



Calidad del aire en la ciudad de Juliaca, Perú: análisis del PM₁₀ y su relación con variables meteorológicas

Air quality in the city of Juliaca, Peru: analysis of PM₁₀ and its relationship with meteorological variables

Qualidade do ar na cidade de Juliaca, Peru: análise de PM₁₀ e sua relação com variáveis meteorológicas

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i28.445>

Edson Apaza Mamani Mamani¹ eapaza@unap.edu.pe

Yasmani Alan Vargas Ramos¹ yasmani.vargas@unap.edu.pe

Lucas Ponce Quispe¹ lponce@unap.edu.pe

Russo Américo Flores Flores¹ russo.flores@unap.edu.pe

Richard Valle Terrazas² richard.valle@unsaac.edu.pe

Julio Cesar Quispe Mamani¹ jcquispe@unap.edu.pe

¹Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú

²Universidad Nacional de San Antonio Abad. Cusco, Perú

Artículo recibido: 7 de noviembre 2025 / Arbitrado: 10 de diciembre 2025 / Publicado: 7 de enero 2026

RESUMEN

La contaminación atmosférica por material particulado constituye uno de los principales problemas ambientales en ciudades altoandinas como Juliaca, debido al crecimiento urbano acelerado, el incremento del tránsito vehicular y las condiciones meteorológicas particulares. En este contexto, el objetivo de la investigación fue analizar la calidad del aire en la ciudad de Juliaca, Perú, a partir de las concentraciones de PM₁₀ y su relación con las variables meteorológicas. Se consideró el enfoque cuantitativo, diseño no experimental y alcance correlacional, donde se utilizaron datos de fuente primaria la base de datos de concentración de PM10 y variables meteorológicas medidas y analizados por un muestreador de alto volumen (Hi-Vol) y la estación meteorológica automática, RK900-01, donde a las mismas se aplicaron pruebas de normalidad y el coeficiente de correlación de Spearman, considerando la no normalidad de las variables. Se pudo determinar que, las concentraciones promedio de PM₁₀ se mantuvieron por debajo del Estándar Nacional de Calidad Ambiental del aire; sin embargo, se identificaron correlaciones negativas moderadas entre el PM₁₀ y la humedad relativa, la temperatura y la precipitación, lo que demuestra una influencia significativa de las condiciones meteorológicas sobre la dispersión y remoción del material particulado. Por lo tanto, aunque los niveles de PM₁₀ no superaron los límites normativos, la calidad del aire en Juliaca está condicionada por la interacción entre factores climáticos y actividades antropogénicas.

Palabras clave: PM₁₀; Calidad de aire; Contaminación; Monitoreo; Variación temporal

ABSTRACT

Air pollution from particulate matter is one of the main environmental problems in high Andean cities like Juliaca, due to rapid urban growth, increased vehicular traffic, and specific meteorological conditions. In this context, the objective of this research was to analyze air quality in the city of Juliaca, Peru, based on PM₁₀ concentrations and their relationship with meteorological variables. A quantitative approach, non-experimental design, and correlational scope were used. Primary data sources included the PM₁₀ concentration database and meteorological variables measured and analyzed by a high-volume (Hi-Vol) sampler and the RK900-01 automatic weather station. Normality tests and Spearman's rank correlation coefficient were applied to the data, considering the non-normal distribution of the variables. The results showed that average PM₁₀ concentrations remained below the National Ambient Air Quality Standard. However, moderate negative correlations were identified between PM₁₀ and relative humidity, temperature, and precipitation, demonstrating a significant influence of meteorological conditions on the dispersion and removal of particulate matter. Therefore, although PM₁₀ levels did not exceed regulatory limits, air quality in Juliaca is conditioned by the interaction between climatic factors and anthropogenic activities.

Key words: PM₁₀; Air quality; Pollution; Monitoring; Temporal variation

RESUMO

A poluição atmosférica por material particulado é um dos principais problemas ambientais em cidades andinas de altitude, como Juliaca, devido ao rápido crescimento urbano, ao aumento do tráfego de veículos e às condições meteorológicas específicas. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi analisar a qualidade do ar na cidade de Juliaca, Peru, com base nas concentrações de PM₁₀ e sua relação com variáveis meteorológicas. Utilizou-se uma abordagem quantitativa, delineamento não experimental e escopo correlacional. As principais fontes de dados incluíram o banco de dados de concentração de PM₁₀ e variáveis meteorológicas medidas e analisadas por um amostrador de alto volume (Hi-Vol) e pela estação meteorológica automática RK900-01. Testes de normalidade e o coeficiente de correlação de Spearman foram aplicados aos dados, considerando a distribuição não normal das variáveis. Os resultados mostraram que as concentrações médias de PM₁₀ permaneceram abaixo do Padrão Nacional de Qualidade do Ar Ambiente. Contudo, foram identificadas correlações negativas moderadas entre PM₁₀ e umidade relativa, temperatura e precipitação, demonstrando uma influência significativa das condições meteorológicas na dispersão e remoção de material particulado. Portanto, embora os níveis de PM₁₀ não tenham excedido os limites regulamentares, a qualidade do ar em Juliaca é condicionada pela interação entre fatores climáticos e atividades antropogênicas.

Palavras-chave: PM₁₀; Qualidade do ar; Poluição; Monitoramento; Variação temporal

INTRODUCCIÓN

En estos tiempos de la globalización, la contaminación atmosférica es uno de los principales riesgos ambientales para la salud pública a nivel mundial; donde de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), millones de personas están expuestas diariamente a niveles de contaminantes del aire que superan los límites máximos permisibles, afectando directamente al incremento de la morbilidad y mortalidad de los seres humanos, causados por enfermedades respiratorias y cardiovasculares (1–3). Entre los contaminantes atmosféricos de mayor preocupación y que tiene donde mayor impacto se encuentran las partículas en suspensión, particularmente el material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros (PM₁₀), esto debido a su capacidad de penetrar en las vías respiratorias y afectar de manera directa la salud de las personas, sin diferencias ni el género ni la edad, ni las condiciones sociales que estas pueden tener (4–6).

Diversos estudios a nivel mundial, han demostrado que la exposición prolongada a concentraciones elevadas de PM₁₀ está relacionada con las enfermedades respiratorias en niños y adultos de tercera edad, con bronquitis, asma y disminución del crecimiento de la función pulmonar; así como con el incremento de enfermedades cardiovasculares, respiratorias

y epidemiológicas (7–9). Estas partículas, al permanecer suspendidas en la atmósfera, transportan polvo, cenizas, hollín y metales pesados, lo que incrementa su potencial nocivo y convirtiéndose en PM₁₀ en una de las principales amenazas ambientales para la salud pública (10–12).

Además, considerando el crecimiento económico de los países, la expansión urbana acelerada y el dinamismo de las actividades productivas han generado presiones significativas sobre el medio ambiente, particularmente sobre la calidad del aire; donde los países en desarrollado son los más perjudicados por las condiciones deficientes que tienen para enfrentar estos problemas ambientales. Las actividades industriales, agrícolas, comerciales y el incremento del parque automotor han sido identificados como factores que generan mayores determinantes en la evolución de la contaminación atmosférica a nivel global (8,13,14).

