

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

Área metropolitana de Lima y Callao

Octubre 2024



VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – OCTUBRE 2024

PRESENTACIÓN

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) presenta el boletín mensual sobre la vigilancia de la calidad del aire en el Área Metropolitana de Lima y Callao (AMLC), donde los tomadores de decisión y público en general podrán encontrar información sobre los principales contaminantes atmosféricos a los que se encuentran expuestos.

Para un mejor entendimiento de las variaciones espaciales y temporales de los contaminantes atmosféricos, se ha utilizado información meteorológica de superficie (datos de las estaciones meteorológicas automáticas del SENAMHI). Asimismo, se realizó un análisis sinóptico y oceánico a partir de la documentación técnica del SENAMHI para el mes de octubre^{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 – octubre 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-116.pdf>

² Boletín climatológico de Lima – octubre 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-124.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.).

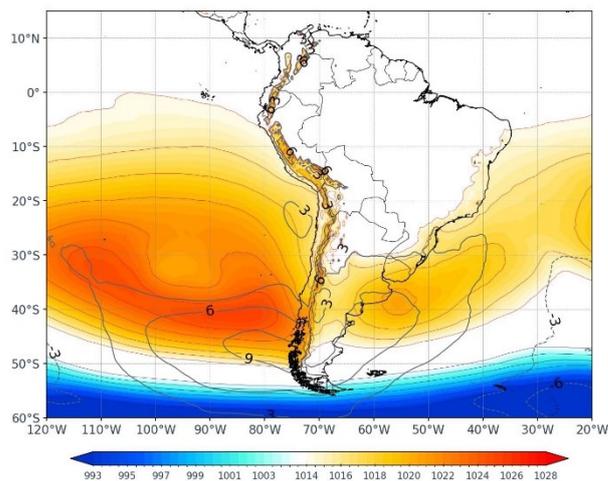
1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

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 que, para el mes de octubre se conformó la decadiaria 1 (del 1 al 10), decadiaria 2 (del 11 al 20) y decadiaria 3 (del 21 al 31).

1.1. PRIMERA DECADIARIA (1 al 10 de octubre)

En la primera decadiaria, se tiene que el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) presentó una configuración un tanto meridional, desplazada hacia sureste en comparación con su posición climatológica, con núcleo intensificado de 1024 hPa ubicado en los 85°S - 42°W^{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 1 y 5 m/s. Por otro lado, las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) estuvieron cercanas a los -0.3 °C frente a las costas del AMLC, lo cual repercutió en las anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, encontrándose en +1.2 °C y -0.3 °C, respectivamente².

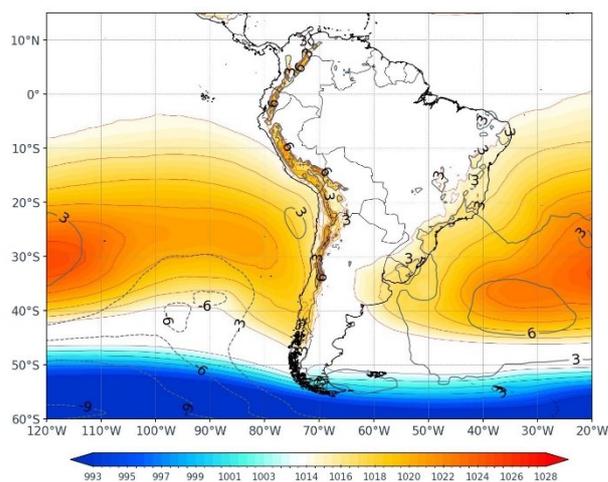
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de octubre)

En la segunda decadiaria, el APS presentó una configuración cuasi zonal, desplazada ligeramente hacia el noreste con una intensidad superior a los 1024 hPa, más intenso respecto a su climatología y con núcleo ubicado sobre los 30°S - 120°W^{6,1} (Figura N° 01b). Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur y velocidades entre 3 m/s y 5 m/s. Por otro lado, respecto a las ATSM⁷, estas se encontraron alrededor de los -0.1 °C, al ser cercano a cero, no repercutió en la temperatura del aire. Durante esta decadiaria se presentaron anomalías de temperatura máximas y mínimas del aire, de +0.7 °C y -0.4 °C, respectivamente².

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



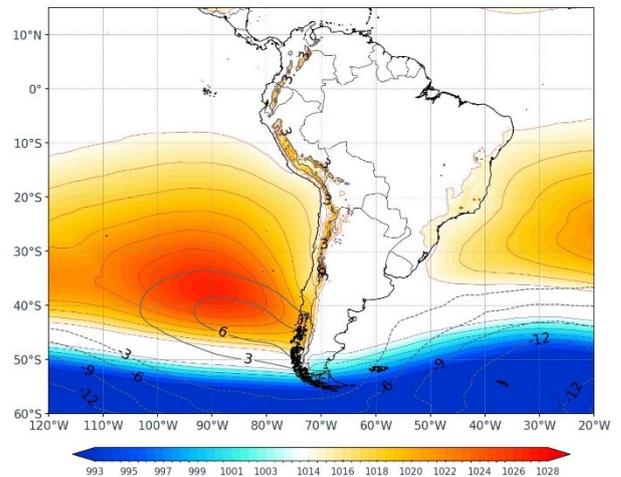
⁶ ¿Cómo responderán los anticiclones subtropicales del hemisferio sur al calentamiento global? Mecanismos y estacionalidad en las proyecciones de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Pág. 704). Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05290-7>

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 31 de octubre)

Finalmente, en la tercera decadiaria, el APS presentó una configuración meridional ligeramente desplazada al sureste de su posición climática, con núcleo de 1026 hPa ubicado sobre los 38°S – 90°W^{6,1} (Figura N° 01c). Asimismo, se presentaron vientos con una dirección predominante del sur y velocidad entre 3 y 6 m/s. Por otro lado, la ATSM fue de -0.1 °C frente a las costas de AMLC, al ser cercano a cero no repercutió en la temperatura del aire. Durante esta decadiaria se presentaron anomalías de temperatura máxima y mínima de +0.3 °C y -0.1 °C, respectivamente².

