

Artículo original

Curvas de referencia de presión arterial según edad y altitud de residencia en adultos peruanos

Akram Hernández-Vásquez^{1,a}, Jamee Guerra Valencia^{2,b}, Rodrigo Vargas-Fernández^{3,c}

Recibido: 01 de diciembre del 2025
Aceptado: 31 de enero del 2026
En línea: 06 de febrero del 2026

Filiación de los autores

¹ Centro de Excelencia en Investigaciones Económicas y Sociales en Salud, Vicerrectorado de Investigación, Universidad San Ignacio de Loyola, Lima, Perú.

² Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Privada del Norte, Lima, Perú.

³ Epidemiology and Health Economics Research (EHER), Universidad Científica del Sur, Lima, Perú.

^a Médico cirujano, magíster en Gestión y Políticas Públicas

^b Licenciado en Nutrición, magíster en Docencia Universitaria y Gestión Educativa

^c Médico cirujano, maestro en Epidemiología

Correspondencia

Akram Hernández-Vásquez
Universidad San Ignacio de Loyola.
Av. La Fontana 550, La Molina,
Lima, Perú.

Correo

ahernandez@usiledup.edu

Fuente de financiamiento

Autofinanciado.

Conflictos de interés

Akram Hernández-Vásquez y Rodrigo Vargas-Fernández son miembros del equipo editorial de Archivos Peruanos de Cardiología y Cirugía Cardiovascular. Jamee Guerra Valencia declara no tener conflictos de interés.

Citar como

Hernández-Vásquez A, Guerra Valencia J, Vargas-Fernández R. Curvas de referencia de presión arterial según edad y altitud de residencia en adultos peruanos. Arch Peru Cardiol Cir Cardiovasc. 2026;7(1). doi: 10.47487/apcyccv.v7i1.596.



Esta obra tiene una licencia de Creative Commons Atribución 4.0 Internacional

RESUMEN

Objetivos. Desarrollar curvas percentilares por edad para la presión arterial media (PAM), diastólica (PAD) y sistólica (PAS) en adultos peruanos de 20-59 años, estratificadas por altitud de residencia. **Materiales y métodos.** Se realizó un estudio transversal analítico con la Encuesta Demográfica y de Salud Familiar (ENDES) 2014-2024. Se incluyeron adultos de 20-59 años con dos mediciones válidas de presión arterial y sin diagnóstico previo de hipertensión. La altitud de residencia se clasificó en <2500, 2500-3499 y ≥3500 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.). Los percentiles (P5-P95) de la PAM, PAD y PAS se estimaron empleando modelos aditivos generalizados para localización, escala y forma (GAMLSS) con distribución Box-Cox Cole and Green (BCCG). **Resultados.** Se analizaron 227 093 adultos (edad media: 35,7 años; 56,2% mujeres). En todos los estratos de altitud, la PAM, PAD y PAS mostraron incrementos graduales entre los 20 y 50 años, aunque la magnitud del incremento se atenuó a mayor altitud. La PAD y la PAM mostraron relativa estabilidad después de los 50 años, mientras que la PAS continuó aumentando de forma más progresiva. A los 50 y 59 años, los valores de PAS fueron sistemáticamente más bajos en altitudes ≥3500 que en <2500 m s.n.m. **Conclusiones.** La distribución de la presión arterial varía según la altitud de residencia, con incrementos por edad menos marcados en zonas de mayor altitud. Las curvas de referencia percentilares generadas pueden aportar a la interpretación contextualizada de la presión arterial en poblaciones de alta altitud y fortalecer la vigilancia epidemiológica.

Palabras clave: Presión arterial; Altitud; Factores de Edad; Adultos; Perú (Fuente: DeCS-BIREME).

ABSTRACT

Blood pressure reference curves by age and residential altitude in Peruvian adults

Objectives. To develop age-specific percentile curves for mean arterial pressure (MAP), diastolic blood pressure (DBP), and systolic blood pressure (SBP) in Peruvian adults aged 20-59 years, stratified by altitude of residence. **Materials and methods.** An analytical cross-sectional study was conducted using data from the 2014-2024 Demographic and Family Health Survey (ENDES). Adults aged 20-59 years with two valid blood pressure measurements and no prior diagnosis of hypertension were included. Altitude of residence was classified as <2500, 2500-3499, and ≥3500 meters above sea level (masl). Percentile curves (P5-P95) for MAP, DBP, and SBP were estimated using Generalized Additive Models for Location, Scale, and Shape (GAMLSS) with the Box-Cox Cole and Green (BCCG) distribution. **Results.** A total of 227,093 adults were analyzed (mean age: 35.7 years; 56.2% women). Across all altitude strata, MAP, DBP, and SBP increased progressively from ages 20 to 50, although the magnitude of increase was attenuated at higher altitudes. MAP and DBP showed relative stability after age 50, whereas SBP continued to rise more steadily. At ages 50 and 59, SBP values were consistently lower at ≥3500 compared with <2500 masl. **Conclusions.** Blood pressure distribution varies according to altitude of residence, with less pronounced age-related increases at higher elevations. The percentile reference curves generated here may support context-specific interpretation of blood pressure in high-altitude populations and strengthen epidemiological surveillance.

Keywords: Arterial pressure; Altitude; Age factors; Adult; Peru (Source: MeSH-NLM).

Introducción

La presión arterial (PA) es un parámetro fisiológico esencial para mantener la perfusión tisular y el equilibrio hemodinámico⁽¹⁾. Desde finales de la década de 1940, se reconoce que la elevación sostenida de la PA es un factor de riesgo modificable de enfermedad cardiovascular, renal y cerebrovascular⁽²⁾. Los valores de la PA no son uniformes tanto a nivel individual como interindividual y varían sistemáticamente según la edad, el sexo, la composición corporal, actividad física, determinantes ambientales y otros factores sociodemográficos^(2,3), lo que refleja la compleja regulación biológica y contextual de este parámetro.

La altitud de residencia destaca entre los factores ambientales que modifican la PA por la exposición crónica a hipoxia hipobárica, provocando adaptaciones cardiovasculares como cambios en el gasto cardíaco, aumento de la viscosidad sanguínea y ajustes en la resistencia vascular periférica⁽⁴⁾. Estas respuestas, necesarias para mantener la oxigenación tisular, pueden alterar los niveles de PA tanto con elevaciones como con descensos⁽⁵⁾ y su trayectoria a lo largo de la vida. Esto es relevante en países andinos como Perú, donde aproximadamente una cuarta parte de la población reside sobre los 2500 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), en contraste con el 1% de la población mundial expuesta a dichas altitudes⁽⁶⁾. Aunque el aumento de la PA con la edad está ampliamente documentado⁽²⁾, algunas poblaciones nativas mantienen valores de PA estables durante la adultez⁽²⁾. Asimismo, la distribución geográfica de la hipertensión arterial reporta prevalencias más bajas en la sierra peruana, caracterizada por mayor altitud geográfica⁽⁷⁾. En conjunto, esto sugiere que la trayectoria de la PA a lo largo de la edad podría diferir según la altitud de residencia.

La caracterización poblacional de la PA requiere evaluar la forma completa de su distribución. Si bien cambios en la media poblacional explican gran parte de las variaciones temporales y geográficas en la prevalencia de hipertensión⁽⁸⁾, la PA presenta una distribución asimétrica sesgada hacia la derecha que se acentúa con la edad⁽⁹⁾, por lo que su comportamiento puede diferir según determinantes fisiológicos y ambientales⁽⁵⁾. En este contexto, las curvas percentilares permiten capturar patrones no evidentes mediante promedios, describir adecuadamente las colas de la distribución y facilitar comparaciones entre subgrupos poblacionales con diferentes exposiciones. Este enfoque es pertinente cuando factores como la altitud y la edad pueden modificar los percentiles altos debido a la influencia de la hipoxia crónica y el envejecimiento sobre los determinantes hemodinámicos de la PA. Asimismo, cambios en los percentiles altos podrían influir en la proporción de personas que alcanzan niveles clínicamente elevados de PA.

