur y velocidad entre 1 y 4 m/s. Por otro lado, la ATSM fue de -0.3°C frente a las costas de AMLC, lo cual repercutió incrementando las temperaturas máximas y mínimas del aire, en 2.8°C y 0.3°C, respectivamente².

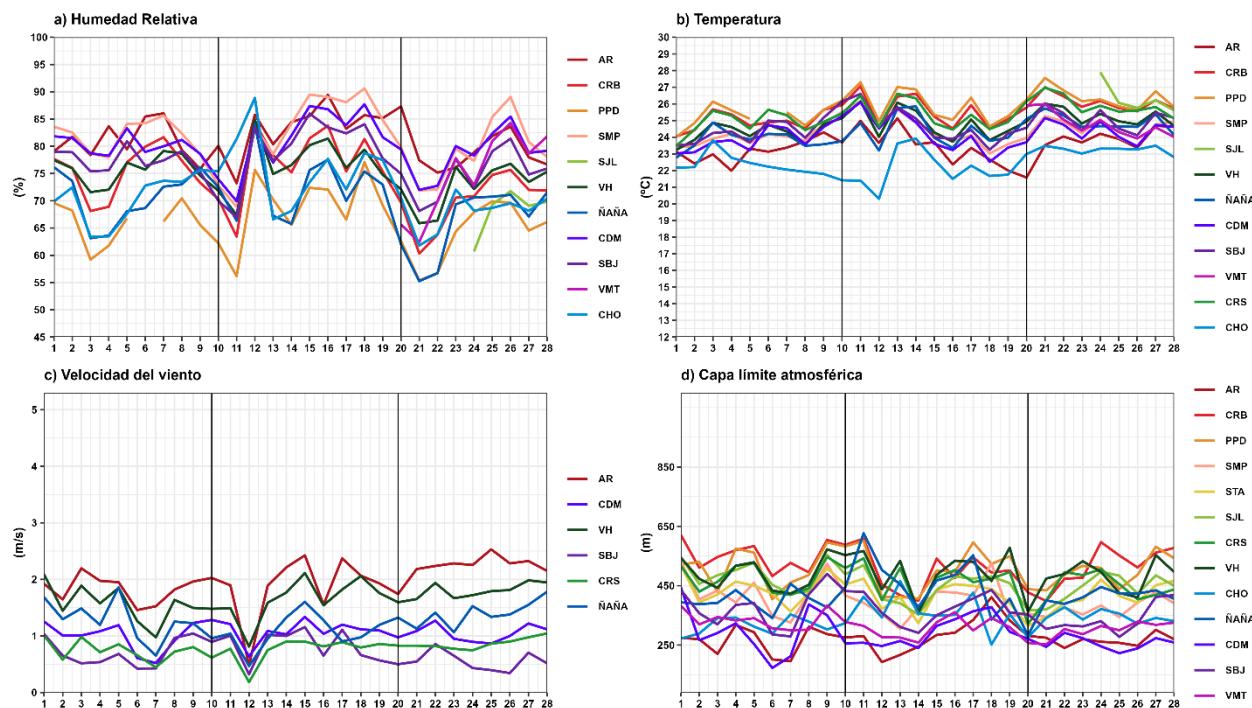
Figura N°01c. Variación del APS en la decadiaria 3.



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, 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 para lo cual se usó las salidas del modelo operativo WRF con resolución de 1Km.

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



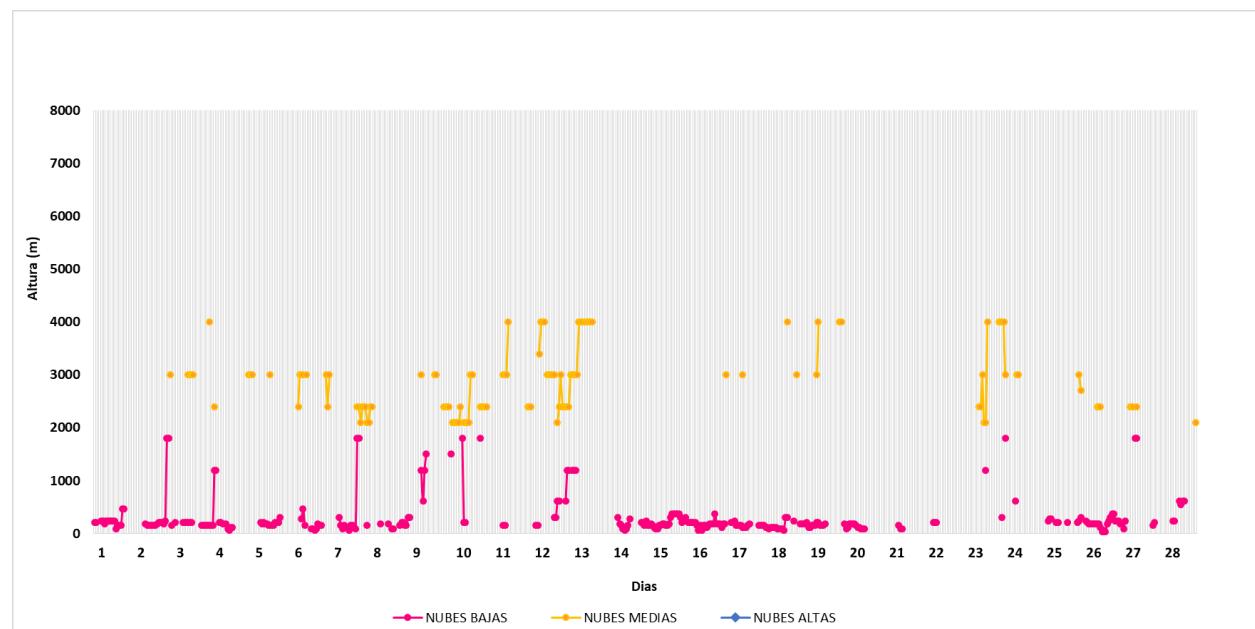
⁸ CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

Con respecto a la humedad relativa (Figura N° 02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 59.2% a 86.0%, para la segunda decadiaria entre 56.1% a 90.6% y para la tercera decadiaria entre 55.2% a 89.0%, siendo las estaciones SMP y AR aquellas que mantuvieron los promedios de humedad más altos, de 81.5% y 81.3%, respectivamente. En relación con la temperatura (Figura N° 02b) durante la primera decadiaria se presentó valores entre 21.4 a 26.1°C, para la segunda decadiaria entre 20.3 a 27.1°C, y en la tercera decadiaria entre 22.7 a 27.9 °C, siendo la estación de PPD la que alcanzó el valor promedio más alto de temperatura de 25.8 °C. En cuanto a la velocidad del viento (Figura N° 02c), fue muy variable, lo que se refleja en sus valores, los mismos que oscilaron entre 0.2 a 2.5 m/s durante todo el mes, siendo la estación AR la que alcanzó los valores promedio más altos, con un promedio mensual de 1.9 m/s. En el caso de la altura de la CLA (Figura N° 02d), las estaciones CRB, PPD y VH alcanzaron los valores promedio más altos de 519.2, 502.8 y 488.3 m, respectivamente, mientras que, en las estaciones CDM y AR se presentaron los valores promedio más bajos de 284.5 y 272.1 m, respectivamente.

