

Caracterización de la hipoxia hipobárica a 2240 metros sobre el nivel del mar

Characterisation of hypobaric hypoxia
at 2240 metres above sea level

Luis Efren Santos-Martínez^{1a}, Jessica Paola Durán-Vidauri^{1b}, José Viennue Ávila-Gómez^{1c}, Adriana Ordoñez-Reyna^{1d},
Javier Quevedo-Paredes^{1e}, Luis Antonio Moreno-Ruiz^{2f}

Resumen

Introducción: la hipoxia hipobárica en residentes a 2240 metros sobre el nivel del mar (msnm) de altitud es poco conocida en sujetos sanos.

Objetivo: caracterizar la hipoxia hipobárica en sujetos sanos a 2240 msnm.

Material y métodos: mediante un diseño transversal analítico se estudiaron sujetos sanos residentes de la Ciudad de México. Sus variables demográficas y de oxigenación se analizaron por sexo con la prueba *t* de Student para variables independientes, con un valor de $p < 0.05$ considerado significativo. Los índices de oxigenación se caracterizaron mediante la correlación de Pearson, el coeficiente de correlación intraclass y el coeficiente de determinación.

Resultados: se estudiaron 244 sujetos sanos residentes de la Ciudad de México, con una edad promedio de 49 ± 9 años; 122 (50%) eran hombres. El índice de masa corporal fue de 22.92 ± 1.63 en hombres y 22.87 ± 1.43 en mujeres ($p = 0.792$). La PaO_2 total fue de 69.88 ± 4.46 mmHg; la SpO_2 total, $93.93 \pm 1.90\%$; la relación $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$, 333 ± 21 , y la ajustada a la presión barométrica, 256 ± 16 . La $\text{SpO}_2/\text{FiO}_2$ fue de 447 ± 9 y la ajustada, 344 ± 7 . Las correlaciones entre $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ y $\text{SpO}_2/\text{FiO}_2$ fueron $r = 0.631$ ($p = 0.0001$) y, al ajustar, $r = 0.629$ ($p = 0.0001$). La concordancia mediante coeficiente de correlación intraclass fue de 0.624 (sustancial) y, al ajustar, 0.543 (moderada). El coeficiente de determinación fue de 39.8% y, ajustado a la presión barométrica, de 39.5%.

Conclusiones: a 2240 msnm, las variables de oxigenación indican la presencia de hipoxia hipobárica. Los índices de oxigenación se correlacionan con una concordancia de moderada a sustancial.

Abstract

Background: Hypobaric hypoxia is little known in healthy subjects at 2240 meters above sea level.

Objective: To characterize hypobaric hypoxia in healthy subjects at 2240 meters above sea level.

Material and methods: Healthy subjects residing in Mexico City were studied using an analytical cross-sectional design. Their demographic and oxygenation variables were analyzed by gender using the *t* test for independent variables and $p < 0.05$. Oxygenation indices were characterized using Pearson's correlation coefficient, intraclass correlation coefficient, and coefficient of determination.

Results: A total of 244 healthy subjects residing in Mexico City, aged 49 ± 9 , 122 (50%) males, were studied; body mass index in men: 22.92 ± 1.63 versus 22.87 ± 1.43 in women, $p = 0.792$. Total PaO_2 was 69.88 ± 4.46 ; total SpO_2 was 93.93 ± 1.90 ; $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ ratio was 333 ± 21 and adjusted for barometric pressure was 256 ± 16 ; $\text{SpO}_2/\text{FiO}_2$ was 447 ± 9 and adjusted for barometric pressure was 344 ± 7 . The $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ - $\text{SpO}_2/\text{FiO}_2$ correlations were $r = 0.631$, $p = 0.0001$, and adjusted $r = 0.629$, $p = 0.0001$, concordance by intraclass correlation coefficient of 0.624 (substantial) and an adjusted of 0.543 (moderate). The coefficient of determination 39.8%, adjusted for barometric pressure 39.5%.

Conclusions: At 2,240 meters above sea level, oxygenation variables indicate the presence of hypobaric hypoxia. The oxygenation indices correlate with moderate to substantial concordance.

¹Instituto Mexicano del Seguro Social, Centro Médico Nacional Siglo XXI, Hospital de Cardiología, Departamento de Hipertensión Pulmonar y Corazón Derecho. Ciudad de México, México

²Instituto Mexicano del Seguro Social, Unidad de Atención Médica. Ciudad de México, México

ORCID: 0000-0002-2866-3047^a, 0009-0006-2856-2007^b, 0009-0003-5612-490X^c, 0000-0002-9787-4032^d,
0000-0002-4864-3481^e, 0000-0001-5339-3504^f

Palabras clave

Altitud
Análisis de los Gases de la Sangre
Oxigenación
Hipoxia
Oximetría de Pulso

Keywords

Altitude
Blood Gas Analysis
Oxygenation
Hypoxia
Pulse Oximetry

Fecha de recibido: 19/09/2025

Fecha de aceptado: 15/10/2025

Comunicación con:

Luis Efren Santos Martínez

✉ lefren@gmail.com

☎ 55 4881 5135

Cómo citar este artículo: Santos-Martínez LE, Durán-Vidauri JP, Ávila-Gómez JV *et al.* Caracterización de la hipoxia hipobárica a 2240 metros sobre el nivel del mar. Rev Med Inst Mex Seguro Soc. 2026;64(2):e6859. doi: 10.5281/zenodo.17537446

