

Comportamiento temporal y asociación entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} y variables meteorológicas en dos estaciones de monitoreo de Lima Metropolitana

Temporal patterns and relationship between meteorological variables and $PM_{2.5}$ and PM_{10} particulate matter at two monitoring stations in Metropolitan Lima

Myrdal Nación¹ , Deyvis Cano^{1*} , Jhanet Álvarez¹ ,
Jhadira Caldas¹ , Guiselle Campos¹ , Sonaly Ccora¹ ,
Mirelly Vargas¹ , Netxy Zevallos¹ 

¹ Programa Académico de Ingeniería Ambiental, Universidad de Huánuco. Huánuco, Perú.



Citar como: Nación, M. *et al.* (2026). «Comportamiento temporal y asociación entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} y variables meteorológicas en dos estaciones de monitoreo de Lima Metropolitana». *South Sustainability*, 7(2), e169.
DOI: doi.org/10.21142/SS-0702-2026-e169

Recibido: 20/7/2026
Revisado por pares
Aceptado: 3/9/2026



© Los autores, 2026. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

*E-mail de correspondencia:
deyvis.cano@udh.edu.pe

Editor asociado:
Alexander Perez Segovia

RESUMEN

La contaminación por partículas finas es un desafío ambiental crítico en metrópolis urbanas, donde la variabilidad de sus concentraciones depende de factores temporales y microclimáticos. Este estudio evaluó la asociación entre variables meteorológicas y $PM_{2.5}$ y PM_{10} en las estaciones Santa Anita y Campo de Marte (Jesús María), Lima, durante el periodo 2015-2023. Se emplearon datos horarios del SENAMHI a escala anual, mensual y horaria, analizados mediante estadística descriptiva, prueba t de Student, series temporales, rosas de viento y correlación de Spearman. Santa Anita registró niveles sistemáticamente más altos, entre los que destacan en PM_{10} promedios de $84.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2019, $77.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en septiembre y un pico diurno de $82.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (14:00 h). En contraste, Campo de Marte presentó menor concentración y una reducción continua de PM_{10} (de $40.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2015 a $14.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023). Se evidenciaron diferencias microambientales significativas: mayor ventilación y precipitación promedio en Santa Anita y mayor humedad relativa en Campo de Marte. A escala mensual, destacó una relación inversa entre temperatura y $PM_{2.5}$ ($p = -0.63$) y, a escala anual, una asociación positiva entre humedad y PM_{10} ($p = 0.50$). Se concluye que el comportamiento temporal del material particulado depende de la interacción entre la escala temporal, la meteorología y el uso del suelo, donde la cobertura vegetal amortigua los niveles de contaminación, mientras que la industria, el tráfico pesado diésel y el suelo expuesto favorecen su acumulación y resuspensión.

Palabras clave: contaminación atmosférica, calidad del aire, material particulado urbano, estaciones de monitoreo, dispersión atmosférica

ABSTRACT

Fine particulate matter pollution is a critical environmental challenge in urban metropolises, where its concentration varies with temporal and microclimatic factors. In this study, we evaluated the association between meteorological variables and $PM_{2.5}$ and PM_{10} at the Santa Anita and Campo de Marte (Jesús María) stations in Lima from 2015 to 2023. Hourly data from SENAMHI were used at annual, monthly, and hourly scales and analyzed using descriptive statistics, Student's t-test, time series analysis, wind roses, and Spearman's correlation. Santa Anita consistently recorded higher levels, with PM_{10} averages of $84.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2019, $77.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in September, and a diurnal peak of $82.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (14:00 h). In contrast, Campo de Marte presented lower concentrations and a continuous reduction in PM_{10} (from $40.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2015 to $14.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2023). Significant microenvironmental differences were evidenced: higher average ventilation and precipitation in Santa Anita, and higher relative humidity in Campo de Marte. At the monthly scale, an inverse relationship between temperature and $PM_{2.5}$ was evident ($p = -0.63$), and at the annual scale, a positive association between humidity and PM_{10} was observed ($p = 0.50$). The study concluded that the temporal behavior of particulate matter depends on the interaction among time scale, meteorology, and land use, with vegetative cover buffering pollution levels, whereas industry, heavy diesel traffic, and exposed soil favor its accumulation and resuspension.

Keywords: atmospheric pollution, air quality, urban particulate matter, monitoring stations, atmospheric dispersion



1. Introducción

La contaminación atmosférica por material particulado constituye un problema ambiental y sanitario de alcance mundial, ya que incrementa la morbilidad, la mortalidad y la carga global de enfermedad en la población expuesta (Cohen *et al.*, 2017). En este contexto, Chow *et al.* (2006) sostienen que la evidencia epidemiológica ha demostrado una relación consistente entre la exposición al material particulado y los efectos adversos sobre la salud humana, especialmente a nivel cardiopulmonar. El PM_{10} , por su diámetro aerodinámico menor de $10\ \mu m$, representa un problema de salud mundial debido a sus efectos a corto y largo plazo, así como a su capacidad de fijarse en el sistema respiratorio superior; esta problemática se intensifica en megaciudades afectadas por la industrialización, el consumo energético y el alto flujo vehicular (Cabello-Torres *et al.*, 2022).

El PM_{10} corresponde a una fracción del material particulado atmosférico asociada a partículas inhalables; según Gugamsetty *et al.* (2012), las partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} se originan principalmente en sal marina, polvo del suelo resuspendido, construcción/demolición, emisiones vehiculares no asociadas al escape y emisiones industriales fugitivas. Su concentración, expresada comúnmente en $\mu g/m^3$, no debe interpretarse como un valor aislado, sino como una variable ambiental con comportamiento temporal y espacial, ya que en Lima-Callao se han observado variaciones según la estación, la zona urbana, la dirección de los vientos locales y la inversión térmica (Silva *et al.*, 2017). También la relación entre material particulado y meteorología permite interpretar procesos de transporte, acumulación o reducción de partículas, debido a que variables como velocidad del viento, temperatura del aire y humedad relativa se asocian con cambios horarios y mensuales del $PM_{2.5}/PM_{10}$ en Lima-Callao (Espinoza-Guillen *et al.*, 2024). En ese sentido, la dispersión del PM_{10} puede analizarse mediante la variación de sus concentraciones frente a condiciones meteorológicas como viento, temperatura, humedad y precipitación, variables empleadas en estudios de interacción entre partículas y meteorología urbana (Islam *et al.*, 2023).

Diversas investigaciones han evaluado la relación entre el $PM_{2.5}$ y el PM_{10} , así como la variabilidad temporal y las condiciones meteorológicas en ciudades urbanas. Dung *et al.* (2019) en Hanoi analizaron datos de PM_{10} , temperatura, humedad y velocidad del viento, y encontraron variaciones estacionales y correlaciones inversas entre el PM_{10} y la mayoría de los factores meteorológicos, con mayores concentraciones en periodos secos y menores en periodos húmedos. En Lima Metropolitana, Sánchez-Ccoyllo *et al.* (2018) aplicaron el modelo WRF-Chem para simular PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante abril de 2016; reportaron concentraciones elevadas en la estación de Santa Anita y relacionaron el comportamiento de los contaminantes con la

temperatura, la humedad relativa, el viento, la topografía y el inventario de emisiones. Por su parte, Encalada-Malca *et al.* (2021) desarrollaron una visualización espaciotemporal de concentraciones horarias de PM_{10} en estaciones de Lima Metropolitana, incluida Jesús María, y encontraron diferencias entre zonas de monitoreo, con mayores concentraciones hacia el este de la ciudad y mejores condiciones relativas en estaciones del centro y del norte. Estos antecedentes muestran que el $PM_{2.5}$ y el PM_{10} no responden solo a las fuentes de emisión, sino también a su variación temporal, a la ubicación urbana y a las condiciones meteorológicas, que pueden favorecer su acumulación o dispersión.