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 ceilómetro⁹ de la EMA Aeropuerto Internacional Jorge Chávez ubicada en el Callao (Figura N° 03), se observó que, durante el mes de febrero, las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) se presentaron el 44.7% de las horas. Con respecto a la presencia de nubes medias (ABN mayor a 2000 m y menor a 6000 m), se encontró en un 18% de los casos. Respecto a las horas con condición de cielo despejado, estas se presentaron en el 37.2% de las mediciones realizadas. En febrero predominaron las condiciones de cielo parcialmente cubierto, por la predominancia de nubes bajas, situación característica de mediados de verano.

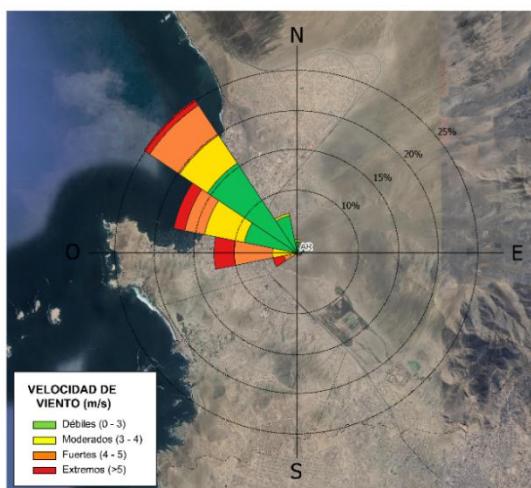
Figura N°03. Altura de base de la nube registrada en la estación Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (JCH).



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

2.2. ANALISIS DEL VIENTO EN SUPERFICIE POR HORARIOS

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, generalmente se grafican las direcciones de donde provienen, así como también la frecuencia y magnitud de la velocidad¹⁰.

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 máxima 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).

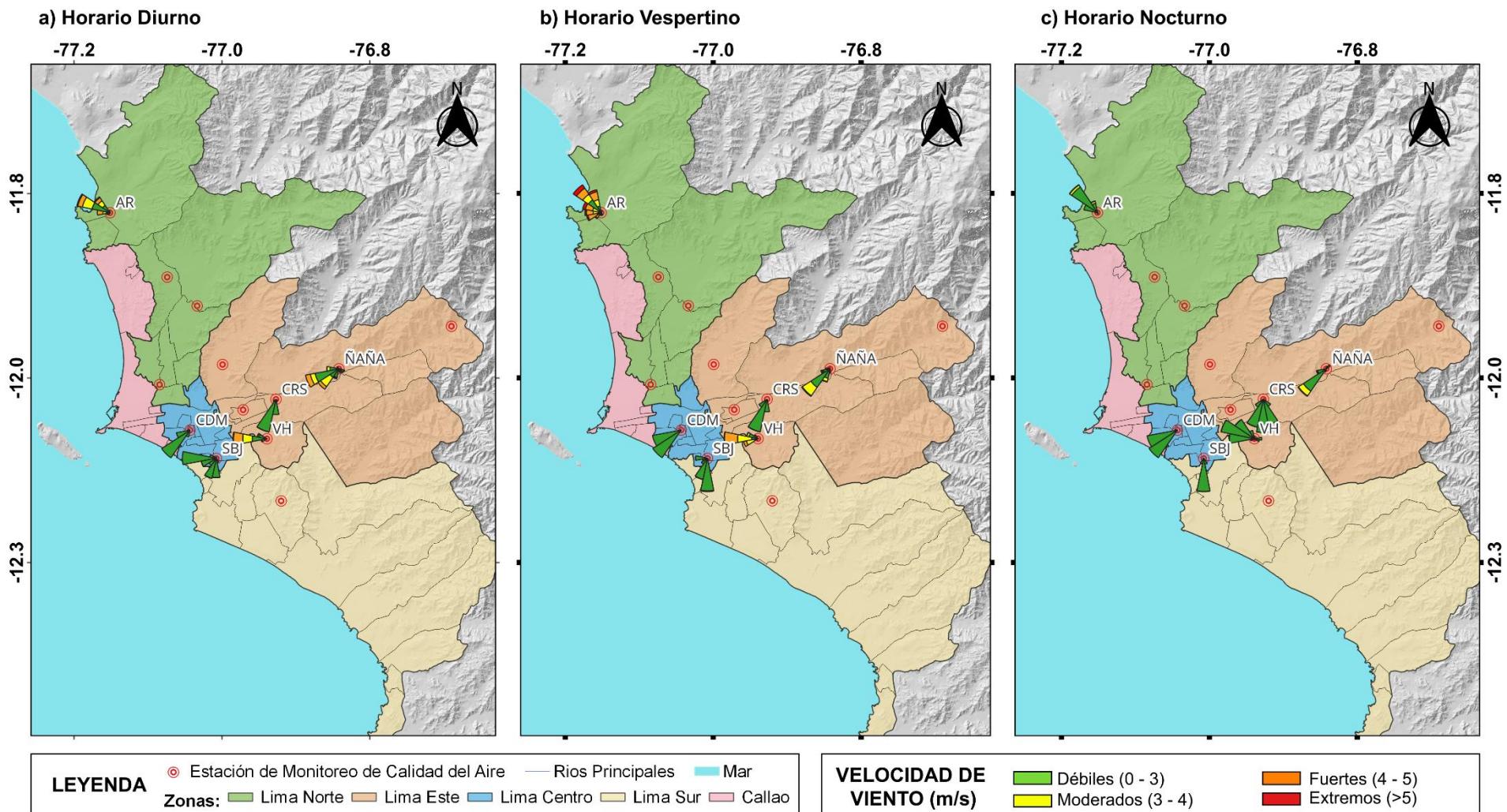
Es así como se observó, que en el horario diurno (Figura N° 05a), las estaciones VH y SBJ presentaron vientos con una dirección predominante del oeste e intensidades máximas de extrema y débil, respectivamente. Las estaciones CRS y CDM presentaron vientos con direcciones predominantes del sur suroeste (SSO) y del suroeste (SO), e intensidad máxima de débil. Finalmente, las estaciones de AR y ÑAÑA han presentado vientos con direcciones predominantes del oeste noroeste (ONO) y del oeste suroeste (OSO), e intensidad máxima de extrema y fuerte, respectivamente.

Para el horario vespertino (Figura N°05b), las estaciones CDM y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante de suroeste (SO), e intensidad máxima de débil y fuerte, respectivamente. Para las estaciones de CRS, SBJ y VH se presentaron vientos con direcciones predominantes del sur suroeste (SSO), del sur (S) y oeste (O), e intensidad máxima de débil, débil y fuerte, respectivamente. En el caso de la estación AR presentó vientos con una dirección predominante del noroeste (NO), e intensidad máxima de extrema.

Para el horario nocturno (Figura N°05c), las estaciones CDM y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante del suroeste (SO), e intensidad máxima de débil para CDM y fuerte para ÑAÑA. Para las estaciones de CRS y SBJ se presentaron vientos con una dirección predominante del sur (S) e intensidad máxima de débil. Finalmente, las estaciones de VH y AR presentaron vientos con una dirección predominante del oeste noroeste (ONO) y noroeste (NO), e intensidad máxima de débil y moderada, respectivamente.

¹⁰ 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.