Introducción

La disminución de la oxigenación relacionada con la altitud se conoce como hipoxia hipobárica. Es un mecanismo fisiológico que ocurre por la reducción de la presión barométrica (PB) y de la presión inspirada de oxígeno (PiO_2) cuando se asciende o se reside en altitud.¹

La respuesta a la hipoxia se denomina aclimatización, y ocurre cuando se asciende a la altitud por diversos motivos (turísticos, de rescate o militares) y requiere uno o más días para adaptarse al ascenso. También puede ser “crónica”, denominada adaptación, como sucede en quienes viven de forma permanente en la altitud, lo cual requiere años y varias generaciones para ser óptima para la función y la vida.²

Durante la adaptación, la hipoxia crónica por arriba de 2500 metros sobre el nivel del mar (msnm) se acompaña de alteraciones en la oxigenación y otros cambios morfológicos y funcionales, los cuales están mejor estudiados que los cambios que podrían presentarse a menor altitud, como los informados entre 1500 y 2500 msnm.³

La información sobre el efecto de la altitud a 2240 msnm en comparación con valores del nivel del mar ha sido escasa.⁴ Se han descrito cambios en el intercambio gaseoso, como la disminución de la presión arterial de oxígeno (PaO_2) y de la saturación arterial de oxígeno (SaO_2). Cid Juárez *et al.*⁵ refieren que la presión arterial de bióxido de carbono ($PaCO_2$) también se encuentra disminuida a esta altitud, siendo aún menor en mujeres que en hombres, relación que no fue encontrada por Vélez Páez *et al.*⁶ Otras modificaciones incluyen incrementos hematológicos en respuesta a la hipoxia: aumento de la hemoglobina (Hb) en 10% respecto al nivel del mar y del hematocrito, presión pulmonar media normal (< 16 mmHg) y, a nivel respiratorio, valores mayores de difusión al monóxido de carbono, ventilación voluntaria máxima y flujo espiratorio pico que los observados al nivel del mar.⁴

Estas observaciones se han descrito en la Ciudad de México (antes Distrito Federal), ubicada a una altitud promedio de 2276 ± 83 msnm,⁴ con un valor estimado de 2240 msnm⁷ y clasificada como *altitud moderada* (1500 - 2500 msnm). Se desconoce si, dentro de esta categoría, los cambios descritos a 2240 msnm son similares a los que ocurren en los límites inferiores de altitud.

El consenso de altitud de China⁸ señaló que el límite inferior en el que se han informado algunos cambios es 1500 msnm, aunque estos se vuelven más evidentes por arriba de 2500 msnm. Por lo tanto, este trabajo se limita a reportar observaciones relacionadas con la oxigenación a 2240 msnm.

Existen diversas ciudades y regiones del mundo entre 1500 y 2500 msnm, con densidades poblacionales variables. En México, casi la mitad de la población reside por encima de los 1500 msnm y 5% por arriba de los 2440 msnm.⁹ Algunos estados que se encuentran dentro de esta categoría, con sus altitudes promedio, son: Estado de México (2392 ± 239), Michoacán (1581 ± 652), Puebla (1903 ± 543), Aguascalientes (1880 ± 78), Querétaro (1879 ± 269), Guanajuato (1820 ± 132), Durango (1650 ± 437) e Hidalgo (1792 ± 686), entre otros.⁴

Entre el 0.9% (800 mil personas) y el 3.4% (3 millones) de la población sana presentan una PaO_2 en reposo alrededor de 60 mmHg, criterio utilizado con frecuencia para indicar oxígeno suplementario en sujetos con enfermedad pulmonar obstructiva crónica,¹⁰ obesidad mórbida¹¹ o hipertensión pulmonar severa.¹² A 2,240 msnm los límites de normalidad y anormalidad se traslapan.

Debido a estas consideraciones, sobre el síndrome de dificultad respiratoria aguda (ARDS) diversos autores^{13,14,15} han señalado la necesidad de ajustar los valores de oxigenación a la altitud. Matthay *et al.*¹⁶ en la nueva definición global para ARDS, sugieren ajustar la fórmula de la PB de acuerdo con la altitud; sin embargo, aún no existe una evaluación prospectiva de esta recomendación.

La escasa información¹⁷ sobre valores normales de oxigenación a 2240 msnm¹⁸ ha contribuido a que se utilicen como referencia valores obtenidos al nivel del mar,¹⁹ y los valores propios de altitud moderada se interpreten erróneamente como evidencia de hipoxemia. Esta situación puede complicar la estratificación de gravedad en entidades como el SDRA y la indicación de oxígeno suplementario.

Por estos motivos, en este estudio se caracterizan los valores normales de los parámetros relacionados con la oxigenación en sujetos sanos, de acuerdo con su sexo, a 2240 msnm, con una PB estimada de 587 mmHg y FiO_2 del 21%.

Material y métodos

En el laboratorio de Fisiología Cardiopulmonar del Departamento de Hipertensión Pulmonar y Corazón Derecho de la Unidad Médica de Alta Especialidad (UMAE) del Hospital de Cardiología del Centro Médico Nacional Siglo XXI, del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), se estudiaron consecutivamente sujetos sanos mediante un diseño transversal analítico. Todos eran residentes de la Ciudad de México, ubicada a 2240 msnm, con una presión barométrica (PB) de 587 mmHg y una fracción inspirada de oxígeno (FiO_2) del 21%.

