

BOLETÍN VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE

Área metropolitana de Lima y Callao

Diciembre 2024



VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – DICIEMBRE 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 diciembre^{1,2} y las salidas resultantes de la aplicación del modelo Weather Research and Forecasting (WRF)³ para el ámbito del AMLC, el cual tiene una resolución espacial de 1 km y temporal de 1 hora. Por otro lado, se realizó un análisis del comportamiento del tránsito vehicular en el AMLC a partir de la información extraída de Google Traffic⁴. Con respecto a la información de contaminantes atmosféricos, se usaron los datos de la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire (REMCA) de SENAMHI e información del satélite Sentinel 5P⁵.

*Toda persona tiene derecho de gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida.
Constitución Política del Perú. Artículo 2, inciso 22.*

¹ Informe de Vigilancia Sinóptica de Sudamérica – diciembre 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-118.pdf>

² Boletín climatológico de Lima – diciembre 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-126.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.).

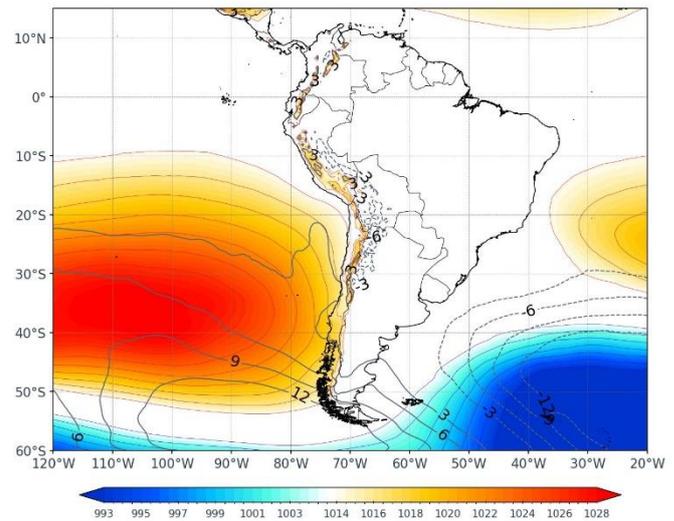
1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

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 diciembre se conformó la decadiaria 1 (del 1 al 10), decadiaria 2 (del 11 al 20) y decadiaria 3 (del 21 al 31).

1.1. PRIMERA DECADIARIA (1 al 10 de diciembre)

En la primera decadiaria, se presentó una configuración zonal con núcleo en los 35°S y 105°W con valores de presión alrededor de los 1026 hPa, notablemente más intensificado respecto a lo climático y desplazado ligeramente hacia este^{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 2 y 4 m/s. Por otro lado, las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) estuvieron cercanos 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 ligeramente por encima de lo normal, de 1.7°C y 0.7°C, respectivamente².

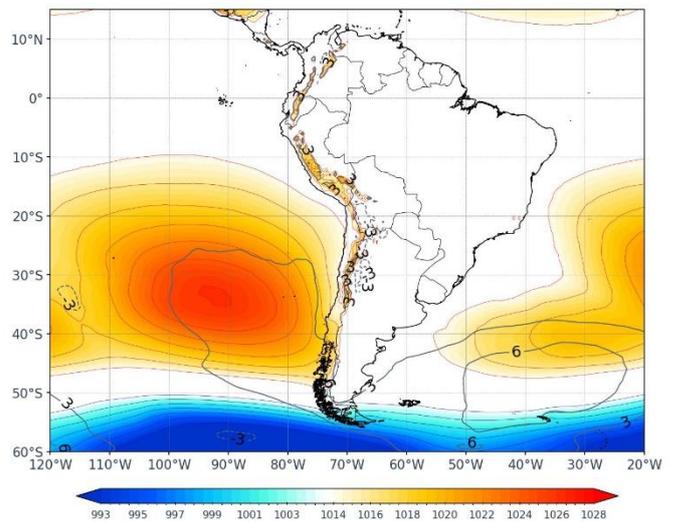
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de diciembre)

En la segunda decadiaria, el APS presentó una configuración cuasi zonal y núcleo en los 35° S y 90° W, con valores de presión alrededor de los 1026 hPa, más intenso respecto a lo climático y desplazado hacia el este^{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 6 m/s. Por otro lado, respecto a las ATSM⁷, estas se encontraron alrededor de los -0.8°C frente a las costas del AMLC, lo cual repercutió en las temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándolas por encima de su normal, en 1.3°C y -1.1°C, respectivamente².

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



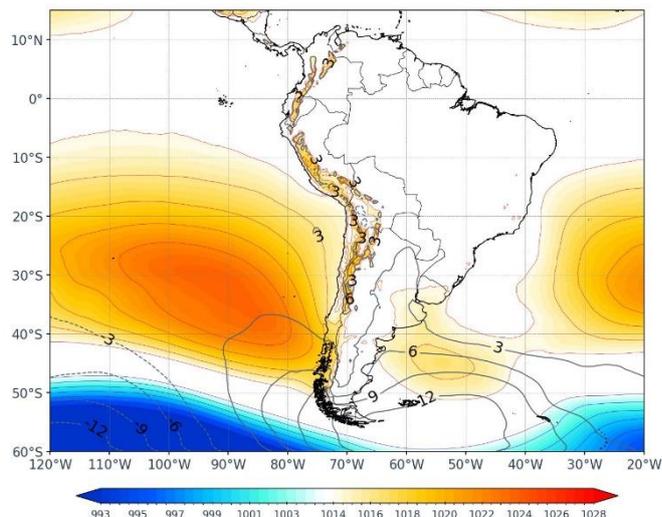
⁶ ¿Cómo responderán los anticiclones subtropicales del hemisferio sur al calentamiento global? Mecanismos y estacionalidad en las proyecciones de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Pág. 704). Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05290-7>