A pesar de la importancia epidemiológica y clínica de estas variaciones, hasta la fecha no existen curvas de referencia de la PA en adultos que viven a diferentes altitudes, lo que limita la interpretación contextualizada de la PA a lo largo de la adultez en poblaciones que residen en zonas altoandinas. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo desarrollar curvas

percentilares para la edad de la presión arterial media (PAM), presión arterial sistólica (PAS) y presión arterial diastólica (PAD) en adultos peruanos de 20-59 años, estratificadas por altitud de residencia.

Materiales y métodos

Diseño del estudio y fuente de datos

Se realizó un estudio transversal analítico utilizando los datos secundarios provenientes de la Encuesta Demográfica y de Salud Familiar (ENDES) de los años 2014 a 2024⁽¹⁰⁾, ejecutada cada año por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) mediante un diseño muestral probabilístico, estratificado, y bietápico, con ponderaciones que permiten realizar inferencias representativas a nivel de la población peruana⁽¹⁰⁾.

Muestra del estudio

La muestra del presente estudio estuvo conformada por adultos de 20-59 años que participaron en la ENDES durante el período 2014-2024. El grupo etario fue seleccionado con el propósito de reducir la variabilidad fisiológica asociada al envejecimiento⁽⁹⁾, particularmente por el aumento de la rigidez arterial y la mayor dispersión de los valores de la PA en adolescentes y adultos mayores.

Se incluyeron aquellos participantes que tenían entre 20 y 59 años, contaban con dos mediciones de PAS y PAD, y disponían de información completa en las variables de estudio. Fueron excluidos los participantes que presentaban valores fisiológicamente no plausibles, definidos como PAS < 70 mmHg o > 270 mmHg y PAD < 50 mmHg o > 150 mmHg según lo reportado previamente^(11,12), así como diferencias entre los promedios de las dos tomas de PA, tanto diastólica como sistólica, $\geq \pm 10$ mmHg⁽¹³⁾. Se excluyeron las mujeres que declararon estar embarazadas y aquellos con un diagnóstico previo de hipertensión arterial, ya que su inclusión podría distorsionar la estimación de los percentiles poblacionales, ya sea por sobreestimación o subestimación. La muestra final estuvo conformada por 227 093 participantes (**Figura 1**).

Variables de estudio

Las variables principales del estudio fueron la PAM, PAD y PAS, calculadas a partir de las mediciones directas de PA realizadas en la ENDES. Cada participante contó con dos mediciones de PAS y PAD obtenidas durante la misma visita, siguiendo el protocolo estandarizado de medición establecido por el INEI. A partir de estas mediciones se obtuvieron tres variables: PAS promedio, calculada como el promedio de las dos tomas de PAS; PAD promedio, calculada como el promedio de las dos tomas de PAD; y la PAM, estimada según la fórmula $PAD + (PAS - PAD)/3$.

La PA fue medida siguiendo el protocolo estandarizado de la ENDES, detallado en el manual de la entrevistadora⁽¹⁴⁾.

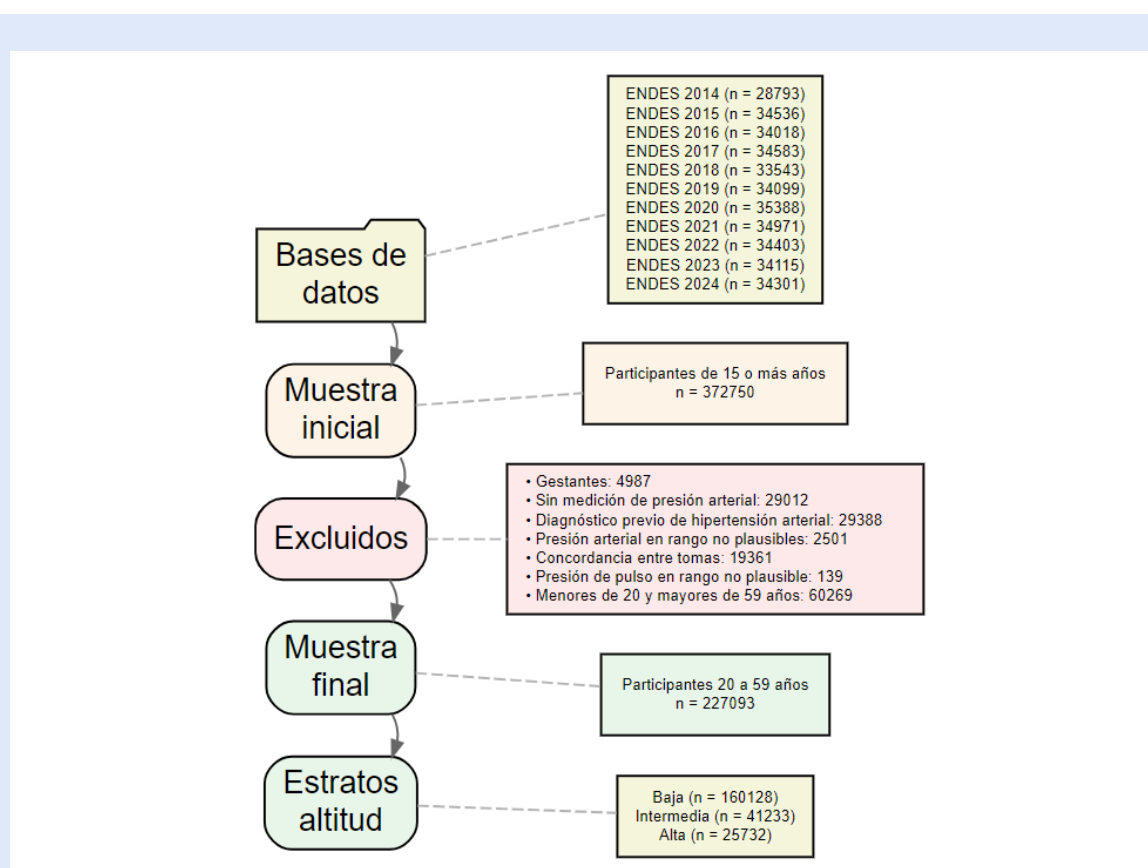


Figura 1. Flujograma de selección de participantes del estudio.

Desde 2017, se emplea un tensiómetro automático OMRON HEM-7113 (rango 0 - 299 mmHg; precisión ± 3 mmHg) y brazaletes según la textura del entrevistado (estándar de 220 a 320 mm y de mayor volumen de 320 a 420 mm) ⁽¹⁵⁾. La medición se realizó tras un reposo de ≥ 5 min en posición sentada, con los pies apoyados en el suelo, el brazo derecho descubierto y apoyado sobre una mesa a la altura del corazón, y tras excluir el consumo de té, café, alcohol o tabaco en los 30 min anteriores. Se tomaron dos mediciones consecutivas con un intervalo de dos minutos entre ellas y se efectuó una tercera cuando se observó una diferencia > 20 mmHg en la PAS o > 10 mmHg en la PAD entre la primera y segunda medición, registrándose así las mediciones que no presentaran estas diferencias entre sí. Mayores detalles se pueden encontrar en el Manual de la entrevistadora ⁽¹⁴⁾.

La altitud de residencia se utilizó como variable estratificadora, expresada en m s.n.m. Para el análisis, se clasificó en tres categorías: < 2500 m s.n.m., 2500-3499 m s.n.m. y ≥ 3500 m s.n.m. Adicionalmente, se incluyó una categoría global denominada «Total» para agrupar a todos los participantes independientemente de la altitud. Dado que los patrones de variación de la PA durante la adultez son similares en ambos sexos, con diferencias de magnitud pequeñas ⁽¹⁶⁾, el sexo no se incluyó como variable de estratificación.

