

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

Área metropolitana de Lima y Callao

Abril 2025



VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – ABRIL 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 abril^{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 – abril 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-122.pdf>

² Boletín climatológico de Lima – abril 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-130.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.).

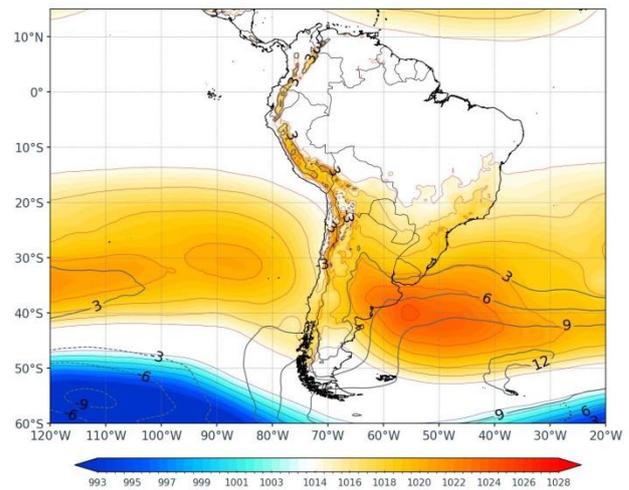
1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

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

Durante la primera decadiaria, el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) presentó una configuración zonal con dos núcleos, el más cercano a continente ubicado en los 31°S y 88°W, y valores de presión cercanos a 1020 hPa, ligeramente más intenso al climático y desplazado hacia el sureste^{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 0 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 -1.2°C, lo cual repercutió en las anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, encontrándose la máxima en 0.3°C por encima de lo normal, mientras que la mínima, -0.4°C².

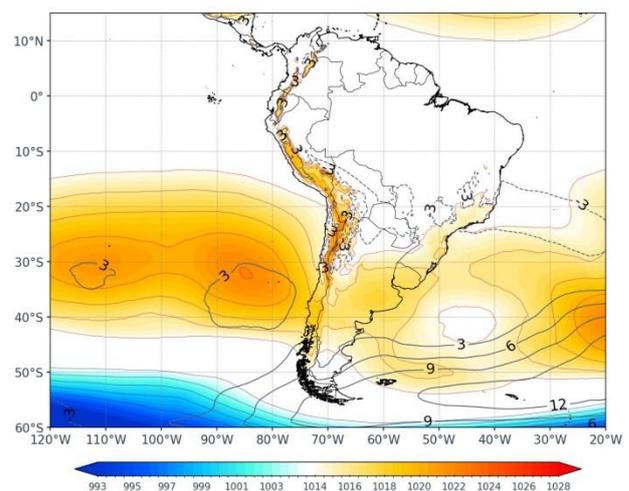
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de abril)

En superficie, el APS presentó una configuración zonal con dos núcleos, el más próximo a continente en los 33°S y 85°W, con valores de presión cercanos a los 1022 hPa, más intenso respecto al climático y desplazado hacia el sureste.^{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 ATSM⁷ frente a las costas del AMLC se encontraron alrededor de los -0.3°C, con una ligera tendencia a aumentar, lo cual repercutió en el aumento de anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicando a la máxima en 1.1°C y la mínima en -1.2°C².

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



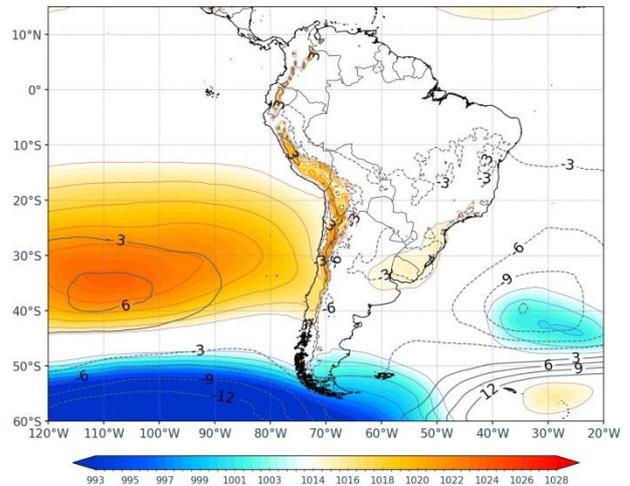
⁶ ¿Cómo responderán los anticiclones subtropicales del hemisferio sur al calentamiento global? Mecanismos y estacionalidad en las proyecciones de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Pág. 704). Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05290-7>

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

1.3. TERCERA DECADIARIA (21 al 30 de abril)

En superficie, el APS presentó una configuración zonal y núcleo en los 35°S y 110°W con valores por encima de los 1022 hPa, más intenso respecto al climático y desplazado hacia el suroeste.^{6,1} (Figura N° 01c). Asimismo, se presentaron vientos con una dirección predominante del sur, con velocidades entre 1 y 4 m/s. Por otro lado, las ATSM frente a las costas de AMLC estuvieron cerca de -0.1°C, con una ligera tendencia a incrementarse, lo que favoreció el incremento de anomalías de temperaturas máximas del aire en 1.4 y una disminución en las mínimas de -0.8°C².

