

# Efectos de la exposición aguda a gran altitud en jugadores profesionales de fútbol aclimatados y no aclimatados

Jorge Cajigal<sup>1</sup>, Oscar F. Araneda<sup>2</sup>, José Naranjo Orellana<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Ciencias del Deporte. Universidad Mayor. Santiago. Chile. <sup>2</sup>Laboratorio Integrativo de Biomecánica y Fisiología del Esfuerzo (LIBFE). Universidad de los Andes. Santiago. Chile. <sup>3</sup>Laboratorio de Fisiología del Ejercicio. Universidad Pablo de Olavide. Sevilla. España.

Recibido: 12.09.2017

Aceptado: 22.09.2017

## Resumen

**Objetivo:** Evaluar la respuesta cardiopulmonar, equilibrio ácido base y gases en una prueba cardiopulmonar máxima en futbolistas profesionales de primera división de Bolivia residentes de altitudes bajas, medidos durante las primeras seis horas de llegada a la gran altura de 3.600 m.

**Métodos:** A once futbolistas bolivianos residentes a 150 m (lowlanders, LL) y diez residentes a 3.600 m (highlanders, HL) se les realizó el Yo-Yo endurance test con ergoespirometría, determinación de pH, exceso de bases (EB), gases y lactato en sangre capilar a 150 m y a 3.600 m una semana después.

**Resultados:** El  $\dot{V}O_{2\max}$  ( $L \cdot \text{min}^{-1}$ ) disminuyó a 3.600 m en ambos grupos estudiados, sin diferencia entre el lugar de residencia y altitud. En LL ( $p < 0,001$ ),  $3,52 \pm 0,46$  vs  $2,92 \pm 0,38$ . En HL ( $p < 0,001$ ),  $4,02 \pm 0,5$  vs  $3,41 \pm 0,45$ . La distancia máxima recorrida (metros) fue menor en altura (3.600 m) en ambos grupos,  $1.903,64 \pm 202,55$  vs  $1.358,2 \pm 210,6$  ( $p < 0,001$ ) en LL, y  $2.096,0 \pm 272,4$  vs  $1.605,0 \pm 281,17$  ( $p < 0,001$ ) en HL. Pre-ejercicio a 3.600 m, los LL tuvieron mayor  $p\text{CO}_2$  ( $38,3 \pm 3,0$  vs  $30,69 \pm 1,78$  mmHg;  $p < 0,001$ ) y menor  $\text{satO}_2$  ( $83,1 \pm 2,7$  vs  $88,1 \pm 1,1\%$ ;  $p < 0,01$ ). El ejercicio en altura generó en LL mayores decrementos de pH ( $-0,258 \pm 0,06$  vs  $-0,206 \pm 0,03$ ;  $p < 0,05$ ) y de EB ( $-18,73 \pm 2,83$  vs  $-12,62 \pm 2,13$ ) sin diferencias en lactato sérico ( $10,8 \pm 2,09$  vs  $9,43 \pm 2,1$  mmol/L para LL y HL respectivamente).

**Conclusión:** En las primeras seis horas a 3.600 m, la caída del rendimiento aeróbico es similar en LL y HL, a pesar de una menor respuesta ventilatoria y oxigenación en reposo del grupo LL, además en ejercicio se genera una mayor acidosis metabólica en LL en ambas alturas.

## Palabras clave:

Equilibrio ácido-base.  
Rendimiento físico.  
Hipoxia hipobárica.  
Jugadores de fútbol.  
Mal agudo de montaña.

## Effects of acute exposure to high altitude in acclimatized and non-acclimatized professional soccer player

### Summary

**Objective:** To evaluate the cardiopulmonary response, gases and acid base balance in a cardiorespiratory maximal test applied to professional football players of first division of Bolivia living at low altitude, during the first six hours after arrival to the high altitude of 3,600 meters.

**Methods:** Eleven Bolivian players living at an altitude of 150 m (lowlanders, LL) and ten highlanders (HL), living at an altitude of 3,600 m, performed the Yo-Yo endurance test with ergospirometry. Base excess (BE), pH, blood gases and capillary blood lactate were determined at 150 m and at 3,600 m seven days later.

**Results:**  $\dot{V}O_{2\max}$  ( $L \cdot \text{min}^{-1}$ ) decreased at 3,600 m in both groups, without differences in slopes or interaction between the factors residence and altitude. In LL ( $p < .001$ ),  $3.52 \pm 0.46$  vs  $2.92 \pm 0.38$ . In HL ( $p < .001$ ),  $4.02 \pm 0.5$  vs  $3.41 \pm 0.45$ . The distance covered in the test was lower at 3,600 m in both groups:  $1358.2 \pm 210.6$  vs  $1903.64 \pm 202.55$  m in LL ( $p < .001$ ) and  $1605.0 \pm 281.17$  vs  $2096.0 \pm 272.4$  m in HL ( $p < .001$ ). Pre-exercise at 3600 m, LL had a higher  $p\text{CO}_2$  ( $38.3 \pm 3.0$  vs  $30.69 \pm 1.78$  mmHg;  $p < .001$ ) and a lower  $\text{satO}_2$  ( $83.1 \pm 2.7$  vs  $88.1 \pm 1.1\%$ ;  $p < .01$ ). Exercise performed at high altitude produced in LL a higher decrement in pH ( $-0.258 \pm 0.06$  vs  $-0.206 \pm 0.03$ ;  $p < .05$ ) and in BE ( $-18.73 \pm 2.83$  vs  $-12.62 \pm 2.13$ ) with no differences in blood lactate ( $10.8 \pm 2.09$  vs  $9.43 \pm 2.1$  mmol/L for LL and HL, respectively).

**Conclusion:** During the first six hours at 3,600 m, aerobic performance decrease is similar in LL and HL, although a lower ventilatory response and resting oxygenation of the LL group is found. LL group also showed a greater metabolic acidosis in both altitudes during exercise.

## Key words:

Acid-base equilibrium.  
Physical performance.  
Hypobaric hypoxia.  
Soccer players.  
Acute mountain sickness.

Correspondencia: Jorge Cajigal  
E-mail: jorgecajigal@gmail.com

## Introducción

Jugar al fútbol en altura es un interesante desafío científico, deportivo y logístico para los equipos provenientes de nivel del mar. Así, se han planteado tanto riesgos para la salud y la disminución del rendimiento físico como las causas principales de la desventaja que implica competir en estas condiciones<sup>1-4</sup>. A pesar de esto, la FIFA (*Fédération Internationale de Football Association*), ha planteado que existe aún información insuficiente al respecto, particularmente en altitudes superiores a los 3.000 m<sup>5-7</sup>.

