

Concentración de material particulado y salud de la población en zonas de más de 3500 m s.n.m.

Lenin Rueda-Torres^a, Julio Warthon-Ascarza^b, Sergio Pacsi-Valdivia^a

FILIACIONES

a. Programa de Doctorado en Ingeniería y Ciencias Ambientales, Universidad Nacional Agraria La Molina

b. Centro de Investigación de Energía y Atmósfera, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

CORREOS DE AUTORES

20240311@lamolina.edu.pe

julio.warthon@unsaac.edu.pe

sergiopacsi7@gmail.com

Introducción

Las poblaciones residentes en gran altitud ($\geq 3,500$ m s. n. m.) han desarrollado cambios fisiológicos para enfrentar la hipoxia ambiental, como el aumento de la ventilación y capacidad pulmonar^[1]. No obstante, estas adaptaciones también podrían favorecer una mayor captación de contaminantes atmosféricos por inhalación y aumentar el riesgo de efectos adversos sobre la salud^[2]. El Perú es uno de los países con mayor proporción de población residente en zonas de gran altitud^[3], por tanto, resulta clave estudiar la relación entre altitud y salud respiratoria para generar evidencia que contribuya al diseño de regulaciones particulares^[4-7]. En ese marco, este estudio busca estimar y modelar la exposición a PM_{2.5} en comunidades de Cerro de Pasco (4300 m s.n.m.) y evaluar su asociación con parámetros espirométricos.

Materiales y métodos

Se realizó un estudio transversal analítico con componente semiecológico. Se evaluó a 496 participantes (68.5 % mujeres) mediante espirometría y georreferenciación de domicilio, entre noviembre de 2025 y enero de 2026. Las mediciones espirométricas se realizaron con un espirómetro portátil MIR Spirobank II previamente calibrado. Las concentraciones ambientales de PM_{2.5} se midieron con cuatro sensores fijos PurpleAir, de forma continua desde noviembre de 2025 hasta marzo de 2026 (temporada de lluvias). Los sensores fueron previamente intercomparados a gran altitud con equipos de referencia, cumpliendo con la regulación nacional (Fig. 1). Las concentraciones de PM_{2.5} fueron depuradas mediante recorte de valores extremos. La exposición individual se estimó mediante kriging^[8] ordinario, y su asociación con la relación entre el volumen espiratorio forzado en el primer segundo y la capacidad vital forzada (FEV₁/FVC) se evaluó con modelos de regresión lineal multivariable ajustados por edad, sexo e índice de masa corporal.

Resultados y conclusiones

La exposición media estimada a PM_{2.5} fue de $4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (DE: 1.6). La media del FEV₁/FVC fue de 84.0% (DE: 8.2). En el análisis multivariable, una mayor exposición a PM_{2.5} estimada mediante kriging (Fig. 2). se asoció con una menor relación FEV₁/FVC ($\beta = -0.56$ puntos porcentuales por cada incremento de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; IC 95%: $-1.13, -0.00$; $p = 0.050$), ajustando por edad, sexo e índice de masa corporal. Aunque la dirección de la asociación fue consistente con un efecto adverso, el modelo explicó una proporción limitada de la variabilidad en la función pulmonar ($R^2 = 0.015$).

Una mayor exposición estimada a PM_{2.5} se asoció con una menor función pulmonar en este contexto de gran altitud, con una significancia estadística marginal. Estos hallazgos sugieren un posible efecto adverso de la contaminación del aire sobre la salud respiratoria en poblaciones de gran altitud. Sin embargo, la limitada cobertura espacial de los

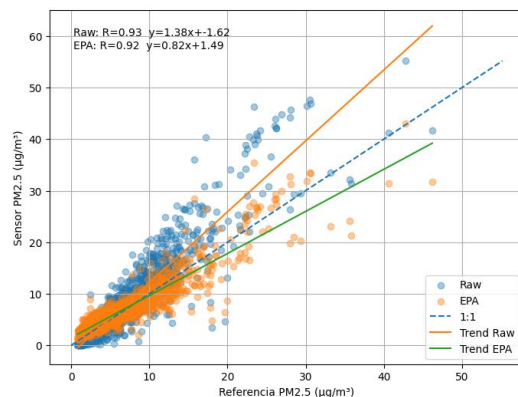


Fig. 1. Evaluación de la intercomparación entre el sensor PurpleAir y el equipo de referencia mediante análisis de correlación.