Se consideraron variables sociodemográficas que incluyeron la edad, registrada como variable continua en años

cumplidos (**Figura 2**); el sexo, clasificado como masculino o femenino; el área de residencia, categorizada como urbana o rural; y la región o departamento, correspondiente a las 25 unidades político-administrativas del país (24 departamentos y la Provincia Constitucional del Callao).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis descriptivo, considerando la muestra total y las categorías de altitud. La variable edad se resumió mediante la media y su desviación estándar (DE), así como la mediana y su rango intercuartílico (RIC). Las variables sexo, área de residencia (urbana/rural) y departamento de residencia se describieron como frecuencias absolutas y relativas.

Se estimaron curvas de referencia para la PAM, PAD y PAS en función de la edad, tanto en la muestra total como en cada estrato de altitud. De este modo, se describió la relación entre los parámetros de PA entre los 20 y 59 años según la altitud de residencia. Para ello, se emplearon modelos aditivos generalizados para localización, escala y forma (GAMLSS, por sus siglas en inglés), un método de regresión flexible que permite modelar simultáneamente los parámetros de la distribución condicional de la variable respuesta ⁽¹⁷⁾.

Se evaluaron diferentes familias de distribuciones continuas disponibles en GAMLSS, incluyendo la Normal (NO), Box-Cox Cole and Green (BCCG), Box-Cox Power Exponential (BCPE) y Box-Cox t (BCT). La comparación de

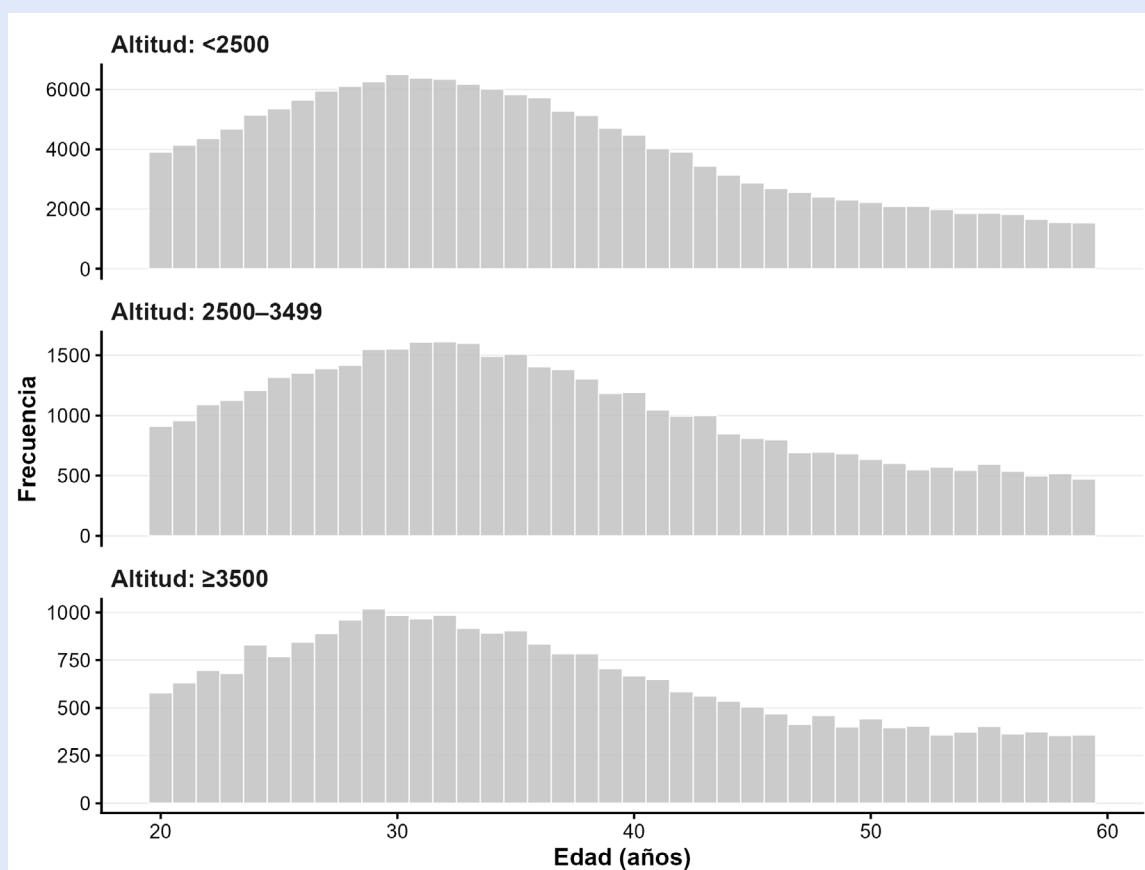


Figura 2. Distribución de la muestra según edad y altitud de residencia (m s.n.m).

modelos se realizó mediante criterios de información (AIC, BIC y GAIC), seleccionando la distribución BCCG al mostrar un buen desempeño global de ajuste según el GAIC. Asimismo, la modelación se realizó utilizando la distribución BCCG, recomendada para la construcción de curvas percentilares y estimación de percentiles en parámetros fisiológicos continuos con posible asimetría y porque proporciona parámetros directamente interpretables en la escala original de la variable respuesta^(18,19). En cada estimación, se ajustaron modelos con la edad (en años) como variable continua, mediante funciones de suavizamiento penalizado (p-splines) para los parámetros de localización (μ) y escala (σ). La adecuación de los modelos se evaluó a través de gráficos diagnósticos específicos de GAMLSS como el worm plot, el bucket plot y las estadísticas Q de normalidad de residuos. A partir de los modelos finales, se generaron predicciones suavizadas de los percentiles de interés (P5, P10, P25, P50, P75, P90 y P95) a lo largo del rango de edad y se construyeron gráficos individuales para la muestra total y cada estrato de altitud.

Todos los análisis se llevaron a cabo en R versión 4.3.2 (R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria) utilizando los paquetes gamlss para el modelamiento sin incluir ponderadores ni características del diseño muestral (funcionalidad de opciones no disponibles en el paquete) y ggplot2 para la elaboración de las figuras.

Consideraciones éticas

Este estudio se basó en el análisis secundario de bases de datos anonimizadas que son de dominio público, por lo que no se buscó la aprobación por un comité de ética.

Resultados

Se analizaron 227 093 adultos entre 20 y 59 años. El promedio de edad fue 35,7 (DE: 10,1), y 56,2% fueron mujeres. La distribución urbano - rural varió según la altitud de residencia. A <2500 m s.n.m., la mayoría de los participantes residía en áreas urbanas (76,5% vs. 23,5%). En contraste, entre los 2500-3499 m s.n.m., así como a partir de los 3500 m s.n.m., predominó la residencia en áreas rurales (52,4% vs. 47,6% y 63,9% vs. 36,1%, respectivamente). La distribución de las características sociodemográficas y las regiones político-administrativas por las categorías de altitud se observa en la **Tabla 1**.

En el total de la muestra (**Figura 1A, Tabla suplementaria 1**), la mediana de la PAM tuvo un patrón creciente con la edad (de 82,2 mmHg a los 20 años hasta 89,1 mmHg a los 46 años), con estabilización relativa hacia los 59 años (89,8 mmHg). Los percentiles inferiores (P5 y P10) presentaron incrementos entre los 20 y 49 años y un ligero descenso hacia los 59 años. Los percentiles superiores (P90 y P95) evidenciaron un

Tabla 1. Características sociodemográficas de los participantes según categorías de altitud de residencia.