Aunque la evidencia disponible confirma la importancia de estudiar el material particulado en Lima, todavía persiste una brecha en el análisis específico de la dispersión de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en función de variables meteorológicas, así como en la comparación temporal amplia entre distritos urbanos. Por un lado, las investigaciones epidemiológicas en Lima han priorizado el $PM_{2.5}$ y sus efectos sanitarios y la mortalidad cardiorrespiratoria diaria, pero no explican directamente el comportamiento del PM_{10} frente al viento, la humedad, la temperatura y la precipitación (Tapia *et al.*, 2020). Por otro lado, los estudios sobre PM_{10} en distritos de Lima han aportado información sobre fuentes contaminantes, composición química o emisiones puntuales, pero se han desarrollado en zonas como San Juan de Lurigancho, Puente Piedra y Carabayllo, sin centrarse en la comparación entre las estaciones de Santa Anita y Jesús María (Valverde Flores, 2016; Ilizarbe-González *et al.*, 2020). También los modelos de exposición construidos para Lima han integrado información meteorológica y espacial, pero principalmente para estimar $PM_{2.5}$, lo que refuerza la necesidad de analizar el PM_{10} con datos observados y series temporales de mayor duración (Vu *et al.*, 2019). Por ello, esta investigación se justifica porque permitirá evaluar cómo las condiciones meteorológicas pueden favorecer la acumulación o la dispersión de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en dos estaciones ubicadas en distritos con dinámicas urbanas distintas.

Por lo tanto, el objetivo general de esta investigación es analizar la asociación entre las variables meteorológicas y las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} registradas en las estaciones de monitoreo ubicadas en los distritos de Santa Anita y Jesús María, Lima, Perú, durante el periodo 2015-2023. Se busca: (1) evaluar la tendencia temporal anual, mensual y horaria de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} ; (2) analizar el comportamiento temporal de la precipitación, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento en las áreas de influencia de ambas estaciones; y (3) determinar el grado de correlación entre las variables meteorológicas y los niveles de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Con ello, se espera identificar patrones de acumulación y dispersión de material particulado, contrastar las diferencias microambientales entre ambas estaciones y

generar información útil para la gestión y la comprensión de la calidad del aire urbano en Lima Metropolitana.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló con base en la información registrada por dos estaciones de monitoreo continuo de Senamhi, ubicadas en los distritos de Santa Anita y Jesús María, en Lima Metropolitana (Perú). La selección obedeció a la disponibilidad de registros horarios continuos de material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) y variables meteorológicas pareadas durante el periodo 2015-2023 (Figura 1).

La estación Santa Anita se ubica al este de Lima (10.69 km², 196 214 habitantes [INEI, 2017]). Su microambiente presenta una intensa actividad comercial, industrial y logística. Destaca por el tránsito pesado a diésel y por superficies con suelo descubierto que favorecen la resuspensión de polvo. La estación Campo de Marte se sitúa en el distrito de Jesús María (4.57 km², 75 359 habitantes [INEI, 2017]). Corresponde a un entorno residencial, comercial y de servicios (Info Perú, 2017). La estación colinda con el parque Campo de Marte, cuya cobertura vegetal actúa como sumidero natural y amortiguador de contaminantes. Esta diferencia en el uso del suelo permite evaluar la asociación entre la meteorología y el material particulado en dos microambientes representativos. El contexto de Lima se caracteriza por un clima costero hiperárido, precipitaciones escasas (lloviznas de baja intensidad) y barreras topográficas que limitan la ventilación local (Campos Díaz *et al.*, 2024). Por ello, las mediciones reflejan las condiciones del área de cobertura de cada estación y no una distribución homogénea en toda la extensión de los distritos.

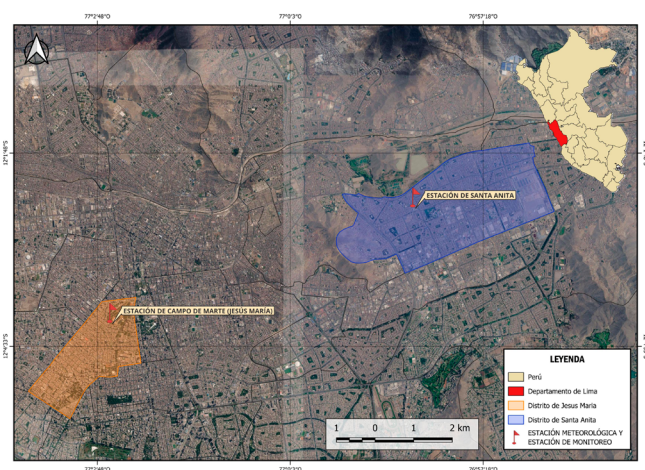


Figura 1. Mapa de ubicación de las estaciones de monitoreo y estaciones meteorológicas

2.2. Fuente de datos

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental, longitudinal y correlacional (asociativo). Se emplearon registros secundarios preexistentes sin manipulación de las condiciones atmosféricas. Se utilizaron dos estaciones de monitoreo del Senamhi: Santa Anita (12°2'34.88"S, 76°58'17.2"W) y Campo de Marte en Jesús María (12°4'14.03"S, 77°2'35.3"W). Ambas operan como puntos representativos de sus respectivos microambientes comercial/industrial y residencial/comercial.

a) Datos de $PM_{2.5}$ y PM_{10}

Los registros horarios de $PM_{2.5}$ y PM_{10} (2015-2023) se obtuvieron del portal del Senamhi para las estaciones Santa Anita (<https://www.senamhi.gob.pe/?e=112208&p=calidad-del-aire-estacion>) y Campo de Marte (<https://www.senamhi.gob.pe/?e=112194&p=calidad-del-aire-estacion>). La base de datos incluyó la fecha, la hora, la estación, el distrito, las coordenadas y la concentración en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta estructura metodológica se basó en Campos Díaz *et al.*, (2024) y en investigaciones previas en Lima, y ordenó la información por estación y año antes del análisis temporal.

b) Datos meteorológicos

Las variables meteorológicas incluyeron temperatura (°C), precipitación (mm), humedad relativa (%), dirección (°) y velocidad del viento (m/s). Se priorizaron los datos oficiales del Senamhi (<https://www.senamhi.gob.pe/servicios/?p=estaciones>). Ante la falta de continuidad en algunos periodos (principalmente entre 2015 y 2021), la serie se complementó con datos de NASA POWER (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>). Esta fuente utiliza el modelo de reanálisis MERRA-2 (0.5° × 0.625°) y descarga series horarias en formatos CSV.

El empleo de NASA POWER como fuente secundaria se justificó por su validación internacional frente a estaciones terrestres del National Center for Environmental Information, Integrated Surface Database y Global Summary of the Day. Este producto ha sido evaluado con éxito en estudios ambientales realizados por Rodrigues y Braga, (2021) en Portugal y por Negm *et al.* (2017) en Sicilia. Para Lima, la fuente es confiable porque la temperatura y la humedad responden a patrones atmosféricos de macroescala (influencia marina) bien capturados por MERRA-2, lo que mantiene coherencia con las tendencias de Senamhi. Por ello, se utilizó únicamente para rellenar vacíos y no como fuente principal.