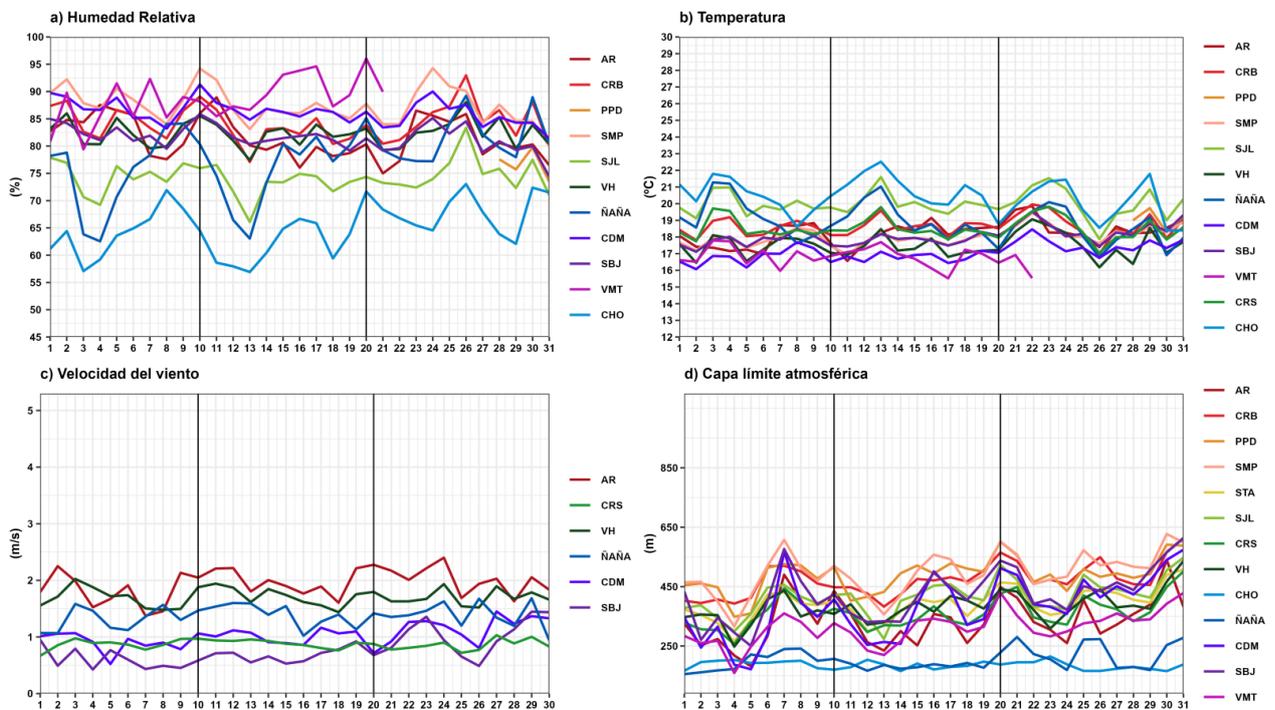
Figura N°01c. Variación del APS en la decadiaria 3.



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 (S JL), 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 datos a 1 km del modelo operativo WRF.

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



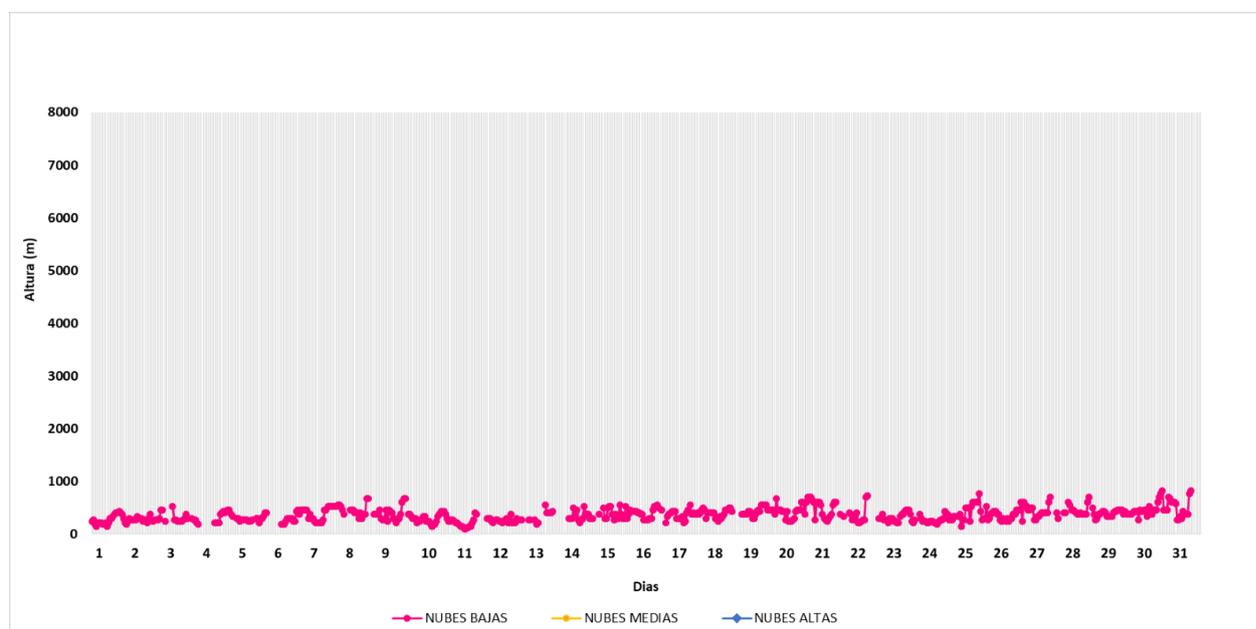
⁸ CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

Con respecto a la humedad relativa (Figura N° 02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 57% a 94.4%, para la segunda decadiaria entre 56.9% a 96% y para la tercera decadiaria entre 62.1% a 94.3%, siendo las estaciones CDM, SMP y VMT aquellas que mantuvieron los promedios de humedad relativa más altos, de 86.2%, 87.4% y 88.5%, respectivamente. En relación con la temperatura (Figura N° 02b), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 15.9 a 22.5 °C, para la segunda decadiaria entre 15.5 a 22.5 °C, y en la tercera decadiaria entre 15.5 a 21.7 °C, siendo la estación de CHO la que registró el valor promedio más alto de temperatura, alcanzando los 20.4 °C (cabe mencionar que esta estación al encontrarse ubicada en el extremo este y en un nivel altitudinal mayor, presenta condiciones meteorológicas diferentes a las presentadas por las estaciones ubicadas dentro del AMLC, especialmente respecto a las variables de temperatura y humedad relativa). En cuanto a la velocidad del viento (Figura N° 02c), esta presentó una alta variabilidad a lo largo del mes, con valores que oscilaron entre 0.7 a 2.7 m/s, siendo la estación AR la que registró los valores promedio más altos, alcanzando un promedio mensual de 2.2 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 472.8, 487.4 y 496.1 m, respectivamente, mientras que, en las estaciones ÑAÑA y CHO se presentaron los valores promedio más bajos, con 204 y 185.5 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 octubre, las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) tuvieron mayor presencia, siendo el 85.4% de los casos. Con respecto a la presencia de nubes medias (ABN mayor a 2000 m y menor a 6000 m), no se presentaron nubes dentro de esta capa. Respecto a las horas con condición de cielo despejado, estas fueron de apenas 14.5%. En octubre predominaron las condiciones de nubes bajas, situación característica de inicio de primavera.

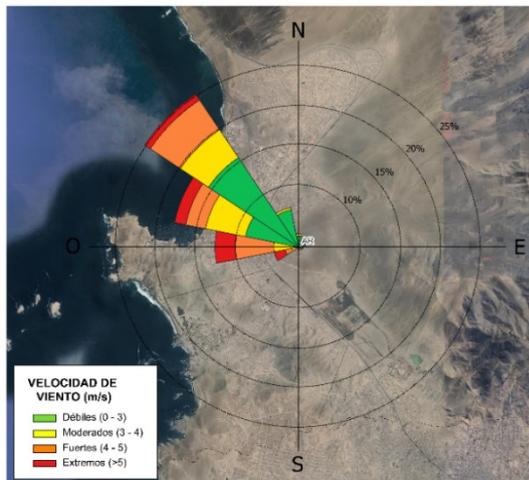
Figura N°03. Altura de base de la nube registrada en la estación Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (JCH).