Característica	Total (n=227 093)	<2500 m s.n.m. (n=160 128)	2500–3499 m s.n.m. (n=41 233)	≥3500 m s.n.m. (n=25 732)
Edad (años)				
Media (DE)	35,7 (10,1)	35,5 (10,0)	36,2 (10,2)	36,4 (10,5)
Mediana (RIQ)	34,0 (28,0–42,0)	34,0 (28,0–42,0)	35,0 (28,0–43,0)	35,0 (28,0–44,0)
Sexo				
Hombre	99 371 (43,8)	71 087 (44,4)	17 521 (42,5)	10 763 (41,8)
Mujer	127 722 (56,2)	89 041 (55,6)	23 712 (57,5)	14 969 (58,2)
Residencia				
Urbano	151 333 (66,6)	122 418 (76,5)	19 615 (47,6)	9 300 (36,1)
Rural	75 760 (33,4)	37 710 (23,5)	21 618 (52,4)	16 432 (63,9)
Departamento de residencia				
Amazonas	9208 (4,1)	8504 (5,3)	704 (1,7)	0 (0,0)
Ancash	8202 (3,6)	3880 (2,4)	3847 (9,3)	475 (1,8)
Apurímac	8123 (3,6)	992 (0,6)	5235 (12,7)	1896 (7,4)
Arequipa	8236 (3,6)	5894 (3,7)	1913 (4,6)	429 (1,7)
Ayacucho	9252 (4,1)	1454 (0,9)	6873 (16,7)	925 (3,6)
Cajamarca	8253 (3,6)	3912 (2,4)	4054 (9,8)	287 (1,1)
Callao	7946 (3,5)	7946 (5,0)	0 (0,0)	0 (0,0)
Cusco	7545 (3,3)	1377 (0,9)	3409 (8,3)	2759 (10,7)
Huancavelica	7688 (3,4)	320 (0,2)	2889 (7,0)	4479 (17,4)
Huánuco	9033 (4,0)	5381 (3,4)	2260 (5,5)	1392 (5,4)
Ica	8717 (3,8)	8633 (5,4)	35 (0,1)	49 (0,2)
Junín	8520 (3,8)	2697 (1,7)	4796 (11,6)	1027 (4,0)
La Libertad	8325 (3,7)	6244 (3,9)	1768 (4,3)	313 (1,2)
Lambayeque	8663 (3,8)	8557 (5,3)	98 (0,2)	8 (0,0)
Lima	26 629 (11,7)	25 930 (16,2)	385 (0,9)	314 (1,2)
Loreto	7657 (3,4)	7657 (4,8)	0 (0,0)	0 (0,0)
Madre de Dios	8240 (3,6)	8240 (5,1)	0 (0,0)	0 (0,0)
Moquegua	7747 (3,4)	6583 (4,1)	811 (2,0)	353 (1,4)
Pasco	8238 (3,6)	2991 (1,9)	1429 (3,5)	3818 (14,8)
Piura	8619 (3,8)	8427 (5,3)	171 (0,4)	21 (0,1)
Puno	7625 (3,4)	448 (0,3)	139 (0,3)	7038 (27,4)
San Martín	8858 (3,9)	8858 (5,5)	0 (0,0)	0 (0,0)
Tacna	8364 (3,7)	7798 (4,9)	417 (1,0)	149 (0,6)
Tumbes	8502 (3,7)	8502 (5,3)	0 (0,0)	0 (0,0)
Ucayali	8903 (3,9)	8903 (5,6)	0 (0,0)	0 (0,0)

DE: desviación estándar. RIQ: rango intercuartílico.

Entre paréntesis se expresan los porcentajes de la columna a menos que se indique lo contrario.

incremento sostenido en todo el rango etario, aunque con aumentos más discretos después de los 49-50 años (**Figura 1A, Tabla suplementaria 1**).

Las **Figuras 1B a 1D** presentan las curvas de percentiles de la PAM según las altitudes de residencia. En residentes de <2500 (**Figura 1B, Tabla suplementaria 2**) y 2500-3499 m s.n.m. (**Figura 1C, Tabla suplementaria 3**), la mediana de la PAM mostró un incremento progresivo desde los 20 hasta los 47-50 años,

seguido de una estabilización relativa hacia los 59 años. Los percentiles inferiores (P5 y P10) mostraron incrementos suaves desde los 20 hasta alrededor de los 47-50 años, seguidos de un leve descenso en la década posterior, manteniéndose en valores cercanos a 73-77 mmHg hacia los 59 años. En los percentiles superiores (P90 y P95), la PAM mostró incrementos sostenidos a lo largo de todo el rango etario, aunque más atenuados en el grupo de 2500-3499 m s.n.m. (P90/P95

a los 59 años: 107,0/112,6 mmHg y 105,6/111,0 mmHg, respectivamente). En contraste, los residentes a ≥ 3500 m s.n.m. no mostraron una meseta clara en edades mayores. La mediana de la PAM aumentó de 82,6 mmHg a los 20 años a 88,4 mmHg a los 59 años, manteniendo un patrón ascendente continuo, aunque con un incremento de menor magnitud después de los 50 años. Los percentiles inferiores (P5 y P10) también presentaron incrementos sostenidos con variaciones de baja magnitud en las edades finales. En los percentiles superiores (P90 y P95), los incrementos fueron más pronunciados, con trayectoria ascendente en toda la adultez (**Figura 1D, Tabla suplementaria 4**).

En la muestra total, la mediana de la PAD tuvo un patrón de incremento con la edad, con variaciones de 67,7 mmHg a los 20 años a 74,3 mmHg a los 50 años, seguido de un descenso leve hacia los 59 años (73,5 mmHg). Esto se replicó en los percentiles inferiores (P5 y P10), con incrementos de la PAD desde los 20 hasta los 49 años, seguidos de un descenso hasta los 59 años. En los percentiles superiores (P90 y P95), la PAD mostró un aumento sostenido hasta los 50 años, con posterior estabilización hacia los 59 años (**Figura 2A, Tabla suplementaria 5**). Los patrones de variación de la PAD con la edad no fueron uniformes entre los distintos niveles de altitud.

Entre los 20 y 50 años, los incrementos de la PAD se observaron para todos los percentiles, aunque fueron más pronunciados en residentes a <2500 m s.n.m. (**Figura 2B, Tabla suplementaria 6**) y progresivamente menores en los grupos de 2500-3499 (**Figura 2C, Tabla suplementaria 7**) y ≥ 3500 m s.n.m. (**Figura 2D, Tabla suplementaria 8**). Entre los 50 y 59 años, la mediana y los percentiles superiores e inferiores de la PAD mostraron un descenso leve en residentes de <2500 m s.n.m. En contraste, en residentes de ≥ 2500 m s.n.m., para la mediana y los percentiles superiores predominó una estabilización con variaciones mínimas, mientras que para los percentiles inferiores (P5 y P10) se observaron ligeros descensos. Además, en residentes de ≥ 3500 m s.n.m., los valores de PAD a los 20 años fueron ligeramente mayores que los observados en <2500 m s.n.m. (mediana: 68,6 mmHg vs. 67,2 mmHg), patrón similar al observado en el grupo de 2500-3499 m s.n.m.

La mediana de la PAS en la muestra total (**Figura 3A, Tabla suplementaria 9**) mostró un aumento progresivo desde los 20 años (111,0 mmHg) hasta los 50 años (119,7 mmHg), con un ascenso más atenuado hacia los 59 años (122,3 mmHg). Este patrón también se observó tanto en los percentiles superiores (P90-P95) como en los inferiores (P5-P10), aunque en estos últimos el incremento fue más gradual.