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 diciembre)

Finalmente, el APS presentó una configuración zonal y núcleo en los 32°S y 92°W con valores de presión alrededor de los 1024 hPa, más intenso respecto al climático y desplazado hacia el sureste^{6,1} (Figura N° 01c). Asimismo, se presentaron vientos con una dirección predominante del sur y velocidad entre 1 y 3 m/s. Por otro lado, la ATSM fue de -0.5°C frente a las costas de AMLC, lo cual repercutió en las temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándolas por encima de su normal, en 1.4°C y -0.6°C, respectivamente².

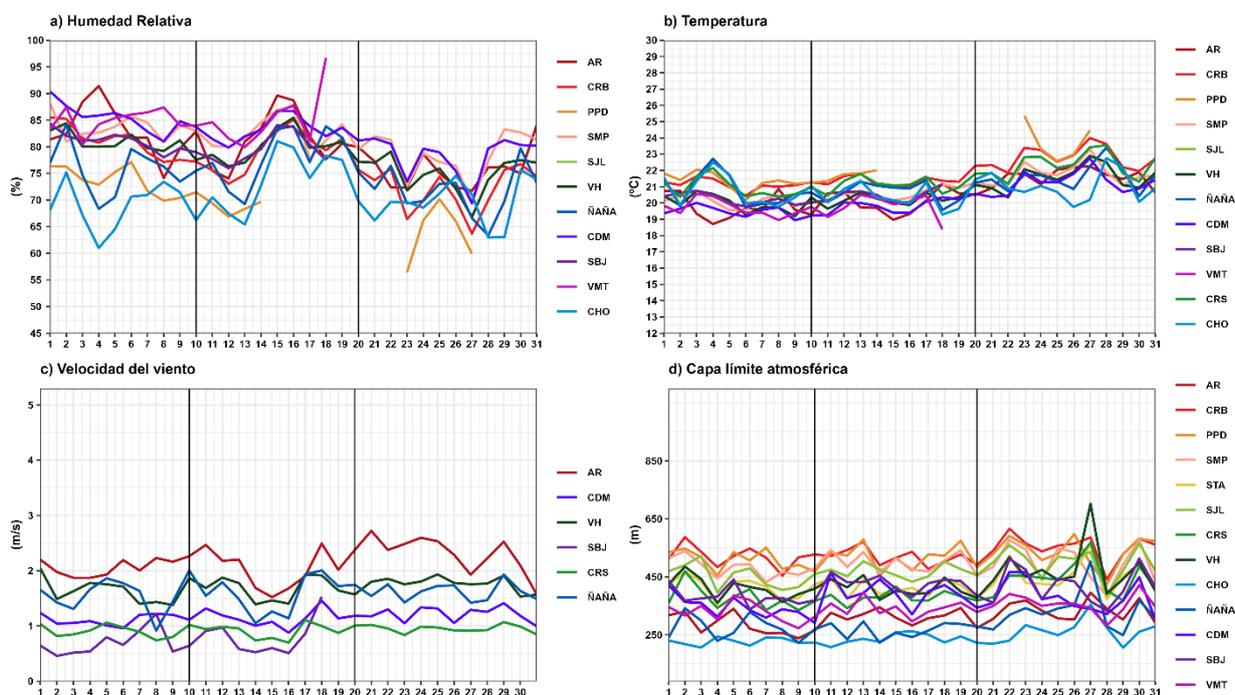
Figura N°01c. Variación del APS en la decadiaria 3.



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 (SJM), 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



Con respecto a la humedad relativa (Figura N° 02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 61.0% a 91.4%, para la segunda decadiaria entre 65.4% a 96.9% y para la tercera decadiaria entre

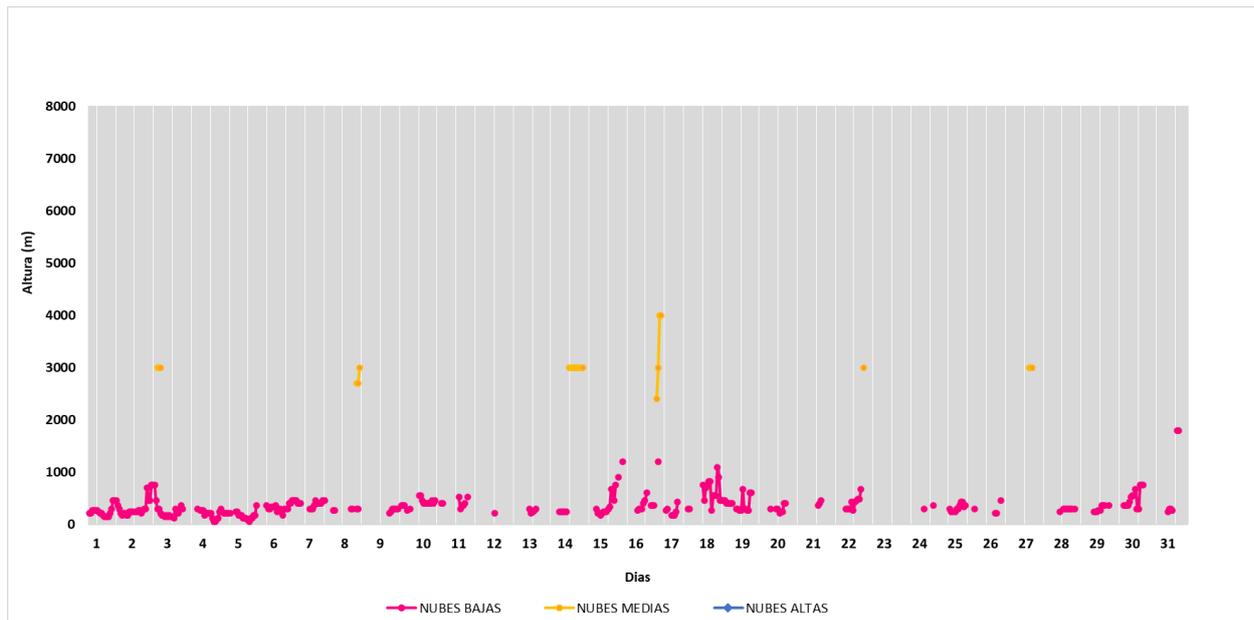
⁸ CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