Definición de la población residente

Se incluyeron sujetos de 20 a 60 años de edad, residentes de la Ciudad de México, definidos como aquellos que nacieron y han vivido toda su vida en la ciudad.

Definición de la población sana

Se consideraron sujetos sin antecedentes de tabaquismo y con un índice de masa corporal (IMC) $< 24.9 \text{ kg/m}^2$, dado el efecto adverso del aumento del IMC en el intercambio gaseoso.²⁰ También debían carecer de evidencia clínica (interrogatorio, exploración física y presión arterial), alteraciones en pruebas de función respiratoria o anomalías en estudios de laboratorio, incluida la gasometría arterial, relacionadas con hipertensión arterial, diabetes mellitus, enfermedad pulmonar obstructiva crónica o enfermedades asociadas con la función pulmonar o cardíaca. Se excluyeron los sujetos que no cumplieron estos criterios.

Muestras arteriales

Después de realizar la prueba de Allen²¹ en cada extremidad superior y previa asepsia de la región radial derecha o izquierda, se obtuvieron muestras sanguíneas mediante punción de la arteria radial no dominante, utilizando jeringas desechables DL de 1 mL para insulina.²² Una vez obtenida la muestra, se cubrió la jeringa para evitar contaminación con aire y se procesó de inmediato. El tiempo entre la toma y el procesamiento fue menor a 3 minutos.

Se eliminaron los casos en los que la muestra fue insuficiente, se coaguló, el analizador reportó error o no se logró en la primera punción. Los sujetos fueron incluidos en forma consecutiva, usualmente acompañantes sanos de pacientes que acudieron a realizar estudios de función pulmonar. A cada participante se le explicó la técnica y, para disminuir la ansiedad, permaneció sentado, en reposo y calmado antes y durante la punción.

Oxímetros de pulso (OP)²³

Se utilizó el modelo Onyx II 9550 (Nonin Medical Inc., Plymouth, Minnesota, EUA). El sensor se colocó durante 30 segundos en el dedo índice de la mano no puncionada para obtener la saturación parcial de oxígeno (SpO_2). Los valores se obtuvieron a partir de una señal estable, sin exposición a luz ambiental y sin movimiento de la extremidad. Simultáneamente con la gasometría arterial, se obtuvo la SpO_2 del dedo índice contralateral a la mano puncionada.

Analizador de gasometrías arteriales

Se empleó el equipo RAPIDPoint 500 System (Siemens Healthcare Diagnostics Inc., EUA), calibrado diariamente antes del procesamiento de las muestras.

Medición de peso y altura

Se utilizó la báscula BAME modelo DGN 2412. Los sujetos fueron evaluados de pie, con bata hospitalaria y sin zapatos.

Caracterización de la hipoxia hipobárica

En la práctica clínica, la oxigenación en altitud se determina mediante fórmulas basadas en valores de gasometría arterial y presión barométrica:

1. Presión de oxígeno en el aire ambiente ($\text{PO}_2 \text{ AA}$)¹⁴

Fórmula: $\text{PO}_2 \text{ AA} = \text{Patm} \times 0.21$ (fracción inspirada de oxígeno, FiO_2)

Evalúa el oxígeno disponible en el aire ambiente.

2. Presión inspirada de oxígeno (PiO_2)¹⁴

Fórmula: $\text{PiO}_2 = (\text{Patm} - \text{PVH}_2\text{O}) \times \text{FiO}_2$

Considera la humidificación del aire en vías aéreas de conducción.

3. Presión alveolar de oxígeno (PAO_2)¹⁴

Fórmula: $\text{PAO}_2 = (\text{Patm} - \text{PVH}_2\text{O}) \times \text{FiO}_2 - \text{PaCO}_2 / R$

Donde R es el cociente respiratorio (0.8–1.0). Al llegar al alveolo la PiO_2 se mezcla con el bioxido de carbono, que es producto del metabolismo y sale del capilar alveolar para ser eliminado en la espiración; la oxigenación disminuye aún más, y su valor se ve reflejado en la PAO_2 .

4. Contenido arterial de oxígeno (CaO_2)

Fórmula: $\text{CaO}_2 = (1.34 \times \text{Hb} \times \text{SaO}_2) + (0.003 \times \text{PaO}_2)$

5. Gradiente alveolo-arterial de oxígeno²⁴

Fórmula: $\text{P(A-a)}\text{O}_2 = \text{PAO}_2 - \text{PaO}_2$

Refleja la capacidad del pulmón para realizar el intercambio de gases.

6. Razón $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ (PAFI)¹⁴

Fórmula: $\text{PaO}_2 \div \text{FiO}_2$

Determina la cantidad de oxígeno disuelto en sangre a partir del oxígeno suministrado, expresa el grado de oxemia de acuerdo a la fracción inspirada de oxígeno

7. Razón ajustada $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ ¹⁴

Fórmula: $(\text{PaO}_2 \div \text{FiO}_2) \times (\text{PB}/760)$

8. Razón $\text{SaO}_2/\text{FiO}_2$ (SaOFI)¹³

Fórmula: $\text{SaO}_2 \div \text{FiO}_2$

9. Razón ajustada $\text{SaO}_2/\text{FiO}_2$ ¹³

Fórmula: $(\text{SaO}_2 \div \text{FiO}_2) \times (\text{PB}/760)$

10. Razón $\text{SpO}_2/\text{FiO}_2$ (SpOFI)¹³

Fórmula: $\text{SpO}_2 \div \text{FiO}_2$

11. Razón ajustada $\text{SpO}_2/\text{FiO}_2$ ¹³

Fórmula: $(\text{SpO}_2 \div \text{FiO}_2) \times (\text{PB}/760)$

Análisis estadístico

Los datos numéricos se presentan como promedios $\pm$ desviación estándar, y las variables categóricas como frecuencias y porcentajes. La normalidad se evaluó mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Las comparaciones por sexo se realizaron con la prueba *t* de Student para muestras independientes.