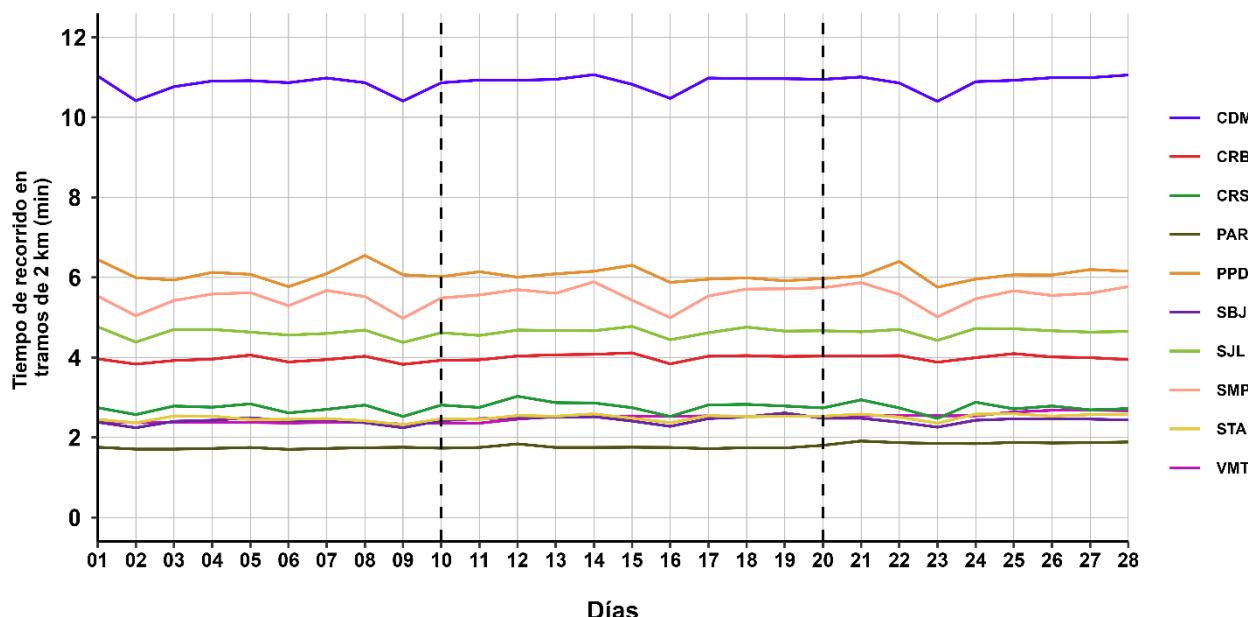
La Figura N° 05 muestra el comportamiento de la dirección y velocidad del viento en cada una de las EMA para los horarios diurnos (07:00 - 12:59 horas), vespertinos (13:00 - 18:59 horas) y nocturnos (19:00 - 06:59 horas).

3. ACTIVIDAD VEHICULAR EN EL AMLC

La actividad vehicular tiene una contribución de más del 50% sobre la contaminación del aire en el AMLC¹¹, asimismo, según el ranking del año 2023 de la compañía TOMTOM, en el AMLC el tiempo empleado para recorrer un tramo de 10 km es de 28 minutos¹². 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^{13,14}. En relación con lo indicado, se ha desarrollado un algoritmo en Python que utiliza la técnica de web scraping¹⁵ para extraer datos sobre el tiempo de recorrido en tramos de 2 km de las principales avenidas¹⁶, específicamente en el área de influencia de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la REMCA del SENAMHI.

En la Figura N°06 se aprecia que los mayores tiempos de recorrido en tramos de 2 km se presentaron en los alrededores de la estación CDM (zona centro), con un valor promedio diario máximo de 11.1 minutos durante la segunda decadiaria (viernes 14 de febrero, presentándose los valores más altos entre las 18:00 y 20:00 horas). En la zona norte, el tiempo de recorrido más alto fue de 6.5 minutos, durante la primera decadiaria (sábado 8 de febrero) en los alrededores de la estación PPD. En la zona este, el mayor tiempo promedio diario fue de 4.8 minutos, registrado durante la segunda decadiaria (sábado 15 de febrero) en los alrededores de la estación SJL. Finalmente, en la zona sur, estación VMT, el valor más alto fue de 2.7 minutos, alcanzado en la tercera decadiaria (miércoles y jueves 26 y 27 de febrero). Se observa que, en general, los valores se mantuvieron sin variaciones notables a lo largo del mes. Por otro lado, según la Figura N° 07 se aprecia que, en su mayoría, de lunes a viernes, se presentaron dos picos en los tiempos de demora entre las 7:00 a 9:00 horas y entre las 18:00 a 20:00 horas, mientras que los fines de semana el primer pico tiende a presentarse alrededor de las 12:00 horas. Asimismo, se destaca una reducción los domingos, lo que refleja una menor carga vehicular los días de descanso, sin embargo, en el caso de la estación SJL y más aún en la estación PPD se observa un incremento los sábados, lo que se debería a actividades propias de estas zonas.

Figura N°06. Variación diaria del tiempo de recorrido en tramos de 2 km en el ámbito de la REMCA



¹¹ 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>

¹² Ranking 2023 "TOMTOM TRAFFIC INDEX". Obtenido de: <https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking/>

¹³ 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/pii/S0269749117304001?via%3Dihub>