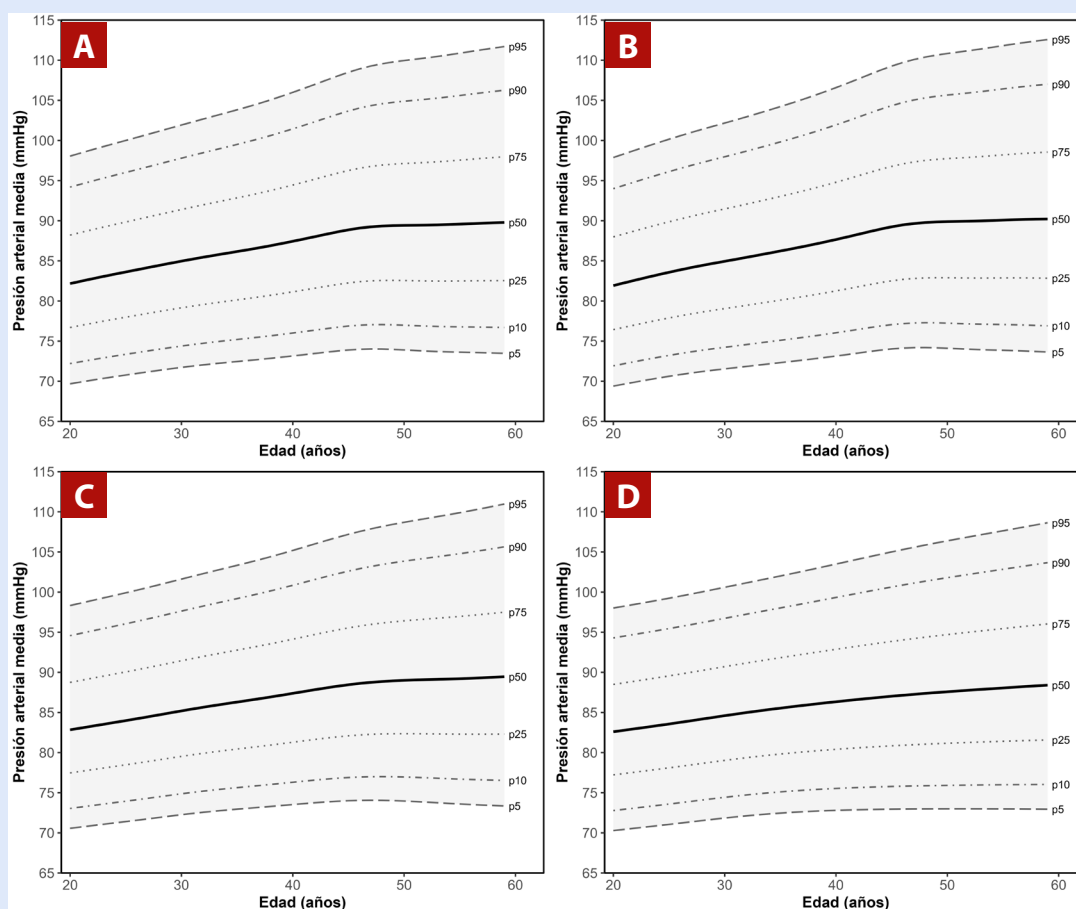


Figura 3. Curvas percentilares (P5, P10, P25, P50, P75, P90, P95) de presión arterial media según edad en adultos peruanos de 20-59 años. **A)** Muestra total; **B)** <2500 m s.n.m.; **C)** 2500-3499 m s.n.m.; **D)** ≥ 3500 m s.n.m.

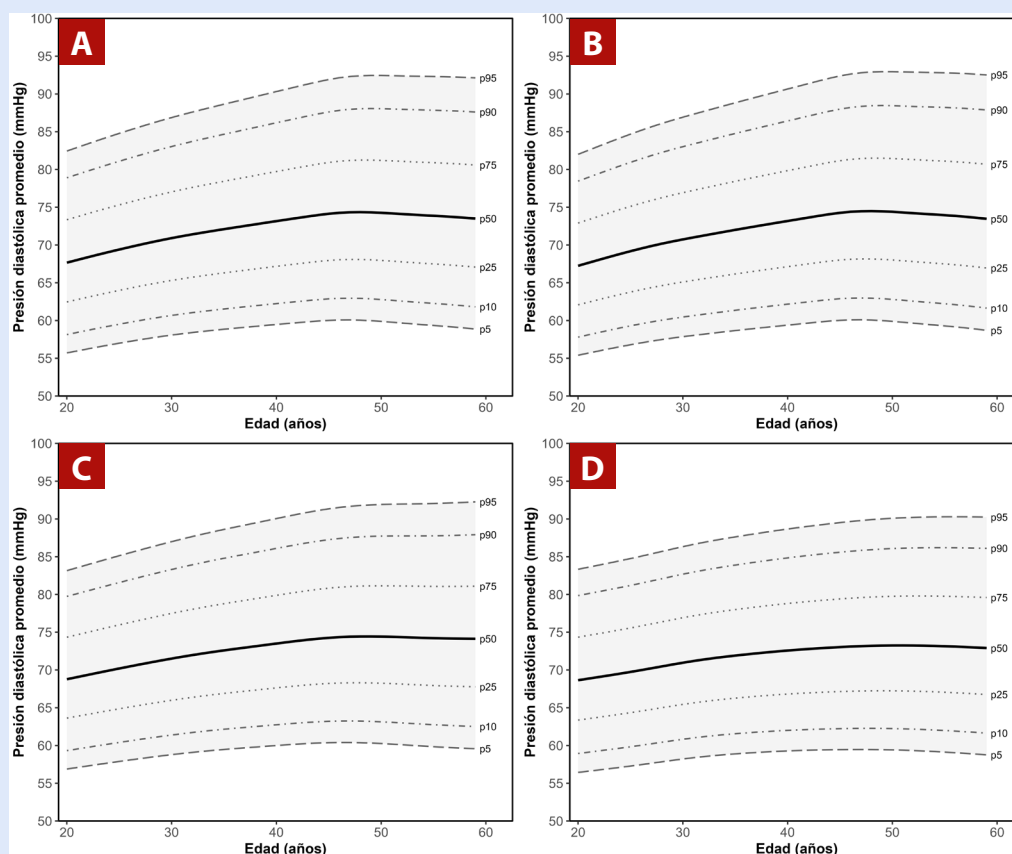


Figura 4. Curvas percentilares (P5, P10, P25, P50, P75, P90, P95) de presión arterial diastólica según edad en adultos peruanos de 20-59 años. **A)** Muestra total; **B)** <2500 m s.n.m.; **C)** 2500-3499 m s.n.m.; **D)** ≥3500 m s.n.m.