En el caso particular del Perú, esta problemática se manifiesta con mayor intensidad en las ciudades de rápido crecimiento urbano como la capital Lima, Arequipa, Cusco, Trujillo, entre otras, donde la planificación territorial limitada y la concentración de actividades económicas contribuyen al deterioro de la calidad del aire (14). Por ejemplo, en Lima, los promedios de concentración de material particulado PM₁₀

han mostrado variaciones significativas entre 2019 y 2025, con picos que han superado los 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y valores promedio que aún se sitúan por encima de los límites máximo permisibles establecidos en las normas nacionales e internacionales como la OMS para proteger la salud humana ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual según guía de la OMS) en diversas estaciones de monitoreo, lo que evidencia la existencia de una mala calidad del aire persistente en los últimos años (15–17).

En este sentido, la exposición a las partículas de PM_{10} genera efectos adversos especialmente en poblaciones vulnerables, como niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardíacas o pulmonares preexistentes (18). De acuerdo a la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), el PM_{10} puede provocar muertes prematuras, agravar episodios de asma, desencadenar infartos de miocardio, causar arritmias, reducir la función pulmonar y generar síntomas respiratorios como tos persistente y dificultad para respirar; por lo que, el control y monitoreo del PM_{10} se ha convertido en una prioridad para las políticas ambientales y sanitarias del país (19–21).

Lo que se complementa con la literatura científica existente, donde resaltan que, la dispersión y concentración de contaminantes atmosféricos están fuertemente influenciadas por factores geográficos y variables meteorológicas, tales como la temperatura, la humedad relativa, la

velocidad y dirección del viento y la precipitación. Estas variables condicionan la acumulación o dispersión del material particulado y pueden dar lugar a episodios críticos de contaminación del aire; motivo por el cual, el análisis conjunto de las concentraciones de PM_{10} y las variables meteorológicas resulta fundamental estudiarlas, a fin de comprender la dinámica de la calidad del aire en contextos urbanos específicos (14,22,23).

El departamento de Puno, que se encuentra ubicado en el altiplano andino, presenta condiciones ambientales particulares que influyen en la calidad del aire, toda vez que, sus características geográficas de altitud elevada y valles cerrados, favorecen a la acumulación de contaminantes en la atmósfera, debido a la menor dispersión de partículas en comparación con áreas costeras o de mayor ventilación; son embargo, a pesar de existir evidencia cuantitativa consolidada a nivel nacional, estos a nivel departamental son limitadas; por lo que, la presencia de evidencias anecdóticas, estudios locales y monitoreos específicos muestran que la calidad del aire puede variar considerablemente dentro del departamento, con episodios en los que concentraciones de PM_{10} y otros contaminantes alcanzan niveles que requieren atención para la salud pública y el medio ambiente (9,24,25).

En lo particular, la ciudad de Juliaca, que está ubicada en la región altiplánica del sur del

Perú, a comparación de otras provincias del departamento, enfrenta desafíos particulares en términos de calidad del aire, esto debido a la confluencia de factores geográficos, meteorológicos y antropogénicos; en vista que, su elevada altitud, con condiciones atmosféricas que limitan la dispersión de contaminantes, la existencia de una rápida urbanización pero sin planificación, con el crecimiento del parque automotor desordenado y la intensa actividad comercial que se desarrolla; pues han contribuido en los últimos años al incremento de las concentraciones de PM₁₀ en la atmósfera (25,26).

Por lo cual, la ciudad de Juliaca, al ser uno de los centros urbanos con mayor crecimiento demográfico y actividad económica en el sur del Perú, diversos estudios han documentado niveles preocupantes de PM₁₀ que muestran un desafío ambiental significativo; los resultados de los monitoreos realizados en múltiples puntos de la ciudad han reportado concentraciones de PM₁₀ que, en zonas de alta desarrollo de la actividad vial, superan los 100 µg/m³ en períodos de 24 horas y promedios urbanos que rondan entre 30 y más de 50 µg/m³ en ciertos sectores, las mismas que están muy por encima de los parámetros recomendados por la OMS e inclusive son superiores a los límites máximos permisibles en normativa ambiental nacional. Estas elevadas concentraciones se dan principalmente al tráfico vehicular intenso (más

de 11,000 vehículos circulando diariamente), que generan contaminación atmosférica, sonora, entre otras; y la falta de áreas verdes suficientes, limita a la captura de partículas contaminantes y la configuración urbana que favorece la retención de contaminantes, pues hacen que este problema sea más complejo (27,28).

Complementariamente, las condiciones locales de Juliaca se ven agravadas por la combinación de factores meteorológicos y geográficos que dificultan la dispersión de partículas, como bajas velocidades de viento y perfiles térmicos que pueden generar inversiones térmicas, reteniendo el material particulado cerca de la superficie. Además, en estudios recientes se demostraron que, las fuentes puntuales como las ladrilleras artesanales y otras fuentes fijas, contribuyen de manera sustancial al incremento de las emisiones de contaminantes atmosféricas, lo que constituye un factor adicional a considerar en la gestión ambiental urbana (27,29).

En este contexto, la evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Juliaca adquiere importancia significativa, debido a sus implicancias en la salud pública, así como por su utilidad para la gestión ambiental; por lo que, los resultados mostrados en la presente investigación, contribuirán como información relevante para la toma de decisiones de instituciones como el Gobierno Regional de Puno, las municipalidades y las entidades ambientales

competentes, contribuyendo a la formulación de estrategias de prevención, control y mitigación de la contaminación atmosférica.

Por ello, el objetivo del presente artículo científico es analizar la calidad del aire en la ciudad de Juliaca, Perú, a partir de las concentraciones de PM₁₀ y su relación con las variables meteorológicas.

Calidad del aire y la contaminación atmosférica

De acuerdo a los conceptos ambientales, la calidad del aire está definido como el estado de la atmósfera en relación con la presencia y concentración de contaminantes que pueden afectar la salud humana, los ecosistemas y los bienes materiales. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación atmosférica se da cuando las sustancias sólidas, líquidas o gaseosas se encuentran en el aire en concentraciones que superan los niveles naturales y generan efectos adversos sobre la salud de los seres vivos y el medio ambiente. En las zonas urbanas, la calidad del aire se ha visto deteriorada principalmente por el crecimiento del parque automotor, por la dinámica del desarrollo económico y por la expansión urbana desordenada (30,31).

Material particulado (PM₁₀) y sus efectos sobre la salud

El material particulado (PM) es una mezcla compleja de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, clasificadas según su tamaño aerodinámico. El PM₁₀ corresponde a partículas con un diámetro menor o igual a 10 micrómetros, capaces de ingresar al sistema respiratorio superior e inferior. Diversas investigaciones demostraron que la exposición a concentraciones elevadas de PM₁₀ está asociada con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, exacerbación del asma, reducción de la función pulmonar e incremento de la mortalidad prematura (32). Además, a diferencia de las ciudades de los países desarrollados, en ciudades de países en desarrollo, el PM₁₀ representa uno de los principales contaminantes del aire, esto debido a la existencia de fuentes contaminantes como el transporte vehicular deteriorado y desfasado, la quema de residuos, las actividades industriales y el polvo suspendido en las zonas urbanas (33).