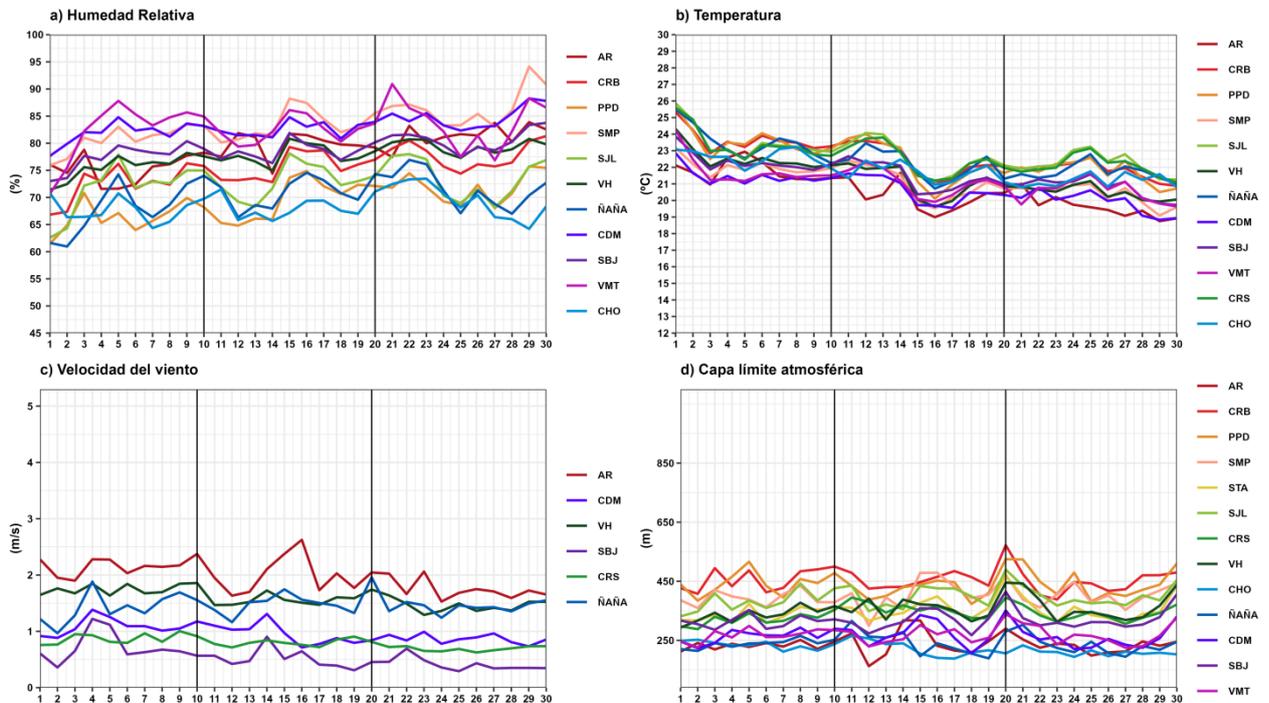
Figura N°01c. Variación del APS en la decadiaria 3.



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 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



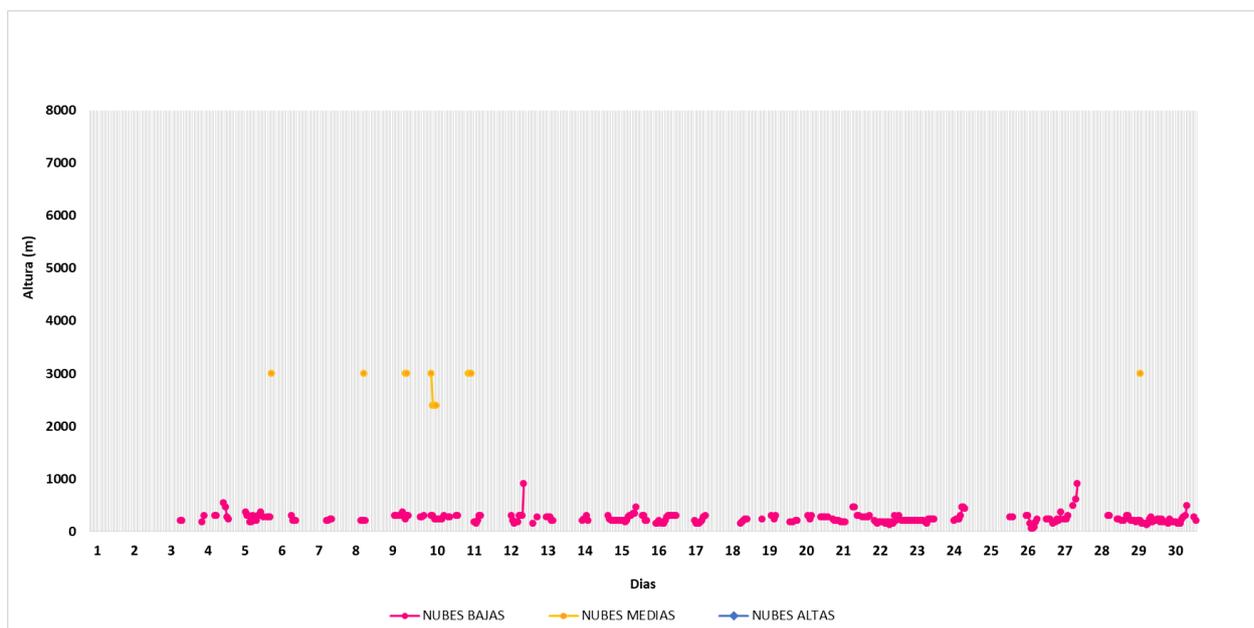
⁸ CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

Con respecto a la humedad relativa (Figura N° 02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 60.9% a 87.7%, para la segunda decadiaria entre 64.2% a 88.2% y para la tercera decadiaria entre 64.2% a 94.1%, siendo las estaciones SMP y CDM aquellas que mantuvieron los promedios de humedad más altos, de 83.6% y 83.1%, respectivamente. En relación con la temperatura (Figura N° 02b) durante la primera decadiaria se presentó valores entre 20.9°C a 25.8°C, para la segunda decadiaria entre 18.9°C a 24.1°C, y en la tercera decadiaria entre 18.8°C a 23.2°C, siendo la estación de SJL la que alcanzó el valor promedio más alto de temperatura de 22.8 °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 0.3 a 2.6 m/s durante todo el mes, siendo la estación AR la que alcanzó los valores promedio más altos, con un promedio mensual de 2 m/s. En el caso de la altura de la CLA (Figura N° 02d), las estaciones CRB, PPD y SMP alcanzaron los valores promedio más altos, con una altura promedio de 453.8, 438.5, 400.9 m, respectivamente, mientras que en las estaciones AR y CHO se presentaron los valores promedio más bajos, con 236.3 y 221.7 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 ceilómetro⁹ de la EMA Aeropuerto Internacional Jorge Chávez ubicada en el Callao (Figura N° 03), durante el mes de abril se observó que las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) se presentaron en el 40.6% de las horas. Las nubes medias (ABN entre 2000 m y 6000 m), se registraron en el 1.7% de los casos. En cuanto al cielo despejado, este se presentó en el 58.9% de las mediciones realizadas. En general, durante el mes de abril disminuyeron las condiciones de cielo despejado, situación característica de mediados de otoño.

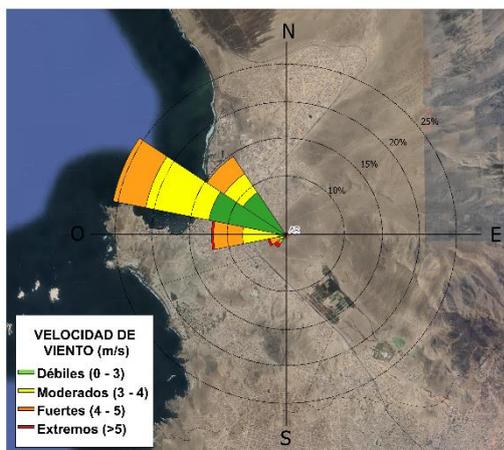
Figura N°03. Altura de la base de la nube registrada en la estación Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (JCH).