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 velocidad (intensidad)¹⁰.

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).

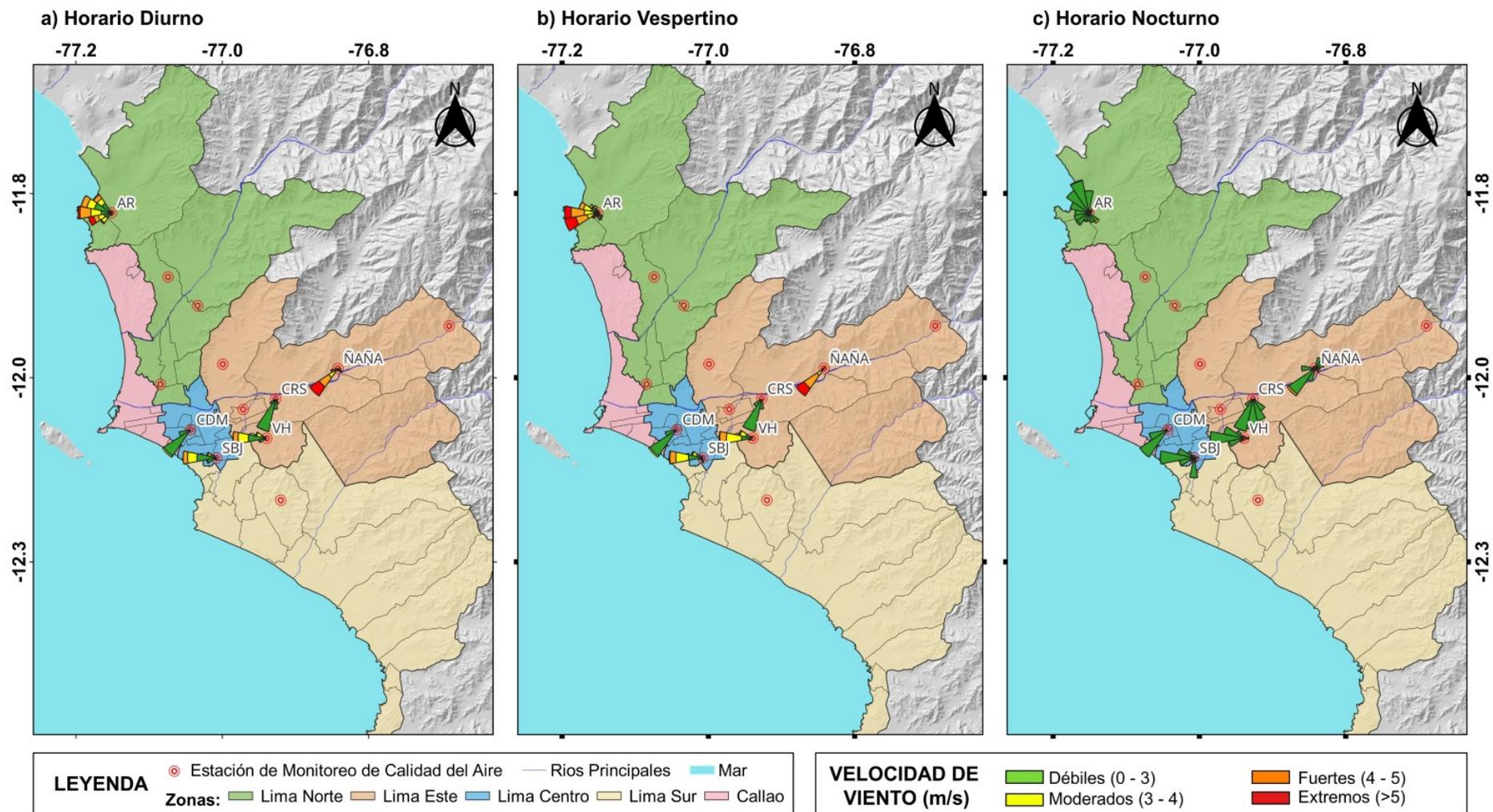
Es así como se observó, que en el horario diurno (Figura N° 05a), la estación de CRS presentó vientos con una dirección predominante de sur suroeste (SSO) con intensidad máxima de débil. Para las estaciones CDM y ÑAÑA se presentaron vientos con una dirección predominante del suroeste (SO) e intensidad máxima de moderada y extrema, respectivamente. Mientras que, las estaciones SBJ, VH y AR presentaron vientos con una dirección predominante del oeste (O) y una intensidad máxima de fuerte, fuerte y extrema, respectivamente.

Para el horario vespertino (Figura N°05b), la estación CRS presentó vientos con una dirección predominante de sur suroeste (SSO) e intensidad máxima de débil. Asimismo, las estaciones CDM y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante del suroeste (SO), con una intensidad máxima de moderada y extrema, respectivamente. Las estaciones SBJ y VH presentaron vientos con una dirección predominante del oeste (O) e intensidad máxima de fuerte. Finalmente, la estación AR presentó vientos con una dirección predominante de oeste suroeste (OSO) con una intensidad máxima de extrema.

Para el horario nocturno (Figura N°05c), se observó que la estación CRS presentó vientos con una dirección predominante de sur suroeste (SSO) con una intensidad máxima de débil. Asimismo, las estaciones CDM y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante del suroeste (SO) e intensidad máxima de débil y fuerte, respectivamente. Por otro lado, las estaciones SBJ y VH presentaron vientos con una dirección predominante del oeste (O) e intensidad máxima de débil. Finalmente, la estación AR presentó vientos con una dirección predominante del nor noroeste (NNO) e intensidad máxima de débil.

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).