Variables meteorológicas y la dispersión de contaminantes

La concentración y dispersión de los contaminantes atmosféricos están vinculadas con las condiciones meteorológicas; donde las variables como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento, la dirección del viento y la precipitación desempeñan un rol fundamental en la dinámica del material particulado. En el caso de la velocidad del viento, favorece la dispersión horizontal de las partículas, mientras que la temperatura y la estabilidad atmosférica pueden generar fenómenos como las inversiones térmicas en el día y la noche, y estas limitan la dispersión vertical y aumentan la concentración de contaminantes cerca de la superficie. Además, la humedad relativa y la precipitación pluviales influyen en los procesos de sedimentación y remoción del PM₁₀ de la atmósfera (34).

Además, desde la perspectiva de la climatología urbana, el análisis conjunto de PM₁₀ y variables meteorológicas permite comprender los episodios críticos de contaminación y la variabilidad temporal de la calidad del aire en ciudades con condiciones geográficas particulares, como las ubicadas en zonas altoandinas (35).

Enfoque teórico: enfoque ambiental-sistémico

La presente investigación tiene como bases en el enfoque ambiental y sistémico, el cual concibe la contaminación atmosférica como el resultado de la interacción entre factores naturales (meteorología y geografía) y factores antropogénicos (actividades humanas); lo que permite analizar la calidad del aire como un sistema dinámico, donde las emisiones, las condiciones atmosféricas y el entorno urbano interactúan de manera continua. Además, tomando en cuenta este enfoque, la ciudad se entiende como un sistema abierto, donde se desarrollan todos los flujos contaminantes que están condicionados tanto por las fuentes emisoras como por los procesos meteorológicos que regulan su dispersión y acumulación (36).

Modelos conceptuales y analíticos aplicados al estudio del PM₁₀

Al considerar el análisis del material particulado, esta suele apoyarse en modelos conceptuales y estadísticos que permiten evaluar su comportamiento y relación con variables explicativas. Entre los modelos más utilizados se encuentran (37):

- Los modelos descriptivos y de series temporales, que ayudan a analizar la evolución del PM₁₀ a lo largo del tiempo.
- Los modelos de correlación, que ayudan a realizar la evaluación de la asociación entre las concentraciones de PM₁₀ y las variables meteorológicas.
- Los modelos de regresión múltiple, que ayudan a estimar la influencia de cada variable meteorológica sobre las concentraciones de PM₁₀, controlando otros factores.

Todos los modelos anteriores son parte de las herramientas fundamentales para identificar patrones, explicar la variabilidad del contaminante y generar evidencia científica útil para la gestión ambiental urbana.

Marco normativo y estándares de calidad del aire

La evaluación y análisis del PM₁₀ se sustenta también en el marco normativo ambiental, donde a nivel internacional, la OMS determina los valores guía para la concentración de material particulado, y estas tienen como propósito de ser una guía para la protección de la salud humana; además, a nivel nacional, el Ministerio del Ambiente del Perú ha establecido los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire, que fijan límites máximos permisibles para el PM₁₀ en períodos de 24 horas y promedios anuales. Por

lo cual, la comparación de las concentraciones observadas con estos estándares ayuda a evaluar el nivel de riesgo ambiental y la magnitud del problema de contaminación atmosférica en contextos urbanos específicos como la ciudad de Juliaca (38,39).

MATERIALES Y MÉTODOS

Enfoque, tipo y diseño de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo el enfoque cuantitativo, debido a que consideró medir de manera objetiva las concentraciones de material particulado PM₁₀ y de variables meteorológicas, así como en el análisis estadístico de la relación entre dichas variables (40).

Además, es de tipo aplicado, en vista que, buscó generar evidencia empírica útil para la gestión ambiental y la toma de decisiones en materia de calidad del aire en la ciudad de Juliaca. Asimismo, presenta un alcance descriptivo y correlacional, porque describe los niveles de PM₁₀ y analiza su relación con las variables meteorológicas sin manipularlas.

El diseño de investigación es no experimental y transversal, toda vez que, las variables de estudio no fueron controladas ni alteradas deliberadamente y la información se recolectó durante un periodo determinado de monitoreo ambiental (41).

Método de investigación

Se consideró el método científico, específicamente el método analítico - estadístico, lo que permitió descomponer el fenómeno de la contaminación atmosférica en sus componentes medibles (PM₁₀ y variables meteorológicas), y a la vez permite analizar su comportamiento temporal y evaluar la relación entre las variables mediante técnicas estadísticas.

Zona de estudio

Como zona de estudio se consideró a la ciudad de Juliaca, capital de la provincia de San Román, ubicada en el departamento de Puno, al sureste del Perú. Juliaca cuenta con una extensión territorial aproximada de 533.47 km² y se localiza a una altitud promedio de 3 825 m s. n. m., próxima al lago Titicaca. Es uno de los principales centros urbanos y comerciales de la región, con una población estimada de 350 000 habitantes. Además, de acuerdo a sus características, la economía local se caracteriza por una intensa actividad urbana, sustentada principalmente en el comercio, el transporte, la industria y la construcción, actividades que generan una elevada presión sobre la calidad del aire, especialmente por el incremento del parque automotor y la suspensión de partículas.

Población y muestra

Se considera como población de estudio estuvo conformada por todas las concentraciones de PM₁₀ y los registros de variables meteorológicas presentes en la atmósfera de la ciudad de Juliaca durante el periodo de estudio.

La muestra corresponde a los registros diarios de PM₁₀ obtenidos en los puntos de monitoreo seleccionados, así como a los datos horarios de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento y precipitación); las mismas que están registrados por la estación meteorológica automática, los cuales fueron promediados a nive diario y mensual para su análisis. Además, la muestra considera al tipo no probabilística e intencional, basada en la disponibilidad de equipos de monitoreo y representatividad de los puntos seleccionados.

Análisis de variables

Las variables consideradas en la investigación fueron:

Variable principal:

- Concentración de material particulado PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Variables meteorológicas:
- Temperatura del aire (°C)
- Humedad relativa (%)

- Velocidad del viento (m/s)
- Dirección del viento
- Precipitación (mm)

Se debe resaltar que, para el análisis de las variables, se consideró la estadística descriptiva para caracterizar su comportamiento y análisis correlacional para evaluar la relación entre las concentraciones de PM₁₀ y las variables meteorológicas.

Instrumentos y técnicas de recolección de datos

De acuerdo al proceso de recolección de datos y los instrumentos utilizados, para la medición de PM₁₀ se utilizó un muestreador de alto volumen (HI-VOL), siguiendo el método gravimétrico, que consiste en la captación de partículas en filtros durante un periodo de 24 horas. Los filtros fueron previamente acondicionados, pesados y calibrados conforme a los lineamientos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2017).