56.4% a 84.1%, siendo las estaciones SMP, CDM y VMT aquellas que mantuvieron los promedios de humedad más altos, de 81.3%, 82.0% y 84.9%, respectivamente. En relación con la temperatura (Figura N° 02b) durante la primera decadiaria se presentó valores entre 18.7 a 22.7°C, para la segunda decadiaria entre 18.9 a 22.2 °C, y en la tercera decadiaria entre 19.7 a 25.3 °C, siendo la estación de PPD la que alcanzó el valor promedio más alto de temperatura de 22°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 0.4 a 2.7 m/s durante todo el mes, siendo la estación AR la que alcanzó los valores promedio más altos, con un promedio mensual de 2.1 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 530.8, 522.1, 492.2m, respectivamente, mientras que, en las estaciones ÑAÑA y CHO se presentaron los valores promedio más bajos, con 292.4 y 242.7m, 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 diciembre, las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) se presentaron el 44.3% 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 3.6% de los casos. Respecto a las horas con condición de cielo despejado, estas se presentaron en el 52% de las mediciones realizadas. En diciembre predominaron las condiciones de cielo despejado, situación característica de fines de primavera.

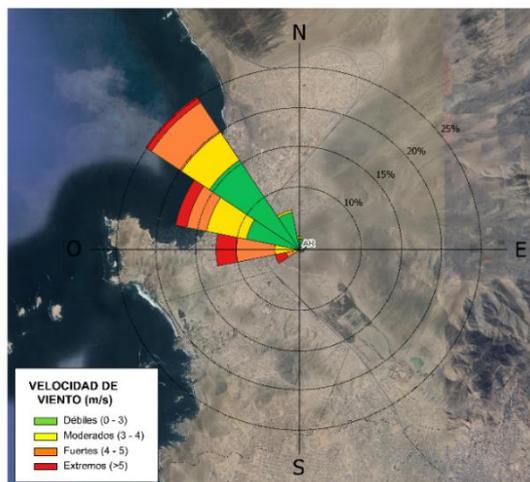
Figura N°03. Altura de base de la nube registrada en la estación Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (JCH).



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 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).

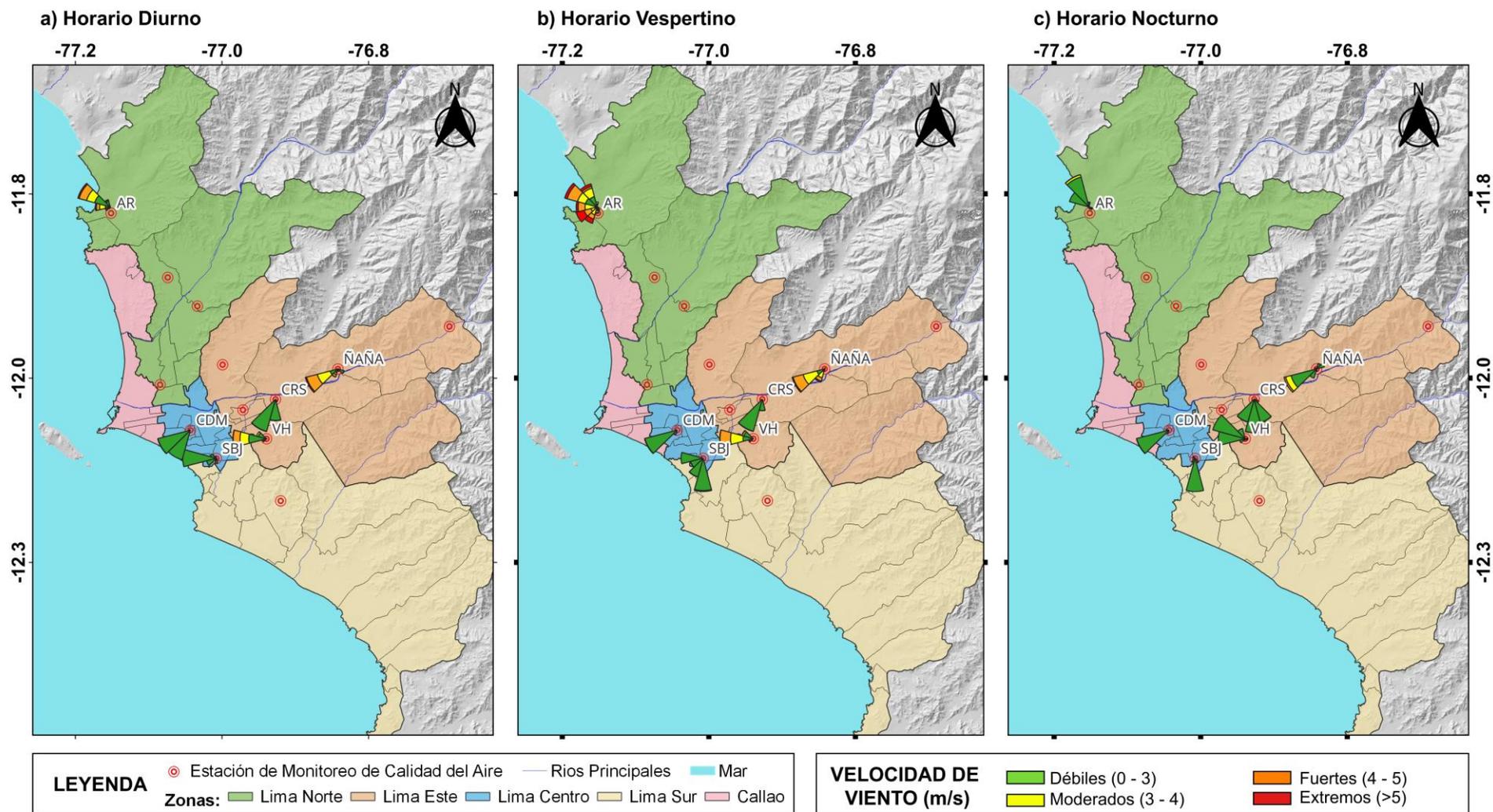
Es así como se observó, que en el horario diurno (Figura N° 05a), las estaciones CDM y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante de oeste suroeste (OSO) con intensidades máximas de débil y extrema, respectivamente. Para la estación de AR, se tuvo vientos con una dirección predominante del oeste noroeste (ONO) con intensidad máxima de extrema. En el caso de la estación CRS presentó vientos con una dirección predominante del sur suroeste (SSO) con intensidad máxima de débil. Finalmente, para la estación SBJ y VH se presentó vientos con una dirección predominante del oeste (O), con intensidad máxima de débil y fuerte.