Se calcularon el coeficiente de correlación de Pearson (*r*) y su coeficiente de determinación (*r*²) mediante regresión lineal entre los índices de oxigenación. La concordancia se evaluó con el coeficiente de correlación intraclass (CCI) y su intervalo de confianza al 95% (IC95%).²⁵ La interpretación del CCI fue: casi perfecto (0.81 - 1.0), sustancial (0.61 - 0.80), moderado (0.41 - 0.60), regular (0.21 - 0.40), leve (0.10 - 0.20) y pobre (0.02 - 0.06).²⁶

Tamaño muestral

Con base en el trabajo de Cid Juárez *et al.*,⁵ se estimó el tamaño de muestra para una media, considerando una desviación estándar esperada de 5.9 mmHg, precisión de 0.6, error estandarizado de 0.136 y alfa (α) de 0.025 por lado. El tamaño calculado fue de 108 sujetos.

Posteriormente, se realizó un análisis de poder para la PaCO_2 obtenida en mujeres en este estudio frente a los valores reportados por Cid Juárez *et al.*,⁵ (20.6 ± 3.4 ; $n = 104$ frente a 31.72 ± 3.04 ; $n = 122$). Con $\alpha = 0.05$, el poder ($1-\beta$) fue del 100%, descartándose error tipo II.

Consideraciones éticas

Este estudio forma parte del proyecto de investigación R-2013-3604-4, autorizado por el Comité Local de Inves-

tigación y el Comité de Ética en Investigación del Hospital de Cardiología del Centro Médico Nacional Siglo XXI, del IMSS. Todos los sujetos otorgaron consentimiento informado por escrito.

Resultados

Se estudiaron 244 sujetos sanos, residentes de la Ciudad de México. Las ocupaciones se clasificaron según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI): servicios personales 60 (24.59%), técnicos 52 (21.31%), servicios domésticos 41 (16.80%), ayudantes de administración 39 (15.98%), profesionistas 28 (11.48%) y comerciantes 24 (9.84%).

En el cuadro I se presentan las características demográficas, la gasometría arterial y la oximetría de pulso, estratificadas por sexo. Se observaron diferencias en talla y peso en los hombres, igualándose los valores en el índice de masa corporal. El pH también fue diferente en los hombres. El resto de las variables no mostró diferencias estadísticas por sexo.

En el cuadro II se puede observar que las variables de oxigenación no tienen diferencias por sexo. Sin embargo, para una $\text{P(A-a)} \text{O}_2$ normal, son diferentes ($p < 0.05$) los valores reales de la PAFI, SPOFI y SaOFI frente al valor ajustado por la PB a 2240 msnm, en los grupos total, hombres y mujer respectivamente.

En el cuadro III se muestran las correlaciones de Pearson "*r*", CCI (IC95%) y la concordancia entre los índices de oxigenación; el coeficiente de determinación (*r*²) de la PAFI frente a la SPOFI fue 39.8%, la de ambas ajustadas a la presión barométrica 39.5%; de la PAFI frente a la SaOFI 77.4% y ambas ajustadas 77.3%. Demuestra que los índices de oxigenación PAFI, SpOFI y SaOFI están relacionadas a la altitud, lo que valida su uso y la generalización en sujetos a 2240 msnm.

Discusión

En este trabajo se describe la hipoxia hipobárica presente en sujetos sanos residentes a una altitud de 2,240 msnm, con una presión barométrica (PB) de 587 mmHg y una FiO_2 del 21%. La PaO_2 compilada por Santos Martínez *et al.*,³ proveniente de diversos trabajos previos, se ubicó entre 60 y 70 mmHg. Dichos valores incluyen los obtenidos en el presente estudio (69.88 ± 4.46 mmHg) y los reportados por Cid Juárez *et al.*,⁵ (71.2 ± 5.9 mmHg) a la misma altitud, siendo ligeramente mayores; sin embargo, todos permanecen por debajo de los 80 mmHg considerados normales a nivel del mar.¹⁹

Cuadro I Variables demográficas, de la gasometría arterial y oximetría de pulso a 2240 msnm

	Total (n = 244)	Hombres (n = 122)	Mujeres (n = 122)	p
Edad, años	49 ± 9	48 ± 10	49 ± 9	0.571
Talla, mts	1.61 ± 0.09	1.67 ± 0.07	1.55 ± 0.06	0.0001
Peso, Kgs	59.63 ± 7.53	64.08 ± 6.72	55.18 ± 5.35	0.0001
IMC, Kg/m ²	22.9 ± 1.53	22.92 ± 1.63	22.87 ± 1.43	0.792
pH	7.42 ± 0.02	7.41 ± 0.02	7.42 ± 0.01	0.004
PaCO ₂ , mmHg	31.93 ± 2.88	32.14 ± 2.70	31.72 ± 3.04	0.261
PaO ₂ , mmHg	69.88 ± 4.46	70.19 ± 4.58	69.59 ± 4.35	0.279
Hb, gr/dL	14.16 ± 1.60	14.33 ± 1.55	14 ± 1.54	0.097
SaO ₂ , %	94.10 ± 1.24	94.14 ± 1.16	94.04 ± 1.32	0.814
SpO ₂ , %	93.93 ± 1.90	93.96 ± 2.19	93.90 ± 1.57	0.608