2.3. Procesamiento de la información

Se seleccionaron las escalas anual, mensual y horaria para analizar la tendencia a largo plazo, la variabilidad estacional y el ciclo diurno de dispersión. Se omitió la escala diaria continua porque el elevado volumen de registros en

nueve años introduce ruido de corto plazo que enmascara los patrones macroclimáticos y la dinámica intradía.

a) Homologación temporal

Después de la organización inicial, se crearon columnas de fecha y hora, con la finalidad de unir los datos horarios de $PM_{2.5}$ y PM_{10} con las variables meteorológicas correspondientes al mismo distrito, día y hora. En esta etapa se identificaron registros duplicados, valores vacíos y datos inconsistentes. Los duplicados fueron revisados y depurados, mientras que los valores faltantes no fueron eliminados directamente, sino que se completaron mediante interpolación de pronóstico lineal, disponible como función en MS Excel, utilizando el criterio temporal cuando correspondían a vacíos horarios cortos dentro de la serie. Los datos faltantes correspondieron únicamente al 2.8 % del total de registros horarios del periodo 2015-2023. El proceso de interpolación lineal se aplicó de manera restrictiva solo a vacíos de corta duración (de 1 a 3 horas continuas), un procedimiento que preserva la estructura de la serie sin atenuar ni generar falsos picos ni caídas drásticas en las concentraciones de contaminantes.

b) Comportamiento del viento

Los registros de dirección ($^{\circ}$) y velocidad del viento (m/s) correspondientes a las coordenadas de cada estación se procesaron en el *software* WRPLOT View. Se generaron rosas de viento para determinar las frecuencias de dirección y los rangos de velocidad predominantes en los microambientes de Santa Anita y Campo de Marte, en Jesús María, durante el periodo 2015-2023.

c) Integración y tendencia temporal de variables

Se construyó una base de datos integrada horaria por estación que emparejó las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, la temperatura, la precipitación, la humedad relativa y la velocidad del viento. Para el análisis temporal, las variables se agruparon en promedios anuales, mensuales y horarios (diurnos). En el caso de la precipitación, los valores corresponden a promedios de la tasa horaria (mm) y no a montos acumulados (Campos Díaz *et al.*, 2024). Esto aseguró la homogeneidad de escalas al comparar la meteorología con el material particulado. El flujo metodológico general se resume en la Figura 2.

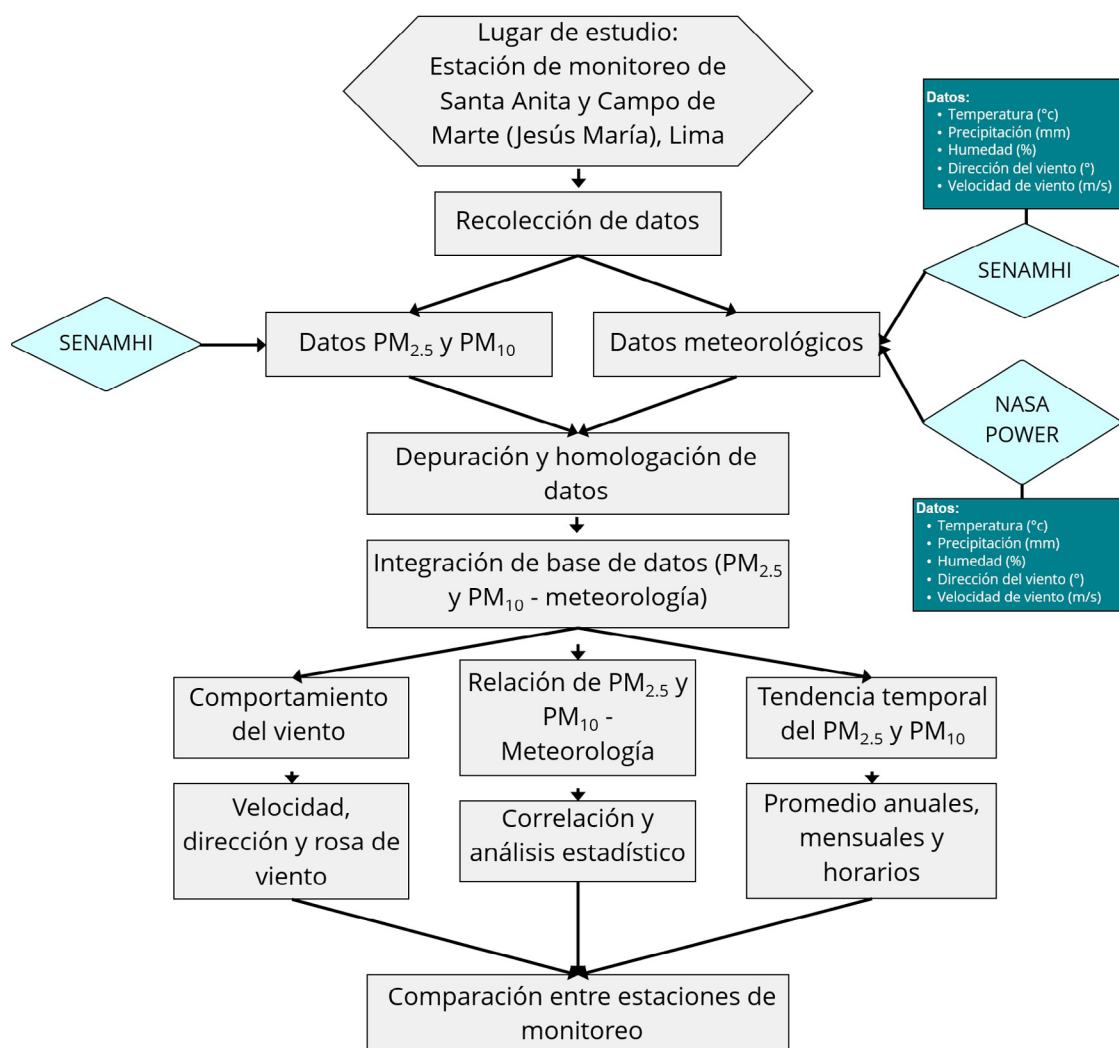


Figura 2. Diagrama de flujo metodológico para el análisis de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y variables meteorológicas.

2.4. Análisis estadístico de los datos

El análisis estadístico se realizó en RStudio (paquetes dplyr, ggplot2, tidyr y lubridate) a partir de la base de datos horaria integrada (2015-2023). El procesamiento se estructuró por estación de monitoreo, contaminante ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) y escala temporal. En primera instancia, se calcularon estadísticas descriptivas para las concentraciones y variables meteorológicas en los microambientes de Santa Anita y Campo de Marte (Jesús María). Para evaluar las diferencias en las medias entre ambas estaciones, se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes. No se requirió prueba previa de normalidad para este análisis de medias debido al gran volumen de datos ($n > 3000$), sustentado en el teorema del límite central. La evaluación de la asociación entre la meteorología y el material particulado se realizó mediante el coeficiente de correlación de Spearman. Este método no paramétrico se seleccionó por su versatilidad para identificar relaciones monotónicas no lineales, frente al de Pearson. Asimismo, Spearman resulta técnicamente superior para series ambientales masivas, pues no exige normalidad bivariada y ofrece mayor robustez frente a valores atípicos o ruidos de medición en las estaciones. En la escala horaria, se detectó autocorrelación serial (dependencia temporal entre horas consecutivas). Por ello, el coeficiente de Spearman en esta escala se empleó con un enfoque exclusivamente exploratorio de asociación. La interpretación priorizó la magnitud y el sentido del coeficiente por encima de la significancia estadística (p-value), que tiende a inflarse debido al tamaño muestral elevado y a la persistencia temporal. Finalmente, el análisis de tendencia temporal se efectuó agrupando promedios anuales, mensuales y horarios. A estas series se les aplicaron modelos de regresión lineal simple, considerando el tiempo como variable independiente y la concentración del contaminante como variable dependiente. Esto permitió determinar la tasa de cambio y la dirección de la tendencia (creciente, decreciente o estable) durante el periodo 2015-2023.