En el año 2000, Brutsaert *et al*<sup>8</sup> estudiaron la respuesta cardiopulmonar y metabólica al ejercicio en jugadores profesionales aclimatados a la altura (o *highlanders*; HL) y jugadores procedentes de bajas altitudes y no aclimatados a la altura (o *lowlanders*; LL) medidos a las 48 horas de permanencia a 3.600 m. Al término del esfuerzo cardiopulmonar, ambos equipos mostraron una elevación en los equivalentes ventilatorios del oxígeno (VE/VO<sub>2</sub>), altas concentraciones de lactato sanguíneo y bajas saturaciones arteriales de oxígeno (SaO<sub>2</sub>), sin diferencias entre LL y HL. Además, ambos grupos tuvieron menores valores de VO<sub>2</sub>max respecto de mediciones hechas a 430 m, con un mayor efecto observado en los LL, lo cual indica una desventaja fisiológica de este grupo frente a los jugadores aclimatados<sup>8</sup>. Recientemente, se han reportado resultados similares en jugadores juveniles de fútbol no aclimatados a la altura<sup>2,9</sup>.

Independiente de la estrategia de aclimatación, la menor presión atmosférica hace disminuir las presiones alveolar (PAO<sub>2</sub>) y arterial (PaO<sub>2</sub>) de oxígeno así como su contenido arterial (CaO<sub>2</sub>), lo que disminuye el rendimiento aeróbico respecto al nivel del mar<sup>10</sup>. De esta forma, la hipoxia hipobárica aumenta la respuesta ventilatoria regulando la PaO<sub>2</sub>, mientras que el CaO<sub>2</sub> es determinado por el desplazamiento en la curva de disociación de la hemoglobina<sup>11</sup> y especialmente por la concentración de hemoglobina, por lo que cambios en la volemia y en la respuesta eritropoyética afectarán directamente el CaO<sub>2</sub><sup>12,13</sup>. Por su parte, la hiperventilación propia de la hipoxia disminuye la presión arterial de CO<sub>2</sub> (PaCO<sub>2</sub>), lo que implica posteriormente el restablecimiento del equilibrio ácido base (EAB) a través del aumento de la excreción renal de bicarbonato<sup>14-17</sup>. Los cambios mencionados forman parte de la aclimatación a la altura y requieren de aproximadamente 2 a 3 semanas para consolidarse<sup>18,19</sup>, lo que genera importantes problemas logísticos para su implementación en las competencias deportivas. En vista de este problema, muchos equipos han optado por llegar el mismo día del partido a la altura, jugar y retornar, estrategia que se denomina “*fly-in, fly-out*”<sup>1</sup> o jugar en “hipoxia aguda inmediata” (HAI). La principal justificación para su uso es evitar las manifestaciones del “mal agudo de montaña” que suceden desde las 6 horas, con su pico entre las 24 y 48 horas, en vista de la merma sobre el rendimiento asociada a este cuadro<sup>15,19,20</sup>. De manera empírica, varios equipos de clubes y selecciones nacionales en Sudamérica han utilizado esta estrategia; sin embargo, no existe información científica al respecto en jugadores de fútbol profesional. Así, el objetivo del presente estudio fue conocer los efectos de la exposición a HAI a gran altitud (3.600 m) sobre la respuesta cardiopulmonar máxima, el EAB y los gases en sangre capilar en jugadores de fútbol profesional aclimatados y no aclimatados a la gran altura.

## Material y método

### Sujetos

Se estudió a 21 futbolistas profesionales pertenecientes a dos equipos de la primera división boliviana, uno proveniente de una altitud baja y no aclimatados a la altura (n = 11, Trinidad, Bolivia, 150 m), denominados *lowlanders* (LL) y otro formado por sujetos aclimatados a la altura con una permanencia de al menos seis meses (n = 10, La Paz, Bolivia, 3.600 m) denominados *highlanders* (HL). Ninguno de los sujetos del grupo HL era nativo de altura pero todos eran residentes permanentes de la gran altura con un mínimo de aclimatación de 6 meses. La totalidad de los sujetos involucrados en el estudio eran jugadores profesionales y además titulares de sus respectivos equipos, con entrenamientos diarios y partidos de fútbol durante los fines de semana. Todos los sujetos involucrados presentan al menos 5 años de entrenamiento sistemático. La Tabla 1 resume las características de la muestra. Todos los sujetos fueron informados de las pruebas a realizar y dieron su consentimiento por escrito para participar voluntariamente en el estudio. Los protocolos del estudio fueron diseñados siguiendo las indicaciones de la Declaración de Helsinki.

### Protocolo

Las evaluaciones se realizaron durante el desarrollo del campeonato nacional de primera división de Bolivia. Inicialmente ambos equipos fueron evaluados a baja altitud (150 m). Un día después de esta medición, los HL retornaron a la altura para ser medidos seis días después en esta condición. El grupo LL viajó a la altura una semana después de la primera medición y tras 60 min en avión se dirigieron inmediatamente al estadio de fútbol Hernando Siles (3.600 m). Desde que los jugadores se expusieron a la altura, hasta que fueron evaluados, transcurrió un tiempo menor a 6 horas (entre 3 y 5 horas de HAI). La Figura 1 muestra el desarrollo de las mediciones.

### Procedimiento

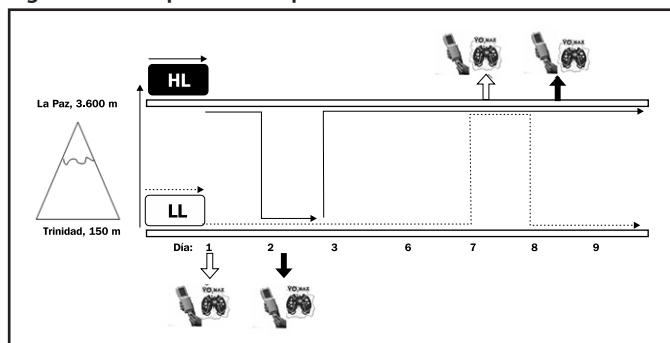
El día de las evaluaciones, temprano por la mañana, se procedió con la evaluación cardiopulmonar aplicando la prueba de campo de esfuerzo máximo *Yo-Yo Endurance Test* (YYET)<sup>21</sup>. Cada jugador realizó la prueba portando un equipo ergoespirómetro que registró los cambios cardiopulmonares. En reposo, (pre-ejercicio) y al término de la prueba,

**Tabla 1. Datos antropométricos, edad y tiempo de permanencia en altura.**

	Lowlanders (n=11)	Highlanders (n=10)
Edad (años)	21,8±3,4	25,2±3,2*
Estatura (cm)	172,7±0,07	174,6±0,05
Masa corporal (kg)	68,6±9,7	72,2±6,3
IMC (kg/m <sup>2</sup> )	22,9±2,1	23,7±1,6
Permanencia en altura (meses)	0	24,9±32,6*

Los datos se presentan como promedios ± DE. (\*) p<0,05.