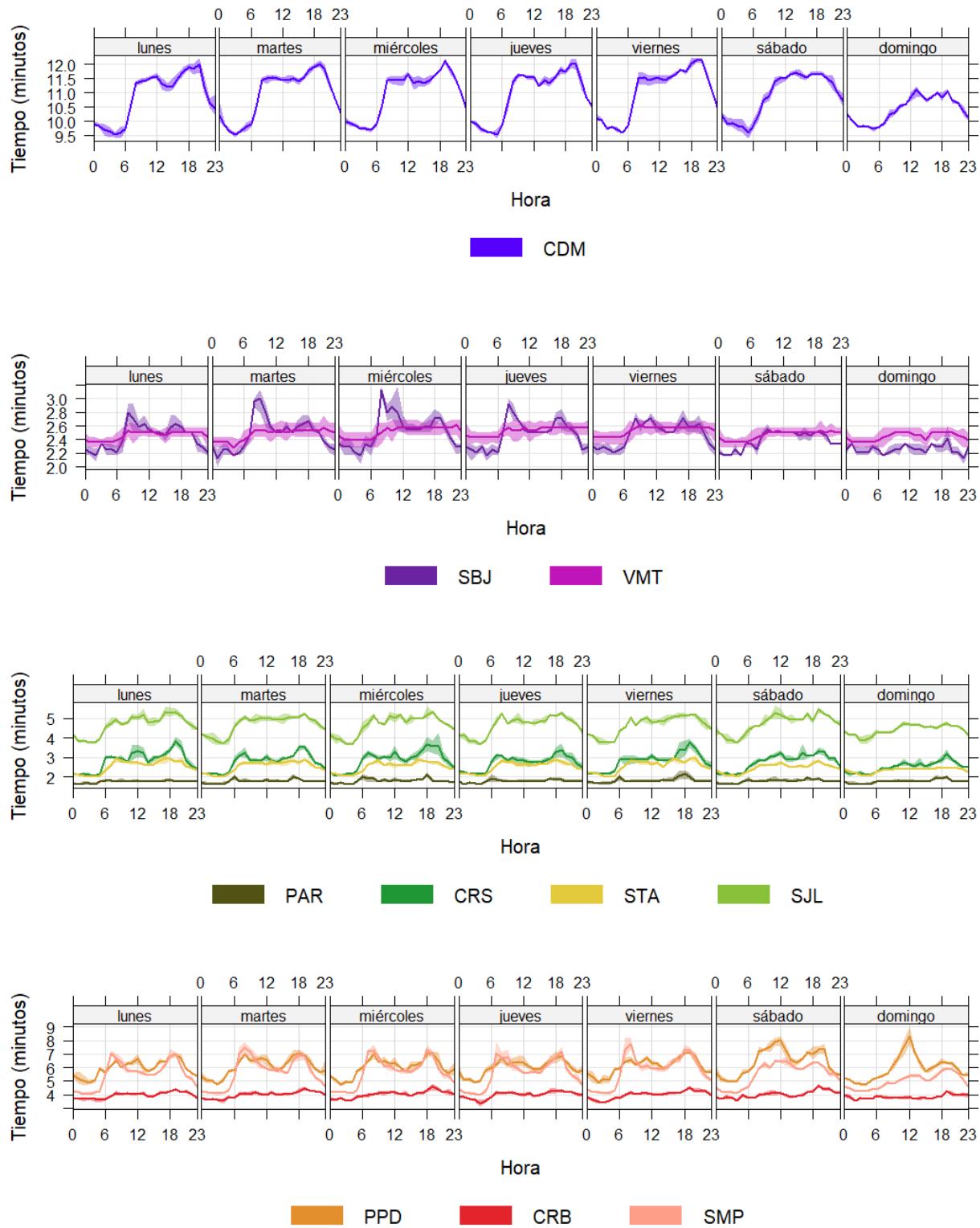
¹⁴ Sjodin et al. (1998) mostraron aumentos de hasta 4, 3 y 2 veces en las emisiones de CO, HC y NOx, respectivamente, en condiciones de congestión (velocidad promedio de 13 millas por hora, mph; 1 mph = 1,61 km por hora) en comparación con condiciones no congestionadas. Obtenido de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4243514/>

¹⁵ 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.

¹⁶ Estudio: Extracción y Minería de Datos de Tráfico en Google Maps. Obtenido de:

https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/volume3/issue_4_april_2021/8350/1628083343.pdf

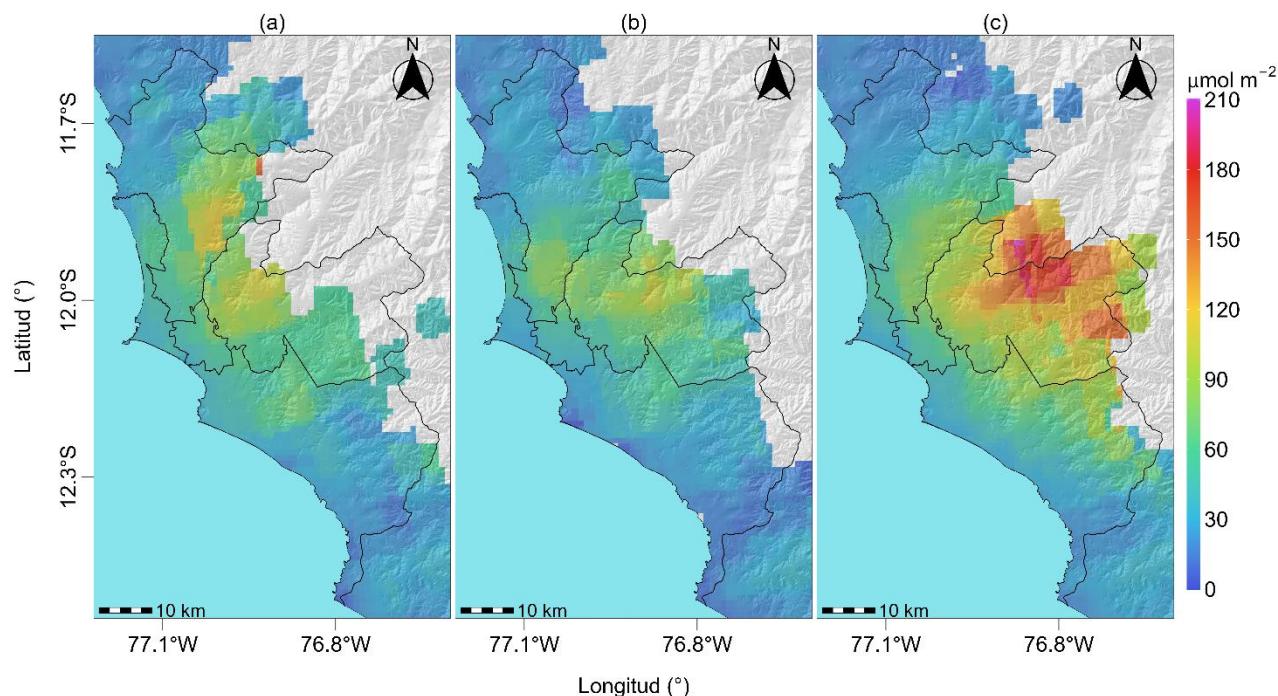
Figura N°07. Variación del tiempo de recorrido en tramos de 2 km en el ámbito de la REMCA según horario y día de semana



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

La Figura N° 08, muestra el comportamiento espacial de la densidad de la columna vertical troposférica del NO₂ ($\mu\text{mol/m}^2$), obtenidas del satélite Sentinel 5P (instrumento Tropomi) a una resolución aproximada de 5 km × 3.5 km durante el mes de febrero. Es así como, la Figura N° 08a, muestra el comportamiento espacial promedio de NO₂ en la primera decadiaria (1 a 10 de febrero), la Figura N° 08b, en la segunda decadiaria (11 al 20 de febrero) y la Figura N° 08c en la tercera decadiaria (21 al 28 de febrero).

Figura N° 08. Comportamiento espacial de la densidad del NO₂ ($\mu\text{mol/m}^2$) en la columna vertical troposférica para el AMLC.



Durante la primera decadiaria, el valor máximo de densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica fue de 154.7 $\mu\text{mol/m}^2$ en la zona norte. En la segunda decadiaria, se observa que en promedio se dio una reducción en todas las zonas, destacando la zona norte, donde se produjo una reducción del 27.7% con relación a lo registrado en la primera decadiaria; asimismo, a nivel de toda el AMLC, se alcanzó el valor máximo de 106.8 $\mu\text{mol/m}^2$ en la zona este. En la tercera decadiaria, se produjo un incremento general de la densidad del NO₂ en todas las zonas, destacando la zona este, donde se produjo un incremento de 79.6% con relación a lo registrado en la segunda decadiaria; asimismo, a nivel de toda el AMLC, se alcanzó el valor máximo de 190.7 $\mu\text{mol/m}^2$ en la zona este.

Cabe precisar que el NO₂ se origina principalmente por la oxidación del nitrógeno atmosférico durante procesos de combustión, especialmente relacionados a la actividad vehicular.^{17,18}. Debido a la dirección predominante del viento, el NO₂ tiende a dispersarse hacia las zonas norte y este del AMLC. 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.