3. Resultados

Los datos del periodo 2015-2023 evidencian marcadas diferencias temporales y espaciales entre las estaciones de Santa Anita y Campo de Marte en Jesús María según la prueba t de Student ($p < 0.05$). La estación Santa Anita registró de manera constante concentraciones más altas de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} , mientras que Campo de Marte, en Jesús María, presentó valores menores y de mayor estabilidad temporal.

3.1. Variación temporal de las concentraciones $PM_{2.5}$ y PM_{10}

La Figura 3 detalla el comportamiento anual, mensual y horario de las concentraciones promedio de material particulado en ambas estaciones. En la escala anual, el PM_{10} alcanzó sus niveles más altos en Santa Anita en

2019 ($84.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2016 ($80.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que en Campo de Marte mostró un marcado descenso hasta $14.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023 (Figura 3A). Para el $PM_{2.5}$, Santa Anita presentó un incremento puntual en 2020 con $69.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a diferencia de Campo de Marte, que mantuvo valores estables entre 13.72 y $19.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 3B). A escala mensual, la estación de Santa Anita registró los mayores promedios de ambos contaminantes, destacando el PM_{10} en septiembre con $77.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 3C) y el $PM_{2.5}$ en mayo con $39.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 3D). En la estación Campo de Marte, las concentraciones máximas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ también se registraron en mayo, hasta alcanzar $33.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $20.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Respecto al ciclo diurno, se identificó un pico a las 14:00 horas en ambos puntos (Figuras 3E y 3F). A esa hora, Santa Anita alcanzó valores de $82.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $43.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$, mientras que Campo de Marte, en Jesús María, registró $35.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $19.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$. En conjunto, la serie evidencia mayores concentraciones de material particulado en la estación de Santa Anita y una oscilación temporal más acentuada de PM_{10} que de $PM_{2.5}$.

3.2. Comportamiento temporal de la precipitación, temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento

Las variables meteorológicas presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ambas estaciones según la prueba t de Student ($p < 0.05$). En la precipitación promedio, la estación Santa Anita presentó los mayores valores en las tres escalas analizadas (Figuras 4A-C). El valor anual más alto en Santa Anita se registró en 2023, con 100.5 mm ; a nivel mensual, febrero alcanzó un máximo de 24.54 mm ; y, a escala horaria, se observó un pico a las 13:00 horas con 0.025 mm/h . En la estación Campo de Marte (Jesús María), los valores fueron menores: destacaron un máximo anual de 20.80 mm en 2018 y un máximo mensual de 1.94 mm en agosto.

La temperatura mostró comportamientos similares en ambos distritos (Figuras 4D-F). Durante 2023, la estación Santa Anita alcanzó una media anual de 21.43°C y Campo de Marte de 21.10°C . En el ciclo diurno, el pico térmico en Santa Anita ocurrió a las 16:00 horas con 22.66°C , mientras que en Campo de Marte se registró a las 13:00 horas con 21.47°C . Por su parte, la humedad relativa fue más elevada en Campo de Marte, con valores anuales entre 82% y 84% (Figuras 4G-I). En contraste, Santa Anita mostró una reducción más marcada durante la tarde, al descender hasta 54.28% a las 15:00 horas. La velocidad del viento fue consistentemente superior en la estación Santa Anita (Figuras 4J-L). Esta estación registró un máximo anual de 3.21 m/s en 2015 y un máximo horario de 4.31 m/s a las 16:00 horas. Por el contrario, la estación Campo de Marte presentó menor ventilación, ya que alcanzó un pico horario máximo de solo 1.89 m/s a las 15:00 horas.



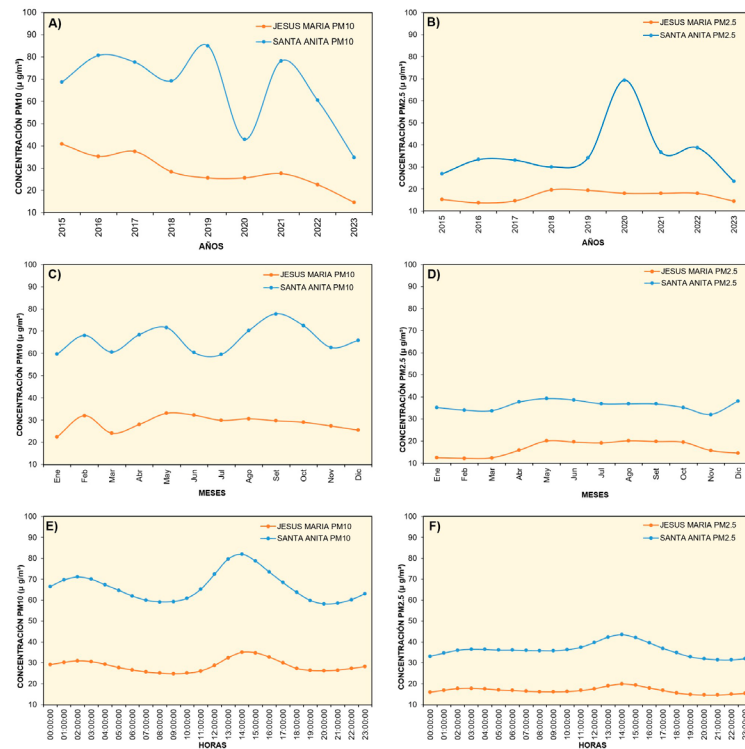


Figura 3. Variación temporal anual, mensual y horaria de las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en las estaciones de monitoreo de los distritos de Jesús María y Santa Anita, Lima (Perú), 2015-2023. A) PM_{10} anual; B) $PM_{2.5}$ anual; C) PM_{10} mensual; D) $PM_{2.5}$ mensual; E) PM_{10} horario; F) $PM_{2.5}$ horario.