IMC: Índice de masa corporal; pH: Potencial hidrógeno; PaCO₂: Presión arterial de bióxido de carbono; PaO₂: Presión arterial de oxígeno; Hb: Hemoglobina; SaO₂: Saturación arterial de oxígeno; SpO₂: Saturación parcial de oxígeno

Cuadro II Parámetros de oxigenación a 2240 msnm

	Total n = 244	Hombres n = 122	Mujeres n = 122	p
P(A-a) O ₂	5.09 ± 3.91	5 ± 3.95	5.18 ± 3.88	0.721
CaO ₂	1786 ± 197	1808 ± 197	1764 ± 195	0.086
PAFI	333 ± 21*	334 ± 22*	331 ± 21*	0.271
PAFI ajustada	256 ± 16*	257 ± 17*	255 ± 16*	0.284
SpOFI	447 ± 9**	447 ± 10**	447 ± 7**	0.815
SpOFI ajustada	344 ± 7**	345 ± 8**	344 ± 6**	0.803
SaOFI	448 ± 6***	448 ± 5***	448 ± 6***	0.569
SaOFI ajustada	345 ± 5***	345 ± 4***	344 ± 5***	0.553

P(A-a)O₂: Gradiente alveolo-arterial de oxígeno; CaO₂: Contenido arterial de oxígeno; PAFI: Relación presión arterial de oxígeno (PaO₂) / Fracción inspirada oxígeno (FiO₂); SpOFI: Relación saturación parcial de oxígeno (SpO₂) / fracción inspirada de oxígeno; SaOFI: Relación saturación arterial de oxígeno (SaO₂) / FiO₂; Ajustada: ajuste a la presión barométrica del lugar* prueba t para muestras independientes, p < 0.05; Comparaciones de la PAFI frente a PAFI ajustada a la presión barométrica*; SpOFI frente a SpOFI ajustada a la presión barométrica**; SaOFI frente a la SaOFI frente a la SaOFI ajustada a la presión barométrica***, p < 0.05.

Cuadro III Correlación de Person (r²), coeficiente de correlación intraclase e intervalo de confianza al 95% y concordancia entre los índices de oxigenación a 2240 msnm

	r (p)	CCI (IC95%)	Concordancia
PAFI – SPOFI	0.631 (0.0001)	0.624 (0. 516, 0.708)	Sustancial
PAFI – SPOFI ajustadas	0.629 (0.0001)	0.543 (0.411, 0.644)	Moderada
PAFI – SaOFI	0.880 (0.0001)	0.620 (0.511, 0.704)	Sustancial
PAFI – SaOFI ajustadas	0.879 (0.0001)	0.622 (0.514, 0.706)	Sustancial

CCI: Coeficiente de correlación intraclase; IC95%: Intervalo de confianza al 95%; r: rho de Pearson; PAFI: Relación presión arterial de oxígeno / fracción inspirada de oxígeno; SPOFI: Relación saturación parcial de oxígeno / fracción inspirada de oxígeno; PAFI Ajustada: Relación Presión arterial de oxígeno / fracción inspirada de oxígeno ajustada por la presión barométrica; SPOFI Ajustada: Relación saturación parcial de oxígeno / fracción inspirada de oxígeno ajustada por la presión barométrica; SaOFI: Relación saturación arterial de oxígeno / fracción inspirada de oxígeno ajustada por la presión barométrica

Llama la atención que Vélez Páez *et al.*,⁶ reportaron valores de PaO_2 de 74.27 ± 8.58 mmHg en Quito, Ecuador, a una altitud mayor (2,850 msnm), con una PB menor (547 mmHg) y la misma FiO_2 (21%). En teoría, los valores de PaO_2 deberían ser más bajos a mayor altitud, por lo que esta discrepancia podría explicarse por el hecho de que la disminución de la PB es más pronunciada que la reducción de la PiO_2 conforme la altitud incrementa, además de influencias atribuibles a características étnicas⁹ o genéticas¹ que modulan la respuesta de aclimatación.

Se requiere mayor información sobre la hipoxia hipobárica a altitudes moderadas. Con los datos disponibles, los valores parecen traslaparse entre diferentes categorías de altitud, lo que sugiere que los cambios fisiológicos propios de la hipoxia hipobárica podrían presentarse incluso por debajo de los 1,500 msnm. Este valor fue adoptado por el consenso chino⁶ como altitud mínima para que ocurran modificaciones fisiológicas, y posteriormente aceptado por el consenso del Comité de Expertos en Medicina Crítica en la Altitud.²⁷

En condiciones de un gradiente alveolo-arterial de oxígeno [P(A-a)O_2] normal, los índices de oxigenación (PAFI, SpOFI, SaOFI), al ajustarse por la PB, también mostraron disminución en ambos sexos, como se observa en el Cuadro II. Este patrón se acentúa conforme aumenta la altitud,

tal como han señalado Viruez Soto *et al.*,¹⁴ Vera Carrasco,¹⁵ Tinoco Solórzano *et al.*,²⁸ y como se ejemplifica en el cuadro IV. Las referencias presentadas en dicho cuadro fueron seleccionadas por incluir los principales valores aquí investigados y evidencian los cambios que ocurren a medida que disminuye la PB en diversas altitudes.