**Figura 1. Descripción del experimento.**



Las líneas representan los desplazamientos entre 150 y 3.600 m durante el experimento. Línea punteada para LL y continúa para HL. Las flechas representan los momentos de medición, blanco para LL y negro para HL. *Lowlanders* (LL), *highlanders* (HL).

durante los primeros 30s de recuperación (post-ejercicio), se extrajo una muestra de sangre capilar donde se realizaron las mediciones del EAB y gases.

### Prueba de campo YYET

Se utilizó el YYET de resistencia nivel 1<sup>21-23</sup>, con determinación directa y simultánea de la función cardiopulmonar. La prueba se realizó en campo de fútbol de césped natural y con botas de fútbol. La prueba es de tipo progresivo continuo, comenzando a bajas velocidades y con incrementos en la velocidad de carrera de 0,5 km/h cada minuto con el objetivo de alcanzar el máximo esfuerzo cardiopulmonar. El rendimiento físico de cada sujeto se obtuvo como distancia máxima alcanzada en el YYET.

Los jugadores no realizaron ningún ejercicio exigente 48 horas antes de la prueba YYET. Antes de iniciar la prueba realizaron un calentamiento de 10 min de trote a 6-8 km/h, además de ejercicios de flexibilidad y movilidad articular.

### Medición de parámetros cardiorespiratorios

Para valorar la respuesta cardiopulmonar máxima, se utilizó un equipo portátil Metamax 3B, (Cortex, Alemania), que fue calibrado antes de cada medición utilizando gases de fábrica y aire ambiental para los analizadores y una jeringa homologada de 3 litros para la calibración del flujómetro. Igualmente, se registró la presión barométrica.

Se consideró como criterio de esfuerzo máximo cardiopulmonar haber alcanzado una meseta en el VO<sub>2</sub>max. En caso de no ocurrir meseta, se consideró válida la prueba al reunir 2 de los siguientes 3 criterios: 1) un RER ≥ 1,15; 2) alcanzar al menos el 95% de la FC máxima teórica (220 – edad); 3) concentración de lactato sanguíneo superior a 8 mmol/L<sup>24</sup>. Los sujetos fueron motivados para alcanzar el máximo esfuerzo cardiopulmonar. En la última etapa del YYET se obtuvo el consumo máximo de oxígeno (VO<sub>2</sub>max), ventilación pulmonar máxima (VEmax) y equivalente ventilatorio máximo de oxígeno (VE/VO<sub>2</sub>max). Estos parámetros cardiorespiratorios se obtuvieron respiración a respiración y posteriormente fueron exportados a una planilla Excel en intervalos de 15 segundos. Se determinaron los valores máximos como aquellos pertenecientes al intervalo donde se obtuvo el VO<sub>2</sub>max.

### Medición del EAB y gases en sangre capilar

El EAB y gases fueron medidos en condiciones de reposo (5 minutos sentados) antes de iniciar el calentamiento (pre-ejercicio) y en los 30 segundos siguientes al término del esfuerzo máximo cardiopulmonar (post-ejercicio). Se midió el pH y la pCO<sub>2</sub> y se calculó HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>; exceso de bases (EB) y SaO<sub>2</sub> en 100 µL de sangre arterializada o capilar obtenida por punción en el lóbulo de la oreja. Las muestras fueron analizadas con el equipo portátil I-Stat (Abbot, USA) por medio de cartuchos específicos (CG4)<sup>25,26</sup>. La concentración de lactato en sangre se determinó en una muestra de sangre de 5 µL obtenida también desde el mismo lóbulo de la oreja y utilizando un analizador portátil (Lactate Pro1, Arkray, Japón).

### Análisis estadístico

La normalidad de las distribuciones se valoró con el Test de Saphiro-Wilk y la homogeneidad de las varianzas fue evaluada con el test de Levene. Como prueba de contraste de hipótesis se utilizó un ANOVA factorial, considerando como factores principales el lugar de residencia permanente de los deportistas (*Low Landers* o *High Landers*) y el sitio donde se realizaron las mediciones (150 ó 3.600 metros de altura). Cuando se encontraron diferencias significativas en alguno de los factores principales se utilizó la prueba de Bonferroni como test post-hoc. Las correlaciones fueron analizadas mediante el test de Pearson. Para todas las pruebas descritas se utilizó como nivel de significación un valor de *p* inferior a 0,05. Todos los datos se presentan como media y desviación estándar.