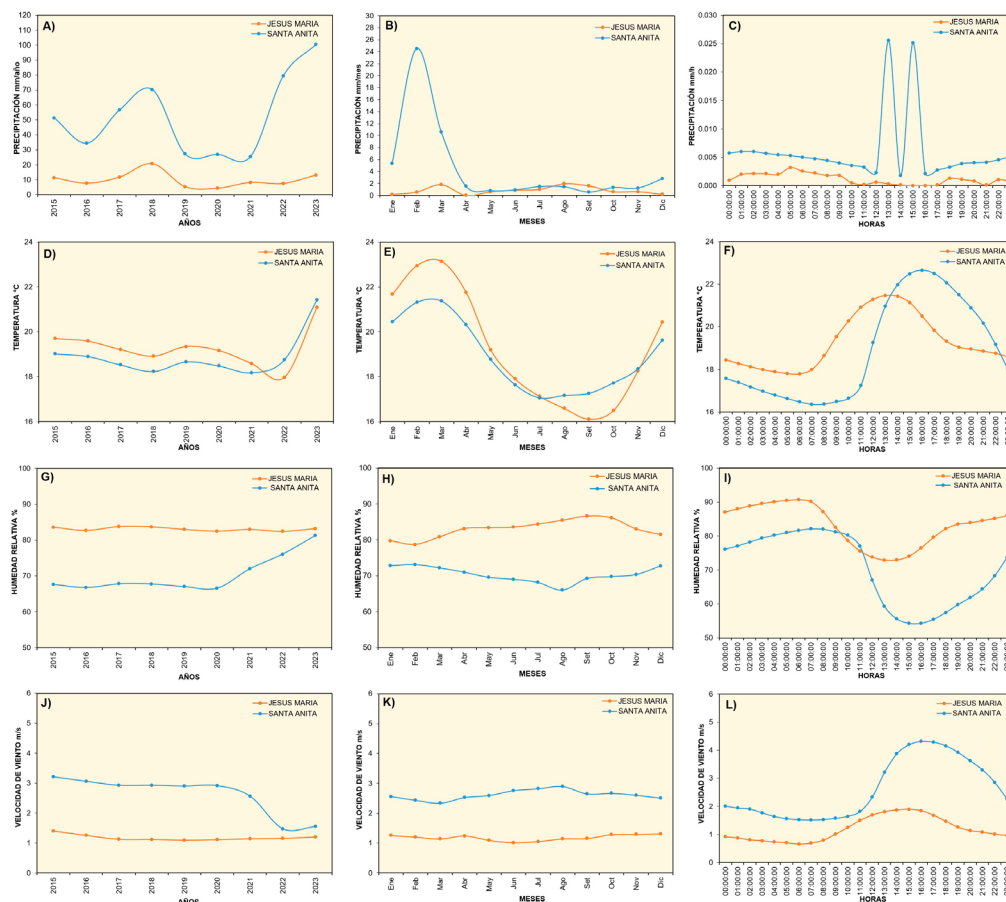


Figura 4. Comportamiento temporal de la precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento en las estaciones de monitoreo de los distritos de Jesús María y Santa Anita, Lima (Perú), 2015-2023. A-C) precipitación anual, mensual y horaria; D-F) temperatura anual, mensual y horaria; G-I) humedad relativa anual, mensual y horaria; J-L) velocidad del viento anual, mensual y horaria.

La Figura 5 presenta el comportamiento de la dirección y velocidad del viento en las estaciones de monitoreo de los distritos de Santa Anita y Jesús María durante el periodo 2015-2023. En la Figura 5A, correspondiente a la estación de Santa Anita, se observa que los vientos se concentraron principalmente en el sector sur, con componentes hacia el sur-sureste; la velocidad media fue de 2.61 m/s y con 2.52 % de calmas, lo que indica un régimen de viento más constante y con menor frecuencia de condiciones sin movimiento atmosférico. En la Figura 5B, correspondiente a las estaciones de Jesús María, el viento presentó predominio desde el suroeste, con una velocidad media de 1.15 m/s y 13.54 % de calmas, lo que evidencia un régimen de viento más débil y con mayor frecuencia de estabilidad atmosférica.

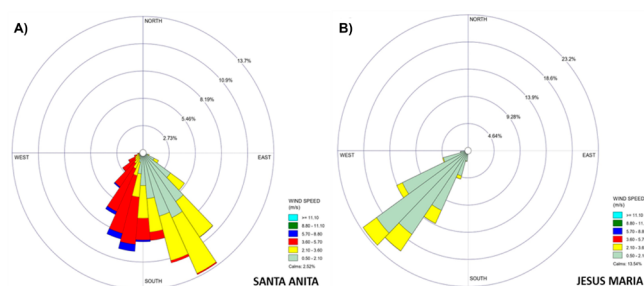


Figura 5. Comportamiento de la dirección y velocidad del viento en las estaciones de monitoreo de los distritos de Santa Anita y Jesús María durante el periodo 2015-2023. A) estación Santa Anita; B) estación Jesús María.

3.3. Relación de las variables meteorológicas con las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10}

La Figura 6 sintetiza las correlaciones de Spearman (ρ) entre los parámetros meteorológicos y el material particulado en las tres escalas temporales evaluadas. En la escala anual se registraron los coeficientes de mayor magnitud (Figuras 6A y 6B). En la estación Campo de Marte (Jesús María) se observó una fuerte asociación inversa significativa ($p < 0.05$) entre la velocidad del viento y el $PM_{2.5}$ ($\rho = -0.77$), así como una relación directa no significativa entre la humedad relativa y el PM_{10} ($\rho = 0.50$). Por su parte, en la estación Santa Anita predominaron las asociaciones inversas no significativas de la precipitación con ambos contaminantes, alcanzando un $\rho = -0.57$ para $PM_{2.5}$ y un $\rho = 0.52$ para PM_{10} . A escala mensual, la temperatura presentó una asociación negativa altamente significativa y más acentuada con el $PM_{2.5}$, con $\rho = -0.63$ en Campo de Marte (Jesús María) y $\rho = -0.38$ en Santa Anita (Figuras 6C y 6D). Asimismo, en Campo de Marte (Jesús María) la humedad relativa mantuvo una correlación positiva significativa con el $PM_{2.5}$ ($\rho = 0.38$).

En la escala horaria, los coeficientes mostraron una menor magnitud, pero todos fueron estadísticamente significativos ($p < 0.05$; Figuras 6E y 6F). En Campo de Marte (Jesús María), se observó una asociación negativa

altamente significativa entre la temperatura y el $PM_{2.5}$ ($\rho = -0.34$). En Santa Anita se observó una relación inversa entre la humedad y el PM_{10} ($\rho = -0.20$), acompañada de una correlación directa entre la velocidad del viento y el PM_{10} ($\rho = 0.17$). En conjunto, los valores evidencian que la magnitud y el sentido de las asociaciones varían según la escala temporal de análisis.

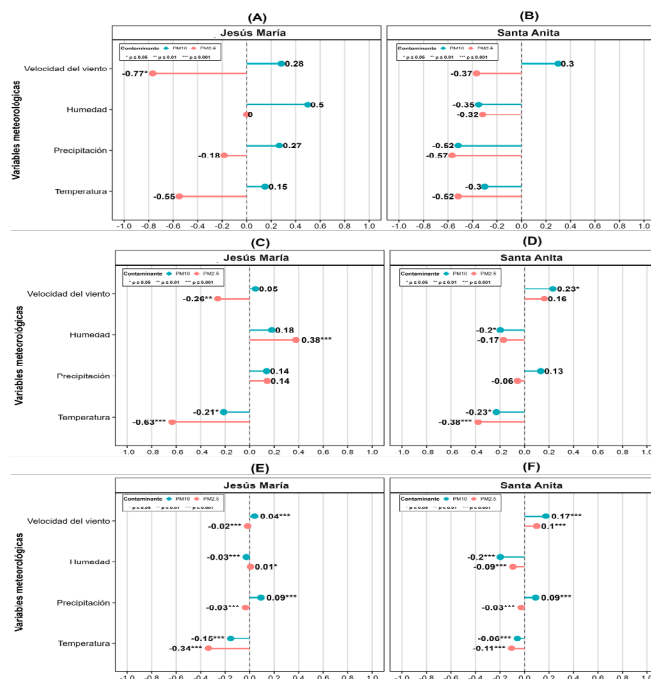


Figura 6. Correlación de Spearman entre variables meteorológicas y concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en las estaciones de monitoreo de los distritos de Jesús María y Santa Anita, Lima (Perú), periodo 2015-2023. A) Estación Jesús María anual; B) estación Santa Anita anual; C) estación Jesús María mensual; D) estación Santa Anita mensual; E) estación Jesús María horaria; F) estación Santa Anita horaria.