Además, las variables meteorológicas fueron registradas mediante una estación meteorológica automática RK900-01, que proporcionó datos horarios de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento y precipitación.

Procedimiento de muestreo y análisis de laboratorio

El procedimiento de campo incluyó la identificación de los puntos de monitoreo, la instalación del equipo HI-VOL y la calibración del sistema conforme a las directrices técnicas. Los filtros fueron pesados antes y después del muestreo utilizando una balanza analítica con una precisión de 0.1 mg y una exactitud de 0.5 mg, minimizando interferencias externas.

La concentración de PM₁₀ se determinó a partir de la diferencia entre el peso inicial y final del filtro, considerando el volumen de aire muestreado, de acuerdo con el método gravimétrico estándar. Las muestras recolectadas fueron trasladadas al laboratorio de la Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ) , Perú, para su procesamiento final.

Técnicas y procedimientos de análisis de datos

Los datos utilizados en la presente investigación, fueron organizados en una base de datos y procesados mediante los programas Microsoft Excel y Stata; además, para la representación gráfica de la dirección y velocidad del viento se realizó utilizando el software WRPLOT.

Pruebas estadísticas y estadística básica

Considerando el análisis descriptivo de la investigación, se utilizó el cálculo de las estadísticas básicas, tales como media, mediana, valores máximos y mínimos y desviación estándar, todo esto con la finalidad de caracterizar las concentraciones de PM₁₀ y las variables meteorológicas.

Complementariamente, para realizar la evaluación de la relación entre las concentraciones de PM₁₀ y las variables meteorológicas, se consideró el uso de la prueba de correlación Rho de Spearman, debido a que los datos no necesariamente siguen una distribución normal y presentan escalas de medición continuas; donde el nivel de significancia estadística considerado fue de $\alpha = 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variación temporal del PM₁₀

Analizando la variación temporal del PM₁₀, su comportamiento temporal en meses para el año 2024, refleja las concentraciones crecientes, desde el mes de abril en adelante, alcanzando el pico más alto en el mes de mayo con 81.01 ug/m³ seguido del mes de junio con 77.92 ug/m³ y después en el mes de Julio se presenta una bajada con 67.32 ug/m³; además, en los meses de febrero a abril se presentaron bajas concentraciones, donde en el mes de marzo tuvo una concentración menor a comparación de los otros meses, alcanzando solo un valor de 39.31 ug/m³, lo que se debe en parte a la variación estacional que se presenta en la ciudad de Juliaca llegando a deducir que en otoño las concentraciones son mayores a comparación de verano, Figura 1.



Figura 1. Variación mensual del PM₁₀ de la ciudad de Juliaca.

Analizando la variación diaria del contaminante PM10, a nivel de la ciudad de Juliaca, las concentraciones del PM₁₀ fueron mayores los días miércoles, viernes y sábado, debido a que dicha concentración sobrepasaron los 40.00 ug/m³; mientras que en los días domingo, martes y jueves se presentaron concentraciones promedio de 38.26 ug/m³; además, los días lunes

evidenciaron una menor concentración de PM10, alcanzando solo el valor de 29.93 ug/m³; lo que puede estar asociado al incremento del tráfico vehicular, especialmente en vías principales de acceso al centro de la ciudad, ya que la dinámica comercial en dichos y días y en los principales centros comerciales y ferias lo exigen, Figura 2.

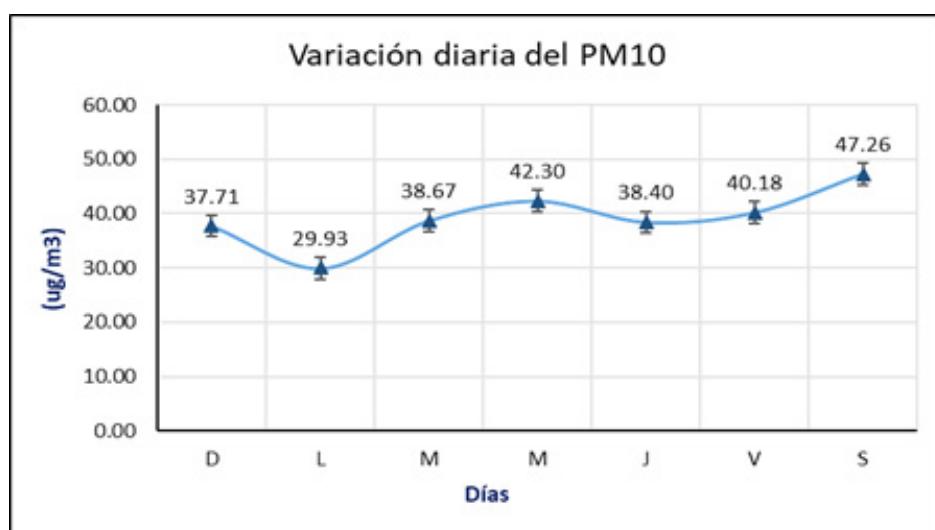


Figura 2. Variación diaria del PM₁₀ de la ciudad de Juliaca.

En esta misma línea, realizando el análisis con respecto al comportamiento horario en un día promedio del 2024, se puede evidenciar la existencia de picos marcados de concentración entre 8:00 a.m. y 10:00 a.m. en general, las concentraciones disminuyen ligeramente entre las

3:00 p.m. y 7:00 p.m., luego empiezan a aumentar gradualmente hasta el primer pico de la mañana, después hay una reducción de concentraciones hacia el mediodía y en la noche vuelve a incrementarse, Figura 3.



Figura 3. Variación horaria del PM₁₀ de la ciudad de Juliaca.

Prueba de normalidad de variables

Luego del análisis del comportamiento del PM₁₀, se hizo las pruebas de normalidad de las variables PM₁₀, temperatura, precipitación y humedad; por lo que, se evaluaron dos aspectos clave de la distribución: la asimetría y la curtosis (Skewness/Kurtosis test) mediante el software STATA 18.0, considerando un nivel de significancia del 5%. Esta prueba permite contrastar si la distribución empírica de cada variable difiere significativamente de una distribución normal, evaluando de manera conjunta los componentes de asimetría y curtosis a través del estadístico chi cuadrado ajustado.

De acuerdo a los resultados que se muestran en la Tabla 1; para la variable PM₁₀ ($n = 181$), el valor de probabilidad asociado a la asimetría es ligeramente significativo ($p = 0.0006$), lo cual evidencia una distribución

marcadamente asimétrica; a pesar que la curtosis no resulta estadísticamente significativa ($p = 0.5118$), el estadístico global de la prueba (Adj $\chi^2 = 10.65$) arroja un p -valor de 0.0049, inferior al umbral de significancia del 5%, indicando que la variable PM₁₀ no sigue una distribución normal; lo que muestra la presencia de concentraciones extremas asociadas a episodios puntuales de contaminación, característica común en series ambientales en la ciudad de Juliaca.