¹⁷ Monitoreando el Dióxido de Nitrógeno desde el Espacio. Obtenido de: https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Inside_Look_AQ_Spanish.pdf

¹⁸ 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>

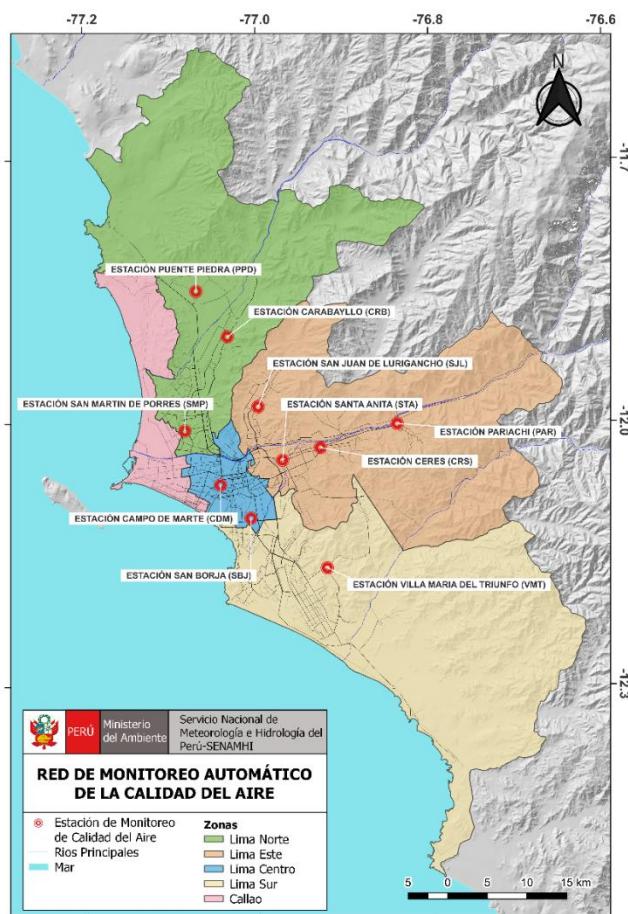
5. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

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 Nº 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 Lingan - Pariachi 2a etapa distrito de Ate
	Estación Santa Anita (STA) Palacio Municipal del distrito de Santa Anita
Sur	Estación Villa María del Triunfo (VMT) Parque Virgen de Lourdes Zona Nueva Esperanza en el distrito de Villa María del Triunfo
Centro	Estación San Borja (SBJ) Polideportivo Limatambo del distrito de San Borja
	Estación Campo de Marte (CDM) Parque Campo de Marte en el distrito de Jesús María.

Figura N°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

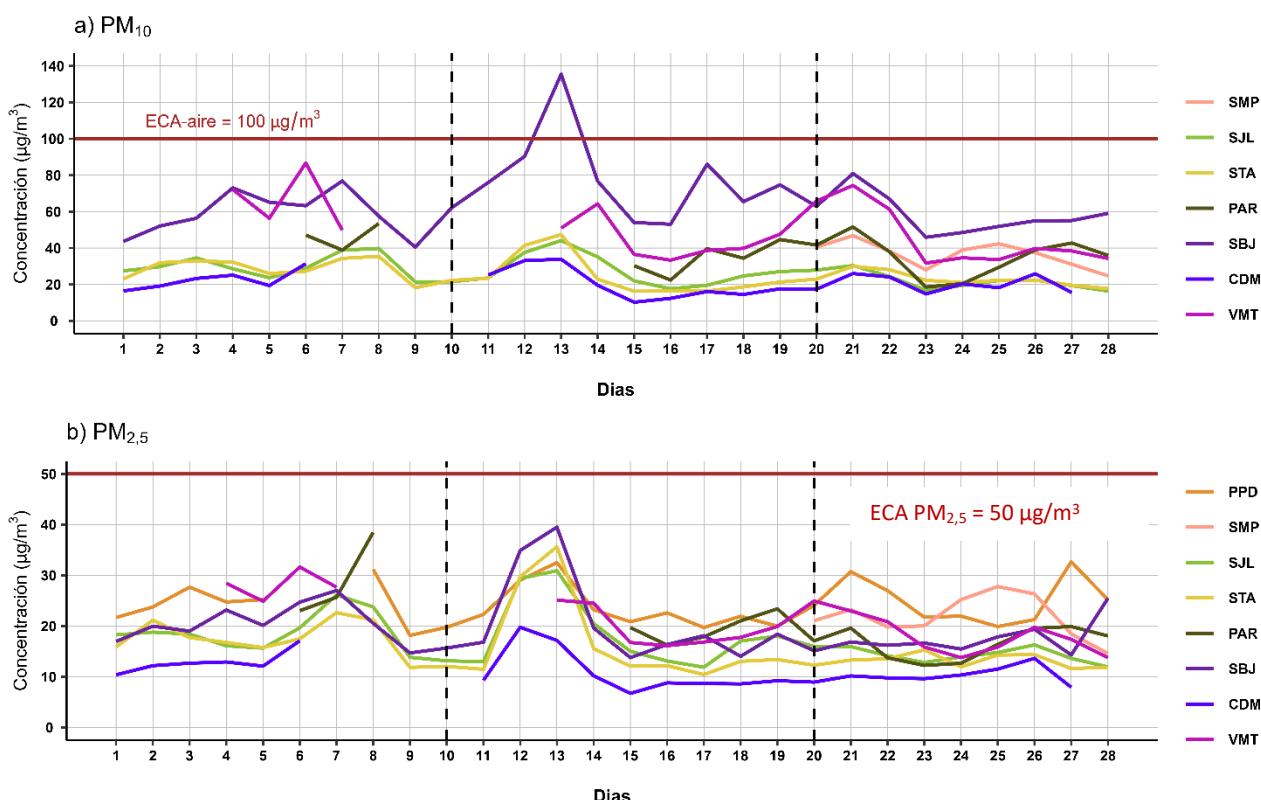
Con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el AMLC, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones del material particulado y gases. Los datos provinieron de las estaciones: Puente Piedra (PPD), Carabayllo (CRB), San Martín de Porres (SMP), San Juan de Lurigancho (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 ($\text{PM}_{2,5}$ 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 $2,5 \mu\text{m}$ y las denominadas partículas gruesas que incluyen a las partículas con diámetro menor a $10 \mu\text{m}$ ¹⁹.

En el AMLC, la principal fuente de material particulado está relacionada a las emisiones provenientes del parque automotor; sin embargo, existen otras fuentes, 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)¹¹. 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 $\text{PM}_{2,5}$, mientras que un incremento en la temperatura está relacionado con un incremento en las concentraciones de PM_{10} ²⁰.