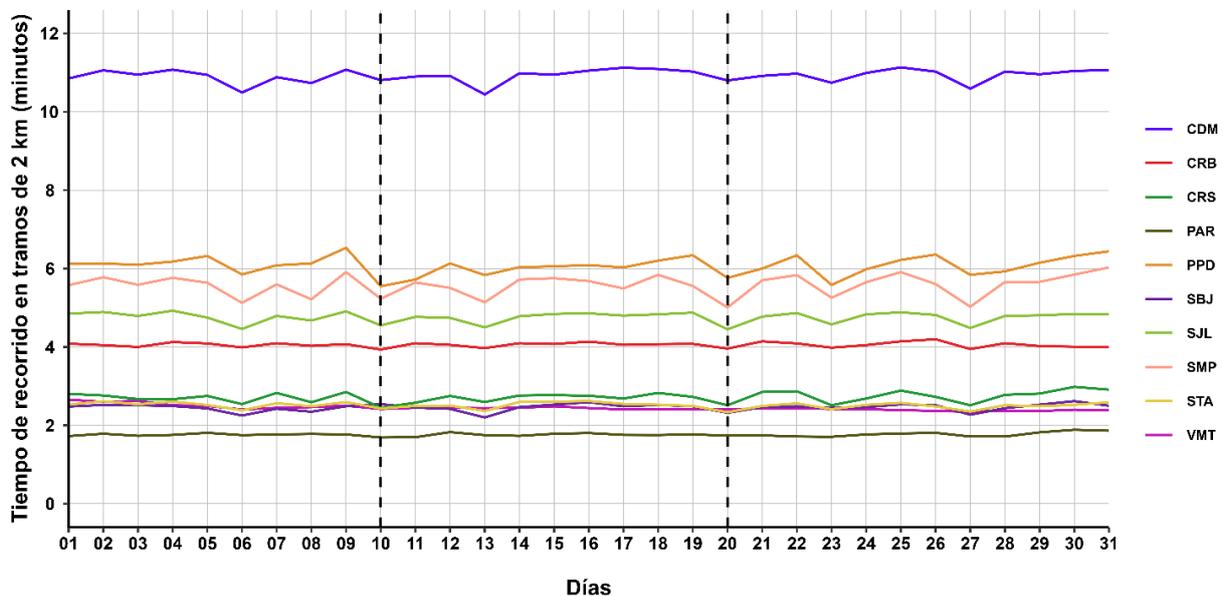
3. ACTIVIDAD VEHICULAR EN EL AMLC

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 valores de tiempo de recorrido en tramos de 2 km se presentaron en los alrededores de las estaciones CDM, PPD y SMP. En la zona centro, el valor promedio diario más alto de 11.1 minutos se alcanzó durante la segunda decadiaria (el 25 de octubre) en los alrededores de la estación CDM. En la zona norte, el valor promedio diario más alto de 6.5 minutos se alcanzó durante la tercera decadiaria (el 21 de octubre) en los alrededores de la estación PPD. En la zona este, el valor promedio diario más alto de 5 minutos se alcanzó durante la primera decadiaria (el 9 de octubre) en los alrededores de la estación SJL. Finalmente, en la zona sur, estación VMT, el valor promedio diario más alto de 2.7 minutos se alcanzó durante la primera decadiaria (el 1 de octubre). En general, los valores promedios diarios presentaron poca variación a lo largo del mes en todas las estaciones, destacándose la variación en los tiempos de demora alrededor de las estaciones CDM, PPD y SMP de sábado a domingo y de domingo a lunes, lo que refleja el cambio entre días laborables a no laborables; asimismo, hubo una reducción en los tiempos de demora el 10 y 23 de octubre debido al paro de transportes y el 8 de octubre debido al feriado nacional.

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/>

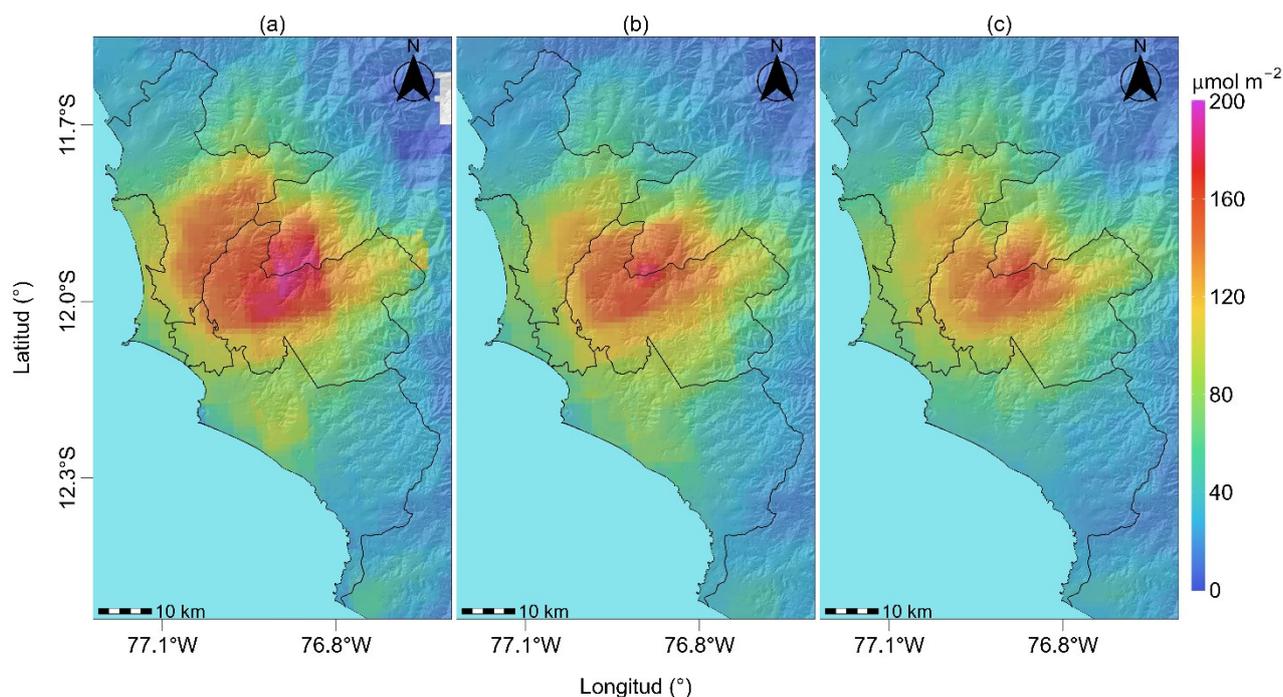
¹⁵ El web scraping es la práctica de recopilar datos de Internet de forma automatizada, mediante la escritura de programas que consultan servidores web y extraen información, usualmente en forma de archivos HTML, sin necesidad de interactuar con una interfaz de programación de aplicaciones (API) o navegadores web. Esta técnica ha sido conocida por diversos términos a lo largo del tiempo, pero actualmente se prefiere el término "web scraping". 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

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

La Figura N° 07, 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 × 3.5 km durante el mes de octubre. Es así como, la Figura N° 07a, muestra la distribución espacial promedio de NO₂ en la primera decadiaria (1 a 10 de octubre), la Figura N° 07b, en la segunda decadiaria (11 al 20 de octubre) y la Figura N° 07c en la tercera decadiaria (21 al 31 de octubre).

Figura N° 07. Distribución espacial de la columna del NO₂ (μmol/m²) en la tropósfera del AMLC.