Para el horario vespertino (Figura N°05b), la estación CDM y ÑAÑA presentó vientos con una dirección predominante de oeste suroeste (OSO) con una intensidad máxima de débil y extrema, respectivamente. Para las estaciones de CRS y SBJ se presentaron vientos con direcciones predominantes del sur suroeste (SSO) y del sur (S), con una intensidad máxima de débil. En el caso de la estación VH presentó vientos con una dirección predominante del oeste (O) con intensidad máxima de fuerte. Finalmente, la estación de AR presentó vientos con una dirección predominante del oeste noroeste (ONO) y una intensidad máxima de extrema.

Para el horario nocturno (Figura N°05c), la estación CDM y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante de oeste suroeste (OSO) y una 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) y con una intensidad máxima de débil. Finalmente, las estaciones de VH y AR presentaron vientos con una dirección predominante del oeste noroeste (ONO) y nor noroeste (NNO) con una intensidad máxima de débil y moderada.

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.



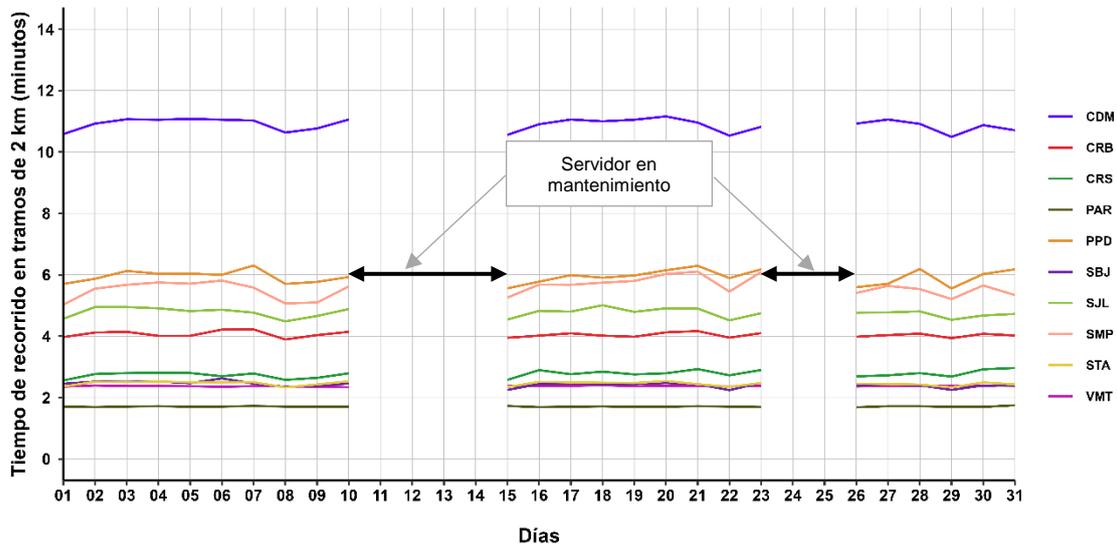
La Figura N° 05 muestra el comportamiento de la dirección y velocidad del viento en cada una de las EMA para los horarios diurnos (07:00 - 12:59 horas), vespertinos (13:00 - 18:59 horas) y nocturnos (19:00 - 06:59 horas).