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, 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 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).

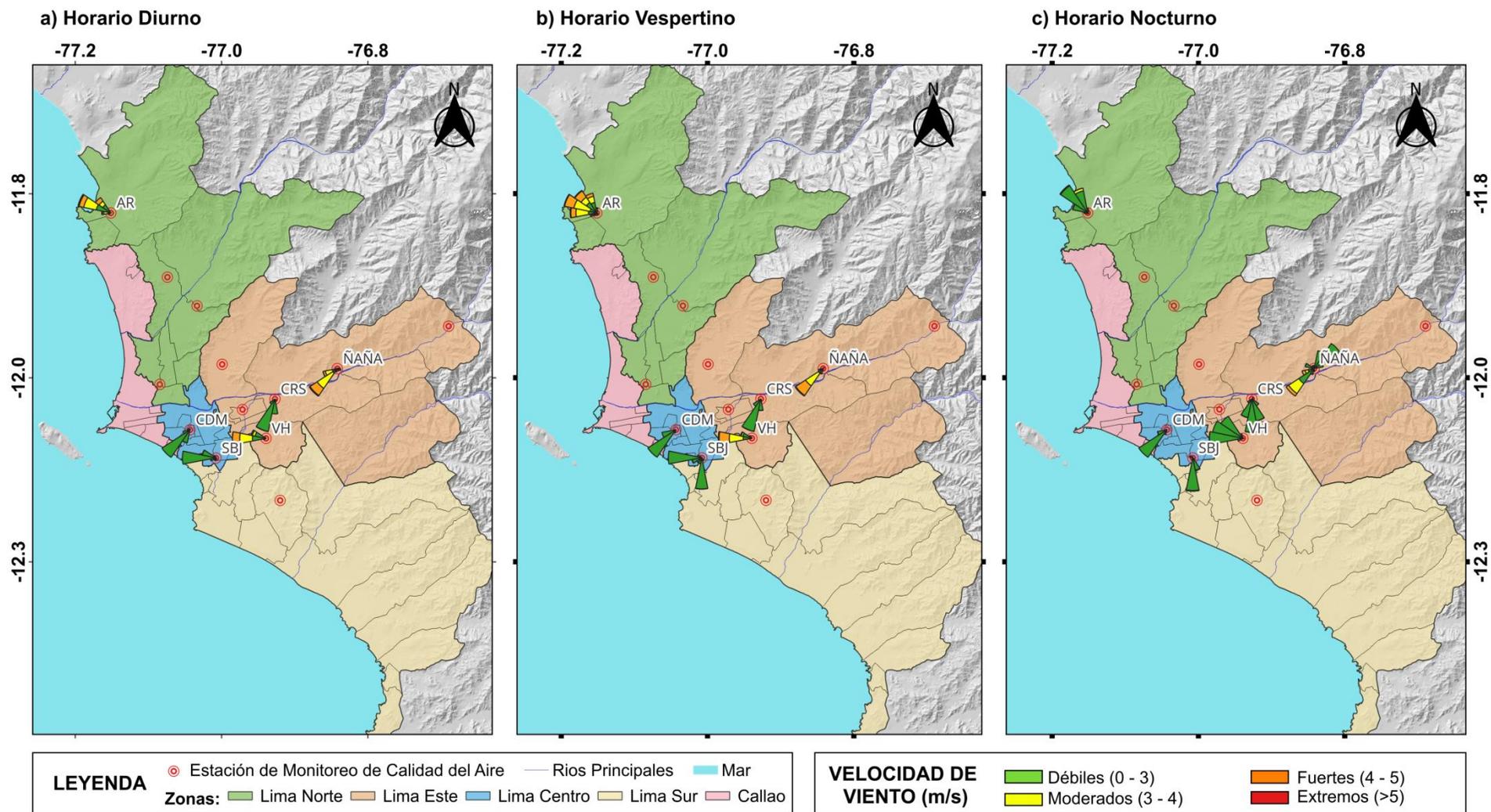
Durante el horario diurno (Figura N° 05a), en las estaciones VH y SBJ se alcanzaron vientos fuertes y débiles, respectivamente, con una dirección predominante del oeste (O). En las estaciones CDM y CRS se alcanzaron vientos débiles, con direcciones predominantes del suroeste (SO) y sur suroeste (SSO), respectivamente. Finalmente, en las estaciones de AR y ÑAÑA se alcanzaron vientos extremos, con direcciones predominantes del oeste noroeste (ONO) y suroeste (SO), respectivamente.

Durante el horario vespertino (Figura N°05b), en las estaciones AR y ÑAÑA se alcanzaron vientos extremos con una dirección predominante del oeste noroeste (ONO) y suroeste (SO), respectivamente. En las estaciones CRS y CDM se presentaron vientos débiles con direcciones predominantes del sur suroeste (SSO) y del suroeste (SO), respectivamente. En el caso de las estaciones VH y SBJ se alcanzaron vientos extremos y débiles, respectivamente, con una dirección predominante del oeste (O).

Durante el horario nocturno (Figura N°05c), en las estaciones ÑAÑA y CDM se alcanzaron vientos fuertes y débiles, respectivamente, con una dirección predominante del suroeste (SO). En las estaciones de CRS y SBJ se dieron vientos débiles, con una dirección predominante del sur (S). Finalmente, en las estaciones de AR y VH se alcanzaron vientos moderados y débiles, con una dirección predominante del noroeste (NO) y oeste (O), 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.