El análisis fue realizado utilizando el programa estadístico GraphPad Prism 6.0

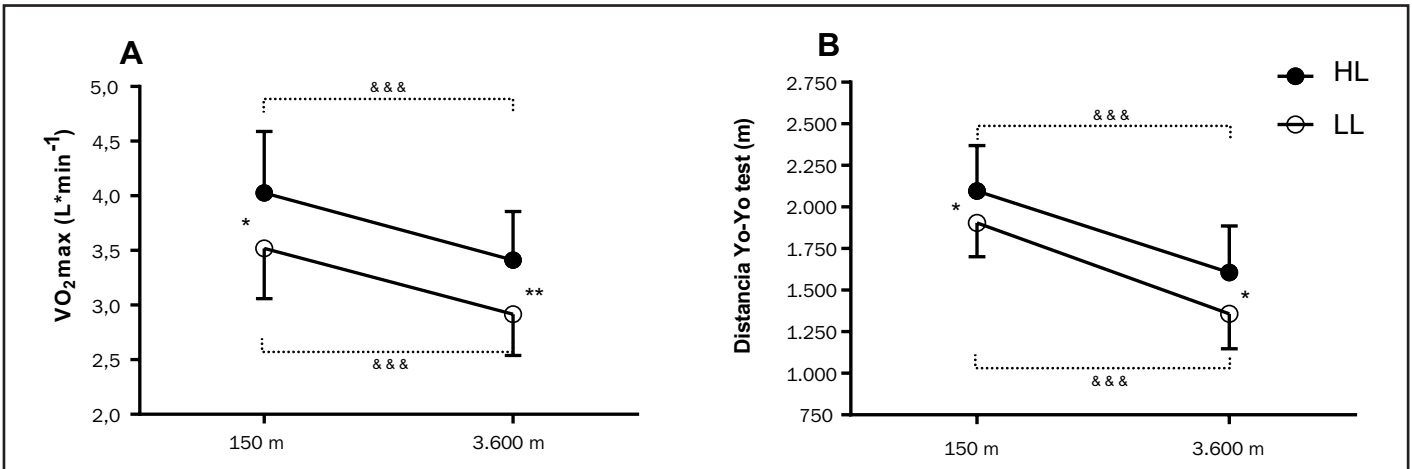
## Resultados

### Rendimiento físico

Respecto al rendimiento físico, se observó una disminución en el VO<sub>2</sub>max absoluto (L\*min<sup>-1</sup>) en la altura en ambos grupos. En LL este parámetro disminuyó desde 3,52 ± 0,46 hasta 2,92 ± 0,38 L\*min<sup>-1</sup> (p < 0,001) y en HL disminuyó desde 4,02 ± 0,5 hasta 3,41 ± 0,45 L\*min<sup>-1</sup> (p < 0,001) (Figura 2A). De igual forma, el VO<sub>2</sub>max relativo (ml\*min<sup>-1</sup>\*Kg<sup>-1</sup>) disminuyó en LL con la altura desde 51,48 ± 3,92 hasta 42,77 ± 3,67 (p < 0,001) y en HL disminuyó desde 55,65 ± 4,47 hasta 47,76 ± 3,53 (p < 0,001). En la distancia recorrida (metros) en el YYET, también se encontró una disminución en las mediciones en altitud, desde 1.903,64±202,55 hasta 1.358,2±210,6 m (p < 0,001) en el grupo LL y desde 2.096,0±272,4 hasta 1.605,0±281,17 m (p < 0,001) en el grupo HL (Figura 2B). Para ambos parámetros, el grupo LL presentó menores valores que el grupo HL tanto a 150 m como a 3.600 m.

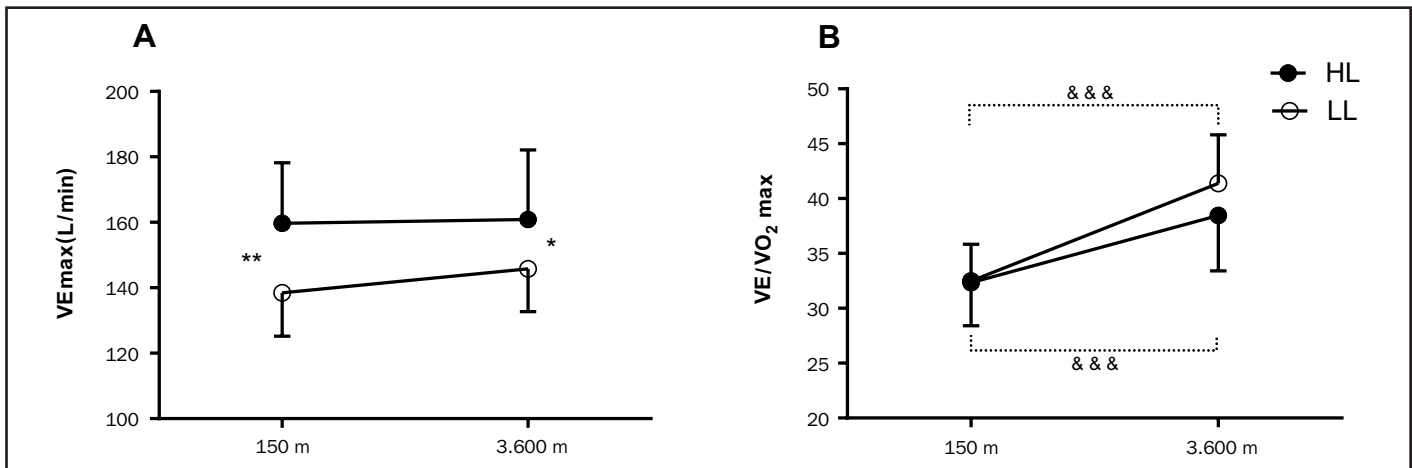
La VEmax (L/min) no mostró variación (p = 0,42) por el cambio de altura en ninguno de los grupos (138,44 ± 13,23 vs 145,83 ± 13,08 para LL y 159,72 ± 18,51 vs 160,84 ± 21,32 para HL) (Figura 3A). El grupo HL mostró mayores valores de VE tanto a 150 m (p < 0,01) como a 3.600 m (p < 0,05). Respecto al VE/VO<sub>2</sub>max (Figura 3B), aumentó desde 32,49 ± 3,34 hasta 41,39 ± 4,41 (p < 0,001) en LL y desde 32,35 ± 3,95 hasta 38,47 ± 5,03 (p < 0,001) en HL al comparar 150 m con 3.600 m respectivamente. No se encontraron diferencias entre grupos a la misma altura (p = 0,25).

Figura 2.  $VO_2$  max absoluto (A) y distancia máxima Yo-Yo Test (B) medidos a 150 m y 3.600 m en futbolistas *lowlanders* (LL) y *highlanders* (HL). Los valores son promedios  $\pm$  SD.



\*Diferencias entre grupos a la misma altura: \*p < 0,05; \*\*p < 0,01. (& & &) Diferencias entre 3.600 m y 150 m: (&&&) p < 0,001.

Figura 3. Ventilación máxima (VE max) (A) y equivalente ventilatorio máximo para el oxígeno (VE/ $VO_2$  max) (B) medidos a 150 m y 3.600 m en futbolistas *lowlanders* (LL) y *highlanders* (HL). Los puntos representan promedios  $\pm$  SD.



\*Diferencias entre grupos a la misma altura: \*p < 0,05; \*\*p < 0,01. (& & &) Diferencias entre 3.600 m y 150 m: (&&&) p < 0,001.