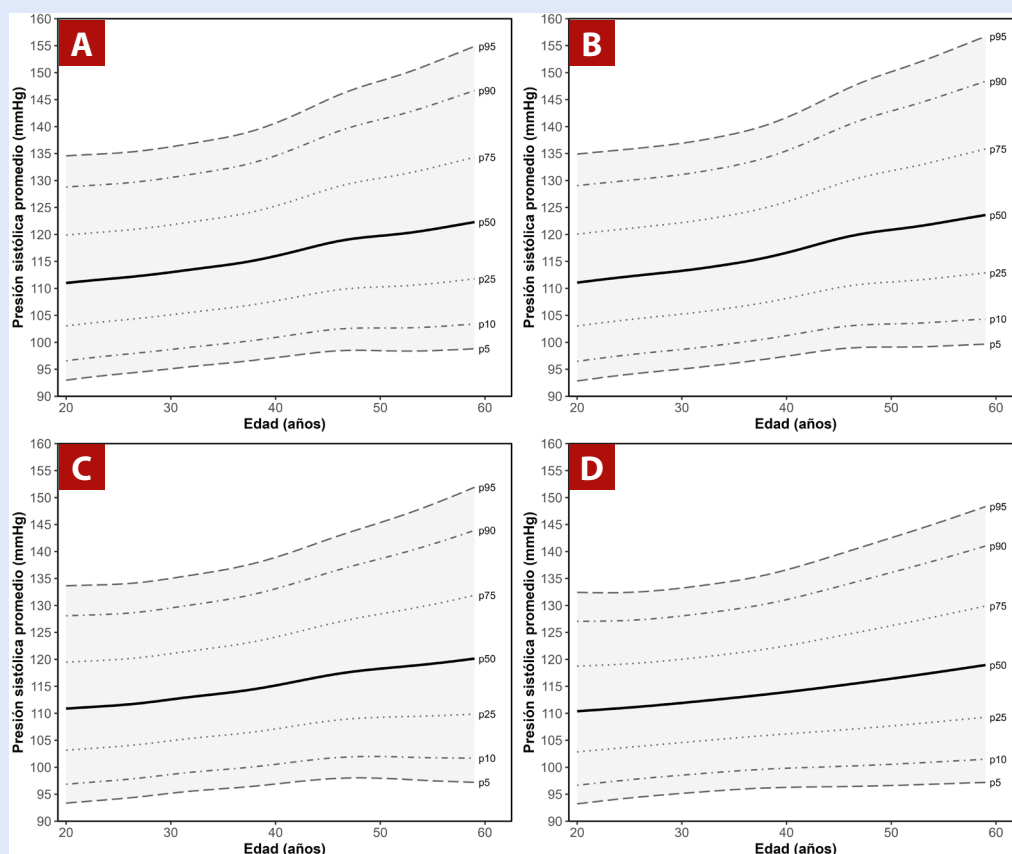


Figura 5. Curvas percentilares (P5, P10, P25, P50, P75, P90, P95) de presión arterial sistólica según edad en adultos peruanos de 20-59 años. **A)** Muestra total; **B)** <2500 m s.n.m.; **C)** 2500-3499 m s.n.m.; **D)** ≥3500 m.s.n.m.

El análisis de la PAS según la altitud de residencia mostró un patrón de ascenso a lo largo del rango etario, aunque con diferencias en la magnitud del incremento. Entre los 20 y 50 años, se observó un ascenso progresivo en todos los niveles de altitud de residencia y para todos los percentiles. Sin embargo, la magnitud del incremento se vio atenuada con la altitud de residencia. La mediana de la PAS varió en este rango etario (20 a 50 años) de 111,1 mmHg a 120,9 mmHg en residentes de <2500 m s.n.m. (**Figura 3B, Tabla suplementaria 10**), de 110,9 mmHg a 118,3 mmHg entre los 2500-3499 m s.n.m. (**Figura 3C, Tabla suplementaria 11**), y de 110,4 mmHg a 116,4 mmHg en residentes de ≥ 3500 m s.n.m. (**Figura 3D, Tabla suplementaria 12**). Entre los 50 y 59 años, en todos los niveles de altitud de residencia y para todos los percentiles, se observó un incremento de la PAS, con magnitud del incremento atenuada a mayor altitud. Además, los valores de la PAS a los 20 años fueron similares para los percentiles inferiores en todos los niveles de altitud, mientras que la mediana y los percentiles superiores (P90 y P95) fueron ligeramente menores en el grupo de ≥ 3500 m s.n.m. respecto a los de <2500 y 2500-3499 m s.n.m. En contraste, los valores de PAS a los 50 y 59 años fueron menores para todos los percentiles con el incremento de altitud (**Tablas suplementarias 10 a 12**).

Discusión

Este estudio modeló curvas de referencia por edad para la PAM, PAD y PAS estratificadas por altitud de residencia. En todos los estratos de altitud, la PAM, PAD y PAS aumentaron progresivamente entre los 20 y aproximadamente los 50 años, aunque a ≥ 2500 m s.n.m. la magnitud de este incremento fue sistemáticamente menor. Hacia los 50 años y superiores, las curvas de PA no fueron uniformes. La PAM y la PAD presentaron una relativa estabilización en todos los grupos de altitud, con una atenuación más marcada en las poblaciones de ≥ 2500 m s.n.m., mientras que la PAS no tuvo evidencia clara de estabilización entre los 50 y 59 años y aumentó sostenidamente a lo largo de todo el rango etario, con incrementos más suavizados en edades avanzadas y atenuación más evidente a mayor altitud. Además, entre los 50 y 59 años, para todos los percentiles, se observó que los valores de la PAS fueron sistemáticamente inferiores en residentes de ≥ 2500 m s.n.m. en comparación con residentes de <2500 m s.n.m.

La exposición a la altitud tiene como estímulo fisiológico central la hipoxia hipobárica, la cual modula la función cardiovascular. Mientras que la exposición aguda a hipoxia aumenta la actividad simpática, la frecuencia cardíaca y la PA⁽⁴⁾, en residentes de altitud predominan adaptaciones crónicas, de tipo hematológico, vascular y metabólico, que modulan la respuesta presora⁽⁴⁾. Sin embargo, la magnitud estas adaptaciones no es uniforme entre poblaciones y depende, en parte, de factores étnicos y genéticos⁽²⁰⁾.

El incremento sostenido de la PAS, PAD y PAM entre los 20 y 50 años en todos los estratos de la altitud de residencia observado en nuestro estudio es consistente con lo documentado en poblaciones no expuestas a altura^(9,16,21) y

es compatible con la fisiología del envejecimiento vascular, caracterizada por el incremento de fatiga y fractura de las láminas de elastina en arterias centrales, incremento de rigidez aórtica, modificación de la propagación de la onda de pulso^(22,23) y aumento de la resistencia vascular periférica en los vasos pequeños^(24,25). En este contexto, la PAD aumenta principalmente por mayor resistencia vascular periférica, mientras que la PAS lo hace por el efecto combinado de la PAD y la rigidez arterial^(24,25). Después de los 50 años, la progresión de la rigidez arterial se acelera, lo que produce un aumento más marcado de la PAS y, simultáneamente, una estabilización o reducción de la PAD⁽²⁴⁾. Nuestros hallazgos muestran que la magnitud de estos incrementos fue sistemáticamente menor a mayor altitud, lo que podría reflejar una atenuación del incremento típico del envejecimiento vascular en el contexto de la residencia a mayor altitud.

La PAS mostró un ascenso sostenido a lo largo de todo el rango etario en todos los estratos de altitud, patrón coherente con la fisiología del envejecimiento arterial^(23,24). Sin embargo, el incremento fue menos pronunciado a mayor altitud, lo que es compatible con respuestas heterogéneas en poblaciones de altitud. Por ejemplo, una revisión sistemática reportó que en tibetanos, la PAS aumentó en 17 mmHg por cada 1000 metros adicionales de elevación, mientras que en poblaciones no tibetanas, la PAS tiende a disminuir o no varía significativamente⁽⁵⁾. Similarmente, en la comunidad de Ladakh (~3500 m s.n.m.) se han descrito pendientes de incremento por edad mayores que en residentes del nivel del mar⁽²⁶⁾. En contraste, en adultos residentes a ~2850 m s.n.m. en Ecuador, la PAS aumenta con la edad, pero con una magnitud más atenuada que en poblaciones a nivel del mar⁽²⁷⁾, hallazgo congruente con lo observado en nuestro estudio. Asimismo, en pobladores altoandinos de Perú, residentes de ≥ 5000 m s.n.m., se ha reportado ausencia de incrementos sustanciales de la PAS⁽²⁸⁾.