De manera general, la mayor densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica se observó en la zona este, mientras que la menor densidad se observó en la zona norte y sur. Durante la primera decadiaria, los mayores valores fueron de 190.8 μmol/m² en la zona este y de 152.4 μmol/m² en la zona norte. En la segunda decadiaria, se presentó en promedio una reducción de la densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica, siendo esto más resaltante en la zona norte y oeste (25.7% y 20.4% menor que la primera decadiaria); el valor máximo fue de 176.6 μmol/m² en la zona este. En la tercera decadiaria, se presentó en promedio un incremento de la densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica en la zona norte y oeste (12% y 10% mayor que en la segunda decadiaria), mientras que, se presentó una reducción en el resto de las zonas, siendo más pronunciada en la zona sur (21.3% menor que la segunda decadiaria); el valor máximo fue de 172.4 μmol/m² 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 de 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>

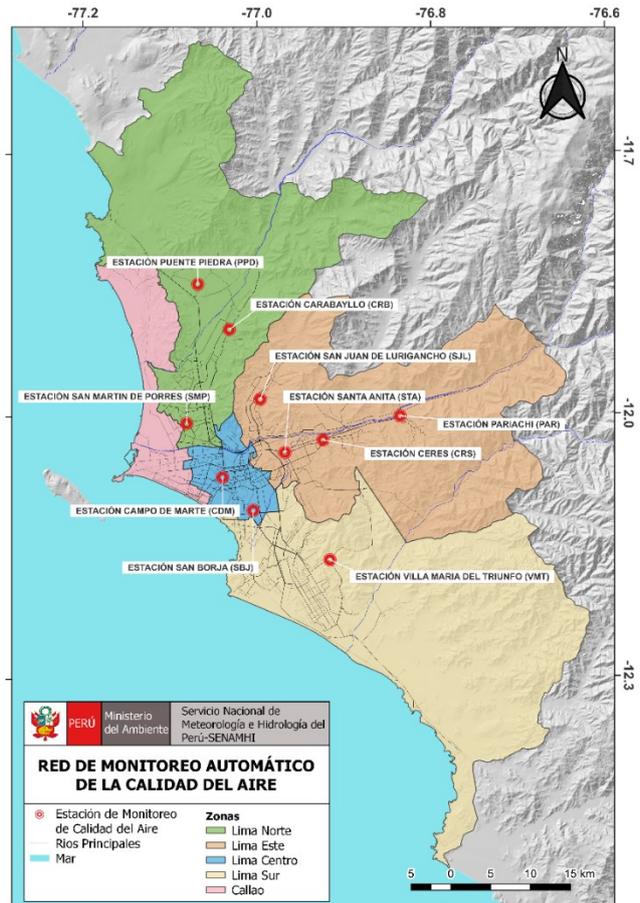
5. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

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° 08.

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 Carabaylo (CRB) Piscina Municipal del distrito de Carabaylo
	Estación San Martín de Porres (SMP) Parque Ecológico del distrito de San Martín de Porres
Este	Estación San Juan Lurigancho (S JL) Universidad César Vallejo en el distrito de San Juan de Lurigancho
	Estación Ceres (CRS) Plaza Cívica de Ceres distrito de Ate
	Estación Pariachi (PAR) Parque Barrantes Lingan - Pariachi 2a etapa distrito de Ate
	Estación Santa Anita (STA) Palacio Municipal del distrito de Santa Anita
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°08. 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

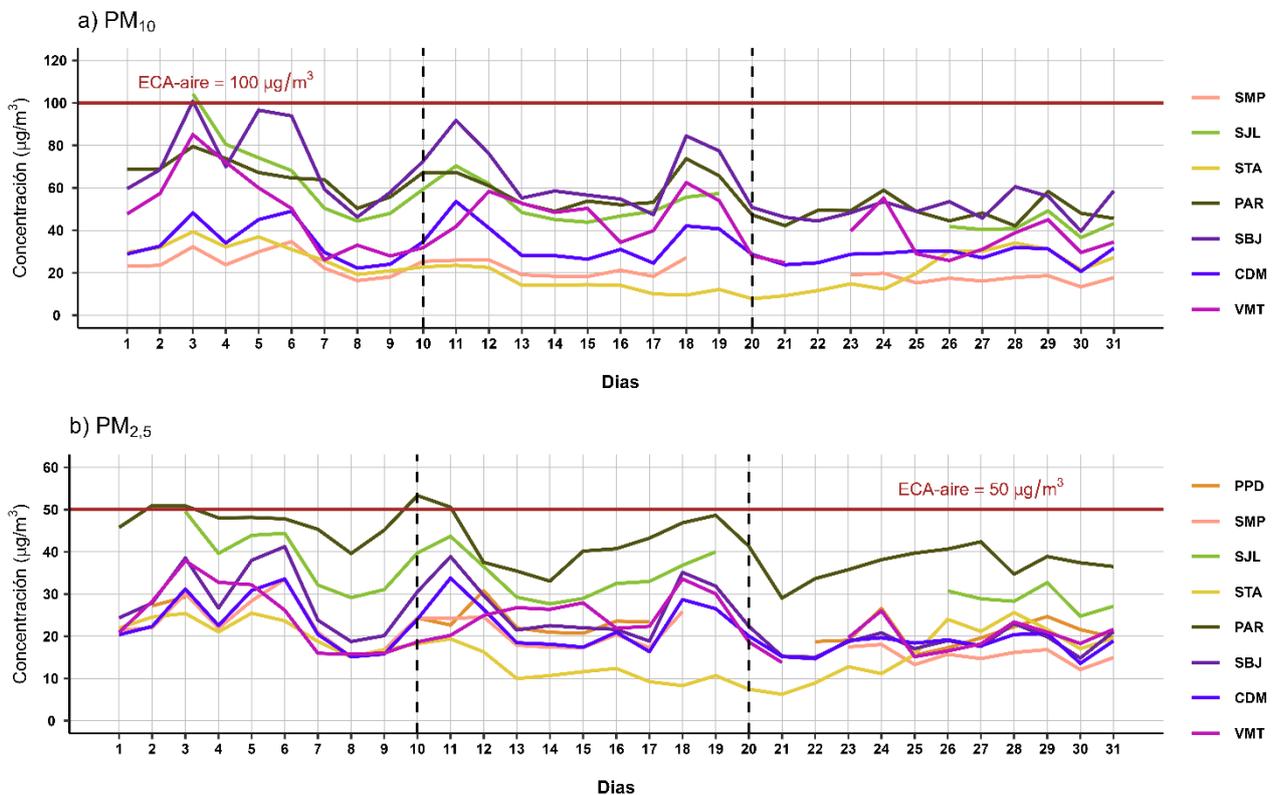
Con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el AMLC, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones del material particulado y gases. Los datos provinieron de las estaciones: Puente Piedra (PPD), Carabaylo (CRB), San Martín de Porres (SMP), San Juan de Lurigancho (S JL), 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 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 PM_{2,5}, mientras que un incremento en la temperatura está relacionado con un incremento en las concentraciones de PM₁₀²⁰.