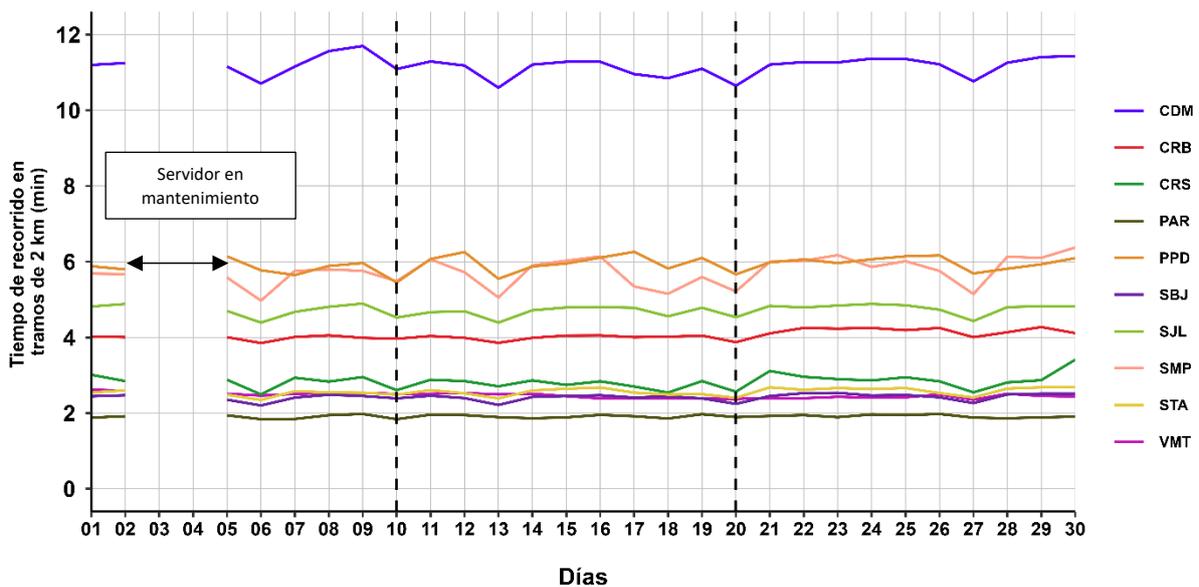
La Figura N° 05 muestra el comportamiento de la dirección y velocidad del viento en cada una de las EMA para los horarios diurnos (07:00 - 12:59 horas), vespertinos (13:00 - 18:59 horas) y nocturnos (19:00 - 06:59 horas).

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 2024 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 registraron en los alrededores de la estación CDM (zona centro), alcanzando un valor promedio diario máximo de 11.7 minutos durante la primera decadiaria (miércoles 9 de abril), con el pico más alto alrededor de las 20:00 horas. En la zona norte, el mayor tiempo de recorrido fue de 6.4 minutos, registrado durante la tercera decadiaria (miércoles 30 de abril) en los alrededores de la estación SMP. En la zona este, el valor más alto fue de 4.9 minutos, alcanzado durante la primera decadiaria (miércoles 9 de abril) en los alrededores de la estación SJL. Finalmente, en la zona sur, en los alrededores de la estación VMT, el valor más alto fue de 2.6 minutos, alcanzado también en la primera decadiaria (miércoles 1 de abril). En la mayoría de las locaciones, los tiempos de recorrido se mantuvieron relativamente estables a lo largo del mes, con reducciones en los tiempos de demora durante los domingos y días feriados, lo que refleja una menor carga vehicular durante los días de descanso. Por otro lado, la Figura N° 07 muestra que en su mayoría 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.

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/abs/pii/S0269749117304001?via%3Dihub>

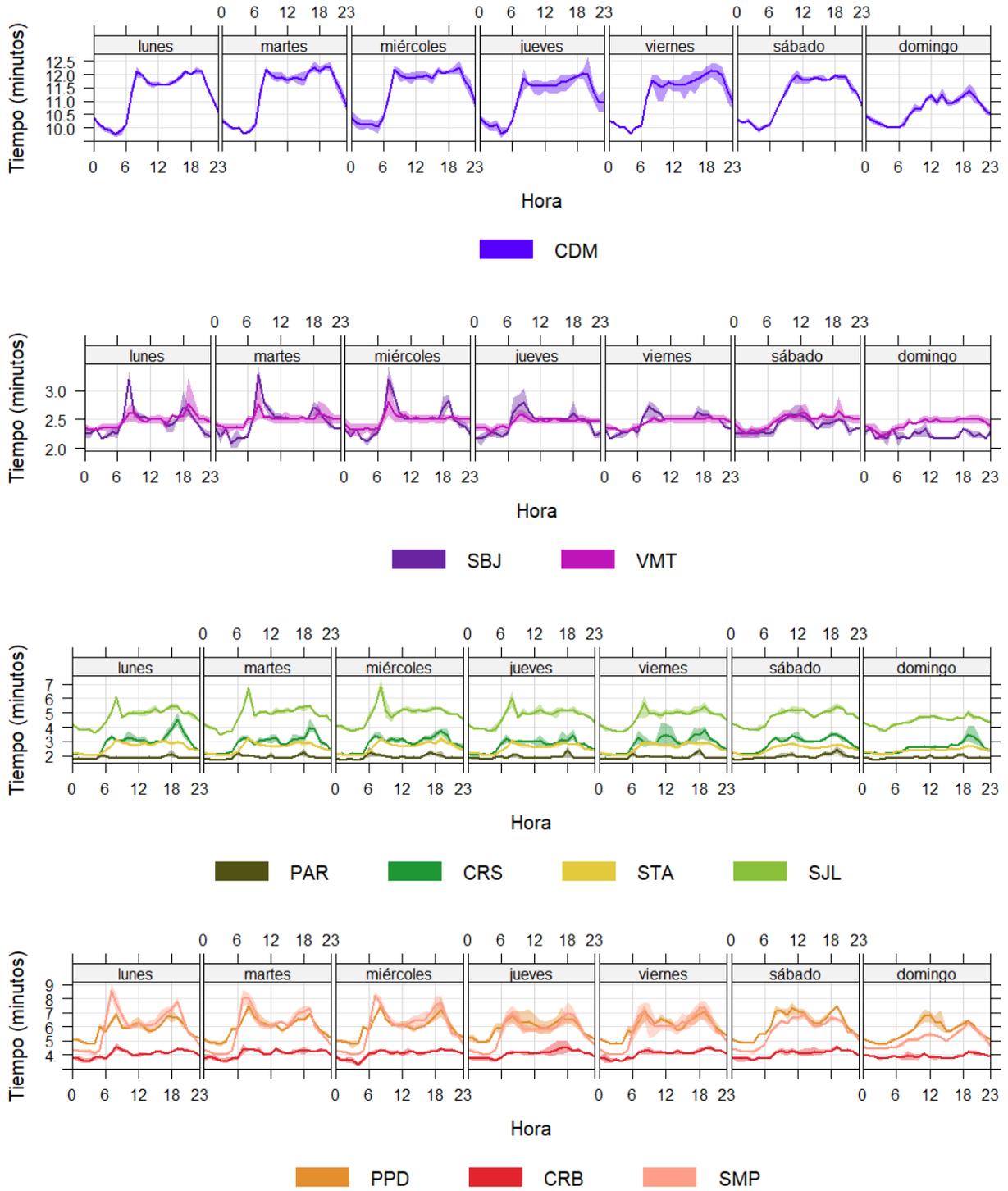
¹⁴ Sjodin et al. (1998) mostraron aumentos de hasta 4, 3 y 2 veces en las emisiones de CO, HC y NOx, respectivamente, en condiciones de congestión (velocidad promedio de 13 millas por hora, mph; 1 mph = 1,61 km por hora) en comparación con condiciones no congestionadas. Obtenido de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4243514/>