Adicionalmente, nuestros hallazgos muestran que, desde los 50 años, la PAS fue menor en residentes a ≥ 3500 m s.n.m. que en aquellos a <2500 m s.n.m. En este último grupo, los percentiles superiores (P90 y P95) superaron los 140 mmHg, mientras que a ≥ 3500 m s.n.m., el P90 se mantuvo por debajo y el P95 apenas por encima del umbral de hipertensión. En conjunto, nuestros hallazgos indican que la magnitud del incremento de la PAS con la edad no sigue un patrón uniforme entre poblaciones que residen a diferentes altitudes. En poblaciones altoandinas se ha descrito selección positiva en genes vinculados a la regulación vascular (EDNRA), el metabolismo energético (PRKAA1) y la vía del óxido nítrico (NOS2A)⁽²⁹⁾, lo que es compatible con la existencia de rutas de adaptación diferenciadas centradas en la modulación de la vía del NO y del sistema cardiovascular⁽⁴⁾.

La PAD mostró un ascenso entre los 20 y 50 años en todos los estratos de altitud, hallazgo concordante con lo descrito en poblaciones no expuestas a altura^(9,16,21), aunque con una magnitud progresivamente menor a mayor altitud. Desde los 50 años, la PAD tendió a estabilizarse, lo que es consistente con la transición fisiológica en la que la progresión de la rigidez aórtica comienza a reducir la PAD⁽²⁴⁾. En nuestro

estudio, esta estabilización se observó en todos los niveles de altitud; sin embargo, a altitudes ≥ 3500 m s.n.m., los valores de PAD se aproximaron al umbral de 90 mmHg entre los 50 y 59 años, lo que podría reflejar que la adaptación crónica a la hipoxia atenúa el incremento por edad, pero no impide que se alcancen valores clínicamente relevantes en edades mayores. La PAM siguió un patrón similar al de la PAD, con un incremento progresivo desde los 20 hasta los 50 años en todos los estratos de altitud. Dado que la PAM refleja el balance entre la PAS, PAD y la resistencia vascular periférica, su evolución sintetiza las modificaciones hemodinámicas asociadas al envejecimiento ⁽²⁴⁾. Tras los 50 años, la PAM mostró una tendencia a la estabilización, en concordancia con la desaceleración del aumento sistólico y la meseta diastólica observadas en este rango etario.

En conjunto, estos hallazgos subrayan que la relación entre altitud, edad y PA no sigue un patrón uniforme entre grupos humanos. Poblaciones tradicionales no expuestas a hipoxia, como los tsimane, yanomami o kuna, mantienen niveles de PA bajos y relativamente estables durante la adultez ⁽²⁾, lo que es compatible con la idea de que la progresión del incremento de la PA es el resultado de interacciones específicas entre biología, entorno y estilo de vida ⁽²⁾. Asimismo, parte de la heterogeneidad documentada en poblaciones de altura podría relacionarse con diferencias en los métodos de medición. Por ejemplo, la PA medida a través de monitoreo ambulatorio en 24 horas presenta una variabilidad circadiana distintiva en altura, con incrementos más marcados durante la noche que durante el día ⁽³⁰⁾. Esto sugiere que las mediciones puntuales utilizadas en encuestas poblacionales podrían no capturar completamente la variabilidad de PA en altura y resalta la necesidad de que futuras investigaciones incorporen métodos de evaluación que consideren la variación temporal.

Los hallazgos de este estudio muestran que la magnitud del incremento de la PAS y PAD con la edad es menor en la población altoandina que reside a mayor altitud. Aunque estos patrones no justifican redefinir los umbrales diagnósticos ni sugieren un menor riesgo cardiovascular, resaltan la importancia de una interpretación contextualizada de la PA. En un país como Perú, donde alrededor de una cuarta parte de la población vive a ≥ 2500 m s.n.m. ⁽⁶⁾, la prevención y vigilancia epidemiológica podrían beneficiarse de enfoques adaptados al contexto ambiental, considerando que la dinámica poblacional de la PA no es equivalente en todas las regiones, donde un mismo valor absoluto de PAS puede representar realidades epidemiológicas muy distintas según la altitud. Por ejemplo, según nuestros resultados, a los 50 años, una PAS de 150 mmHg sitúa a un residente de <2500 m s.n.m. cerca del 5% superior de la distribución, mientras que a ≥ 3500 m s.n.m. dicho valor supera ampliamente el P95 local (142,5 mmHg). Así, una PAS de 150 mmHg, que ya es elevada en zonas bajas, se vuelve excepcional en la altitud más alta. Aunque esto no modifica umbrales diagnósticos ni las metas terapéuticas, aporta información interpretativa útil sobre la magnitud de la desviación respecto del patrón poblacional local. Asimismo, las diferencias en los percentiles superiores sugieren que los esfuerzos de prevención primaria deberían

considerar la distribución local de la PA. Por otro lado, dado que en la población altoandina se ha documentado una variabilidad circadiana particular ⁽³⁰⁾, futuros estudios deberían evaluar si estos patrones se traducen en variaciones del riesgo cardiovascular mediante mediciones ambulatorias de 24 h.

El presente estudio tiene varias limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. Primero, el diseño transversal impide distinguir si los patrones observados a lo largo de la edad y entre estratos altitudinales reflejan cambios fisiológicos propios del envejecimiento o diferencias entre generaciones. Asimismo, no se puede determinar si las distribuciones percentilares observadas reflejan adaptaciones fisiológicas a largo plazo o características propias de las poblaciones que conforman cada estrato altitudinal. Segundo, la exclusión de personas con diagnóstico previo de hipertensión arterial, aunque necesaria para evitar el desplazamiento de la distribución por valores claramente patológicos, limita la generalización de los hallazgos a la población general adulta estudiada (20 a 59 años) y puede subestimar los valores reales de PA al no descartar la hipertensión no diagnosticada. Tercero, el diagnóstico previo de hipertensión arterial y el embarazo, basados en autorreporte, pueden haber introducido sesgos de mala clasificación. Cuarto, no se dispuso de información sobre el tiempo de residencia en altitud o historia de migración altitudinal, factores potencialmente influyentes en los valores de PA. Quinto, la combinación de datos de varios años con diferentes marcos supone estabilidad temporal en los patrones de PA, lo cual podría no cumplirse si existieron cambios en los factores de riesgo cardiovascular durante este período. Sexto, el uso de datos secundarios recopilados de diferentes periodos y con diferentes entrevistadores no descarta la variabilidad en la técnica de medición y podría introducir un sesgo de medición. Séptimo, la medición altitudinal por centroide del conglomerado versus vivienda puede caracterizar inadecuadamente el estrato. Octavo, el análisis no incorporó los ponderadores muestrales ni las características del diseño muestral complejo de ENDES debido a limitaciones del paquete *gamlss*, que no permite especificar estratos, conglomerados ni factores de expansión en el modelamiento distribucional paramétrico. Esta limitación puede introducir sesgos en la subestimación de errores estándar y en las estimaciones por sobrerepresentación de áreas urbanas y áreas de menor altitud en relación con su peso poblacional real; por lo tanto, los resultados no deben interpretarse como estimadores poblacionales precisos. Finalmente, una menor muestra en los extremos del rango etario en estratos de mayor altitud puede afectar la estabilidad de las estimaciones en los percentiles extremos y se requeriría un mayor tamaño muestral para estimaciones robustas.

En conclusión, la PA en adultos peruanos de 20 a 59 años mostró incrementos por edad menos marcados en poblaciones que residen a mayor altitud. Las curvas percentilares generadas evidencian estas diferencias y pueden contribuir a una interpretación contextualizada de la PA en zonas de gran altitud, así como a fortalecer la vigilancia epidemiológica en entornos con heterogeneidad geográfica. No obstante, nuestros hallazgos deben interpretarse desde

una perspectiva exploratoria y no como parámetros destinados a redefinir umbrales diagnósticos ni a inferir un menor riesgo cardiovascular en estas poblaciones.