Figura N°09. 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° 09a, se observa que, en la estación SBJ y SJL se registraron concentraciones diarias de PM₁₀ superiores al ECA-aire de 100 µg/m³ (como promedio diario) durante al menos un día del periodo de monitoreo. Presentándose el valor máximo de 104.3 µg/m³, en la estación SJL, el jueves 3 de octubre (las concentraciones más altas se registraron entre las 19:00 y 23:00 horas), lo cual estaría asociado a la resuspensión de polvo por actividad vehicular en la zona este (durante días particulares), así como una reducción de la altura de la CLA durante las horas de mayor concentración. En promedio se observa una tendencia a la reducción de las concentraciones hacia la segunda decadiaria, la cual se mantiene hacia la tercera decadiaria. El comportamiento presentado estaría asociado a la actividad vehicular, así como a variaciones en la temperatura y en la altura de la CLA. (ver Figura N° 02b y Figura N° 02d)^{20, 21, 22}

En la Figura N° 09b, se evidencia que respecto a PM_{2,5}, en la estación PAR se registró concentraciones diarias de PM_{2,5} superiores al ECA-aire de 50 µg/m³ (como promedio diario), durante al menos un día del periodo de monitoreo. El valor máximo de 53.3 µg/m³ fue alcanzado en la estación PAR durante finales de la primera decadiaria, el jueves 10 de octubre (las concentraciones más altas se registraron entre las 08:00 y 10:00 horas), principalmente asociado a la actividad vehicular en la zona este. En su mayoría se observa una tendencia a la reducción de las concentraciones hacia la segunda decadiaria, la cual se mantiene hacia la tercera decadiaria. El comportamiento presentado estaría asociado a variaciones en la humedad relativa y un incremento en la altura de la CLA, así como a una reducción en la congestión vehicular relacionada a días no laborables. (ver Figura N° 02a y 02d y Figura N° 06) ^{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 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.

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>

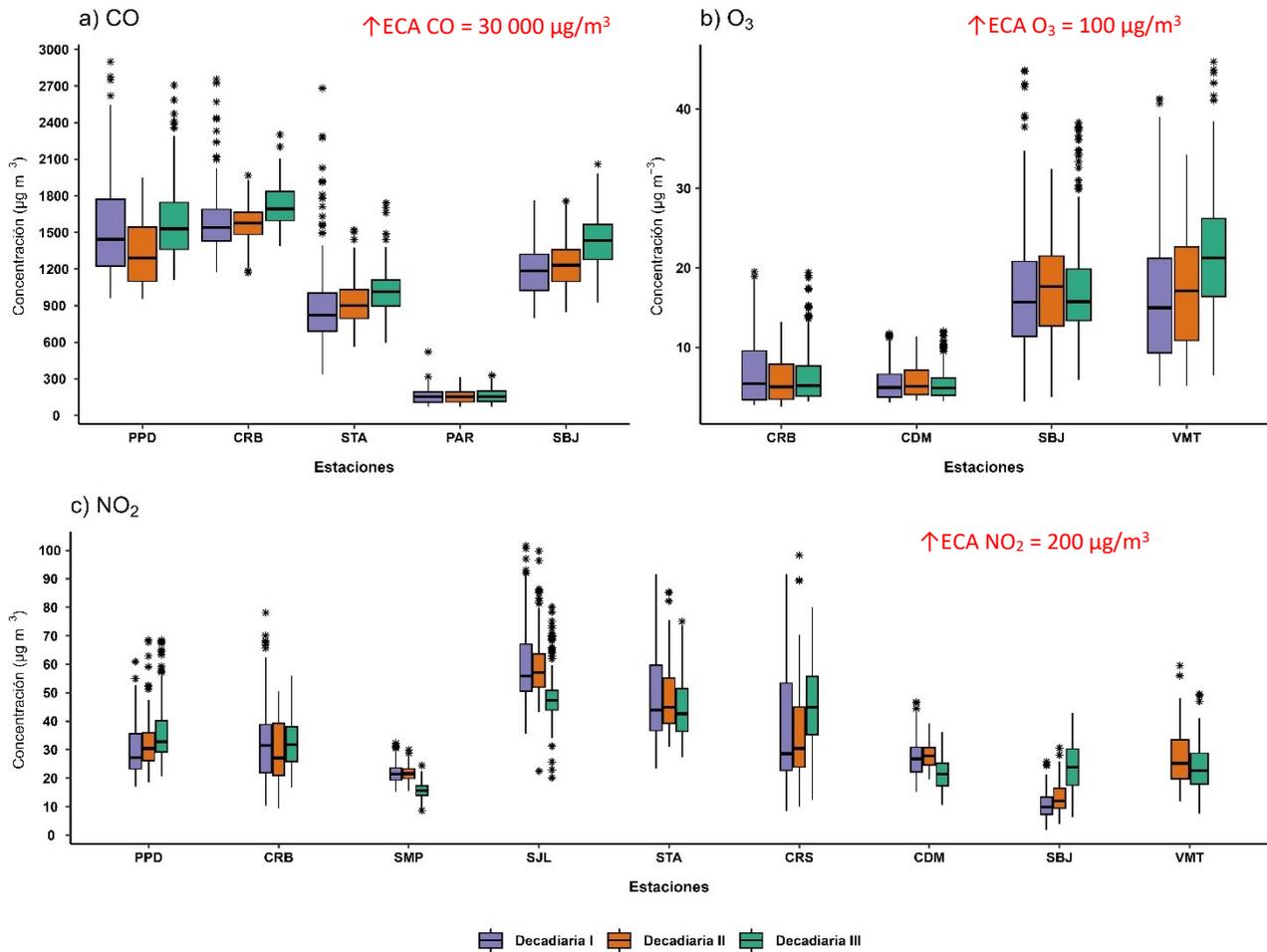
²⁴ Ozono y compuestos orgánicos volátiles en el área metropolitana de Lima-Callao, Perú. Obtenido de: https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20_500_12542/237

²⁵ Análisis de la Relación entre O₃, NO y NO₂ en Tianjin, China. Obtenido de: <https://aaqr.org/articles/aaqr-10-07-0a-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

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°10. Variación de las concentraciones del CO, O₃ y NO₂ (µg/m³) por decadiaria en el AMLC.



En la Figura N° 10a, 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, se puede apreciar que, el valor más alto se registró durante la primera decadiaria en la zona norte, estación PPD, con una máxima de 2 899.1 µg/m³ (lunes 04 de octubre a las 01:00 horas), lo cual estaría relacionado con una reducción en la altura de la CLA. Respecto al comportamiento decadiario, se observa que en promedio los valores más altos se registraron en la tercera decadiaria, especialmente en la zona norte, en la estación CRB. Este comportamiento estaría asociado a variaciones presentadas en la altura de la CLA que favorecería la estabilidad y la acumulación de los contaminantes (ver Figura N° 02d).

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 relación con el O₃, la Figura N° 10b 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. Asimismo, se puede apreciar que el valor más alto se registró en la zona sur, en la estación VMT, con una máxima de 45.9 µg/m³ el domingo 27 de octubre, seguido de la estación SBJ, ubicada en la zona centro, alcanzando una máxima de 44.8 µg/m³ el domingo 6 de octubre. Las mayores concentraciones se registraron en horarios posteriores al periodo de máxima radiación solar²⁸ (comprendido entre las 11:00 horas y 15:00 horas). Respecto al comportamiento decadiario, se observa que, en promedio, en las estaciones CRB, CDM y SBJ se presentó poca variación en los valores de ozono en las tres decadiarias. En contraste, en la estación VMT se registró un incremento durante la tercera decadiaria, posiblemente asociado a una disminución en las concentraciones de material particulado, lo que favorece una menor dispersión y absorción de la radiación solar (Figura N° 09). Esta mayor disponibilidad de radiación en la superficie terrestre permitiría una mayor formación de O₃ ²⁹.