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.irimets.com/uploadedfiles/paper/volume3/issue_4_april_2021/8350/1628083343.pdf

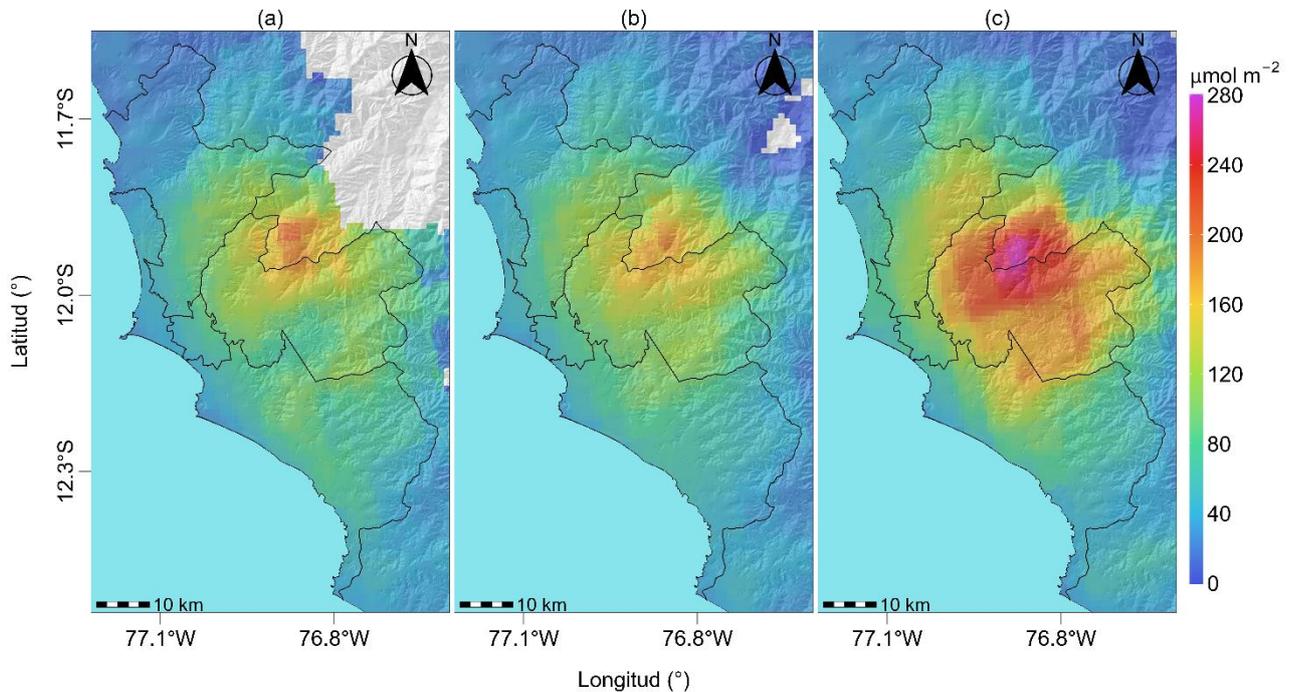
Figura N°07. Variación del tiempo de recorrido en tramos de 2 km en el ámbito de la REMCA según horario y día de semana



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

La Figura N° 08, muestra 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 abril. Es así como, la Figura N° 08a, muestra la distribución espacial promedio de NO₂ en la primera decadiaria (1 a 10 de abril), la Figura N° 08b, en la segunda decadiaria (11 al 20 de abril) y la Figura N° 08c en la tercera decadiaria (21 al 30 de abril).

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



Durante la primera decadiaria, el valor máximo de densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica fue de 186.3 μmol/m² en la zona este. En la segunda decadiaria, no hubo variaciones notables en la densidad del NO₂, alcanzándose el valor máximo de 174.7 μmol/m² en la zona este. En la tercera decadiaria, se produjo un incremento a nivel general en la densidad del NO₂, destacando la zona este donde se incrementó en un 53.6% con relación a la segunda decadiaria; en esta decadiaria el valor máximo también fue registrado en la zona este, alcanzando 269.3 μmol/m².

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 de viento, el NO₂ tiende a dispersarse hacia la zona 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 esta zona.

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>

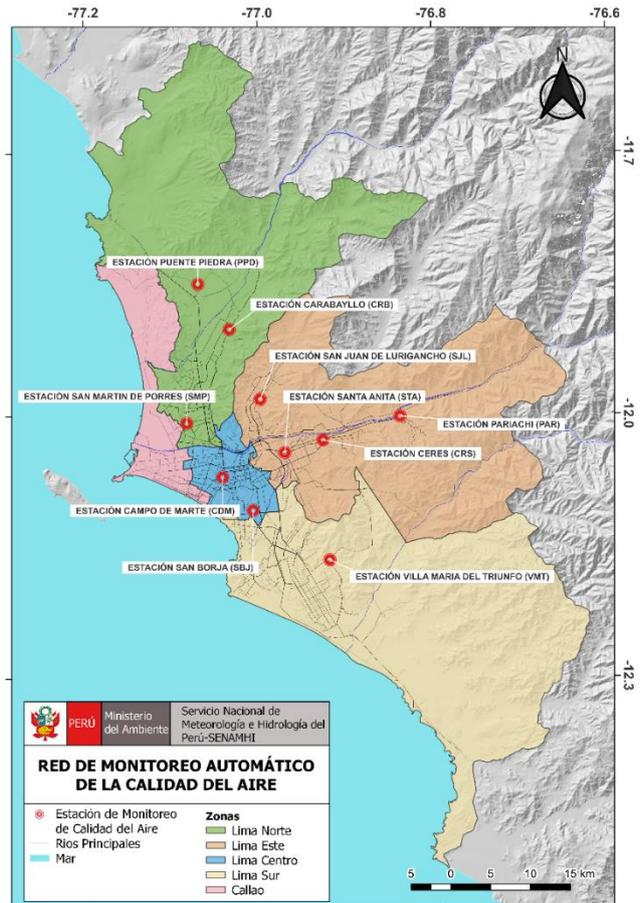
5. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

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 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 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