4. Discusión

Las marcadas diferencias espaciales observadas entre las estaciones de monitoreo obedecen a la interacción entre el uso del suelo, la topografía y las dinámicas microambientales de la cuenca atmosférica de Lima. En la estación Campo de Marte (Jesús María), los menores niveles de PM_{10} y $PM_{2.5}$ reflejan la función reguladora de la cobertura vegetal circundante, que puede actuar como un sumidero local y una barrera física, mediante procesos de deposición seca sobre el follaje y la atenuación de la humedad. En contraste, la estación Santa Anita se sitúa en un nodo industrial, comercial y logístico caracterizado por una alta densidad de tránsito vehicular pesado impulsado por diésel y por extensas áreas con suelo descubierto, factores que potencian las emisiones primarias por combustión y la resuspensión mecánica de polvo. Estas observaciones concuerdan con los picos horarios reportados por Campos Díaz *et al.* (2024) y con los hallazgos de Encalada-Malca *et al.* (2021), quienes documentaron

concentraciones sustancialmente mayores en el sector este de Lima (promedios diarios que alcanzaron los $435 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Huachipa) que en el centro de la metrópoli. Asimismo, la circulación de vientos alisios con dirección suroeste desplaza paulatinamente los contaminantes desde la franja costera hacia el interior, acumulándolos en el sector oriental debido al acoplamiento con la barrera topográfica andina, un patrón respaldado por estudios en la cuenca de Lima (Vu *et al.*, 2019; Romero *et al.*, 2020; Cabello-Torres *et al.*, 2022; Espinoza-Guillen *et al.*, 2025).

El análisis meteorológico confirma que la precipitación en el litoral peruano —caracterizada por lloviznas de muy baja intensidad o garúas— no alcanza el umbral necesario para ejercer un efecto de lavado atmosférico sobre el material particulado. Esta dinámica difiere drásticamente de lo reportado en climas templados o tropicales, donde las lluvias intensas constituyen la principal vía de deposición húmeda y de remoción de aerosoles (Guo *et al.*, 2016; Zheng *et al.*, 2019). Por ende, en la costa hiperárida peruana, la modulación del material particulado depende fundamentalmente de los regímenes de ventilación y de la humedad relativa (Giráldez *et al.*, 2022; Aliaga-Nestares *et al.*, 2023; Cobeñas *et al.*, 2025). Resulta indispensable precisar que los datos de precipitación evaluados corresponden a promedios de la tasa horaria (mm/h) y no a volúmenes acumulados en eventos episódicos, por lo que no deben compararse con registros pluviales extremos de 24 horas ni con promedios anuales de estaciones costeras (Esenarro *et al.*, 2024; Cobeñas *et al.*, 2025). Mientras que el incremento diurno del viento en Santa Anita promueve episodios vespertinos de ventilación local, la humedad constante en Campo de Marte (82-84 %) evidencia una fuerte advección marina que regula el microclima céntrico.

La variabilidad en la magnitud y el signo de las correlaciones de Spearman (ρ) según la escala temporal pone de manifiesto que las relaciones entre la meteorología y los contaminantes varían en función del nivel de agregación temporal. En la escala horaria, las asociaciones exhibieron magnitudes moderadas o bajas, como la relación inversa entre la temperatura y el $\text{PM}_{2.5}$ en Campo de Marte y entre la humedad y el PM_{10} en Santa Anita. Por el contrario, en las escalas mensual y anual, la atenuación del ruido de corto plazo permitió capturar asociaciones de mayor escala, como la marcada correlación negativa entre la velocidad del viento y el $\text{PM}_{2.5}$ en Campo de Marte, y entre la precipitación y el $\text{PM}_{2.5}$ en Santa Anita. Estos patrones son consistentes con modelos empíricos desarrollados en Lima Sur (Cabello-Torres *et al.*, 2022) y con investigaciones en entornos urbanos áridos (Dung *et al.*, 2019; Reátegui-Romero *et al.*, 2021; Sirithian y Thanatrakolsri, 2022; Islam *et al.*, 2023). Los menores niveles de contaminación en Campo de Marte (Jesús María) podrían deberse a factores como la proximidad a la costa, la cobertura vegetal, el predominio de vehículos ligeros y las superficies pavimentadas, que limitan la resuspensión de polvo. Mientras tanto, en Santa Anita la cercanía al

piedemonte andino interrumpe la circulación del viento, lo que, sumado a suelos descubiertos, escasa vegetación y un denso flujo de transporte pesado a diésel, favorece la acumulación y resuspensión de material particulado (Cano *et al.*, 2024).

La caracterización temporal y microambiental obtenida aporta evidencia técnica clave para el diseño de políticas públicas diferenciadas en Lima Metropolitana. La recurrente superación de concentraciones en la estación Santa Anita subraya la necesidad de concentrar allí acciones prioritarias de fiscalización ambiental, tales como la pavimentación de áreas descubiertas, la regulación del transporte pesado a diésel y la ordenación de actividades industriales. Además, la identificación del pico diurno de concentración a las 14:00 horas en ambas estaciones ofrece una ventana temporal clara para emitir alertas preventivas y modular el tráfico vehicular. La urgencia de estas intervenciones queda respaldada por los estudios epidemiológicos locales de Tapia *et al.* (2020), quienes asociaron incrementos de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ con un aumento significativo en la mortalidad cardiorrespiratoria diaria, y de Davila Cordova *et al.* (2020), quienes vincularon el incremento de material particulado con un aumento del 16-19 % en casos de neumonía y del 10 % en asma/bronquiolitis en niños menores de cinco años. En esta misma línea, resulta conveniente promover la implementación de infraestructura verde con especies arbóreas adaptadas al ecosistema local, ya que contribuyen al enfriamiento urbano mediante sombra y evapotranspiración, y en ciertos contextos su estructura también puede modificar el flujo del viento local y mejorar la calidad del aire (Cano *et al.*, 2025; Molina-Barrenechea *et al.*, 2025).

Finalmente, las limitaciones inherentes al estudio exigen una interpretación cautelosa de los resultados. La discontinuidad en los registros terrestres del Senamhi obligó a complementar las series con datos del reanálisis MERRA-2 (NASA POWER). Aunque existe una discrepancia de escala espacial entre las observaciones puntuales y la grilla satelital ($0.5^\circ \times 0.625^\circ$), esta aproximación permitió consolidar una serie homogénea de nueve años sin distorsionar los ciclos estacionales e interanuales. Por otro lado, la aplicación de interpolación lineal restrictiva para el 2.8 % de los datos preservó la estructura temporal sin introducir picos sesgados. Es determinante aclarar que las mediciones caracterizan el microambiente circundante a cada estación y no representan la exposición homogénea de la totalidad de los distritos. En la escala horaria, la autocorrelación serial intrínseca de los datos atmosféricos exige interpretar los valores de ρ con carácter estrictamente exploratorio, por lo que se recomienda, para futuras investigaciones, el empleo de modelos de series de tiempo no lineales o estocásticos (como ARIMAX o modelos aditivos generalizados, GAM) que remuevan la memoria temporal antes de evaluar las relaciones bivariadas.