Con respecto a la temperatura, tanto la asimetría ($p = 0.0056$) como la curtosis ($p = 0.0186$) resultan estadísticamente significativas, lo que muestra la existencia de una distribución no simétrica y con colas más pronunciadas respecto a la normal; lo que se refuerza con el estadístico global (Adj $\chi^2 = 11.41$; $p = 0.0033$), confirmando la ausencia de normalidad en dicha variable, Tabla 1.

Complementariamente, en el caso de la variable precipitación, se observa la desviación más marcada del supuesto de normalidad; además, tanto la asimetría como la curtosis presentan valores de probabilidad prácticamente nulos ($p = 0.0000$), y el estadístico chi cuadrado ajustado alcanza un valor elevado ($\text{Adj } \chi^2 = 140.35$; $p = 0.0000$); por lo que, este resultado es coherente y consistente con la naturaleza propia de la precipitación, que suele caracterizarse por distribuciones altamente sesgadas, con una alta frecuencia de valores cercanos a cero y eventos extremos ocasionales, Tabla 1.

Además, en el caso de la variable humedad relativa, muestra una asimetría no significativa

($p = 0.6684$), pero una curtosis estadísticamente significativa ($p = 0.0017$), lo cual indica una concentración anormal de observaciones alrededor de la media o colas más pesadas; por lo que, el contraste conjunto confirma esta desviación, con un $\text{Adj } \chi^2$ de 8.97 y un p-valor de 0.0113, menor al nivel crítico de 0.05, Tabla 1.

Por lo cual, estos resultados muestran que ninguna de las cuatro variables analizadas cumple con el supuesto de normalidad, dado que en todos los casos el p-valor del estadístico global es inferior a 0.05. Esta falta de normalidad es típica en datos ambientales y meteorológicos, donde predominan distribuciones asimétricas y valores extremos, Tabla 1.

Tabla 1. Prueba de normalidad a las variables.

Variable	Obs	Pr(skewness)	Pr(kurtosis)	Adj chi2(2)	Prob>chi2
PM10	181	0.0006	0.5118	10.65	0.0049
Temperatura	181	0.0056	0.0186	11.41	0.0033
Precipitación	181	0.0000	0.0000	140.35	0.0000
Humedad	181	0.6684	0.0017	8.97	0.0113

Correlación del PM₁₀, y las variables meteorológicas

Al realizar el análisis de correlación de las variables en estudio; muestran que las concentraciones de PM₁₀ en la ciudad de Juliaca están significativamente moduladas por las condiciones meteorológicas locales, particularmente por la temperatura, la

precipitación y la humedad relativa; toda vez que, dicha relación adquiere especial relevancia al considerar que Juliaca se ubica a más de 3 800 m s.n.m., en un entorno altoandino caracterizado por una atmósfera menos densa, alta radiación solar, marcadas oscilaciones térmicas diurnas y estacionales, así como extensas superficies de suelo descubierto.

La existencia de una correlación negativa y moderada entre PM₁₀ y temperatura ($\rho = -0.5158$) muestra que durante periodos más cálidos se produce una reducción de las concentraciones de material particulado; toda vez que, en el contexto altoandino, este comportamiento puede explicarse por el incremento de la convección térmica diurna y el aumento de la altura de la capa límite atmosférica, procesos que favorecen la dispersión vertical de contaminantes. Además, en horas de mayor radiación solar, típicas del altiplano, el calentamiento del suelo genera movimientos ascendentes del aire que diluyen las partículas suspendidas, reduciendo su acumulación cerca de la superficie urbana. Sin embargo, durante periodos fríos, que se dan normalmente en las mañanas y noches, se intensifican las inversiones térmicas superficiales, y este fenómeno es común en ciudades altoandinas, lo que limita la dispersión de contaminantes y propicia la concentración de PM₁₀ a nivel respirable. Lo antes mencionado resulta especialmente relevante para Juliaca, ya que al caracterizarse como una zona con bajas temperaturas nocturnas coinciden con actividades domésticas que implican combustión de biomasa y mayor tránsito vehicular, amplificando episodios de mala calidad del aire, Tabla 2.

En el caso de la precipitación, al tener una correlación negativa y moderada ($\rho = -0.3645$) confirma la existencia del efecto de lavado atmosférico, mediante el cual las lluvias remueven partículas en suspensión. Sin embargo, la magnitud moderada de esta relación refleja la marcada estacionalidad pluviométrica de Juliaca; donde en periodos de temporada seca predominan largos períodos sin precipitaciones, lo que favorece la acumulación y la resuspensión de polvo superficial proveniente de vías no asfaltadas, áreas periurbanas y suelos desnudos; por lo que, la lluvia actúa como un mecanismo correctivo temporal, pero insuficiente para compensar estructuralmente las fuentes locales de emisión, Tabla 2.

Con respecto a la humedad relativa, muestra la existencia de una asociación inversa más fuerte con el PM₁₀ ($\rho = -0.5419$), lo que muestra su papel clave en la dinámica del material particulado; toda vez que, en ambientes altoandinos como Juliaca, el incremento de la humedad favorece procesos higroscópicos que incrementan el tamaño efectivo de las partículas, acelerando su deposición gravitacional. Asimismo, mayores niveles de humedad permite la disminución de la resuspensión de polvo del suelo, particularmente relevante en una ciudad con elevada proporción de superficies sin pavimentar y fuerte influencia eólica, Tabla 2.

Complementariamente, la existencia de una fuerte correlación positiva entre humedad, precipitación y temperatura evidencia una interacción climática interna que potencia sus efectos conjuntos sobre el PM₁₀; toda vez que, en temporadas húmedas, estas variables actúan de manera sinérgica promoviendo la remoción y dispersión de partículas, mientras que en la estación seca la combinación de baja humedad, ausencia de lluvias y temperaturas nocturnas reducidas crea condiciones propicias para el incremento del material particulado.

Por lo tanto, desde una perspectiva ambiental, estos resultados indican que la calidad del aire en Juliaca no depende únicamente de las fuentes de emisión antropogénicas (tránsito vehicular, comercio informal, quema de residuos y polvo resuspendido), sino que está fuertemente condicionada por la dinámica climática altoandina; es por lo cual que, la estacionalidad

climática emerge como un factor estructural que explica la variabilidad del PM₁₀, con mayores concentraciones esperables durante la estación seca.

En este sentido, los resultados mostrados exigen el planteamiento de estrategias de gestión de la calidad del aire para la ciudad de Juliaca y estas deben incorporar el componente meteorológico, como eje central, inclusive proponiendo la implementación de estaciones meteorológicas automatizadas, priorizando medidas de mitigación durante los meses secos, tales como el control del polvo vial, la pavimentación de vías críticas, el manejo de residuos sólidos y la regulación de fuentes móviles. Además, los resultados respaldan la necesidad de implementar sistemas de alerta temprana basados en condiciones meteorológicas adversas, especialmente durante episodios de baja temperatura y humedad.

Tabla 2. Análisis de correlación de las variables meteorológicas y el PM₁₀.