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



¹⁹ 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>

²⁰ Niveles de material particulado en una megaciudad sudamericana: el área metropolitana de Lima-Callao, Perú. Obtenido de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29134287/>

En la Figura N° 10a, se observa que, la única estación que registró concentraciones de PM₁₀ superiores al ECA-aire de 100 µg/m³ (como promedio diario) fue la estación SBJ, en la zona centro, ocurriendo esto sólo durante 1 día, el jueves 13 de febrero, alcanzando una concentración de 135.4 µg/m³, con los valores más altos entre las 09:00 y 10:00 horas y alrededor de las 18:00 horas, lo que estaría asociado a la resuspensión de polvo por actividad vehicular en la zona centro (durante días particulares), así como a la reducción de la altura de la CLA y un ligero incremento de la temperatura para este día (ver Figura N° 02b y 02d). Asimismo, la concentración más alta registrada para la zona norte se dio el 21 de febrero en la estación SMP, alcanzando 46.8 µg/m³; para la zona sur, la concentración más alta se registró el 6 de febrero en la estación VMT, alcanzando 86.7 µg/m³; finalmente para la zona este, la concentración más alta se registró el 8 de febrero en la estación PAR, alcanzando 53.4 µg/m³. A nivel decadiario se destaca el incremento de las concentraciones en la estación SBJ hacia la segunda decadiaria (31% mayor que la primera decadiaria) y una posterior reducción hacia la tercera decadiaria (25% menor que la segunda decadiaria), asociado a las variaciones en la velocidad del viento, que favorecieron la acumulación y dispersión del contaminante, respectivamente (ver Figura N° 02c)^{20, 21, 22}

En la Figura N° 10b, se evidencia que respecto al PM_{2.5}, no se registraron concentraciones superiores al ECA-aire de 50 µg/m³ (como promedio diario) durante el periodo de monitoreo. El valor máximo de 39.5 µg/m³ se alcanzó el jueves 13 de febrero en la zona centro, estación SBJ, lo cual estaría principalmente asociado a la reducción en la altura de la CLA para esta fecha (ver Figura N° 02d), así como también a un incremento en el tiempo de demora (mayor congestión vehicular) en el horario donde se registró la mayor concentración de PM_{2.5} (alrededor de las 09:00 horas). Por otro lado, en la zona norte, la concentración más alta de 32.7 µg/m³ se alcanzó también el 13 de febrero en la estación PPD; para la zona sur la concentración más alta de 31.6 µg/m³ se registró el 6 de febrero en la estación VMT; finalmente, para la zona este, la concentración más alta de 38.5 µg/m³ se alcanzó el 8 de febrero en la estación PAR. Asimismo, se destaca que en la mayoría de las estaciones se produjo un incremento en las concentraciones de PM_{2.5} a inicios de la segunda decadiaria, lo cual se encontraría asociado a un incremento de la humedad relativa que favoreció la presencia de condiciones de estabilidad para la acumulación del contaminante. (ver Figura N° 02a)^{20, 21, 22}

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 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 O₃²⁴, siendo que, el pico del ciclo

²¹ 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>

²² 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

²³ Variaciones de las concentraciones de monóxido de carbono en la megaciudad de São Paulo de 2000 a 2015 en diferentes escalas de tiempo.

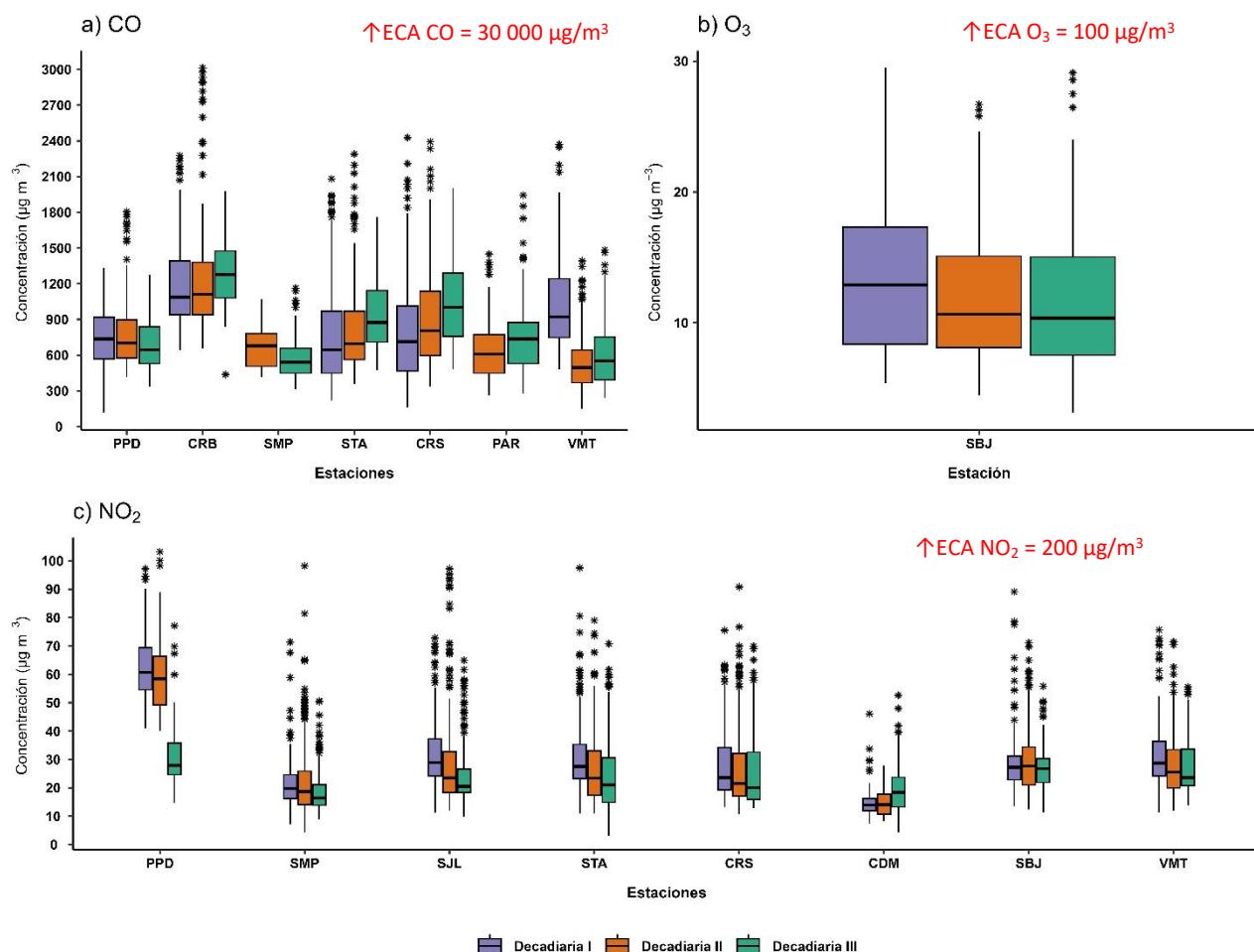
Obtenido de: <https://www.mdpi.com/2073-4433/8/5/81>

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>

del O₃ aparece aproximadamente 6 horas después del pico del NO y 5 horas después del NO₂²⁵. 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 temperatura²⁶.

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 amplio²⁷. 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 precursor²⁶.

Figura N°12. Variación de las concentraciones del CO, O₃ y NO₂ ($\mu\text{g/m}^3$) por decadiaria en el AMLC.



²⁵ Análisis de la Relación entre O₃, NO y NO₂ en Tianjin, China. Obtenido de: <https://aaqr.org/articles/aaqr-10-07-oa-0055>

²⁶ 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. 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 NO₂. <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 µg/m³ (como promedio horario) durante todo el periodo de monitoreo. Asimismo, el valor más alto se registró durante la primera decadiaria en la zona norte, estación CRB, con una máxima de 3 013 µg/m³ (jueves 13 de febrero a las 09:00 horas), lo cual estaría relacionado con una reducción en la altura de la CLA para este día, que estaría favoreciendo la acumulación del contaminante (ver Figura N° 02d). Respecto al comportamiento decadiario, se destaca el incremento en las concentraciones tanto hacia la segunda decadiaria como hacia la tercera, ocurrido en la estación CRS, situación que pudo haberse visto favorecida por una reducción en la altura de la CLA (ver Figura N° 02d), que estaría limitando la dispersión del contaminante.