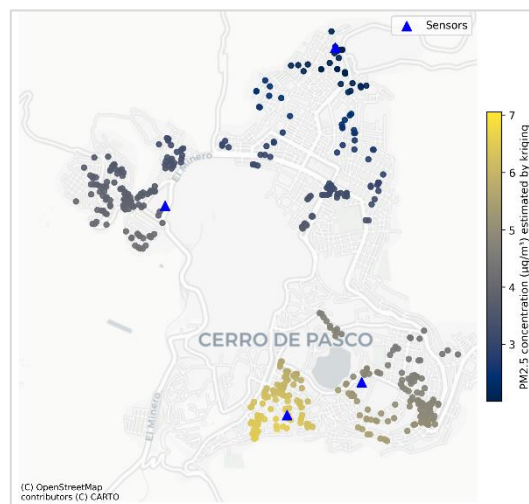


Fig. 2. Estimación de la exposición individual a PM_{2.5} mediante kriging ordinario en participantes de Cerro de Pasco.

puntos de monitoreo y el periodo de evaluación relativamente corto podrían haber introducido incertidumbre en la estimación de la exposición. Se recomienda la continuidad del monitoreo con una mayor cobertura espacial para caracterizar con mayor precisión el impacto de la contaminación del aire en la salud respiratoria en estos entornos.

REFERENCIAS

- [1] Masiol, M.; Formenton, G.; Visin, F.; Bonetto, A.; Rovea, M.; Ficotto, S.; Danesin, E.; Toffanin, T.; Maggiulli, A.; Battistel, M.; Mazzi, G.; Feltracco, M.; Gambaro, A.; Hopke, P.K. Sources of wintertime PM_{2.5} at a major city in an Alpine Valley: The role of atmospheric dispersion and inversion dynamics. *Atmos. Environ.* **2024**, *330*, 120556.
- [2] West, J.B. Oxygen enrichment of room air to relieve the hypoxia of high altitude. *Respir. Physiol.* **1995**, *99*(2), 225–232.
- [3] Tremblay, J.C.; Ainslie, P.N. Global and country-level estimates of human population at high altitude. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2021**, *118*(18), e2102463118.
- [4] Warthon, J.; Olarte, A.; Chura, R.; Warthon, B.; Zamalloa, A. An Adjustment Factor for Air Quality Standards for Pollutant Gases at Different Altitudes: A Tool for Sustainable Environmental Policy and Health Protection. *Sustainability (Switzerland)* **2025**, *17*(21).
- [5] Rueda-Torres, L.V.; Warthon-Ascarza, J.; Pacsi-Valdivia, S. Adjustment Criteria for Air-Quality Standards by Altitude: A Scoping Review with Regulatory Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. , *22*(7) . 2025.
- [6] Bravo, A.; Urone, P. The altitude: A fundamental parameter in the use of air quality standards. *J. Air Pollut. Control Assoc.* **1981**, *31*(3), 264–265.
- [7] Bravo Alvarez, H.; Sosa Echeverria, R.; Sanchez Alvarez, P.; Krupa, S. Air Quality Standards for Particulate Matter (PM) at high altitude cities. *Environmental Pollution* **2013**, *173*, 255–256.
- [8] Kim, S.-Y.; Yi, S.-J.; Eum, Y.S.; Choi, H.-J.; Shin, H.; Ryou, H.G.; Kim, H. Ordinary kriging approach to predicting long-term particulate matter concentrations in seven major Korean cities. *Environ. Health Toxicol.* **2014**, *29*, e2014012.

PALABRAS CLAVE	Gran altitud	PM2.5	salud respiratoria	Espirometría
-----------------------	--------------	-------	--------------------	--------------