Estos datos adquieren especial relevancia en escenarios clínicos donde el punto de corte para indicar oxígeno suplementario se sitúa alrededor de 60 mmHg de PaO_2 , como en la obesidad mórbida,¹¹ la hipertensión pulmonar severa,¹² la enfermedad pulmonar obstructiva crónica¹⁰ y el síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA).¹³ En particular, en el SDRA a 2,240 msnm, el diagnóstico de SDRA leve con una PAFI de 200 a 300 mmHg podría verse comprometido al emplear la PAFI ajustada por la PB, cuyo valor en el presente estudio fue de 256 ± 16 (cuadro II). Esto no ocurre con la SpOFI ajustada, que mostró valores de 344 ± 7 y podría constituir un sustituto adecuado de la PAFI a esta altitud. Aún no existen estudios prospectivos que lo confirmen, aunque el ajuste por altitud ya está contemplado en la nueva definición global de SDRA propuesta por Matthay *et al.*,¹⁶ Los resultados del cuadro III evidencian que PAFI, SpOFI y SaOFI se encuentran correlacionadas, muestran niveles de concordancia de moderada a sustancial a esta altitud y pueden generalizarse, dado su coeficiente de determinación.

Cuadro IV Parámetros de la gasometría arterial y oxigenación a diferentes altitudes

	Nivel del mar, SEPAR, 1998 ¹⁹	Huánuco, Perú, 1818 msnm, 2017 ²⁸	Ciudad de México, 2240 msnm, actual	El Alto, Bolivia, 4082 msnm, 2020 ¹⁴	Cerro de Pasco, Perú. 4380 msnm, 2017 ²⁸
PB, mmHg	760	699	587	464	457
PO_2 AA	160	147	123	97	96
PiO_2	150	137	113	88	86
PAO_2	100	94	73	55	51
pH	7.35 - 7.45	7.42 ± 0.02	7.42 ± 0.02	7.43 ± 0.04	7.43 ± 0.01
PaO_2 , mmHg	80 - 100	78.19 ± 4.76	69.88 ± 4.46	58.69 ± 8.55	54.18 ± 3.12
PaCO_2 , mmHg	35 - 45	34.63 ± 3.62	31.93 ± 2.88	26.14 ± 2.89	27.69 ± 1.88
SaO_2 , %	97.5	96.24 ± 0.87	94.10 ± 1.24	91.70 ± 2.85	82.02 ± 2.31
Hb, gr/dL	14.9	14.94 ± 1.43	14.16 ± 1.60	16.25 ± 1.98	17.23 ± 2.28
P(A-a)O_2	10	16	5	2	7
CaO_2	1947	1927	1786	1997	1894
PAFI	429	372	333	279	258
PAFI ajustada	429	342	257	170	155
SaOFI	464	458	448	437	391
SaOFI ajustada	464	421	346	266	235

PB: Presión barométrica; Patm: presión atmosférica; PO_2 AA: Presión de oxígeno al aire ambiente; PiO_2 : Presión inspirada de oxígeno; PAO_2 : Presión alveolar de oxígeno; pH: Potencial hidrógeno; PaCO_2 : Presión arterial de bióxido de carbono; PaO_2 : Presión arterial de oxígeno; Hb: Hemoglobina; SaO_2 : Saturación arterial de oxígeno; SpO_2 : Saturación parcial de oxígeno; P(A-a)O_2 : Gradiente Alveolo-arterial de oxígeno; CaO_2 : Contenido arterial de oxígeno; PAFI: Presión arterial de oxígeno (PaO_2)/ Fracción inspirada oxígeno; SaOFI: Saturación arterial de oxígeno (SaO_2) / fracción inspirada de oxígeno; Ajustada: ajuste a la presión barométrica del lugar

Como consecuencia de ascender por encima del nivel habitual de residencia, se produce la aclimatización a la hipoxia hipobárica. Esta se manifiesta mediante respiraciones rápidas y profundas que pueden iniciar en horas y persistir durante décadas; como resultado, la PaCO_2 disminuye. Previamente, Pérez Padilla⁴ informó valores de 31 ± 2 mmHg, mientras que Cid Juárez *et al.*,⁵ reportaron 30.2 ± 3.4 mmHg con menores niveles en mujeres. En el presente estudio, la PaCO_2 fue de 31.93 ± 2.88 mmHg, también con valores más bajos en mujeres, aunque sin significancia estadística. La diferencia reportada por Cid Juárez *et al.*,⁵ podría deberse a que su población era más joven y presentaba un IMC mayor, lo que pudo modificar los resultados. El Cuadro IV muestra que la PaCO_2 disminuye conforme aumenta la altitud, desde los valores de referencia de 35–45 mmHg descritos al nivel del mar.¹⁹

En este ambiente de hipoxia hipobárica también se incrementan los niveles de eritropoyetina y el número de eritrocitos, con el fin de mantener la concentración de oxígeno y optimizar su transporte. A 2,240 msnm, Pérez Padilla⁴ señaló que la hemoglobina aumenta a 17.4 ± 0.9 g/dL en hombres y 14.6 ± 1 g/dL⁴ en mujeres, en comparación con los valores a nivel del mar (hombres 16 ± 2 g/dL, mujeres 14 ± 2 g/dL). En el presente trabajo, los niveles fueron menores en hombres (14.33 ± 1.55 g/dL) y en mujeres (14 ± 1.54 g/dL). El Cuadro IV muestra además valores reportados en otras altitudes, evidenciando que la hemoglobina aumenta conforme incrementa la altitud, mientras que el CaO_2 se mantiene relativamente constante, lo cual indica que, pese a la disminución de la PB, el organismo preserva la capacidad de transporte de oxígeno hacia los tejidos.