En relación con el O₃, la Figura N° 12b muestra que las concentraciones promedio móvil de 8 horas no superaron el valor del ECA-aire de 100 µg/m³ (como máxima media de 8 horas) durante los días monitoreados en la estación SBJ. Asimismo, se puede apreciar que el valor más alto se registró el sábado 1 de febrero, alcanzando una máxima de 29.5 µg/m³, las mayores concentraciones se registraron en horarios posteriores al periodo de máxima radiación solar²⁸ (comprendido entre las 15:00 horas y 19:00 horas). En cuanto al comportamiento decadiario, se destaca que en la primera decadiaria la concentración promedio fue más alta, lo cual estuvo mayormente asociado a una reducción en la velocidad del viento, sin embargo, a inicios de la segunda decadiaria se observó un incremento en la velocidad del viento, que favoreció la reducción de las concentraciones. Durante la tercera decadiaria se observó un incremento ligero en la temperatura, lo cual estaría asociado a la formación de O₃, que fue mayor durante la primera parte de esta decadiaria.^{26 29} (Ver Figura N° 02b y 02c).

En la Figura N° 12c, se observa que las concentraciones horarias de NO₂ registradas en las estaciones no superaron el valor de su ECA-aire de 200 µg/m³ (como promedio horario) durante todo el período de monitoreo. La mayor concentración se reportó en la zona norte, en la estación PPD (el miércoles 12 de febrero a las 19:00 horas), alcanzando 103.2 µg/m³, lo cual estaría asociado a la actividad vehicular en la zona norte (89% de las emisiones de NOx provienen de vehículos a diésel)¹⁰, la reducción generalizada de la velocidad del viento, así como también a la disminución de la altura de la CLA e incremento en la humedad relativa, que favorecieron condiciones de estabilidad para la acumulación de contaminantes este día (Ver Figura N° 02a, 02c y 02d). En el análisis decadiario, se destaca de manera general, un incremento de las concentraciones a inicios de la segunda decadiaria, la cual estuvo asociada al incremento en la humedad relativa y una reducción en la altura de la CLA y en la velocidad del viento (Ver Figura N° 02a y 02d). Asimismo, destaca la reducción en las concentraciones los días domingo, lo cual estaría asociado a una reducción en la actividad vehicular (Ver Figura N° 07)

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}.

²⁸ 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>

²⁹ Liu, T., Sun, J., Liu, B., Li, M., Deng, Y., Jing, W., & Yang, J. (2022). Factors influencing O₃ concentration in traffic and urban environments: A case study of Guangzhou city. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(19), 12961.

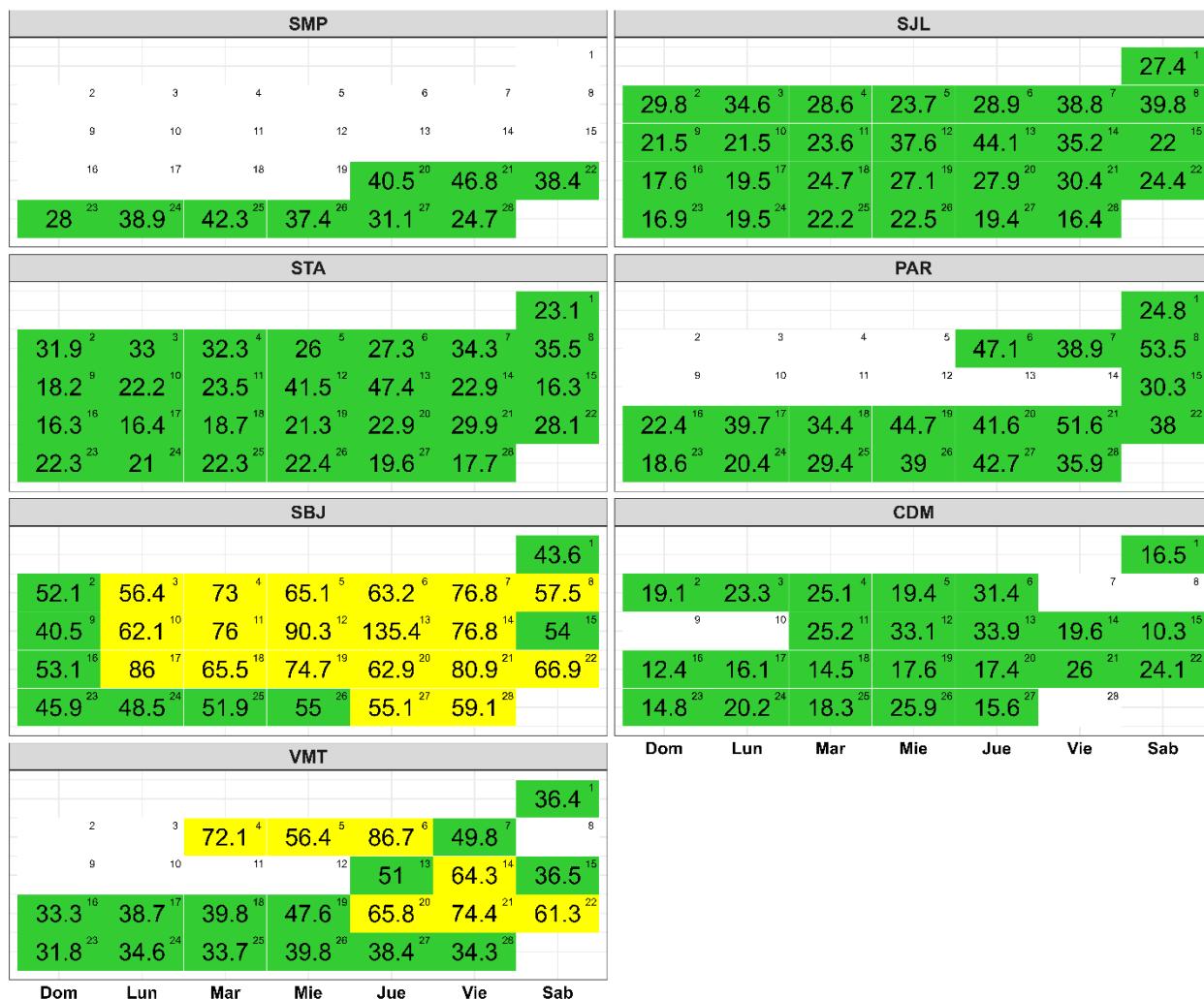
³⁰ Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/agi_brochure_02_14_0.pdf

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>

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 asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observó que, en la zona norte, la estación SMP presentó 9 días con calidad del aire “Buena”. En la zona este, las estaciones SJL y STA presentaron 28 días con calidad del aire “Buena”, mientras que, la estación PAR presentó 18 días con calidad del aire “Buena”. Por otro lado, en la zona centro, la estación CDM presentó 23 días con calidad del aire “Buena”, mientras que, la estación SBJ presentó 19 días con calidad del aire “Moderada” y 9 días con calidad del aire “Buena”. Finalmente, la estación VMT presentó 7 días con calidad del aire “Moderada” y 14 días con calidad del aire “Buena”.