5. Conclusiones

El estudio demostró la existencia de asociaciones significativas entre las variables meteorológicas y la dinámica temporal de PM₁₀ y PM_{2.5} en las estaciones Santa Anita y Campo de Marte (Jesús María) durante el periodo 2015-2023. Santa Anita registró la mayor contaminación, con picos de PM₁₀ de 84.99 µg/m³ (anual, 2019), 77.77 µg/m³ (mensual, septiembre) y 82.03 µg/m³ (diurno, 14:00 h), además de un aumento atípico de PM_{2.5} en 2020 (69.36 µg/m³). En contraste, Campo de Marte presentó concentraciones menores, estabilidad en PM_{2.5} y un descenso sostenido de PM₁₀, al pasar de 40.80 µg/m³ en 2015 a 14.58 µg/m³ en 2023. Microclimáticamente, Santa Anita registró mayor ventilación y precipitación, mientras Campo de Marte presentó mayor humedad relativa. Las correlaciones variaron según la escala: a nivel anual destacaron los coeficientes de mayor magnitud, con una fuerte relación inversa entre viento y PM_{2.5} en Campo de Marte ($p = -0.77$, $p < 0.05$). A escala mensual, la temperatura se asoció inversamente con el PM_{2.5} ($p = -0.63$ en Campo de Marte; $p = -0.38$ en Santa Anita) y la humedad positivamente en Campo de Marte ($p = 0.38$). A escala horaria, todas las relaciones fueron significativas ($p < 0.05$), pero destacó la asociación negativa temperatura-PM_{2.5} en Campo de Marte ($p = -0.34$), la relación inversa humedad-PM₁₀ en Santa Anita ($p = -0.20$) y la correlación directa viento-PM₁₀ en esta última ($p = 0.17$) vinculada a la resuspensión diurna.

El entorno microambiental y el uso del suelo constituyen factores determinantes de estos patrones. La infraestructura verde que rodea la estación Campo de Marte actúa como sumidero y amortiguador naturales de contaminantes. Mientras tanto, la convergencia de transporte pesado a diésel, la actividad industrial y las superficies de suelo descubierto en Santa Anita favorecen la acumulación y resuspensión del material particulado. Estos hallazgos aportan evidencia técnica para orientar la gestión de la calidad del aire en Lima Metropolitana, lo que permite priorizar las zonas críticas y programar medidas preventivas según el ciclo diurno y estacional. Se recomienda que investigaciones futuras integren una red de estaciones más amplia, inventarios de tráfico vehicular en tiempo real y modelos estocásticos de dispersión atmosférica para profundizar en el análisis espacial.

Contribución de autoría

Nación Myrdal: concepción, diseño y ejecución de la investigación, análisis e interpretación de los datos, redacción del manuscrito y aprobación de la versión final.

Cano Deyvis: supervisión académica, revisión científica del manuscrito y aprobación de la versión final.

Álvarez Jhanet: supervisión de la investigación, orientación metodológica, revisión crítica del manuscrito y aprobación de la versión final.

Caldas Jhadira: desarrollo metodológico, procesamiento de datos y revisión crítica del manuscrito.

Campos Guiselle: revisión metodológica, validación de resultados y revisión crítica del manuscrito.

Ccora Sonaly: interpretación de los resultados, revisión científica del contenido y aprobación de la versión final del manuscrito.

Vargas Mirelly: supervisión del estudio, revisión final del manuscrito y aprobación de la versión final para su publicación.

Zevallos Netxy: análisis de resultados, revisión técnica del manuscrito y aprobación de la versión final.

Fuentes de financiamiento

Esta investigación no contó con financiamiento para su ejecución. Sin embargo, sí contó con la ayuda técnica del Programa Académico de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Huánuco.

Potenciales conflictos de interés

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Declaración de inteligencia artificial

Se usó ChatGPT (OpenAI) para la evaluación de la metodología, la verificación de los análisis y algunas cuestiones de corrección de errores. Además, se empleó Gemini (Google) para el apoyo en la redacción de párrafos concretos a partir de ideas previamente elaboradas.

Agradecimiento

A los docentes del Programa académico de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Huánuco, por el impulso y la motivación para atreverse a más y consolidar nuestro trabajo en una publicación científica, lo que representa un logro significativo para los autores.



Referencias bibliográficas

- Aliaga-Nestares, V., De La Cruz, G. y Takahashi, K. (2023). «Comparison between the Operational and Statistical Daily Maximum and Minimum Temperature Forecasts on the Central Coast of Peru». *Weather and Forecasting*, 38(4), pp. 555-570. Available at: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-21-0094.1>
- Cabello-Torres, R. J., Ponce Estela, M. A., Sánchez-Ccoyllo, O., Romero-Cabello, E. A., García Ávila, F. F., Castañeda-Olivera, C. A., Valdiviezo-Gonzales, L., Quispe Eulogio, C. E., Huamán De La Cruz, A. R. y López-Gonzales, J. L. (2022). «Statistical modeling approach for PM₁₀ prediction before and during confinement by COVID-19 in South Lima, Perú». *Scientific Reports*, 12, 16737. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20904-2>
- Campos Díaz, A. H., Muñoz Vilela, A. J., Alvarez-Tolentino, D., Huamán De La Cruz, A., Unchupaico Payano, I., Camargo Caysahuana, A., Mariños Alfaro, J. y Unchupaico Fermin, J. (2024). «A Spatio-Temporal Behavior of PM_{2.5} and PM₁₀ on Changes of Their Concentration Levels in the Metropolitan Area of Lima». *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 19(10), pp. 4083-4092. Available at: <https://doi.org/10.18280/IJSDP.191036>
- Cano, D., Cacciuttolo, C., Haller, A., Rosario, C., Guerra, J. C. y Garcia de Oliveira, G. (2024). «Spatio-temporal tendencies of urban land surface temperature on the Andean piedmont under climate change: A case study of Metropolitan Lima, Peru (1986-2024)». *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 36, 101378. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.RSASE.2024.101378>
- Cano, D., Cacciuttolo, C., Rosario, C., Barzola, R., Pizarro, S., Ramirez, D. W., Freitas, M. y Bremer, U. F. (2025). «Performance of Green Areas in Mitigating the Alteration of Land Surface Temperature in Urban Zones of Lima, Peru». *Remote Sensing*, 17(8), 1323. Available at: <https://doi.org/10.3390/RS17081323>
- Chow, J. C., Watson, J. G., Mauderly, J. L., Costa, D. L., Wyzga, R. E., Vedal, S., Hidy, G. M., Altshuler, S. L., Marrack, D., Heuss, J. M., Wolff, G. T., Arden Pope III, C. y Dockery, D. W. (2006). «Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect». *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(10), pp. 1368-1380. Available at: <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464545>
- Cobena, P., Esenarro, D., Vilchez Cairo, J., Gómez, A., Prado, M., Pérez Sosa, A. A., Raymundo, V., Pinedo Garcia, F. L., Peña, J. y Chang, L. (2025). «Strategies for the Revalorization of the Natural Environment and Landscape Regeneration at La Herradura Beach, Chorrillos, Peru 2024». *Urban Science*, 10(1), 2. Available at: <https://doi.org/10.3390/URBANSCL10010002>
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Ross Anderson, H., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., Pope III, C. A., Shin, H., Straif, K., Shaddick, G., Thomas, M., van Dingenen, R., van Donkelaar, A., Vos, T., PhDe Prof Murray, DPHile, C. J. L. y Forouzanfar, M. H. (2017). «Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015». *The Lancet*, 389(10082), pp. 1907-1918. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
- Davila Cordova, J. E., Tapia Aguirre, V., Vasquez Apestegui, V., Ordoñez Ibarguen, L., Vu, V. N., Steenland, K. y Gonzales, G. F. (2020). «Association of PM_{2.5} concentration with health center outpatient visits for respiratory diseases of children under 5 years old in Lima, Peru». *Environmental Health*, 19(1), 7. Available at: <https://doi.org/10.1186/S12940-020-0564-5>
- Dung, N. A., Hong Son, D., The Duc Hanh, N. y Quang Tri, D. (2019). «Effect of Meteorological Factors on PM₁₀ Concentration in Hanoi, Vietnam». *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7(11), pp. 138-150. Available at: <https://doi.org/10.4236/GEP.2019.711010>
- Encalada-Malca, A. A., Cochachi-Bustamante, J. D., Canas Rodrigues, P., Salas, R. y López-Gonzales, J. L. (2021). «A Spatio-Temporal Visualization Approach of PM₁₀ Concentration Data in Metropolitan Lima». *Atmosphere*, 12(5), 609. Available at: <https://doi.org/10.3390/ATMOS12050609>
- Esenarro, D., Vasquez, P., Acosta-Banda, A. y Raymundo, V. (2024). «Green Infrastructure as a Sustainability Strategy for Biodiversity Preservation: The Case Study of Pantanos de Villa, Lima, Peru». *Urban Science*, 8(4), 156. Available at: <https://doi.org/10.3390/URBANSCL10040156>
- Espinoza-Guillen, J. A., Alderete-Malpartida, M. B., Navarro-Abarca, U. F. y Gómez-Muñoz, H. K. (2024). «Temporal variation of the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio and its association with meteorological factors in a South American megacity: Metropolitan Area of Lima-Callao, Peru». *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(5), 452. Available at: <https://doi.org/10.1007/S10661-024-12611-4>
- Espinoza-Guillen, J. A., Alderete-Malpartida, M. B., Roncal-Romero, F. D. y Vilcanqui-Sarmiento, J. C. (2025). «Identification of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) sources using bivariate polar plots and k-means clustering in a South American megacity: Metropolitan Area of Lima-Callao, Peru». *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(3), pp. 226. Available at: <https://doi.org/10.1007/S10661-025-13696-1>
- Giráldez, L., Silva, Y., Flores-Rojas, J. L. y Trasmonte, G. (2022). «Diagnosis of the Extreme Climate Events of Temperature and Precipitation in Metropolitan Lima during 1965-2013». *Climate*, 10(8), 112. Available at: <https://doi.org/10.3390/CL10080112>
- Gugamsetty, B., Wei, H., Liu, C.-N., Awasthi, A., Hsu, S.-C., Tsai, C.-J., Roam, G.-D., Wu, Y.-C. y Chen, C. F. (2012). «Source Characterization and Apportionment of PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{0.1} by Using Positive Matrix Factorization». *Aerosol and Air Quality Research*, 12(4), pp. 476-491. Available at: <https://doi.org/10.4209/AAQR.2012.04.0084>
- Guo, L. C., Zhang, Y., Lin, H., Zeng, W., Liu, T., Xiao, J., Rutherford, S., You, S. y Ma, W. (2016). «The washout effects of rainfall on atmospheric particulate pollution in two Chinese cities». *Environmental Pollution*, 215, pp. 195-202. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.003>
- Ilizarbe-González, G. M., Valdiviezo, J. G., Rojas Quincho, J. P., Cabello Torres, R. J. y Ugarte Alvan, C. A. (2020). «Chemical characteristics and identification of PM₁₀ sources in two districts of Lima, Peru». *DYNA*, 87(215), pp. 57-65. Available at: <https://doi.org/10.15446/DYNA.V87N215.83688>
- Info Perú. (2017). Distrito de Santa Anita. Available at: <https://www.iperu.org/distrito-de-santa-anita-provincia-de-lima>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2017). «Resultados Definitivos de los Censos Nacionales 2017». Available at: <https://censo2017.inei.gob.pe/resultados-definitivos-de-los-censos-nacionales-2017/>
- Islam, N., Reza Toha, T., Islam, M. M., Ahmed, T. (2023). «Spatio-temporal Variation of Meteorological Influence on PM_{2.5} and PM₁₀ over Major Urban Cities of Bangladesh». *Aerosol and Air Quality Research*, 23(1), 220082. Available at: <https://doi.org/10.4209/AAQR.220082>