Contribución de los autores

AHV: conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, recursos, software, supervisión,

validación, visualización, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición. **JGV:** conceptualización, investigación, metodología, validación, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición. **RVF:** conceptualización, investigación, validación, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Referencias bibliográficas

- Magder S. The meaning of blood pressure. *Crit Care*. 2018;22(1):257. doi:10.1186/s13054-018-2171-1.
- Lüscher TF. What is a normal blood pressure? *Eur Heart J*. 2018;39(24):2233-40. doi:10.1093/eurheartj/ehy330.
- Zhou B, Perel P, Mensah GA, Ezzati M. Global epidemiology, health burden and effective interventions for elevated blood pressure and hypertension. *Nat Rev Cardiol*. 2021;18(11):785-802. doi:10.1038/s41569-021-00559-8.
- Richalet J-P, Hermand E, Lhuissier FJ. Cardiovascular physiology and pathophysiology at high altitude. *Nat Rev Cardiol*. 2024;21(2):75-88. doi:10.1038/s41569-023-00924-9.
- Aryal N, Weatherall M, Bhatta YKD, Mann S. Blood Pressure and Hypertension in Adults Permanently Living at High Altitude: A Systematic Review and Meta-Analysis. *High Alt Med Biol*. 2016;17(3):185-93. doi:10.1089/ham.2015.0118.
- Tremblay JC, Ainslie PN. Global and country-level estimates of human population at high altitude. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2021;118(18):e2102463118. doi:10.1073/pnas.2102463118.
- Hernández-Vásquez A, Carrillo Morote BN, Azurin Gonzales VDC, Turpo Cayo EY, Azañedo D. [Spatial analysis of hypertension in Peruvian adults, 2022]. *Arch Peru Cardiol Cir Cardiovasc*. 2023;4(2):48-54. doi:10.47487/apcyccv.v4i2.296.
- NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC), Zhou B, Bentham J, Di Cesare M, Bixby H, Danaei G, et al. Contributions of mean and shape of blood pressure distribution to worldwide trends and variations in raised blood pressure: a pooled analysis of 1018 population-based measurement studies with 88.6 million participants. *Int J Epidemiol*. 2018;47(3):872-883. doi:10.1093/ije/dyy016.
- Acheson RM. Blood Pressure in a National Sample of U. S. Adults: Percentile Distribution by Age, Sex and Race. *Int J Epidemiol*. 1973;2(3):293-302. doi:10.1093/ije/2.3.293.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Encuesta Demográfica y de Salud Familiar (ENDES) [Internet]. Lima: INEI; 2024 [citado el 1 de diciembre de 2025]. Disponible en: <https://proyectos.inei.gob.pe/endes/>
- NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC). Worldwide trends in blood pressure from 1975 to 2015: a pooled analysis of 1479 population-based measurement studies with 19.1 million participants. *Lancet*. 2017;389(10064):37-55. doi:10.1016/S0140-6736(16)31919-5.
- Tapela N, Collister J, Clifton L, Turnbull I, Rahimi K, Hunter DJ. Prevalence and determinants of hypertension control among almost 100 000 treated adults in the UK. *Open Heart*. 2021;8(1):e001461. doi:10.1136/openhrt-2020-001461.
- Whelton PK, Carey RM, Mancia G, Kreutz R, Bundy JD, Williams B. Harmonization of the American College of Cardiology/American Heart Association and European Society of Cardiology/European Society of Hypertension Blood Pressure/Hypertension Guidelines: Comparisons, Reflections, and Recommendations. *Circulation*. 2022;146(11):868-77. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.121.054602.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Manual de la Entrevistadora. Encuesta Demográfica y de Salud Familiar 2014 [Internet]. Lima: INEI; 2014 [citado el 1 de diciembre de 2025]. Disponible en: https://proyectos.inei.gob.pe/endes/recursos/endes_2014_manual_entrevistadora.pdf
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Perú: Enfermedades no transmisibles y transmisibles, 2017 [Internet]. Lima: INEI; 2018 [citado el 1 de diciembre de 2025]. Disponible en: https://proyectos.inei.gob.pe/endes/2018/SALUD/ENFERMEDADES_ENDES_2017.pdf
- Balijepalli C, Löscher C, Bramlage P, Erbel R, Humphries KH, Jöckel K-H, et al. Percentile distribution of blood pressure readings in 35683 men and women aged 18 to 99 years. *J Hum Hypertens*. 2014;28(3):193-200. doi:10.1038/jhh.2013.85.
- Stasinopoulos MD, Rigby RA, Heller GZ, Voudouris V, Bastiani FD. Flexible Regression and Smoothing: Using GAMLSS in R [Internet]. 1a ed. Chapman and Hall/CRC; 2017 [citado el 1 de diciembre de 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1201/b21973>.
- Cole TJ. Sample size and sample composition for constructing growth reference centiles. *Stat Methods Med Res*. 2021;30(2):488-507. doi:10.1177/0962280220958438.
- Cole TJ, Green PJ. Smoothing reference centile curves: the LMS method and penalized likelihood. *Stat Med*. 1992;11(10):1305-19. doi:10.1002/sim.4780111005.
- Beall CM. Tibetan and Andean patterns of adaptation to high-altitude hypoxia. *Hum Biol*. 2000;72(1):201-28.
- Wright JD, Hughes JP, Ostchega Y, Yoon SS, Nwankwo T. Mean systolic and diastolic blood pressure in adults aged 18 and over in the United States, 2001-2008. *Natl Health Stat Report*. 2011;(35):1-22, 24.
- Schillaci G, Bilo G, Pucci G, Laurent S, Macquin-Mavier I, Boutouyrie P, et al. Relationship Between Short-Term Blood Pressure Variability and Large-Artery Stiffness in Human Hypertension: Findings From 2 Large Databases. *Hypertension*. 2012;60(2):369-77. doi:10.1161/HYPERTENSIONAHA.112.197491.
- Zieman SJ, Melenovsky V, Kass DA. Mechanisms, pathophysiology, and therapy of arterial stiffness. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*. 2005;25(5):932-43. doi:10.1161/01.ATV.0000160548.78317.29.
- Pinto E. Blood pressure and ageing. *Postgrad Med J*. 2007;83(976):109-14. doi:10.1136/pgmj.2006.048371.
- Vakka A, Warren JS, Drosatos K. Cardiovascular aging: from cellular and molecular changes to therapeutic interventions. *J Cardiovasc Aging*. 2023;3(3):23. doi:10.20517/jca.2023.09.
- Otsuka K, Norboo T, Otsuka Y, Higuchi H, Hayajiri M, Narushima C, et al. Effect of aging on blood pressure in Leh, Ladakh, a high-altitude (3524 m) community, by comparison with a Japanese town. *Biomed Pharmacother*. 2005;59 Suppl 1(Suppl 1):S54-57. doi:10.1016/S0753-3322(05)80011-3.
- Vinueza Veloz AF, Yaulema Riss AK, De Zeeuw CI, Carpio Arias TV, Vinueza Veloz MF. Blood Pressure in Andean Adults Living Permanently at Different Altitudes. *High Alt Med Biol*. 2020;21(4):360-9. doi:10.1089/ham.2019.0101.

28. Hancso I, Bailly S, Baillieul S, Doutreleau S, Germain M, Pépin J-L, *et al.* Excessive Erythrocytosis and Chronic Mountain Sickness in Dwellers of the Highest City in the World. *Front Physiol.* 2020;11:773. doi: 10.3389/fphys.2020.00773.
29. Sharma V, Varshney R, Sethy NK. Human adaptation to high altitude: a review of convergence between genomic and proteomic signatures. *Hum Genomics.* 2022;16(1):21. doi: 10.1186/s40246-022-00395-y.
30. Bilo G, Acone L, Anza-Ramírez C, Macarlupú JL, Soranna D, Zambon A, *et al.* Office and Ambulatory Arterial Hypertension in Highlanders: HIGHCARE-ANDES Highlanders Study. *Hypertension.* 2020;76(6):1962-70. doi: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.120.16010.