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 la estación CDM, ubicada en la zona centro, el valor promedio diario más alto de 11.2 minutos se alcanzó durante finales de la segunda decadiaria (el viernes 20 de diciembre, presentándose los valores más altos entre las 15:00 y 20:00 horas). Asimismo, en la zona norte, el valor promedio diario más alto de 6.3 minutos se alcanzó durante la primera decadiaria (el sábado 7 de diciembre, presentándose los valores más altos entre las 10:00 y 11:00 horas) en los alrededores de la estación PPD. En la zona este, el valor promedio diario más alto de 5 minutos se alcanzó durante la segunda decadiaria (el miércoles 18 de diciembre, presentándose los valores más altos entre las 12:00 y 15:00 horas) en los alrededores de la estación SJL. Finalmente, en la zona sur, estación VMT, el valor promedio diario más alto de 2.4 minutos se alcanzó a finales de la tercera decadiaria (el martes 31 de diciembre, presentándose los valores más altos entre las 16:00 y 21:00 horas). En general, los valores promedios diarios se mantuvieron relativamente constantes a lo largo del mes, destacándose una variación en los tiempos de demora de sábado a domingo y de domingo a lunes, lo que refleja el cambio en días de descanso por fin de semana. Cabe mencionar que, durante el 31 de diciembre se observó una reducción en los tiempos de demora en la mayoría de los horarios, sin embargo, estas variaciones no fueron destacables. Asimismo, hay que mencionar que durante la segunda y tercera decadiaria se estuvieron realizando trabajos de mantenimiento en el servidor.

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

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.

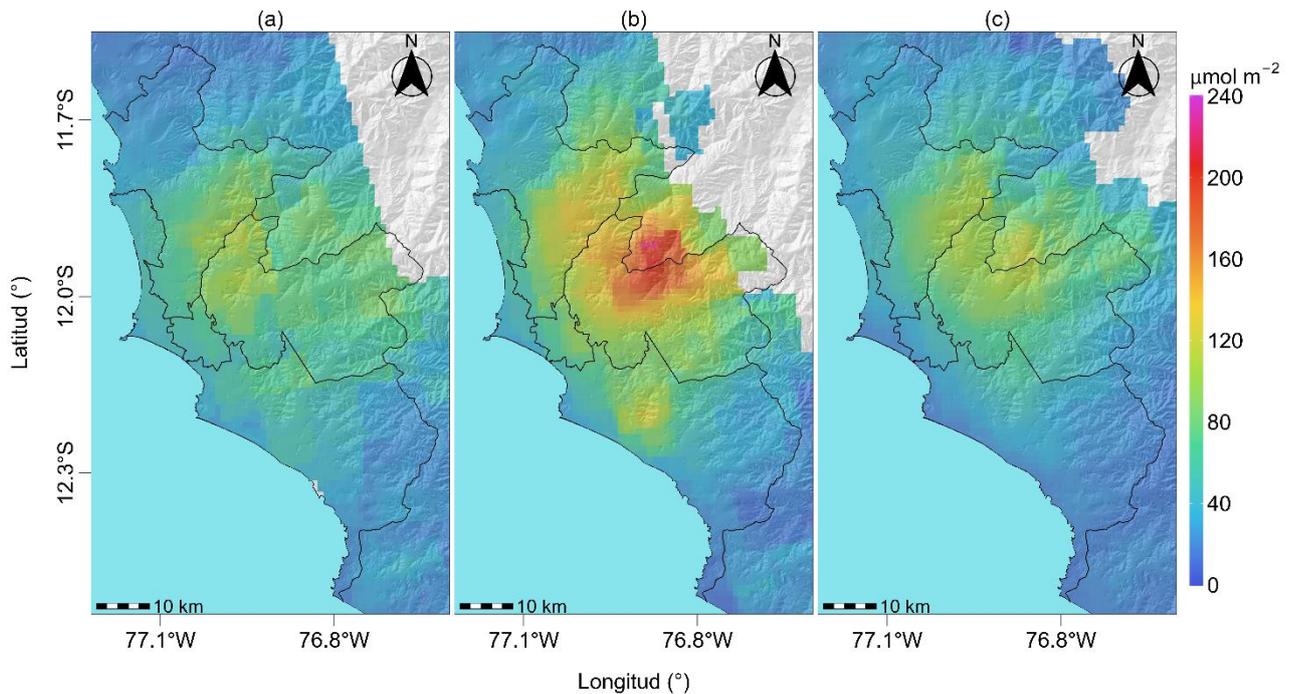
¹⁶ Estudio: Extracción y Minería de Datos de Tráfico en Google Maps. Obtenido de:

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

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

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 se observó en la zona sur. Durante la primera decadiaria, los valores máximos fueron de 117.3 μmol/m² en la zona este y 114.1 μmol/m² en la zona norte. En la segunda decadiaria, se evidenció un incremento general de la densidad de NO₂, especialmente en las zonas este y norte, con aumentos del 50.8% y 38.4% respecto a la primera decadiaria, alcanzando el valor máximo de 207.2 μmol/m² en la zona este. En la tercera decadiaria, se produjo una reducción general de la densidad del NO₂ en todas las zonas del AMLC, destacando disminuciones del 45.1% en la zona centro y del 38% en la zona sur con relación a la segunda decadiaria, registrándose un valor máximo de 113.1 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>