	PM ₁₀	Temperatura	Precipitación	Humedad
PM ₁₀	1.0000			
Temperatura	-0.5158	1.0000		
Precipitación	-0.3645	0.4760	1.0000	
Humedad	-0.5419	0.6755	0.6263	1.0000

Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que las concentraciones de PM₁₀ en la ciudad de Juliaca presentan una clara dependencia de las condiciones meteorológicas, lo cual coincide con la literatura nacional e internacional sobre dinámica de contaminantes atmosféricos en ciudades urbanas, especialmente en contextos altoandinos. Lo que es consistente por lo establecido por Seinfeld y Pandis (42), ya que establecieron que el incremento en dichas variables climáticas tiende a reducir las concentraciones de material particulado, resultado consistente con los procesos físicos de dispersión, deposición húmeda y sedimentación gravitacional descritos en la química atmosférica.

Además, desde una perspectiva ambiental, los resultados encontrados tienen relevancia en Juliaca debido a su condición de ciudad altoandina ubicada por encima de los 3 800 m s.n.m., donde la atmósfera presenta menor densidad, mayor radiación solar y fuertes oscilaciones térmicas diarias. Estas características favorecen episodios de estabilidad atmosférica, especialmente durante la estación seca (otoño - invierno), lo cual limita la dispersión vertical de contaminantes y propicia la acumulación de PM₁₀ cerca de la superficie. En este sentido, estos resultados concuerdan con lo encontrado por Seinfeld y Pandis (42) y Han et al. (43), quienes demostraron que, la correlación

negativa moderada entre PM₁₀ y temperatura durante los períodos más cálidos, trae como consecuencia el incremento de la turbulencia atmosférica y la elevación de la capa límite, favorecen la dilución del material particulado; en este sentido, este comportamiento ha sido ampliamente documentado en estudios urbanos, donde temperaturas más altas facilitan procesos convectivos que reducen la concentración de partículas en suspensión.

Por su parte, la relación inversa entre PM₁₀ y precipitación confirma el efecto de "lavado atmosférico", mediante el cual las gotas de lluvia remueven partículas suspendidas, mejorando temporalmente la calidad del aire; lo que coincide con los resultados encontrado por Plocoste et al. (44), quienes reportaron en ciudades de América y el Caribe en contextos internacionales la existencia de dicha relación.

La humedad relativa mostró la correlación negativa más fuerte con el PM₁₀ ($r = -0.5419$), lo cual indica que ambientes más húmedos favorecen la deposición de partículas por coagulación higroscópica y sedimentación; del cual, dicho resultado coincide con lo reportado por Galloza et. al. (45), Escobar y Sara (20) y Ayala y Ramos (46) en ciudades del sur peruano, así como con Ríos (47) y Cabello-Torres et. al. (48) en Lima Metropolitana.

Complementariamente, desde el punto de vista temporal, la presente investigación identificó mayores concentraciones promedio de PM₁₀ durante los meses de mayo, junio y julio, correspondientes a la estación de otoño - invierno, y menores valores durante el verano; estos resultados coinciden con lo reportado por el SENAMHI y con estudios realizados en Arequipa por Wannaz et. al. (21), Cusco y otras ciudades andinas, donde la estación seca favorece la resuspensión de polvo y reduce la remoción húmeda de contaminantes.

Además, valorando los resultados a nivel diario, se observaron incrementos de PM₁₀ los días miércoles y sábados, lo cual concuerda con Rojas et al. (49) y Alfaro-Alejo et. al. (29), quienes atribuyen estos picos al aumento del flujo vehicular y de actividades comerciales; toda vez que, en Juliaca, esta dinámica puede estar asociada adicionalmente a ferias locales, transporte interprovincial y circulación de vehículos en vías no asfaltadas, factores que incrementan la resuspensión de partículas.

Comparativamente, la presente investigación es concordante con los estudios realizados en ciudades altoandinas como El Alto (Bolivia) y Cusco (Perú), donde también evidenciaron la existencia de patrones similares de acumulación de PM₁₀ durante estaciones secas, atribuibles a inversiones térmicas nocturnas y limitada ventilación

atmosférica, tal es el caso de la investigación de Quispe-Huamán (25). Asimismo, Popescu et al. (50) reportaron en el Ciuc Basin (Rumania) un marcado incremento invernal del PM₁₀ asociado a estabilidad atmosférica y bajas temperaturas, fenómeno comparable al observado en Juliaca pese a las diferencias geográficas.

Comparando a escala internacional, algunas investigaciones realizadas en ciudades europeas y asiáticas confirman que las concentraciones de PM₁₀ están fuertemente moduladas por temperatura, humedad y precipitación, con correlaciones negativas predominantes durante estaciones húmedas y cálidas (51,52). En China, por ejemplo, se ha documentado que la relación entre PM₁₀ y variables meteorológicas alcanza valores promedio cercanos a 0.48, similares a los obtenidos en esta investigación (53,54); los que coinciden con los resultados obtenidos en la presente investigación.

Finalmente, respecto a los niveles absolutos, durante el periodo analizado las concentraciones de PM₁₀ no superaron el valor de 100 µg/m³, manteniéndose dentro de los Estándares de Calidad Ambiental del Aire del Perú. Este resultado coincide con Pineda-Tapia et. al. (27) y Regalado et al. (10), quienes señalan que valores por debajo de este umbral implican riesgos moderados para la salud pública; sin embargo, la exposición crónica, incluso a concentraciones intermedias,

puede generar efectos respiratorios acumulativos, especialmente en poblaciones vulnerables.

CONCLUSIONES

La evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Juliaca mostró las concentraciones promedio de PM₁₀ durante el periodo de estudio se mantuvo por debajo del Estándar de Calidad Ambiental establecido en el D.S. N.º 003-2017-MINAM; sin embargo, las pruebas de normalidad mostraron que las variables PM₁₀, temperatura, precipitación y humedad relativa no presentan una distribución normal, reflejando la alta variabilidad de los procesos atmosféricos urbanos.

Considerando el análisis de correlación de Spearman, se mostró la existencia de relaciones inversas entre el PM₁₀ y las variables meteorológicas, particularmente con la humedad relativa ($r = -0.5419$), la temperatura ($r = -0.5158$) y la precipitación ($r = -0.3645$), lo que refleja que el aumento de estas variables contribuye a reducir las concentraciones de partículas en suspensión; demostrando que, la temperatura favorece la dispersión atmosférica del PM₁₀, mientras que la humedad y la precipitación actúan como mecanismos naturales de remoción mediante procesos de deposición húmeda y lavado atmosférico; se identificó un patrón estacional con mayores concentraciones durante los meses secos (otoño–invierno), asociados a baja

humedad, ausencia de lluvias y mayor estabilidad atmosférica.