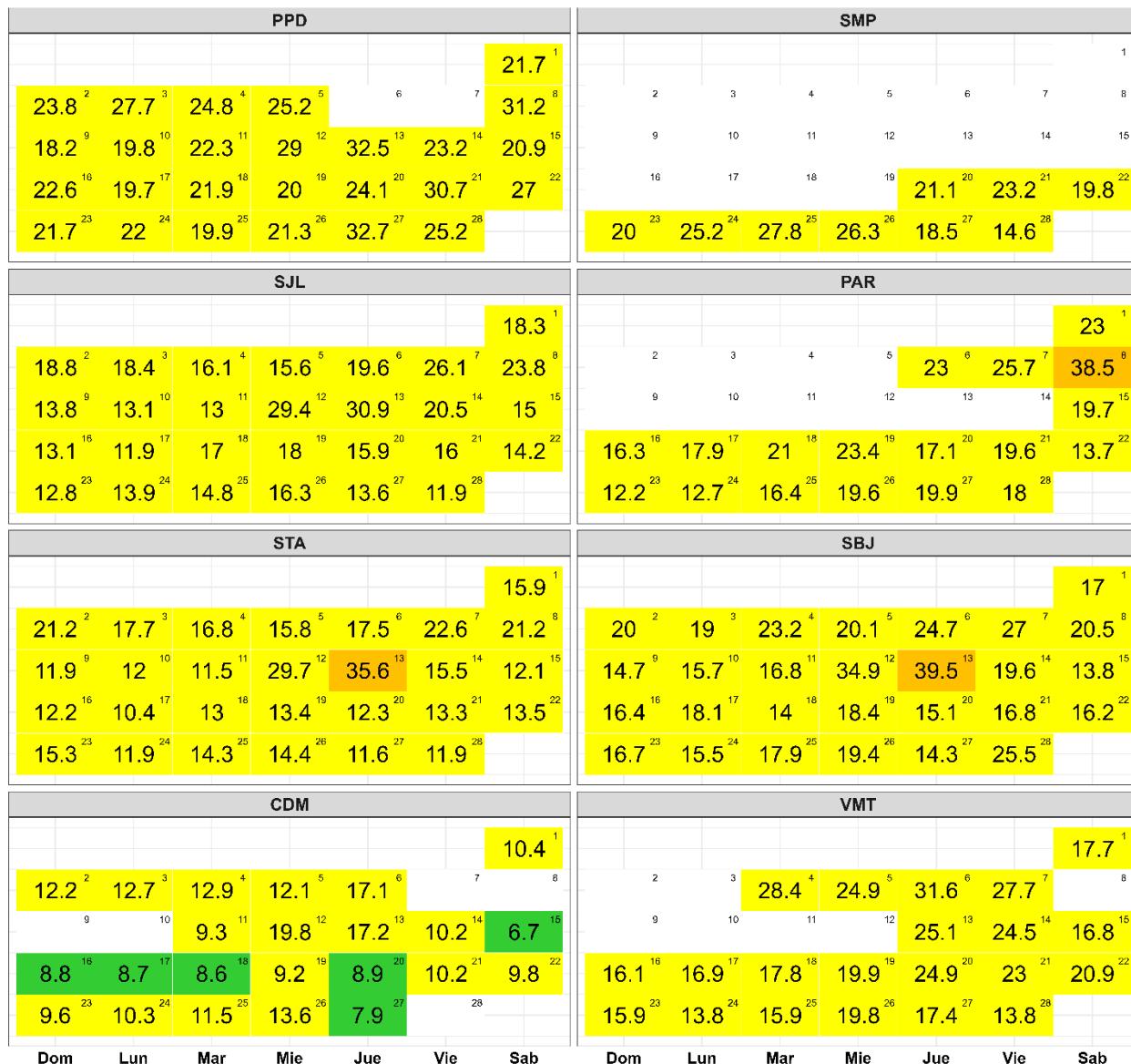
Figura N° 13. Índice de la Calidad del Aire para PM₁₀



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} asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observó que, en la zona norte, la estación PPD presentó 26 días con calidad del aire “Moderada”; mientras que, la estación SMP presentó 9 días con calidad del aire “Moderada”. En la zona este, la estación SJL presentó 28 días con calidad del aire “Moderada”; mientras que las estaciones STA y PAR presentaron 1 día con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 27 y 17 días con calidad del aire “Moderada”, respectivamente. Por otro lado, en la zona centro, la estación SBJ presentó 1 día calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 27 días con calidad del aire “Moderada”; asimismo, la estación CDM presentó 17 días con calidad del aire “Moderada” y 6 días con calidad del aire “Buena”. Finalmente, en la zona sur, la estación VMT presentó 21 días con calidad del aire “Moderada”.

Figura N° 14. Índice de la Calidad del Aire para PM_{2,5}



Concentración PM _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Estado		Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	9	Buena	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 febrero. Se ha presentado una ligera tendencia al incremento de las temperaturas comparado con lo presentado en el mes anterior lo cual favoreció a la dispersión de PM_{2,5}.
- Durante el mes de febrero, los mayores tiempos de recorrido, indicativos de una mayor congestión vehicular, se registraron principalmente en la zona centro, específicamente en los alrededores de la estación CDM. Por otro lado, se observó una reducción de la congestión los días domingo, así como la presencia de dos picos en los tiempos de demora entre las 7:00 y 9:00 horas y entre las 18:00 y 20:00 horas en los alrededores de la mayoría de las estaciones.
- Entre la primera y la segunda decadiaria, la densidad de NO₂ en la columna vertical troposférica mostró una reducción general, mientras que, en la tercera decadiaria, se registró un incremento. Los mayores valores se observaron en la zona norte durante la primera decadiaria, mientras que en las siguientes decadiarias se concentraron en la zona este.
- Se superó el ECA – aire para PM₁₀ en un día del periodo de monitoreo, alcanzando un valor máximo de 135.4 µg/m³ en la estación SBJ. En el caso del PM_{2,5}, durante el periodo de monitoreo, no llegó a ser superado el ECA – aire, alcanzando un valor máximo de 39.5 µg/m³. Estas concentraciones estarían asociadas a las condiciones de actividad vehicular y meteorológicas presentes.
- 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 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 ICA para el contaminante PM₁₀, se observó que, la estación SBJ presentó más del 50% de los días monitoreados una calidad del aire “Moderada”. Por otro lado, para el contaminante PM_{2,5}, predominó una calidad del aire “Moderada” durante la mayor parte del mes, en todas las estaciones, sin embargo, SBJ, STA y PAR presentaron 1 día con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles”.

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

De acuerdo con el pronóstico climático³² para el mes de marzo del 2025, se espera que en el AMLC las temperaturas máximas y mínimas se encuentren dentro de sus rangos normales. Considerando el comportamiento estacional de estas variables meteorológicas, se esperaría que las concentraciones de PM_{2,5}, se mantengan en un rango similar a lo registrado en el mes de febrero.

³² Documento: Boletín climático nacional – febrero 2025 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-140.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

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/a4hpqxSc8KLj47sQ6>

Próxima actualización: 15 de abril del 2025