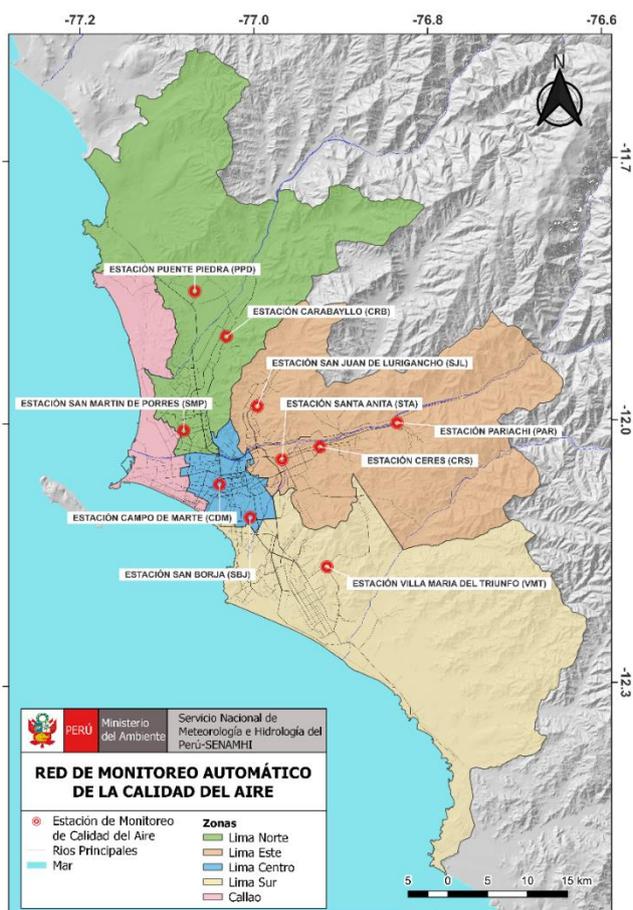
5. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

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 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°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

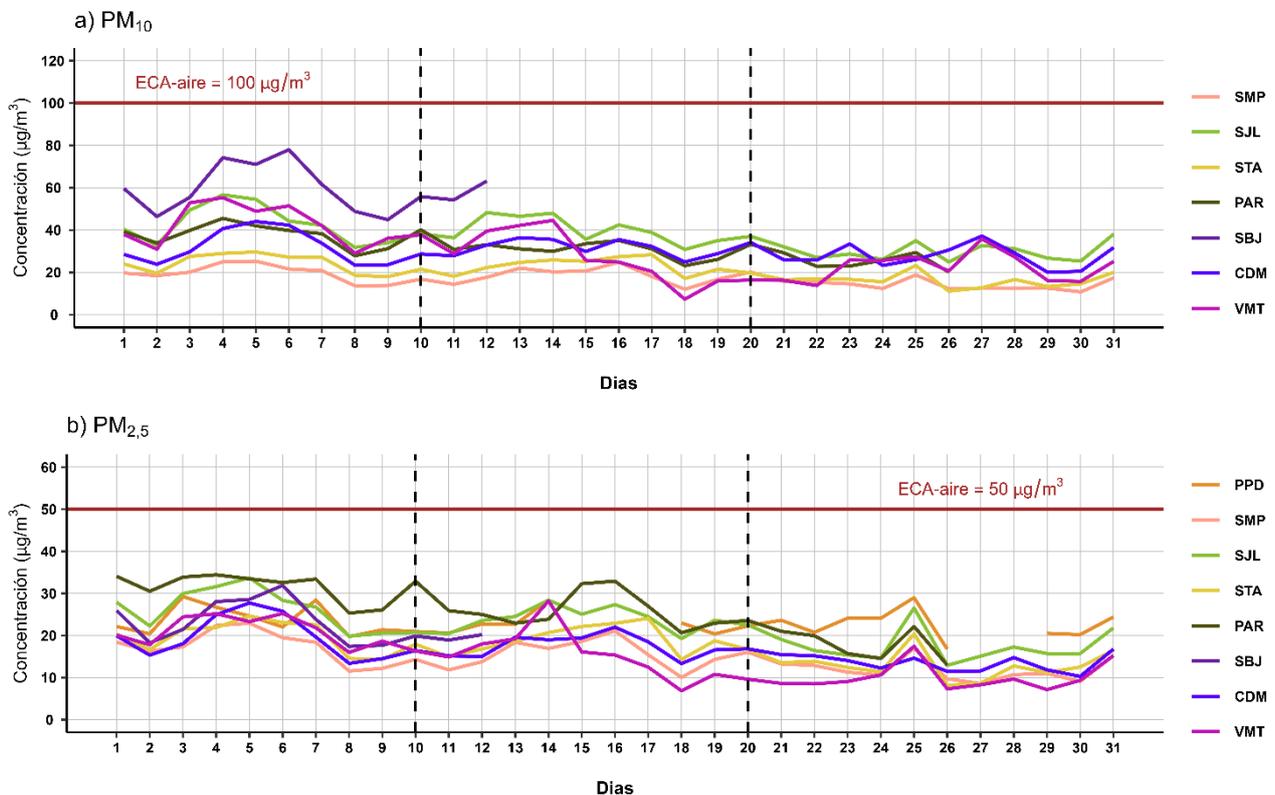
Con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el AMLC, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones del material particulado y gases. Los datos provinieron de las estaciones: Puente Piedra (PPD), Carabayllo (CRB), San Martín de Porres (SMP), San Juan de Lurigancho (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 ninguna de las estaciones se registraron concentraciones diarias de PM₁₀ superiores al ECA-aire de 100 µg/m³ (como promedio diario). Presentándose el valor máximo de 78 µg/m³, en la zona centro, estación SBJ, el viernes 6 de diciembre (las concentraciones más altas se registraron entre las 08:00 y 10:00 horas), lo cual estaría asociado a la resuspensión de polvo por actividad vehicular en la zona centro (durante días particulares), así como un incremento de la temperatura y la velocidad de viento durante las horas de mayor concentración (ver Figura N° 02b y 02c). De manera general, se observa que durante la primera parte de la primera decadiaria hubo un incremento en las concentraciones de PM₁₀, asociado a una disminución en la humedad relativa y un aumento en la temperatura. Por otro lado, en la última parte de la tercera decadiaria se registró una leve disminución en las concentraciones, vinculada a un incremento en la humedad relativa y una disminución en la temperatura. (ver Figura N° 02a y 02b)^{20, 21, 22}