Finalmente, se concluye que la calidad del aire en Juliaca está determinada por una interacción estrecha entre factores meteorológicos y actividades antropogénicas, especialmente el tránsito vehicular y la resuspensión de polvo urbano, intensificados por la condición altoandina de la ciudad. A pesar de que los niveles de PM₁₀ no superaron los límites normativos, la exposición continua representa un riesgo potencial para la salud pública, lo que hace necesario fortalecer el monitoreo ambiental, implementar medidas de control del polvo y del tráfico, y considerar la estacionalidad climática en las estrategias de gestión del aire, con el fin de reducir la vulnerabilidad ambiental y proteger a la población.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en la presente publicación de artículo científico.

REFERENCIAS

1. Barmpadimos I, Hueglin C, Keller J, Henne S, Prévôt ASH. Influence of meteorology on PM₁₀ trends and variability in Switzerland from 1991 to 2008;11(4):1813–35. <https://acp.copernicus.org/articles/11/1813/2011/>
2. Mateus J, Molina N, Álvarez B. Determinación de la concentración de cadmio contenido en material particulado menor a 10 micras en el municipio de Nobsa – Boyacá. Rev Luna Azul. 2022;(54):61–81. <https://revistasoj.sjcaldas.edu.co/index.php/lunazul/article/view/8865>

- 3.** Odubanjo O, Aluko T, Ajayi A, Babatunde P. Embedded system application for establishing variability and the relationship between meteorological parameters and particulate matter pollution in a Lagos site. *Nigerian Journal of Theoretical and Environmental Physics.* 2026;3(4):32–44. <https://njtep.nipngr.org/index.php/njtep/article/view/101>
- 4.** Aranguiz P. Analysis of the measurement of the deterioration of air quality in the Metropolitan Region and its possible relation to the increase in cases of COVID-19. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis.* 2021;57(1):53–74. <https://www.revistaterraaustralis.cl/index.php/rgch/article/view/108>
- 5.** Arganis M, Preciado M. Análisis de frecuencias de los índices IMECA máximos horarios anuales del noroeste de la Ciudad de México. 2025. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642025000400021&script=sci_arttext
- 6.** Kim K, Kabir E, Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International.* 2015;74:136–143. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412014002992>
- 7.** Majumder A, Islam M, Patoary M, Rahman M. Spatio-temporal variation of urban air quality and its relation with meteorological variables in Bangladesh. *Journal of Science and Technology Research.* 2026;6(2):97–108. <https://banglajol.info/index.php/JSciTR/article/view/85459>
- 8.** Massoud R, Shihadeh A, Roumié M, Youness M, Gerard J, Saliba N, et al. Intraurban variability of PM10 and PM2.5 in an Eastern Mediterranean city. *Atmospheric Research.* 2011;101(4):893–901. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809511001712>
- 9.** Romero Y, Diaz C, Meldrum I, Velasquez R, Noel J. Temporal and spatial analysis of traffic-related pollutant under the influence of seasonality and meteorological variables over an urban city in Peru. 2020;6. [https://www.cell.com/heliyon/abstract/S2405-8440\(20\)30873-2](https://www.cell.com/heliyon/abstract/S2405-8440(20)30873-2)
- 10.** Regalado A, Paccha E, Álvarez O, Montaño T. Comportamiento de las concentraciones de PM10 en la ciudad de Loja–Ecuador y su relación con variables meteorológicas. 2020;5(1). <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/sr/article/view/755>
- 11.** Tian G, Qiao Z, Xu X. Characteristics of particulate matter (PM10) and its relationship with meteorological factors during 2001–2012 in Beijing. *Environmental Pollution.* 2014;192:266–274. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749114001857>
- 12.** Zurita J. Evaluación de la contaminación atmosférica en Calderón, Quito, utilizando teledetección y Big Data: análisis de la relación con variables meteorológicas. *Arandu UTIC.* 2025;12(4):2390–2404. <http://uticvirtual.edu.py/revista.ojs/index.php/revistas/article/view/1823>
- 13.** Mora C. Optimización de sensores de bajo coste para la monitorización de la calidad del aire: calibración remota y análisis predictivo. 2025. <https://addi.ehu.es/handle/10810/75420>
- 14.** Pacsi V. Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado PM10 y PM2,5 en Lima Metropolitana. *Anales Científicos.* 2016;77(2):273–283. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6171218>
- 15.** Cruz A, Flores-Roque M, Paccosonco-Sucapuca L, Cari-Cari Y, Álvarez-Tolentino D. Counterintuitive PM2.5 increases during COVID-19 lockdown in Ilo, Peru: coastal meteorology and cardiovascular implications. 2025. <https://www.preprints.org/manuscript/202512.1108>
- 16.** Díaz K, Pérez A, Pacsi S. Evaluación de la influencia del tránsito vehicular y las variables meteorológicas en la concentración del PM10 y PM1.0 en el distrito de Comas. 2022. <https://agris.fao.org/search/en/providers/125069/records/6749826a7625988a3722e1fe>
- 17.** Velasquez J, Valdivia V, Caldas N. Economic valuation related to public health due to the contamination of particulate matter less than 10 microns in Arequipa, Peru. 2024. <https://laccei.org/LACCEI2024-CostaRica/meta/SP1976.html>
- 18.** Espinoza-Guillen J, Alderete-Malpartida M, Navarro-Abarca U, Gómez-Muñoz H. Environmental monitoring and assessment. *Environmental Monitoring and Assessment.* 2024;196(5):452.