- Molina-Barrenechea, I., Véliz-Rojas, M. F., Ibáñez-Blancas, A. N. y La Torre-Cuadros, M. (2025).** «Effect of green corridors on the mitigation of the urban heat island (UHI) in the district of Lince, Lima, Peru». *Atmósfera*, 39, pp. 383-399. Available at: <https://doi.org/10.20937/ATM.53434>
- Negm, A., Jabro, J. y Provenzano, G. (2017).** «Assessing the suitability of American National Aeronautics and Space Administration (NASA) agro-climatology archive to predict daily meteorological variables and reference evapotranspiration in Sicily, Italy». *Agricultural and Forest Meteorology*, 244-245, pp. 111-121. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.05.022>
- Reátegui-Romero, W., Zaldivar-Alvarez, W. F., Pacsi-Valdivia, S., Sánchez-Ccoyllo, O. R., García-Rivero, A. E. y Moya-Alvarez, A. (2021).** «Behavior of the Average Concentrations as Well as Their PM₁₀ and PM_{2.5} Variability in the Metropolitan Area of Lima, Peru: Case Study February and July 2016». *International Journal of Environmental Science and Development*, 12(7), pp. 204-213. Available at: <https://doi.org/10.18178/IJESD.2021.12.7.1341>
- Rodrigues, G. C. y Braga, R. P. (2021).** «Evaluation of NASA POWER reanalysis products to estimate daily weather variables in a hot summer mediterranean climate». *Agronomy*, 11(6), 1207. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/6/1207>
- Romero, Y., Díaz, C., Meldrum, I., Arias Velasquez, R. y Noel, J. (2020).** «Temporal and spatial analysis of traffic – Related pollutant under the influence of the seasonality and meteorological variables over an urban city in Peru». *Heliyon*, 6(6). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04029>
- Sánchez-Ccoyllo, O. R., Ordoñez-Aquino, C. G., Muñoz, Á. G., Llacza, A., Andrade, M. F., Liu, Y., Reátegui-Romero, W. y Brasseur, G. (2018).** «Modeling Study of the Particulate Matter in Lima with the WRF-Chem Model: Case Study of April 2016». *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(11), 10129. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6615757/>
- Silva, J., Rojas, J., Norabuena, M., Molina, C., Toro, R. A. y Leiva-Guzmán, M. A. (2017).** «Particulate matter levels in a South American megacity: the metropolitan area of Lima-Callao, Peru». *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(12), pp. 635. Available at: <https://doi.org/10.1007/S10661-017-6327-2>
- Sirithian, D. y Thanatrakolsri, P. (2022).** «Relationships between Meteorological and Particulate Matter Concentrations (PM_{2.5} and PM₁₀) during the Haze Period in Urban and Rural Areas, Northern Thailand». *Air, Soil and Water Research*, 15. Available at: <https://doi.org/10.1177/11786221221117264>
- Tapia, V., Steenland, K., Vu, B., Liu, Y., Vásquez, V. y Gonzales, G. F. (2020).** «PM_{2.5} exposure on daily cardio-respiratory mortality in Lima, Peru, from 2010 to 2016». *Environmental Health*, 19(1), pp. 63. Available at: <https://doi.org/10.1186/S12940-020-00618-6>
- Valverde Flores, J. W. (2016).** «Evaluación de la calidad de aire en la intersección de la Av. Universitaria con Panamericana Norte - Los Olivos, Lima». *ALLPA Sustainable*, 19(38), pp. 121-124. Available at: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/download/13577/11988/46855>
- Vu, B. N., Sánchez, O., Bi, J., Xiao, Q., Hansel, N. N., Checkley, W., Gonzales, G. F., Steenland, K., Liu, Y. (2019).** «Developing an Advanced PM_{2.5} Exposure Model in Lima, Peru». *Remote Sensing*, 11(6), 641. Available at: <https://doi.org/10.3390/RS11060641>
- Zheng, Z., Xu, G., Li, Q., Chen, C. y Li, J. (2019).** «Effect of precipitation on reducing atmospheric pollutant over Beijing». *Atmospheric Pollution Research*, 10(5), pp. 1443-1453. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.APR.2019.04.001>