En la Figura N° 09b, se evidencia que respecto a PM_{2,5}, en la estación PAR no se registró concentraciones diarias de PM_{2,5} superiores al ECA-aire de 50 µg/m³ (como promedio diario), durante el periodo de monitoreo. El valor máximo de 34.4 µg/m³ fue alcanzado en la estación PAR durante la primera decadiaria, el miércoles 4 de diciembre (las concentraciones más altas se registraron entre las 08:00 y 10:00 horas), lo cual estaría principalmente asociado a la actividad vehicular en la zona este. De manera general, se observa una tendencia a la reducción de las concentraciones, sobre todo de la segunda a la tercera decadiaria, este comportamiento estaría asociado a una reducción en la humedad relativa, así como un incremento en la velocidad del viento y en la altura de la CLA que favorecería la dispersión. (ver Figura N° 02a, 02b y 02d)^{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>

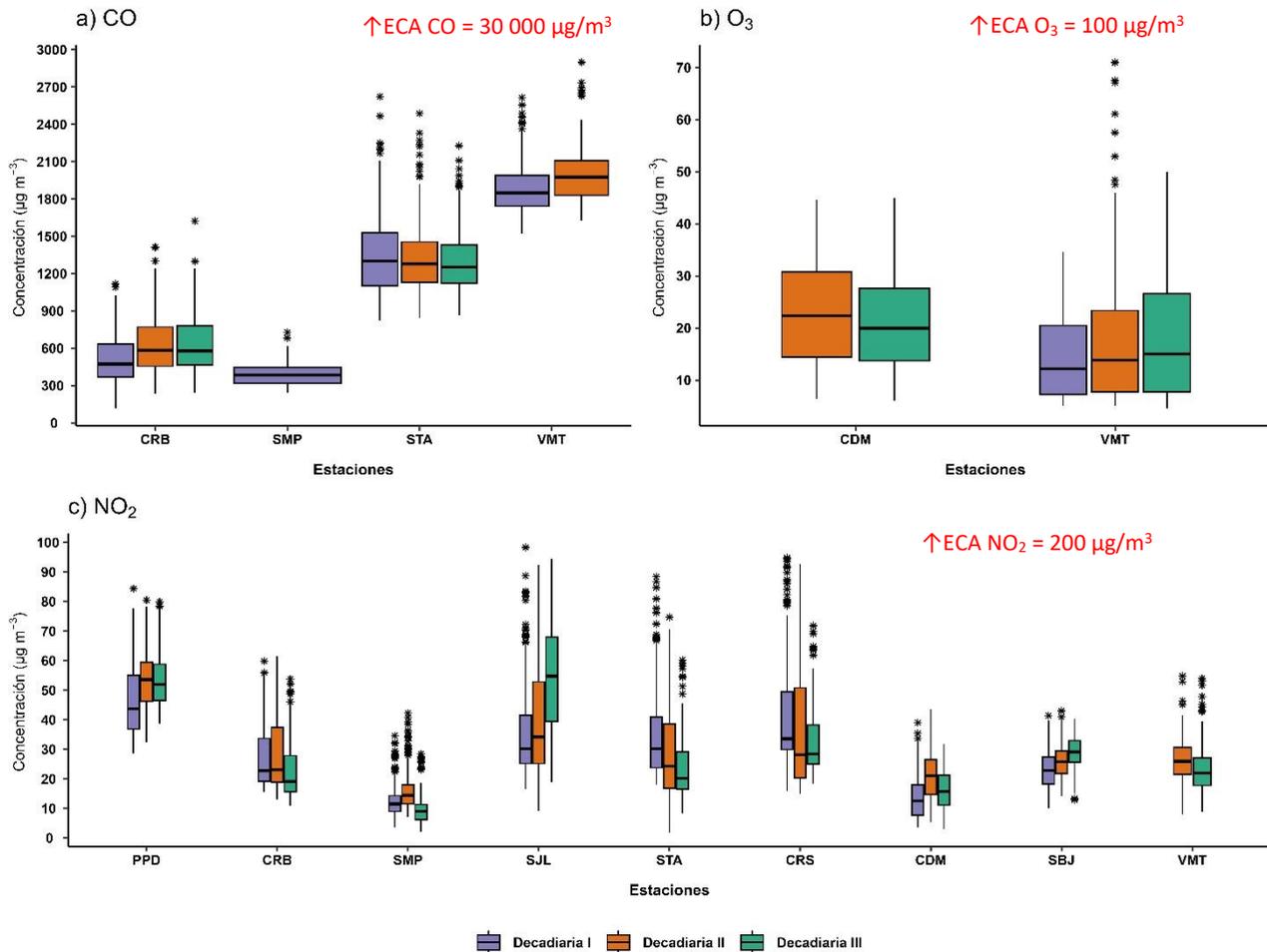
²⁴ Ozono y compuestos orgánicos volátiles en el área metropolitana de Lima-Callao, Perú. Obtenido de: <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/237>

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 este, estación STA, con una máxima de 2 623.1 µg/m³ (miércoles 4 de diciembre a las 10:00 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 observa una relativa estabilidad en las concentraciones, con excepción de un incremento del 26.2% registrado entre la primera y la segunda decadiaria en la estación CRB, situación que pudo haberse visto favorecida por incrementos en la humedad relativa, así como a una reducción en la temperatura y en la altura de la CLA durante los días en los que se presentaron los valores más altos (ver Figura N° 02a, 02b y 02d), que favorecería la estabilidad y la acumulación de los contaminantes.