- <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-024-12611-4>
- 19.** Castillo-Ortiz J, Barajas-Ochoa A, Peláez-Ballestas I, Ramirez-Gomez A, Aceves-Avila F, Castaneda-Sanchez J, et al. AB1136 The age of onset of rheumatoid arthritis correlates with air pollution and health expenditure: results from multinational databases. *Annals of the Rheumatic Diseases*. 2017;76:1452–1453. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003496724258088>
- 20.** Escobar L, Sara J. Correlación del comportamiento de las variables meteorológicas y el comportamiento del material particulado en el aire Carabayllo, 2020. 2020. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/49563>
- 21.** Wannaz E, Larrea A, Reyes J, Salcedo J, Valenzuela C. PM10 correlates with COVID-19 infections 15 days later in Arequipa, Peru. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(29):39648–39654. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-13408-5>
- 22.** Espinoza-Guillen J, Alderete-Malpartida M, Roncal-Romero F, Vilcanqui-Sarmiento J. Environmental monitoring and assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2025;197(3):226. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-025-13696-1>
- 23.** Reátegui-Romero W, Zaldivar-Alvarez W, Pacsi-Valdivia S, Sánchez-Ccoyollo O, García A, Moya-Álvarez A. Behavior of the average concentrations and variability of PM10 and PM2.5 in the metropolitan area of Lima, Peru. 2024.
- 24.** Cortez C. Partículas en suspensión PM10 en el sector de talleres de metal mecánica de la ciudad de Puno. *Revista de Ciencias Naturales*. 2020;2(1):128–136. <https://revistas.unap.edu.pe/rccnn/index.php/rccnn/article/view/377>
- 25.** Quispe-Huamán L. Análisis del índice de claridad atmosférica diaria en la ciudad de Puno, 2014–2021. 2025;48(4):169–177. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0370-39082024000100169&script=sci_arttext
- 26.** Estrada M. Identificación de unas fuentes de PM1 y PM10 en un entorno de fondo urbano. 2025. <https://dspace.umh.es/handle/11000/37084>
- 27.** Pineda-Tapia J, Huayhua-Huamaní E, Humpiri-Flores M, Quispe-Monroy K, Lozano-Ccopia D, Chaiña-Sucasaca R, et al. Evaluating concentrations of PM10, PM2.5, SO₂, NO₂, CO, O₃ and H₂S emitted by artisanal brick kilns in Juliaca, Peru, using a low-cost sensor network and AERMOD model. *Gases*. 2025;5(4). <https://www.mdpi.com/2673-5628/5/4/24>
- 28.** Tapia J, Huamaní E, Monroy K, Huahuachampi M, Sucasaca R, Flores M, et al. Geolocation of fixed emission sources produced by artisan brick kilns in the atmospheric basin of the city of Juliaca, Peru. *RGSA*. 2024;18(11):e09786. <https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/9786>
- 29.** Alfaro-Alejo R, Paredes R, Laqui W, Alfaro-Vilca V, Belizario-Quispe G. Contamination of urban sediment by harmful heavy metals in high vehicular traffic zones of Juliaca, Peru. *EER*. 2025;13(3):358–370. http://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=15098
- 30.** Hernández M, Baloco A. Estrategias de mejoramiento de la calidad del aire en ciudades con problemas de contaminación atmosférica. 2019. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/8b44e5ed-e16c-45fb-87cf-11de5ae93465>
- 31.** Porta A, Sanchez E, Colman L. Calidad del aire. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP); 2018. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/73756>
- 32.** Sánchez J, Valdés S, Ostro B. Los efectos en salud de la contaminación atmosférica por PM10 en Santiago. 1998;69(2).
- 33.** Ramírez O. Contribución de fuentes y origen del material particulado atmosférico en Bogotá, Colombia. 2019. <https://portalcientifico.unav.edu/documents/603e19d9441e30047634775e>
- 34.** Arrieta A. Dispersión de material particulado (PM10) con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*. 2016;16(2):43–54. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096112>

- 35.** Hernández A. Sistema de evaluación de la dispersión episódica de contaminantes atmosféricos. 2016. <https://minerva.usc.gal/items/55634d3e-b9d2-4665-ac57-6dbed6fc384f>
- 36.** Perera J, Graieb O. Enfoque sistemático de problemas ambientales. Restauración de equilibrios dinámicos en ecosistemas dominados por el hombre. 1999. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/157326>
- 37.** Kenny G. Comparación de la capacidad predictiva de técnicas supervisadas y no supervisadas para la calidad del aire en la ciudad de Buenos Aires. 2025. <https://ri.itba.edu.ar/entities/publication/05d674cb-98ac-4786-94c3-49f34a85ca2e>
- 38.** Córdova-Mendoza P, Barrios-Mendoza T, Córdova-Barrios I. Primera caracterización de emisiones contaminantes y la calidad del aire en Ica, Perú. 2021;33(1):138–152. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-54212021000100138&script=sci_arttext
- 39.** Landa C. Análisis del diseño de la política de la calidad del aire de la Municipalidad Metropolitana de Lima: 2010-2012. 2014. <https://www.proquest.com/openview/b19b5f591960227af20fdfcb1e6f6ee6>
- 40.** Mendoza W. Cómo investigan los economistas: Guía para elaborar y desarrollar un proyecto de investigación. Fondo Editorial de la PUCP; 2014. 234 p.
- 41.** Hernández F, Fernández C, Baptista L. Metodología de la investigación. 5a ed. 2010. 264 p.
- 42.** Seinfeld J, Pandis S. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. 2016. <http://tvhdh.vnio.org.vn:8080/xmlui/handle/123456789/1596>
- 43.** Han L, Zhao J, Gao Y, Gu Z, Xin K, Zhang J. Spatial distribution characteristics of PM2.5 and PM10 in Xi'an City predicted by land use regression models. Sustainable Cities and Society. 2020;61:102329. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720305503>
- 44.** Plocoste T, Sankaran A, Euphrasie-Clotilde L. Study of the dynamical relationships between PM2.5 and PM10 in the Caribbean area using a multiscale framework. Atmosphere. 2023;14(3):468. <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/3/468>
- 45.** Galloza D, Ponce L, Mejía D. Contaminación por partículas PM10 y su relación con la temperatura y la humedad relativa en la ciudad de Trujillo, La Libertad, 2021. 2024. <https://agris.fao.org/search/en/providers/125044/records/674979057625988a37222199>
- 46.** Ayala D, Ramos S. Condiciones meteorológicas y material particulado PM10 y PM2.5 en la construcción del hospital Hipólito Unánue, Tacna, 2019. Ingeniería Investiga. 2020;2(1):276–285. <https://revistas.upt.edu.pe/ojs/index.php/ingenieria/article/view/297>
- 47.** Ríos L. Correlación entre las variables meteorológicas y la concentración de los contaminantes atmosféricos en el distrito de Villa María del Triunfo, mayo de 2018. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur; 2020. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/2660>
- 48.** Cabello-Torres R, Estela A, Sánchez-Ccoyollo O, Romero-Cabello E, Ávila F, Castañeda-Olivera C, et al. Statistical modeling approach for PM10 prediction before and during confinement by COVID-19 in South Lima, Perú. Scientific Reports. 2022;12(1):16737. <https://www.nature.com/articles/s41598-022-20904-2>
- 49.** Rojas F, Pacsi-Valdivia S, Sánchez-Ccoyollo O. Simulación computacional e influencia de las variables meteorológicas en las concentraciones de PM10 y PM2.5 en Lima Metropolitana. 2022;33(3). https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642022000300223&script=sci_arttext
- 50.** Popescu L, Popescu R, Catalina T. Indoor particle pollution in Bucharest, Romania. Toxics. 2022;10(12):757. <https://europepmc.org/articles/PMC9786567>

- 51.** Sowka I, Lagiewka A, Zwozdziak A, Skretowicz M, Nych A, Zwozdziak J. Application of GIS technique for PM2.5 and PM10 concentrations spatial analysis in the province of Lower Silesia. 2011. <https://hero.epa.gov/reference/2658661/>
- 52.** Wang J, Gui H, An L, Hua C, Zhang T, Zhang B. Modeling for the source apportionments of PM10 during sand and dust storms over East Asia in 2020. *Atmospheric Environment*. 2021;267:118768. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231021005902>
- 53.** Kuerban M, Waili Y, Fan F, Liu Y, Qin W, Dore A, et al. Spatio-temporal patterns of air pollution in China from 2015 to 2018 and implications for health risks. *Environmental Pollution*. 2020;258:113659. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749119319074>
- 54.** Yin H, Xu L. Comparative study of PM10/PM2.5-bound PAHs in downtown Beijing, China: concentrations, sources, and health risks. *Journal of Cleaner Production*. 2018;177:674–683. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617332572>