### EAB pre-ejercicio

En la Tabla 2 se muestran los datos del EAB y gases. En relación al EAB pre-ejercicio, el pH no se modificó en LL pero sí aumentó en HL a 3.600 m (p < 0,01).  $HCO_3^-$  no se modificó en ninguno de los grupos a 3600 m (p = 0,76) pero sí se encontraron valores más elevados en los sujetos LL tanto a 150 m (p < 0,001) como a 3.600 m (p < 0,001). La  $pCO_2$  (Figura 4A), disminuyó en altitud en HL (p < 0,001) con menores valores en el equipo HL tanto a 150 m (p < 0,001) como a 3.600 m (p < 0,001). El EB (Tabla 2) no se modificó con la altura en ninguno de los equipos (p = 0,44). Sin embargo, en HL presentó valores más bajos en comparación a LL tanto a 150 m (p < 0,001) como a 3.600 m (p < 0,001). El lactato aumentó a 3.600 m en LL (p < 0,01) y HL (p < 0,05), encontrándose mayor lactato a 3.600 m en LL respecto a HL (p < 0,05). Finalmente, respecto

a la  $SaO_2$  (Figura 4B) la altura tuvo un efecto diferente en el grupo LL y HL. Así, a 150 m no existen diferencias en los grupos, disminuyendo en la altura para ambos casos (p < 0,001) pero con un valor mayor en el grupo HL ( $88,1 \pm 1,1$  vs  $83,1 \pm 2,7$ ; p < 0,01).

### EAB post-ejercicio

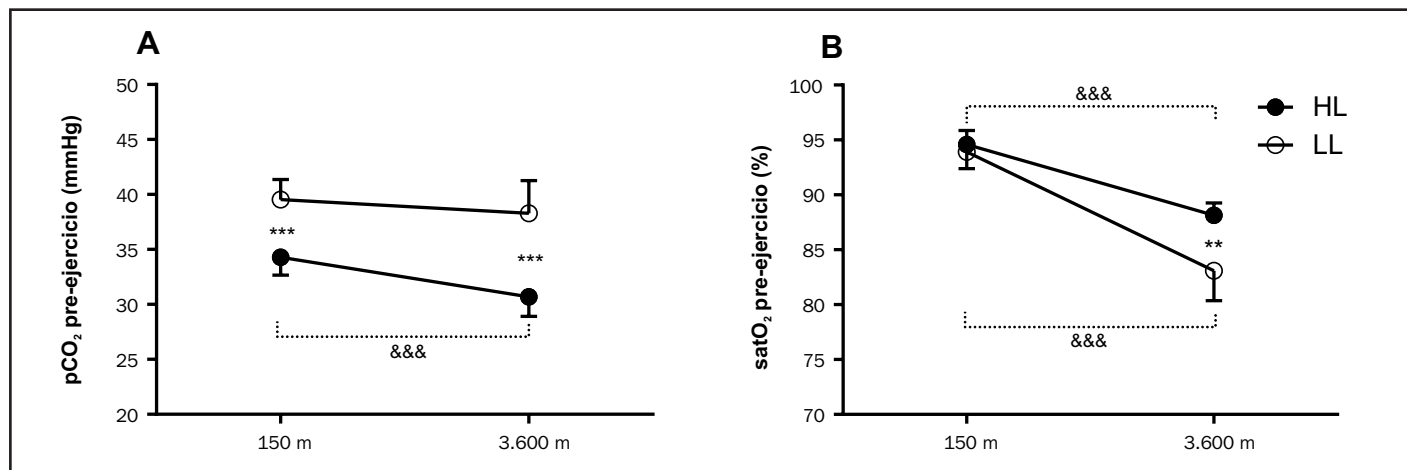
En relación a los parámetros del EAB post-ejercicio, se encontró que el pH no cambia a 3.600 m en ninguno de los dos grupos, presentando valores más elevados el grupo HL tanto a 150 m (p < 0,05) como a 3.600 m (p < 0,01). En relación al  $HCO_3^-$  post ejercicio, se encontró a 3.600 m una menor concentración tanto en sujetos LL (p < 0,01) como HL (p < 0,05) sin diferencias entre ambos grupos (p = 0,66). La  $pCO_2$  post ejercicio también disminuyó a 3.600 m en LL (p < 0,01) y HL (p < 0,001) con valores

**Tabla 2. Equilibrio ácido base y gases en sangre capilar pre y post ejercicio máximo, en futbolistas profesionales medidos a 150 m y 3.600 m de altitud.**

	Lowlanders (n=11)		Highlanders (n=10)	
	150 m	3.600 m	150 m	3.600 m
pH pre	7,425±0,02	7,440±0,03	7,416±0,01	7,454±0,02 <sup>b</sup>
pH post	7,192±0,05	7,182±0,05	7,230±0,04*	7,248±0,04**
ΔpH-0,234±0,05	-0,258±0,06	-0,185±0,04*	-0,206±0,03*	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> pre (mmol/L)	25,93±0,74	26,07±2,25	22,01±0,97***	21,59±1,49***
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> post (mmol/L)	14,05±1,80	11,53±1,92 <sup>b</sup>	13,95±1,87	12,15±1,38
Δ HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mmol/L)	-11,93±2,25	-14,55±2,15 <sup>b</sup>	-8,1±1,73***	-9,44±1,78***
pCO <sub>2</sub> pre (mmHg)	39,5±1,83	38,3±3,0	34,3±1,62***	30,69±1,78 *** <sup>c</sup>
pCO <sub>2</sub> post (mmHg)	36,6±4,5	30,5±2,8 <sup>b</sup>	33,1±2,25*	27,65±2,64 * <sup>c</sup>
Δ pCO <sub>2</sub> (mmHg)	-2,9±4,7	-7,8±2,4 <sup>b</sup>	-1,2±2,38	-3,0±2,57***
BE pre (mmol/L)	1,64±0,92	2,09±2,47	-2,60±1,17***	-2,25±1,39***
BE post (mmol/L)	-14,10±2,33	-16,64±2,77 <sup>a</sup>	-13,5±2,64	-14,88±2,42
Δ BE (mmol/L)	-15,8±2,86	-18,73±2,83 <sup>b</sup>	-10,9±2,38***	-12,62±2,13***
Lactato pre (mmol/L)	1,89±0,48	2,87±0,81 <sup>b</sup>	1,64±0,53	2,1±0,46* <sup>a</sup>
Lactato post (mmol/L)	11,7±1,93	13,72±2,40 <sup>b</sup>	10,7±1,85	11,53±2,12*
Δ Lactato (mmol/L)	9,76±1,82	10,8±2,09	9,06±1,88	9,43±2,1

Los cambios absolutos (Δ) fueron calculados como los valores post-pre ejercicio. Los valores son presentados como promedio ± DS.  
 (\*)Diferencias entre grupos a la misma altura: (\*) p (a, b y c). Diferencias entre 3.600 m y 150 m: (a) p<0,05; (b) p<0,01; (c) p<0,001.