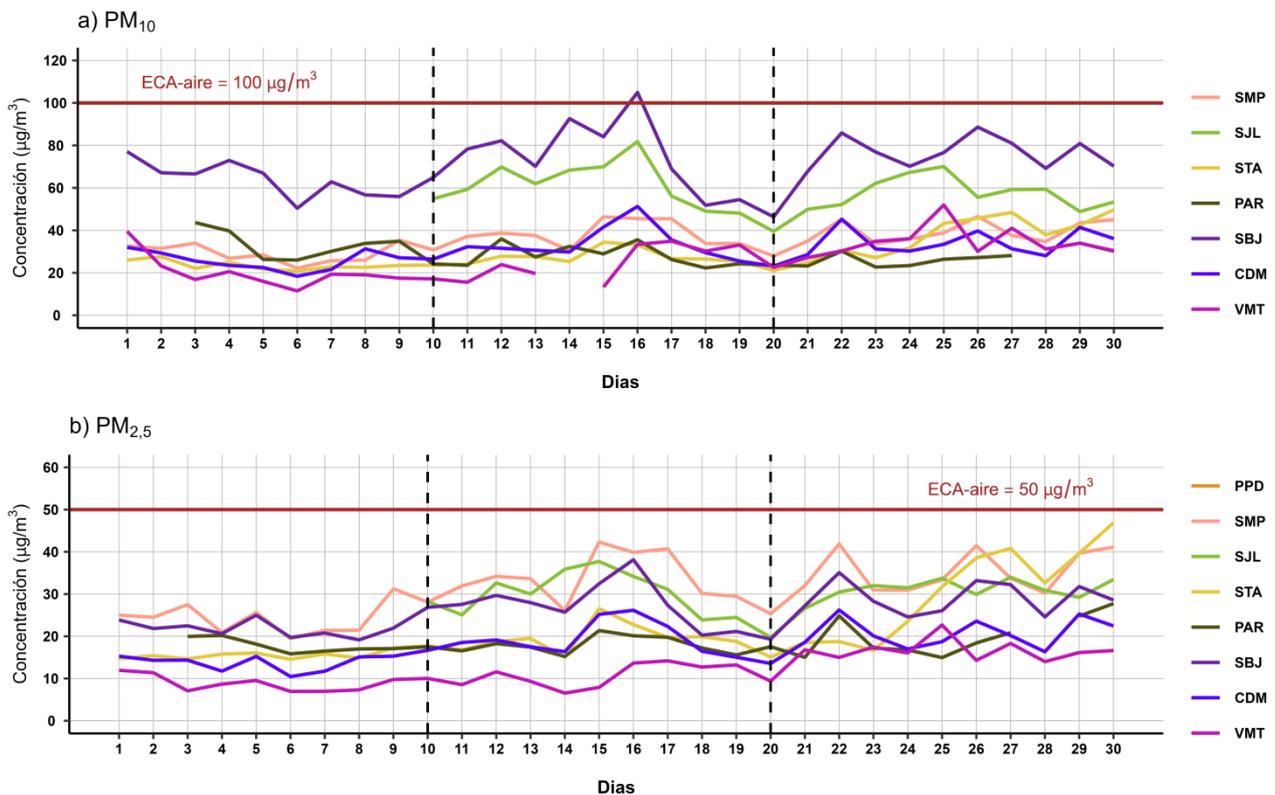
Con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el AMLC, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones del material particulado y gases. Los datos provinieron de las estaciones: Puente Piedra (PPD), Carabaylo (CRB), San Martín de Porres (SMP), San Juan de Lurigancho (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 PM₁₀)

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 µm y las denominadas partículas gruesas que incluyen a las partículas con diámetro menor a 10 µm¹⁹.

En el AMLC, la principal fuente de emisión de material particulado está provienen 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)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 PM_{2,5}, mientras que un incremento en la temperatura está relacionado con un incremento en las concentraciones de PM₁₀²⁰.

Figura N°10. Variación diaria del PM₁₀ y PM_{2,5} (µg/m³) 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, durante el periodo de monitoreo solo se registró 1 día una concentración de PM₁₀ superior al ECA-aire de 100 µg/m³ (como promedio diario). El valor máximo de 104.9 µg/m³ se alcanzó en la estación SBJ, en la zona centro, el miércoles 16 de abril, con los valores más altos entre las 8:00 y 11:00 horas, lo que estaría asociado a la resuspensión de polvo por actividad vehicular en la zona centro durante días particulares, así como también al incremento de la velocidad del viento y de la temperatura durante las horas de mayor concentración (Ver Figura N° 02b y 02c). La concentración más alta registrada para la zona norte se dio el 26 de abril en la estación SMP, alcanzando 46.5 µg/m³. En cuanto a la zona sur, la concentración más alta se registró el 25 de abril en la estación VMT, alcanzando 52 µg/m³. Finalmente, en la zona este, la concentración más alta se registró el 16 de abril en la estación SJL, alcanzando 81.8 µg/m³. A nivel decadiario, destaca el incremento de las concentraciones en la estación SMP durante la segunda decadiaria, con un incremento del 28.5 % respecto a la primera, relacionada a un incremento en la velocidad del viento en toda la costa²¹; así como también, un incremento de las concentraciones hacia la tercera decadiaria en la estación STA (40.3% mayor que la segunda decadiaria), asociada una disminución en la altura de la CLA, condiciones que favorecieron la acumulación del contaminante (ver Figura N° 02d).^{20, 22, 23}

En la Figura N° 10b, se observa que, durante el periodo de monitoreo, no se registraron concentraciones de PM_{2.5} superiores al ECA-aire de 50 µg/m³ (como promedio diario). El valor máximo de 46.9 µg/m³ se alcanzó el miércoles 30 de abril en la zona este, estación STA, asociado principalmente a la actividad vehicular previo a un día feriado, observándose incrementos en los tiempos de demora (mayor congestión vehicular) en las horas donde se registraron las concentraciones más altas (entre las 8:00 y 9:00 horas). En la zona centro, el valor más alto fue de 38.1 µg/m³ registrado el 16 de abril en la estación SBJ. En la zona sur, la concentración más alta fue de 22.7 µg/m³ el 25 de abril en la estación VMT. Finalmente, para la zona norte, la concentración más alta fue de 42.3 µg/m³, alcanzada el 15 de abril en la estación SMP. A nivel decadiario, se destaca un incremento en las concentraciones de PM_{2.5} en la estación SMP hacia la segunda decadiaria, un 36.1% mayor que la primera, asociado a un incremento de la humedad relativa; mientras que hacia la tercera decadiaria se destaca un incremento promedio de 59.5% en la estación STA, también asociado a un incremento de la humedad relativa, lo que favoreció las condiciones para la acumulación del PM_{2.5}. (ver Figura N° 02a)^{20,22,23}

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 CO²⁴.