En conjunto, este estudio caracteriza la hipoxia hipobárica en sujetos sanos a 2,240 msnm; sin embargo, se requiere mayor información en otras altitudes dentro del rango de altitud moderada (1,500 a 2,500 msnm) y en altitudes inferiores a 1,500 msnm.

Limitaciones

Este estudio se limita a una altitud de 2,240 msnm, con una PB de 587 mmHg y FiO_2 del 21%. Al ser un estudio monocéntrico, podría limitarse la generalización a otras altitudes dentro de la misma categoría de altitud moderada. Las poblaciones incluidas en el Cuadro IV no son comparables entre sí; no obstante, se presentan para describir y caracterizar los cambios observados de acuerdo con cada altitud, destacando la necesidad de conocer los valores normales propios de cada población según la altitud de residencia.

Conclusiones

La población sana residente a 2,240 msnm y con FiO_2 al 21%, sana, de ambos sexos, se caracteriza por presentar variables gasométricas indicativas de hipoxia hipobárica.

La hipoxia hipobárica a esta altitud se manifiesta por disminución de la PaO_2 , SaO_2 , SpO_2 y PaCO_2 respecto a los valores de referencia obtenidos a nivel del mar.

No se observaron diferencias en la PaCO_2 ni en la hemoglobina entre sexos.

Los índices de oxigenación ajustados por la PB fueron menores que los no ajustados.

Los índices de oxigenación mostraron correlación y niveles de concordancia de moderados a sustanciales.

Declaración de conflicto de interés: los autores han completado y enviado la forma traducida al español de la declaración de conflictos potenciales de interés del Comité Internacional de Editores de Revistas Médicas, y no fue reportado alguno que tuviera relación con este artículo.

Referencias

1. Murillo JC, Salinas SC, López MJJ, Villena CM. Función ventricular derecha en residentes nativos a gran altura. *J Health Med Sci.* 2020;6(2):113-22.
2. Santos-Martínez LE, Gómez-Tejada RA, Murillo-Jauregui CX, Hoyos-Paladines RA, Poyares-Jardim CV, Orozco-Levi M. Exposición crónica a la altura. Características clínicas y diagnóstico. *Arch Cardiol Mex.* 2021;91(4):500 - 07. Doi:10.24875/ACM.20000447.
3. Santos-Martínez LE, Arias-Jiménez A, Quevedo-Paredes J, Gómez-López L, Ordoñez-Reyna A, Moreno-Ruiz LA. Caracterización de los parámetros del intercambio gaseoso en la ciudad de México. *Rev Med Inst Mex Seguro Soc.* 2021; 59(6):473-81.
4. Pérez-Padilla R. Adaptation to moderate altitude hypoxemia: The example of the valley of Mexico. *Rev Invest Clin.* 2022;74 (1):4-15. doi:10.24875/RIC.21000159.
5. Cid-Juárez S, Téllez-Navarrete NA, Bautista-Bernal A, Leon-Gomez P, Salas-Escamilla I, Gochicoa-Rangel L, et al. Arterial blood gases in normal subjects at 2240 meters above sea level: Impact of age, gender, and body mass index. *Rev Invest Clin.* 2023;75(1):29-36. Doi: 10.24875/RIC.22000281.
6. Vélez-Páez JL, Castro-Bustamante C, Avellanas-Chavala ML. Gasometría y altitud: investigación de los rangos de normalidad en Quito, Ecuador (2.850 m sobre el nivel del mar). *Med Intensiva.* 2025; 49(6): 502140. Doi: 10.1016/j.medin.2025.502140.
7. Vázquez-García JC, Pérez-Padilla R. Valores gasométricos estimados para las principales poblaciones y sitios a mayor altitud en México. *Rev Inst Nal Enf Resp Mex.* 2000; 13(1): 06 - 13.