**Figura 4. pCO<sub>2</sub> (A) y SaO<sub>2</sub> (B) pre ejercicio, medidos a 150 m y 3600 m en futbolistas lowlanders (LL) y highlanders (HL). Los puntos representan promedio ± DS.**



\*Diferencias entre grupos a la misma altura: \*\*p<0,01; \*\*\*p<0,001. (&) Diferencias entre 3.600 m y 150 m: (&&&) p<0,001.

inferiores en HL a ambas altitudes (p <0,05). El EB post ejercicio disminuyó significativamente sólo en sujetos LL a 3.600 m (p <0,05) sin encontrarse cambios en el grupo HL (p = 0,16). Finalmente, el lactato post ejercicio aumentó sólo en sujetos LL a 3.600 m (p <0,01) encontrándose además valores inferiores en HL en altura (p <0,05).

**EAB cambios absolutos por ejercicio**

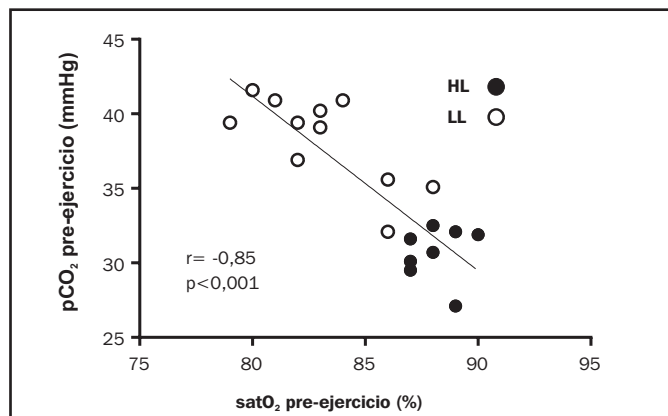
Como se puede apreciar en la Tabla 2, los decrementos del pH, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, EB y pCO<sub>2</sub> tras ejercicio fueron mayores para el grupo LL en

ambas alturas. El incremento de Lactato no mostró diferencias dentro de los grupos ni al comparar entre ellos.

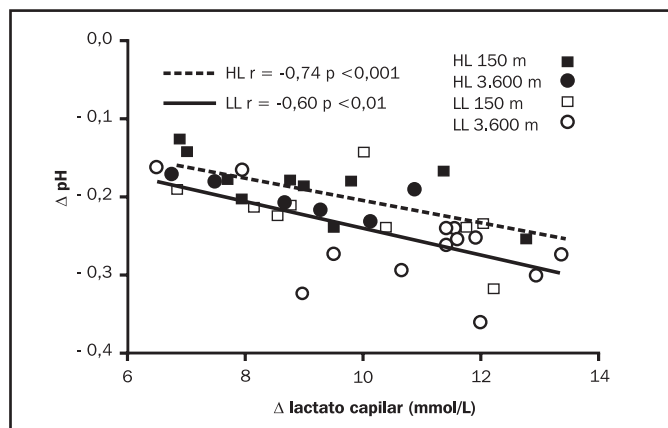
**Correlaciones y análisis de regresión**

En reposo se encontró una correlación negativa (r = -0,85 p <0,001) entre la SaO<sub>2</sub> y pCO<sub>2</sub> para LL y HL medidos a 3.600 m (Figura 5). Para LL se encontró una mayor pCO<sub>2</sub> y menor SaO<sub>2</sub>, mientras que los HL mostraron menor pCO<sub>2</sub> y mayor SaO<sub>2</sub>.

**Figura 5.** Relación entre los valores absolutos de  $\text{SaO}_2$  (%) y  $\text{pCO}_2$  (mmHg) en sangre capilar pre-ejercicio en futbolistas *lowlanders* (LL, n=11) y *highlanders* (HL, n=8) medidos en La Paz a 3.600 m.



**Figura 6.** Relación entre los cambios absolutos de lactato y pH en sangre capilar ( $\Delta$  = post – pre ejercicio) en futbolistas *lowlanders* (LL) y *highlanders* (HL). La línea punteada corresponde a los HL (n=11) y línea continua a los LL (n=8).



Finalmente, la Figura 6 muestra dos rectas diferentes para LL ( $r = -0,60$   $p < 0,01$ ) y HL ( $r = -0,74$   $p < 0,001$ ) al relacionar los incrementos de lactato con los de pH.

## Discusión

### Rendimiento físico

Hasta donde sabemos, el presente trabajo evaluó por primera vez el efecto de la HAI en jugadores de fútbol profesional. El hallazgo más importante del estudio fue que la disminución en altitud del  $\text{VO}_2\text{max}$  y de la distancia máxima del YYET tanto en sujetos HL como LL, sugiere que el efecto de la exposición bajo una condición HAI afectaría de igual manera el rendimiento físico y cardiopulmonar tanto en sujetos aclimatados como no aclimatados a la altitud.

Los resultados de Brutsaert<sup>8</sup>, obtenidos también en La Paz con jugadores de Fútbol profesional a las 48 horas de exposición, coinciden con los nuestros en que ambos grupos presentan una reducción del

$\text{VO}_2\text{max}$ . Sin embargo, en el estudio de Brutsaert la disminución es mayor en los sujetos LL que en los HL (-20% y -13% respectivamente). En nuestros resultados esta disminución en el  $\text{VO}_2\text{max}$  es similar (-17% y -15% respectivamente), lo que sin duda se debe a la duración de la exposición y nos permite afirmar que la exposición aguda a la hipoxia en las primeras 6 horas afecta por igual al rendimiento de LL y HL mientras que prolongar esa exposición a 48 horas afecta en mayor medida a los sujetos LL.

En nuestro estudio, se observa un incremento del  $\text{VE}/\text{VO}_2\text{max}$  en la altura sin aparente efecto diferencial de este medio sobre ambos grupos, lo que concuerda con otros estudios<sup>8,27</sup>. El mayor  $\text{VE}/\text{VO}_2\text{max}$  en altura es el resultado más bien de la disminución en el  $\text{VO}_2\text{max}$  al no encontrarse cambios en la  $\text{VEmax}$  entre 150 m y 3.600 m en ninguno de los dos grupos.