En la Figura N° 10c, 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. Las mayores concentraciones se reportaron en la zona este, en las estaciones SJL y STA (el jueves 3 de octubre a las 11:00 y 14:00 horas, respectivamente) y en la estación CRS (el sábado 12 de octubre a las 11:00 horas), alcanzando 101.6 µg/m³, 91.6 µg/m³ y 98.3 µg/m³, respectivamente, lo cual estaría asociado a la actividad vehicular en la zona este (89% de las emisiones de NO_x provienen de vehículos a diésel)¹⁰. A nivel decadiario, se observa que los valores promedio más altos se presentaron durante la primera y segunda decadiaria en la zona este, en las estaciones SJL y STA. Estos incrementos se habrían visto principalmente favorecidos por una reducción en la altura de la CLA, lo que permitiría la acumulación del contaminante (Figura N° 02d).

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.

6. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL AMLC

El índice de calidad del aire (ICA), está basado en valores establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA por sus siglas en inglés). Los ICAs son valores que permiten informar el estado de la calidad del aire, permitiendo a la población conocer que tan limpio o saludable está el aire y los efectos que podría causar en la salud^{30 31}.

6.1. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM₁₀

La Figura N° 11 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 este, la estación PAR presentó 15 días con calidad del aire “Moderada” y 16 días con calidad del aire “Buena”; asimismo, la estación SJL presentó 9 días con calidad del aire “Moderada” y 14 días con calidad del aire “Buena”; mientras que, la estación STA presentó 31 días con calidad del aire “Buena”. En la zona centro, la estación SBJ presentó 19 días con calidad del aire “Moderada” y 12 días con calidad del aire “Buena”; asimismo, la estación CDM presentó 31 días con calidad del aire “Buena”. En la zona norte se observó que la estación SMP presentó 27 días con calidad del aire “Buena”. Finalmente, en la zona sur, la estación VMT presentó 7 días con calidad del aire “Moderada” y 23 días con calidad del aire “Buena”.

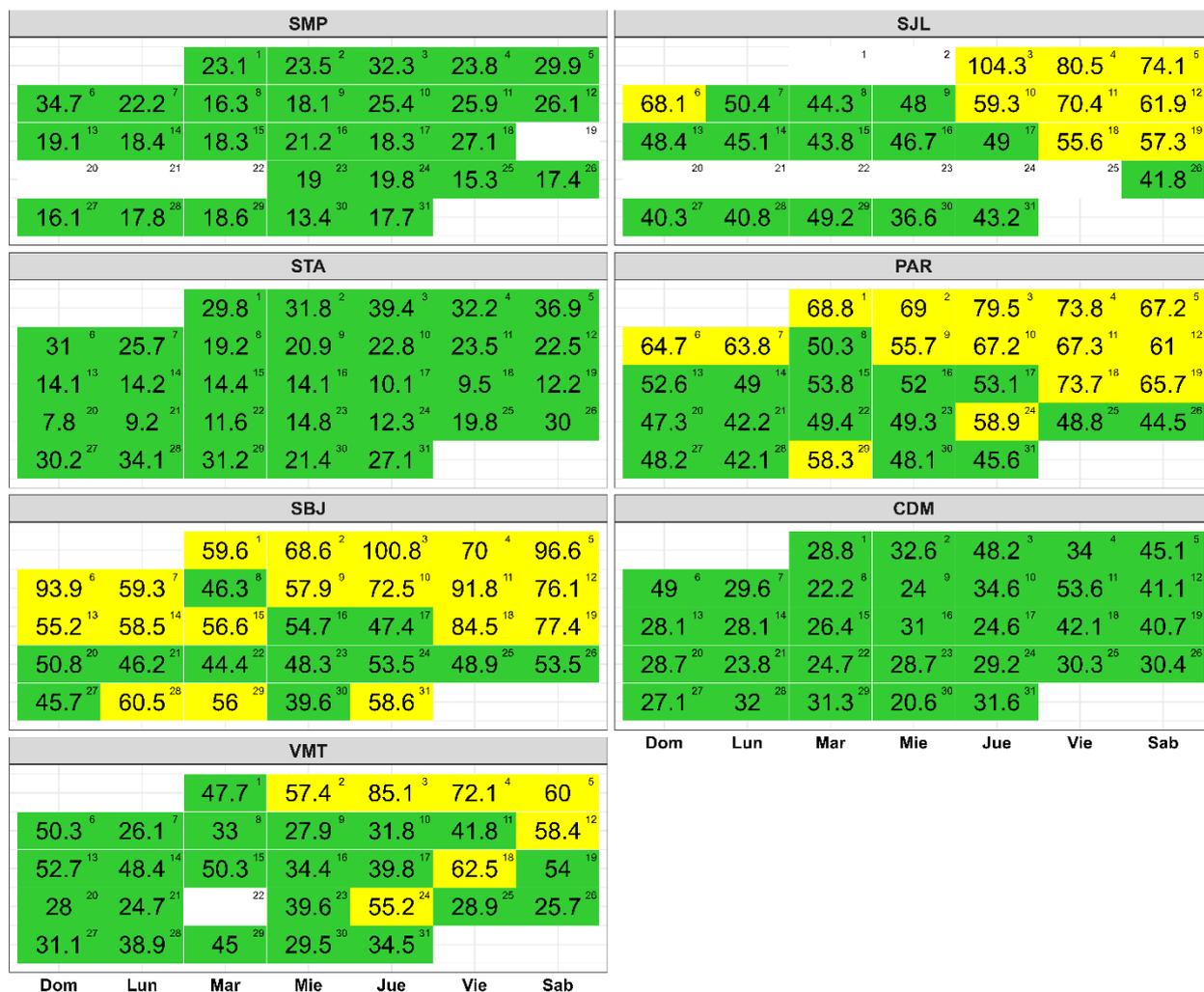
6.2. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM_{2,5}

La Figura N° 12 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 este, la estación PAR presentó 27 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 4 días con calidad del aire “Moderada”; la estación SJL presentó 9 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 14 días con calidad del aire “Moderada”; asimismo, la estación STA presentó 27 días con calidad del aire “Moderada” y 4 días con calidad del aire “Buena”. En la zona norte se observó que la estación PPD presentó 20 días con calidad del aire “Moderada”; asimismo, la estación SMP presentó 27 días con calidad del aire “Moderada”. En la zona centro se observó que la estación SBJ presentó 4 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles”, y 27 días con calidad del aire “Moderada”; asimismo, la estación CDM presentó 31 días con calidad del aire “Moderada”. Finalmente, en la zona sur, la estación VMT presentó 1 día con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 29 días con calidad del aire “Moderada”.