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 estación VMT, con una

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>

máxima de 71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el viernes 20 de diciembre. Las mayores concentraciones se registraron en horarios posteriores al periodo de máxima radiación solar²⁸ (comprendido entre las 16:00 horas y 19:00 horas). En cuanto al comportamiento decadiario, se destaca, sobre todo, el incremento en promedio que la estación VMT registró hacia la segunda decadiaria, el cual se habría visto favorecido por el incremento de temperatura que se ha observado en toda el AMLC, indicador de una mayor disponibilidad de radiación en la superficie terrestre para la formación de O_3 ²⁹ (Ver Figura N° 02b).

En la Figura N° 10c, se observa que las concentraciones horarias de NO_2 registradas en las estaciones no superaron el valor de su ECA-aire de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (como promedio horario) durante todo el período de monitoreo. La mayor concentración se reportó en la zona este, en la estación SJL (el miércoles 4 de diciembre a las 11:00 horas), alcanzando 98.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 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, así como también a la disminución de la altura de la CLA para este día, que estaría favoreciendo la acumulación del contaminante (Ver Figura N° 02d). En el análisis decadiario, se observa que hacia la segunda decadiaria se registró un incremento en las concentraciones de las estaciones ubicadas en las zonas norte, centro y en la estación SJL, situada en la zona noreste. En contraste, las estaciones de la zona este, como CRS y STA, mostraron una reducción en las concentraciones. Posteriormente, en la tercera decadiaria, se destacó una disminución de las concentraciones en las zonas norte, centro, sur y este, excepto en la estación SJL, que continuó con una tendencia a incrementar sus concentraciones. Este descenso estaría relacionado con un incremento en la altura de la CLA, reducción de la humedad relativa e incremento de la velocidad de viento (ver Figura N° 02d, 02a y 02c), condiciones que habrían favorecido la dispersión del contaminante. Por otro lado, los incrementos estarían asociados a la actividad vehicular presentada en dichas zonas.

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 PM_{10}

La Figura N° 11 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM_{10} asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observó que, en la zona norte, la estación SMP presentó 31 días con calidad del aire “Buena”. En la zona este, las estaciones PAR y STA presentaron 31 y 26 días con calidad del aire “Buena”; asimismo, la estación SJL presentó 1 día con calidad del aire “Moderada” y 30 días con calidad del aire “Buena”. Por otro lado, la estación CDM presentó 31 días con calidad del aire “Buena”, mientras que, la estación SBJ presentó 8 días con calidad del aire “Moderada” y 5 días con calidad del aire “Buena”. Finalmente, la estación VMT presentó 1 día con calidad del aire “Moderada” y 30 días con calidad del aire “Buena”.

6.2. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL $\text{PM}_{2,5}$

La Figura N° 12 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el $\text{PM}_{2,5}$ asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observó que, en la zona norte, la estación SMP presentó 30 días con calidad del aire “Moderada” y 1 día con calidad del aire “Buena”; mientras que, la estación PPD presentó 26 días con calidad del aire “Moderada”. En la zona este, las estaciones SJL y PAR presentaron 31 y 26 días con calidad

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 O_3 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/aji_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>

7. CONCLUSIONES

- Las condiciones meteorológicas influyeron en el comportamiento diario de los contaminantes atmosféricos en el AMLC durante el mes de diciembre. Se ha presentado una ligera tendencia al incremento de las temperaturas comparado con lo presentado en el mes anterior lo cual favoreció la reducción del PM_{2,5}.
- Durante el mes de diciembre, 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.
- Entre la primera y la segunda decadiaria, se presentó un incremento en la densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica sobre todo en la zona este. Sin embargo, hacia la tercera decadiaria se observó una reducción generalizada, siendo más pronunciada en la zona centro. En todas las decadiarias los mayores valores se presentaron en la zona este.
- No se superó el ECA – aire para PM₁₀ en ninguno de los días del periodo de monitoreo, alcanzando un valor máximo de 78 µg/m³ en la estación SBJ. En el caso del PM_{2,5}, tampoco fue superado el ECA – aire durante el periodo de monitoreo, alcanzando un valor máximo de 34.4 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 o formación de contaminantes atmosféricos.
- Con respecto al Índice de Calidad del Aire (ICA) para el contaminante PM₁₀, se observó que, en general, la mayor parte del mes presentó días con una calidad del aire clasificada como “Buena”. 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. En particular, las estaciones PPD en el norte, SJL y PAR en el este, y SBJ y CDM en el centro registraron el 100% de los días monitoreados una calidad del aire “Moderada”.

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

De acuerdo con el pronóstico climático³² para el mes de enero del 2025, se espera que en el AMLC las temperaturas máximas se encuentren dentro de sus rangos normales a por encima de su normal; mientras que las temperaturas mínimas se mantengan dentro de su rango normal. 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 diciembre.

³² Documento: Boletín climático nacional – diciembre 2024 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-138.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. Dayana Lucero Acuña Valverde

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 febrero del 2025

industrias

parque
automotor