### EAB y $\text{satO}_2$ pre ejercicio

La reducción de la  $\text{pCO}_2$  de reposo en HL a 3.600 m (Figura 4A) sugiere una mayor respuesta ventilatoria que se relaciona con una mayor  $\text{SaO}_2$  en altura, como muestra la Figura 5. Una posible explicación es que el grupo LL tarde más tiempo en activar adecuadamente el mecanismo de hiperventilación propio de la hipoxia hipobárica<sup>15,28</sup>. La hiperventilación presenta la ventaja de aumentar la disponibilidad de oxígeno, de acuerdo con la ecuación del gas alveolar, pero también la desventaja de provocar alcalosis respiratoria<sup>28</sup> con efectos contradictorios sobre el rendimiento<sup>28,29</sup>. Por su parte, la alcalosis provoca un desplazamiento de la curva de disociación de la hemoglobina hacia la izquierda (lo contrario al efecto Bhor), incrementando la afinidad de la hemoglobina por el  $\text{O}_2$ <sup>14,28</sup> y se asocia con el "Mal Agudo de Montaña"<sup>19,30,31</sup>. Esta situación ha sido previamente reportada en jugadores de fútbol expuestos de forma aguda a la altura (2 a 3 días de permanencia) produciendo malestar general y disnea que afectan el rendimiento<sup>32</sup>.

Los resultados del EAB en reposo, resumidos en la Tabla 2, indican que el pH y  $\text{HCO}_3^-$  no cambian en LL a 3.600 m. Similares hallazgos se han encontrado en jugadores juveniles no profesionales expuestos también a HAI<sup>20</sup>. Por su parte, los cambios observados en los jugadores HL (Tabla 2) sugieren una alcalosis respiratoria compensada por la excreción de  $\text{HCO}_3^-$  por vía renal, situación propia de sujetos aclimatados a la altura<sup>14,15,17</sup>. Por tanto, los sujetos HL logran una mayor hiperventilación en reposo con una mayor  $\text{SaO}_2$  y con una leve alteración del pH, a diferencia de los sujetos LL, quienes probablemente por el limitado tiempo de exposición a la hipoxia, no modifican su EAB alcanzando una menor respuesta ventilatoria y menor  $\text{SaO}_2$ .

### EAB post ejercicio máximo

En relación con el ejercicio físico, los cambios absolutos de pH son mayores para el grupo LL a ambas altitudes implicando una mayor acidosis metabólica o bien una menor capacidad buffer en este grupo (Tabla 2). En los jugadores HL se observa el mismo comportamiento a ambas altitudes pero de menor intensidad.

El tiempo de exposición aguda a las nuevas condiciones de altitud impide la total compensación del EAB para ambos grupos, por lo tanto, las modificaciones agudas por ejercicio son similares a las encontradas en su ambiente de permanencia habitual (Figura 6).



El lactato de reposo es mayor en altitud en ambos grupos, siendo mayor el cambio para los LL (Tabla 2). El lactato post ejercicio es mayor en los LL a 3.600 m, pero al comparar los cambios absolutos de lactato, no encontramos diferencias. Aunque la interpretación correcta del lactato es compleja en estas condiciones<sup>33</sup>, esta respuesta es coherente con las modificaciones observadas en el pH como muestra la Figura 6, donde parece deducirse que la aclimatación genera menos acidosis por ejercicio para el mismo cambio de lactato.

Sabemos que una condición de acidosis metabólica permite aumentar la disponibilidad de oxígeno a nivel tisular durante el ejercicio por efecto Bhor, tanto en normoxia como en hipoxia<sup>34,35</sup>, aunque esta situación ha sido recientemente cuestionada con el ejercicio de alta intensidad en hipoxia<sup>36</sup>. Por otra parte, hay evidencias bajo condiciones de normoxia de que una alcalosis metabólica (por administración oral de bicarbonato) produce una disminución en el  $\dot{V}O_{2max}$  y rendimiento físico<sup>37</sup>. En el presente estudio, bajo condiciones de HAI, los jugadores LL alcanzarían una mayor acidosis metabólica post ejercicio que podría favorecer una mejor disponibilidad de oxígeno a nivel muscular que podría compensar la fuerte caída de la  $PAO_2$  por la hipoxia.

En conclusión, los presentes hallazgos permiten considerar la exposición a HAI como una estrategia fisiológica razonable para enfrentar la gran altitud en deportes como el fútbol (que no permiten largas estancias de aclimatación) dado que la disminución del rendimiento aeróbico es similar en LL y HL, no generando por tanto ninguna desventaja para los jugadores procedentes de bajas altitudes.

## Agradecimientos

A la Federación Boliviana de Fútbol y especialmente a Ivo Eterovic, médico de la Selección de Fútbol de Bolivia quien se encargó de realizar la coordinación con los respectivos equipos y sus cuerpos técnicos.