8. Zhang SF, Lin SX, Gao W, Liu HP, Liu Y, Zhang DH, et al. Report of the consensus conference on diagnostic criteria of ALI/ARDS at high altitudes in Western China. *Intensive Care Med.* 2001;27:1539-46. Doi:10.1007/s001340101052.
9. Pérez-Padilla R. Population distribution residing at different altitudes: Implications for hypoxemia. *Archives of Medical Research* 2002; 33(2) :162-6. Doi:10.1016/s0188-4409(01)00377-0.
10. Vazquez-García JC, Hernández-Centeno RJ, Arroyo-Hernández M, Elizondo-Ríos A, Casillas-Suarez C, Cortés-Tellez A, et al. Guía de practica clínica mexicana de EPOC 2025. *Neumol Cir Tórax.* 2025;84(Supl.1):S8-S108. Doi: 10.35366/119442.
11. Orozco-González BN, Rodríguez-Plascencia N, Palma-Zapata JA, Llamas-Domínguez AE, Rodríguez-González JS, Díaz JM, et al. Obesity hypoventilation syndrome, literature review. *Sleep Adv.* 2024;5(1):zpae033. Doi: 10.1093. sleepadvances/zpae033.
12. Jone PN, Ivy DD, Hauck A, Karamlou T, Truong U, Coleman RD, et al. Pulmonary hypertension in congenital heart disease: A scientific statement from the American Heart Association. *Circ Heart Fail.* 2023;16(7): e00080. Doi: 101161/HHF.0000000000000080.
13. Avila-Hilari A, Tinoco-Solórzano A, Vélez-Páez J, Molano Franco D, Montelongo FJ, Avellanas-Chavala ML. Síndrome de distrés respiratorio agudo en la altitud: consideraciones sobre el diagnóstico y tratamiento. *Med Intensiva.* 2024;48: 546 - 54. Doi:10.1016/j.medin.2024.04.006.
14. Viruez-Soto JA, Jiménez-Torres F, Sirpa-Choquehuanca V, Casas-Mamani R, Medina-Vera M, Vera-Carrasco O. Gasometría arterial en residentes a gran altura, El Alto - Bolivia 2020. *Revista Cuadernos.* 2020; 61(1):38-43.
15. Vera-Carrasco O. Ajuste de la relación o cociente PaO₂ / FiO₂ a la presión barométrica en la ciudad de la Paz 3600 MSNM. *Revista Cuadernos.* 2022; 63(2):62-7.
16. Matthay MA, Arabi Y, Arroliga AC, Bernard G, Bersten AD, Brochard LJ, et al. A New global definition of acute respiratory distress syndrome. *Am J Respir Crit Care Med.* 2024; 209 (1), 37- 47. Doi:10.1164/rccm.202303-0558WS.
17. Pérez-Padilla JR. La fisiología de Daniel Vergara Lope Escobar. Reinterpretación de algunos de sus datos. *Gac Méd Méx.* 2004; 140(4): 417-21.
18. Santos-Martínez LE. Consideraciones sobre la hipoxia y la altitud. *Rev Med Inst Mex Seguro Soc.* 2025;63(5):e6725. Doi: 10.5281/zenodo.16748358.
19. Rodríguez-Roisin R, SEPAR. Normativa sobre la gasometría arterial. *Arch Bronconeumol* 1998;34(3): 142 - 53. Doi: 10.1016/S0300-2896(15)30471-3.
20. Santos-Martínez LE, Gómez-López L, Arias-Jiménez A, Quevedo-Paredes J. Deterioro del intercambio gaseoso en sujetos con incremento del índice de masa corporal a una altitud de 2240 metros sobre el nivel del mar. *Arch Cardiol Mex.* 2021;91 (1):7-16. Doi: 10.24875/ACM.20000407.
21. Allen EV. Thromboangeitis obliterans: Methods of diagnosis of chronic occlusive arterial lesions distal to the wrist with illustrative cases. *Am J Med Sci.* 1929;178:237- 44.
22. Dukić L, Kopčinović LM, Dorotić A, Baršić I. Blood gas testing and related measurements: National recommendations on behalf of the Croatian Society of Medical Biochemistry and Laboratory Medicine. *Biochem Med (Zagreb).* 2016;26(3):318-336. doi: 10.11613/BM.2016.036.
23. Santos-Martínez LE, Ureña-Plascencia MV, Quevedo-Paredes J, Colín-Chávez NI, Durán-Vidauri JP, Soto-Márquez P. Diferencias en la saturación parcial de oxígeno obtenido de 3 oxímetros de pulso. *Rev Med Inst Mex Seguro Soc.* 2020;58 (4):385-93. Doi: 10.24875/RMIMSS.M19000062.
24. López-Fermín J, Escarramán-Martínez D, Sánchez Díaz JS, Pérez Nieto OR. Ratio de oxígeno como determinante de severidad en neumonía COVID-19. *Rev Chil Anest.* 2023; 52 (7): 678-82. Doi:10.25237/revchilanestv52n7-08.
25. Kramer MS, Feinstein AR. Clinical biostatistics LIV. The biostatistics of concordance. *Clin Pharmacol Ther.* 1981;29(1):111-23.
26. Casado A, Prieta L, Lamarca R. La evaluación de la fiabilidad en las observaciones clínicas: el coeficiente de correlación intra-clase. *Med Clin (Barc).* 1998;110: 145-55.
27. Tinoco-Solorzano A, Avila-Hilari A, Avellanas-Chavala ML, Montelongo FJ, Vélez-Páez J, Nieto-Estrada V, et al. Definiciones y recomendaciones de consenso sobre la medicina crítica en la altitud del comité expertos de medicina crítica en la altitud de la Federación Panamericana e Ibérica de Medicina Crítica y Terapia Intensiva. *Med Intensiva.* 2025: Doi:10.1016/j.medin.2025.502256.
28. Tinoco-Solórzano A, Román-Santamaría A, Charri-Victorio J. Gasometría arterial en diferentes niveles de altitud en residentes adultos sanos en el Perú. *Horiz Med* 2017; 17(3): 6-10. Doi: 10.24265/horizmed.2017.v17n3.02.