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

²¹ Aviso de incremento de viento en la costa: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=aviso-meteorologico-detalle&a=2025&b=21701&c=00&d=SENA>

²² 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>

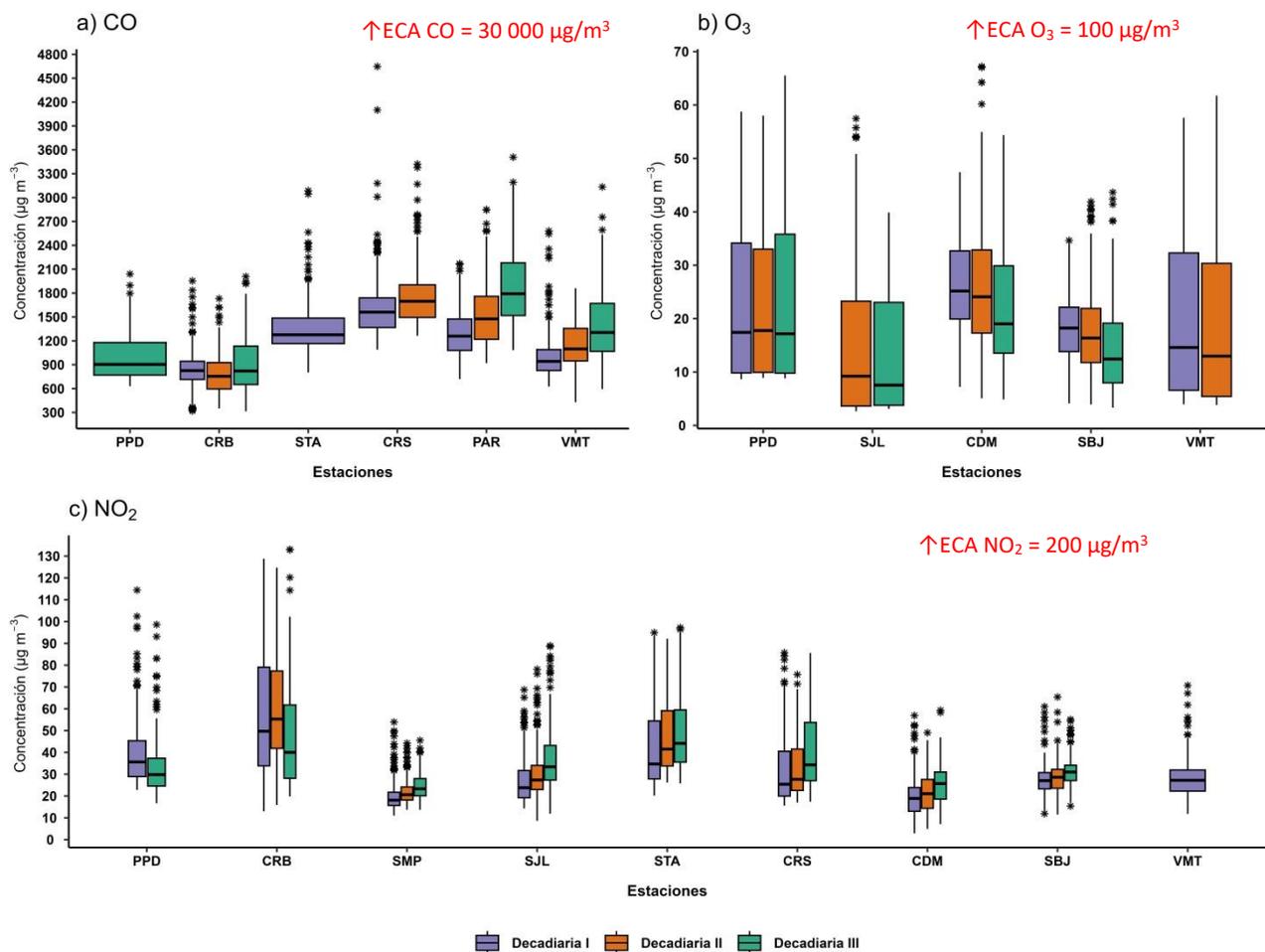
²³ Factores meteorológicos que influyen en la dispersión de la contaminación del aire en la ciudad de Lima. Obtenido de: Boletín de la sociedad Geográfica de Lima, Vol. N° 113:2000

²⁴ 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>

tanto, suele existir una relación inversa entre las concentraciones de NO_2 y O_3 ²⁵, 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 ²⁶. 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 temperatura²⁷.

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 amplio²⁸. 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 precursor²⁷.

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.



²⁵ 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>

²⁶ 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>

²⁷ 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

²⁸ 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 CRS, con una máxima de 4647.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (miércoles 2 de abril a las 08:00 horas), asociado a una reducción en la altura de la CLA que estaría favoreciendo la acumulación del contaminante (ver Figura N° 02d). Respecto al comportamiento decadiario, de la primera a la segunda decadiaria se destaca el incremento de las concentraciones en la estación PAR con un incremento del 19.3%, relacionado a una reducción en la temperatura. Asimismo, destaca el incremento de las concentraciones en la estación VMT y PAR hacia la tercera decadiaria (22% y 21% mayor, respectivamente), situación que pudo haberse visto favorecida también por una reducción en la temperatura (ver Figura N° 02b).

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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (como máxima media de 8 horas) durante los días monitoreados. Asimismo, se puede apreciar que el valor más alto se registró en la estación CDM el viernes 18 de abril, día en el que se alcanzó la altura de la CLP más baja del mes, así como también se presentó un ligero incremento en la temperatura para este día, alcanzando un valor máximo de 67.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cabe mencionar que las mayores concentraciones se registraron en horarios posteriores al periodo de máxima radiación solar²⁹ (comprendido entre las 15:00 horas y 19:00 horas). En cuanto al comportamiento decadiario, en la mayoría de las estaciones, se presentó una reducción de la concentración promedio, destacando la estación SBJ con una reducción de 20.4% de la segunda a la tercera decadiaria, lo cual estuvo mayormente asociado a una reducción en los valores de temperatura, limitando la formación y acumulación de O₃.^{27 30} (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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (como promedio horario) durante todo el periodo de monitoreo. La mayor concentración se reportó en la zona norte, en la estación CRB (el martes 22 de abril a las 16:00 horas), alcanzando 133 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual estaría asociado a la actividad vehicular en la zona norte (89% de las emisiones de NO_x provienen de vehículos a diésel)¹⁰, así como también a la disminución de la altura de la CLA e incremento en la humedad relativa, condiciones que favorecieron la acumulación de contaminantes durante este día (Ver Figura N° 02a y 02d). En el análisis decadiario, se observa un incremento de las concentraciones promedio tanto hacia la segunda como hacia la tercera decadiaria en la mayoría de estaciones, asociado a un incremento en la humedad relativa, lo cual estaría favoreciendo las condiciones para la acumulación de contaminantes (Ver Figura N° 02a). Asimismo, se destaca la reducción en las concentraciones la mayoría de 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^{31 32}.