## Bibliografía

- Gore CJ, Aughey RJ, Bourdon PC, Garvican-Lewis LA, Soria R, Claros JC, et al. Methods of the international study on soccer at altitude 3600 m (ISA3600). *Br J Sports Med.* 2013;47:i80-5.
- Aughey RJ, Hammond K, Varley MC, Schmidt WF, Bourdon PC, Buchheit M, et al. Soccer activity profile of altitude versus sea-level natives during acclimatization to 3600 m (ISA3600). *Br J Sports Med.* 2013; 47:i107-113.
- Sargent C, Schmidt WF, Aughey RJ, Bourdon PC, Soria R, Claros JC, et al. The impact of altitude on the sleep of young elite soccer players (ISA3600). *Br J Sports Med.* 2013;47:i86-92.
- Nassis GP. Effects of altitude on football performance: analysis of the 2010 FIFA World Cup Data. *J Strength Cond Res.* 2013;27:703-7.
- Bärtsch P, Saltin B, Dvorak J. Consensus statement on playing football at different altitude. *Scand J Med Sci Sports.* 2008; 18:96-9.
- Billaut F, Gore CJ, Aughey RJ. Enhancing team-sport athlete performance: is altitude training relevant? *Sports Med.* 2012;42:751-67.
- McLean BD, Buttifant D, Gore CJ, White K, Liess C, Kemp J. Physiological and performance responses to a pre-season altitude training camp in elite team sport athletes. *Int J Sports Physiol Perform.* 2013;8:391-9.
- Brutsaert TD, Spielvogel H, Soria R, Araoz M, Cáceres E, Buzenet G, et al. Performance of altitude acclimatized and non-acclimatized professional football (soccer) players at 3,600 M. *JEPonline.* 2000;3:28-37.
- Buchheit M, Simpson BM, Garvican-Lewis LA, Hammond K, Kley M, Schmidt WF, et al. Wellness, fatigue and physical performance acclimatization to a 2-week soccer camp at 3600 m (ISA3600). *Br J Sports Med.* 2013;47:i100-6.
- Calbet JA, Rådegran G, Boushel R, Saltin B. On the mechanisms that limit oxygen uptake during exercise in acute and chronic hypoxia: role of muscle mass. *J Physiol.* 2009;587:477-90.
- Winslow RM. The role of hemoglobin oxygen affinity in oxygen transport at high altitude. *Respir Physiol Neurobiol.* 2007;158:121-7.
- Heinicke K, Prommer N, Cajigal J, Viola T, Behn C, Schmidt W. Long-term exposure to intermittent hypoxia results in increased hemoglobin mass, reduced plasma volume, and elevated erythropoietin plasma levels in man. *Eur J Appl Physiol.* 2003;88:535-43.
- Prommer N, Heinicke K, Viola T, Cajigal J, Behn C, Schmidt WF. Long-term intermittent hypoxia increases O<sub>2</sub>-transport capacity but not  $\dot{V}O_{2max}$ . *High Alt Med Biol.* 2007;8:225-35.
- West JB. *High altitude medicine and physiology.* Second edition. Published by Chapman & Hall, London, UK. 1995. P140.
- Cerretelli P, Samaja M. Acid-base balance at exercise in normoxia and in chronic hypoxia. Revisiting the "lactate paradox". *Eur J Appl Physiol.* 2003;90:431-48.
- Lundby C, Calbet JA, Robach P. The response of human skeletal muscle tissue to hypoxia. *Cell Mol Life Sci.* 2009;66:3615-23.
- Goldfarb-Rumyantzev AS, Alper SL. Short-term responses of the kidney to high altitude in mountain climbers. *Nephrol Dial Transplant.* 2014;29:497-506.
- Levine BD, Stray-Gundersen J, Mehta RD. Effect of altitude on football performance. *Scand J Med Sci Sports.* 2008;18:76-84.
- Bärtsch P, Saltin B. General introduction to altitude adaptation and mountain sickness. *Scand J Med Sci Sports.* 2008;18:1-10.
- Wachsmuth N, Kley M, Spielvogel H, Aughey RJ, Gore CJ, Bourdon PC, et al. Changes in blood gas transport of altitude native soccer players near sea level and sea level native soccer players at altitude (ISA3600). *Br J Sports Med.* 2013;47:93-9.
- Bangsbo J. *Entrenamiento de la Condicion Fisica en el Futbol.* Barcelona: Paidotribo. 1997: p. 95-103.
- Metaxas TI, Koutlianos NA, Kouidi EJ, Deligiannis AP. Comparative study of field and laboratory tests for the evaluation of aerobic capacity in soccer players. *J Strength Cond Res.* 2005;19:79-84.
- Castagna C, Impellizzeri FM, Chamari K, Carlomagno D, Rampinini E. Aerobic fitness and yo-yo continuous and intermittent tests performances in soccer players: a correlation study. *The Journal of Strength & Conditioning Research.* 2006;20:320-325.
- Howley ET, Bassett DR Jr, Welch HG. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc.* 1995;27:1292-301.
- Schneider J, Dudziak R, Westphal K, Vettermann J. The i-STAT analyzer. A new, hand-held device for the bedside determination of hematocrit, blood gases, and electrolytes. *Anaesthesia.* 1997;46:704-14.
- Steinfeldt-Visscher J, Teerenstra S, Gunnewiek JM, Weerwind PW. Evaluation of the i-STAT point-of-care analyzer in critically ill adult patients. *J Extra Corpor Technol.* 2008;40:57-60.
- Wagner PD, Araoz M, Boushel R, Calbet JA, Jessen B, Rådegran G, et al. Pulmonary gas exchange and acid-base state at 5,260 m in high-altitude Bolivians and acclimatized lowlanders. *J Appl Physiol.* 2002; 92:1393-400.
- Dempsey JA, Powell FL, Bisgard GE, Blain GM, Poulin MJ, Smith CA. Role of chemoreception in cardiorespiratory acclimatization to, and deacclimatization from, hypoxia. *J Appl Physiol.* 2014;116:858-66.
- Swenson ER. Hypoxia and Its Acid-Base Consequences: From Mountains to Malignancy. *Adv Exp Med Biol.* 2016; 903:301-23.
- Imray C, Booth A, Wright A, Bradwell A. Acute altitude illnesses. *BMJ.* 2011;343, d4943
- Richalet JP, Larmignat P, Poirtrine E, Letournel M, Canoui-Poittrine F. Physiological risk factors for severe high-altitude illness: a prospective cohort study. *Am J Respir Crit Care Med.* 2012;185:192-8.
- Garvican LA, Hammond K, Varley MC, Gore CJ, Billaut F, Aughey RJ. Lower running performance and exacerbated fatigue in soccer played at 1600 m. *Int J Sport Physiol Perf.* 2014;9:397-404.
- van Hall G, Lundby C, Araoz M, Calbet JA, Sander M, Saltin B. The lactate paradox revisited in lowlanders during acclimatization to 4100 m and in high-altitude natives. *J Physiol.* 2009;587:1117-29.
- Nielsen AL, Thunelborg P, Brinkenfeldt H, Hegbrant J, Jensen HA, Wandrup JH. Assessment of pH and oxygen status during hemodialysis using the arterial blood line in patients with an arteriovenous fistula. *Blood Purif.* 1999;17:206-12.
- Wasserman K. Critical capillary PO<sub>2</sub> and the role of lactate production in oxyhemoglobin dissociation during exercise. *Adv Exp Med Biol.* 1999;471:321-33.
- Calbet JA, Losa-Reyna J, Torres-Peralta R, Rasmussen P, Ponce-González JG, Sheel AW, et al. Limitations to oxygen transport and utilization during sprint exercise in humans: evidence for a functional reserve in muscle O<sub>2</sub> diffusing capacity. *J Physiol.* 2015;15:593:4649-64.
- Nielsen HB, Bredmose PP, Strømstad M, Volianitis S, Quistorff B, Secher NH. Bicarbonate attenuates arterial desaturation during maximal exercise in humans. *J Appl Physiol.* 2002;93:724-31.