³⁰ Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/air_quality_brochure_02_14_0.pdf

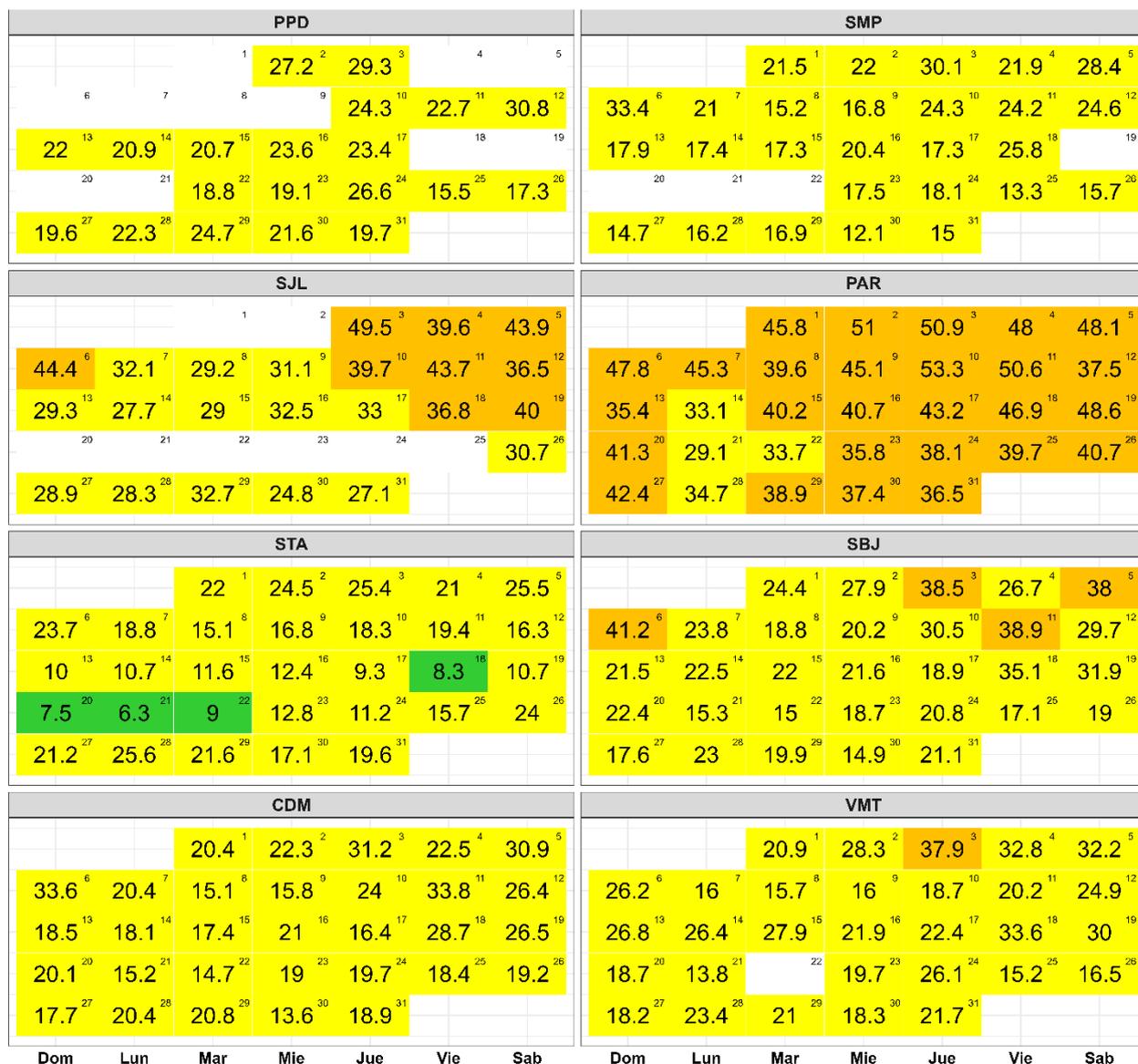
³¹ Final Updates to the Air Quality Index (AQI) for Particulate Matter. Obtenido de: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-02/pm-naaqs-airquality-index-fact-sheet.pdf>

Figura N° 11. Índice de la Calidad del Aire para PM₁₀



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

Figura N° 12. Índice de la Calidad del Aire para PM_{2.5}



Concentración PM _{2.5} (µg/m³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	9		Buena	0
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 octubre. Se ha presentado una ligera tendencia al incremento de temperaturas y una reducción de la humedad relativa lo que favoreció la reducción del PM_{2,5}.
- Durante el mes de octubre, los valores de tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular), tuvieron poca variación, presentándose los valores más altos en la zona centro, en los alrededores de la estación CDM.
- Se observa una reducción en la densidad de NO₂, en la columna vertical troposférica, hacia la segunda decadiaria, mientras que para la tercera decadiaria se observa un comportamiento variado, mostrando un incremento para la zona norte y oeste, y para las demás zonas una reducción. En las tres decadiarias analizadas los mayores valores se presentaron en la zona este.
- Se superó el ECA – aire para PM₁₀ durante al menos un día del periodo de monitoreo en las estaciones SBJ y SJL, alcanzando un valor máximo de 104.3 µg/m³ en la estación SJL. En el caso del PM_{2,5}, la estación PAR superó el ECA – aire durante al menos un día del periodo de monitoreo, alcanzando el valor máximo de 53.3 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 todos los casos. Los incrementos en las concentraciones se asociaron a días con condiciones meteorológicas favorables para la acumulación de contaminantes atmosféricos.
- Con respecto al ICA para el contaminante PM₁₀, se pudo apreciar que la estación SBJ presentó mayor cantidad de días una calidad del aire “Moderada” (61% de los días monitoreados). En cuanto al contaminante PM_{2,5}, la estación PAR presentó una calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” en hasta un 87% de los días monitoreados, mientras que el resto de los días presentó una calidad del aire “Moderada”.

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

De acuerdo con el pronóstico climático³² para el mes de noviembre del 2024, se espera que en el AMLC las temperaturas máximas se encuentren dentro de sus rangos normales al igual que las mínimas. Considerando el comportamiento estacional de estas variables meteorológicas, se esperaría que las concentraciones de PM_{2,5}, se mantengan en un rango de similar a menor a lo registrado en el mes de octubre.

³² Documento: Boletín climático nacional – octubre 2024 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-136.pdf>

Para más información sobre el presente informe, contactar con:

Ing. Jhojan Pool Rojas Quincho

jprojas@senamhi.gob.pe

Subdirector de Evaluación del Ambiente Atmosférico

Elaboración

Ing. Lourdes María Isabel Urteaga Tirado (lurteaga@senamhi.gob.pe)

Ing. Dayana Lucero Acuña Valverde

Ing. José Hitoshi Inoue Velarde

Ing. Elvis Anthony Medina Dionicio

Bach. Hanns Kevin Gómez Muñoz

Apoyo

Tec. Rosalinda Aguirre Almeyda

Para estar informado permanentemente sobre la **EVOLUCIÓN HORARIA DE LOS CONTAMINANTES PRIORITARIOS DEL AIRE** en Lima Metropolitana visita este enlace:

<http://www.senamhi.gob.pe/?p=calidad-de-aire>

Encuentra los últimos **6 BOLETINES MENSUALES DE LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE** de Lima Metropolitana en el siguiente enlace:

<http://www.senamhi.gob.pe/?p=boletines>

Suscríbete al **BOLETÍN MENSUAL DE LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE** de Lima Metropolitana en el siguiente enlace:

<https://forms.gle/a4hpxqSc8KLj47sQ6>

Próxima actualización: 15 de diciembre del 2024

industrias

parque
automotor