²⁹ 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>

³⁰ 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.

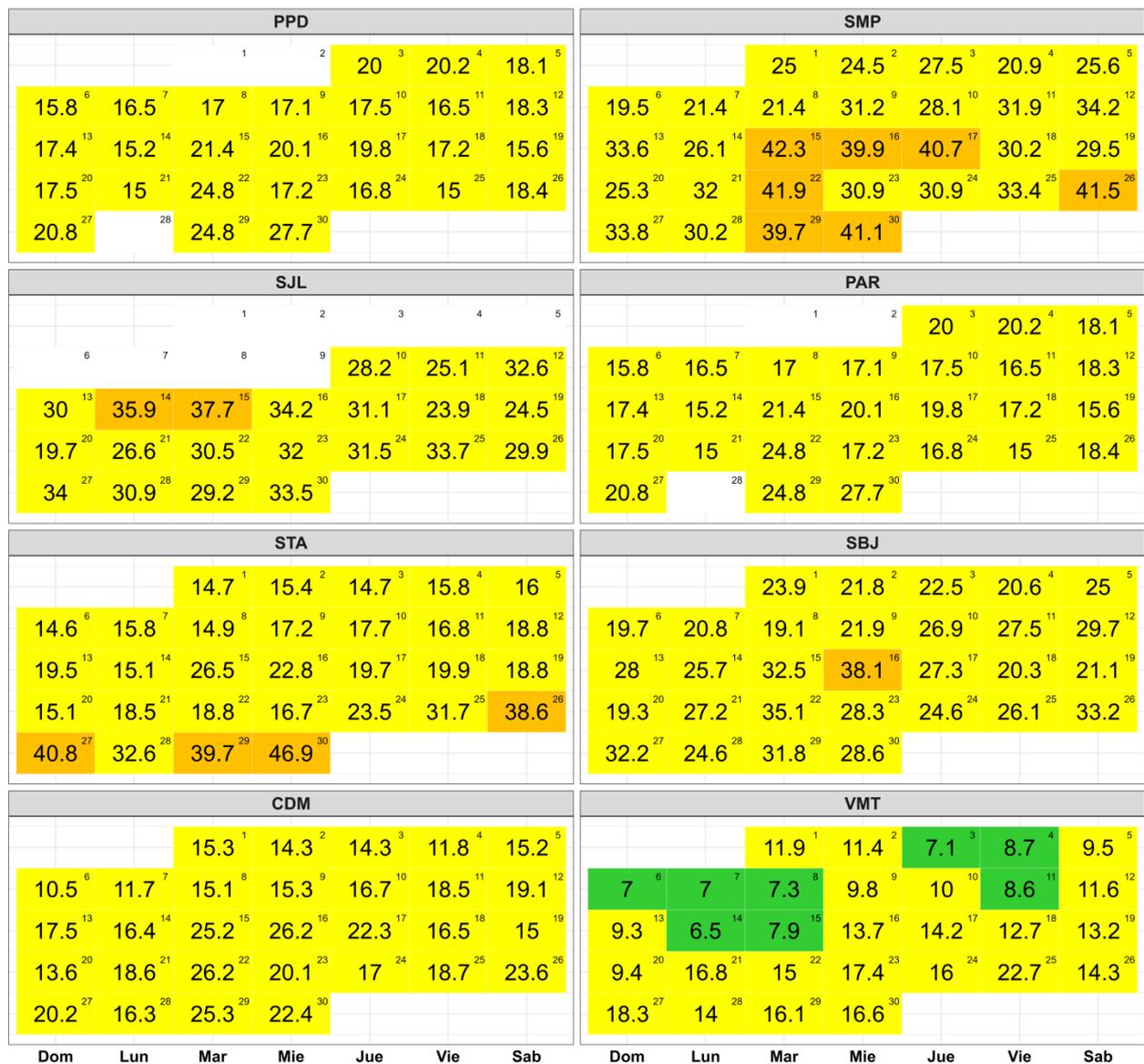
³¹ Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/airnow_brochure_02_14_0.pdf

³² 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>

6.2. 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 27 días con calidad del aire “Moderada”; mientras que, la estación SMP presentó 7 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 23 días con calidad del aire “Moderada”. En la zona este, la estación STA y SJL presentaron 4 y 2 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles”, mientras que presentaron 26 y 19 días con calidad del aire “Moderada”; asimismo, la estación PAR presentó 27 días con calidad del aire “Moderada”. Por otro lado, en la zona centro, la estación SBJ presentó 1 día con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 29 días con calidad del aire “Moderada”; asimismo, la estación CDM presentó 30 días con calidad del aire “Moderada”. Finalmente, en la zona sur, la estación VMT presentó 22 días con calidad del aire “Moderada” y 8 días con calidad del aire “Buena”.

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



Concentración PM _{2,5} (µg/m ³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	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 abril. Se ha presentado una tendencia a la disminución de temperaturas comparado con lo presentado en el mes anterior, lo cual favoreció al incremento de las concentraciones de $PM_{2,5}$.
- Durante el mes de abril, 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 y feriados, 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 NO_2 en la columna vertical troposférica se mantuvo sin variaciones notables, mientras que, en la tercera decadiaria, se registró un incremento generalizado. Los mayores valores se observaron en la zona este durante las tres decadiarias.
- En el periodo de análisis, se superó el ECA – aire para PM_{10} durante un día de la segunda decadiaria (miércoles 16 de abril), en la estación SBJ, alcanzando un valor máximo de $104.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso del $PM_{2,5}$, no llegó a ser superado el ECA – aire durante el periodo de monitoreo, alcanzando un valor máximo de $46.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estas concentraciones estarían asociadas a las condiciones de actividad vehicular y meteorológicas presentes.
- 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) para el contaminante PM_{10} , se observó que, la estación SBJ y SJL presentaron más del 80% y 60% 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, la estación SMP presentó una calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” en más del 20% de los días monitoreados.

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

De acuerdo con el pronóstico climático³³ para el mes de mayo 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 presenten ligeramente por encima de lo registrado en el mes de abril.

³³ Documento: Boletín climático nacional – abril 2025 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-142.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/a4hpxqSc8KLj47sQ6>

Próxima actualización: 15 de mayo del 2025

