

EFFECTOS FISIOLÓGICOS INDUCIDOS POR LOS PROGRAMAS DE HIPOXIA INTERMITENTE

PHYSIOLOGICAL EFFECTS INDUCED BY INTERMITTENT HYPOXIA PROGRAMS

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los deportistas de alto nivel incorporan a su entrenamiento diferentes programas o medios de entrenamiento en condiciones de altura o hipóxicas. Por un lado encontramos los modelos tradicionales *vivir en altura-entrenar en altura* (*Live high-train high*, LHTH), *vivir en altura-entrenar a nivel del mar* (*live high-train low*, LHTL) y *vivir a nivel del mar-entrenar en altura* (*live low-train high*, LLTH) de los cuales han surgido nuevas estrategias de aplicación que han hecho que recientemente se genere un interés por la investigación y utilización de métodos de hipoxia. Dentro de estos destaca la *exposición a hipoxia intermitente* (*intermittent hypoxic exposure*, IHE) la cual se aplica mediante la estancia pasiva en habitaciones con ambiente hipóxico o a través de la respiración de aire con menos concentración de O₂. Otro método utilizado es el denominado *entrenamiento en hipoxia intermitente* (*intermittent hypoxic training*, IHT), que consiste en entrenamiento en condiciones de hipoxia¹.

Recientemente, ha surgido un debate sobre las posibles diferencias entre la utilización de hipoxia hipobárica o normobárica, siendo un tema candente en la literatura⁴. A pesar de las diferencias sustanciales entre los diferentes métodos de hipoxia, todos tienen el objetivo de inducir

adaptaciones en el organismo del deportista que mejoren su rendimiento físico al nivel del mar. El rendimiento de los deportistas incrementa por las adaptaciones inducidas, unas se deben a la mejora del metabolismo anaeróbico y otras se relacionan con el metabolismo aeróbico (la reducción del tiempo de prueba, el incremento del VO_{2max}, aumento de los umbrales o la mayor economía del movimiento deportivo). Todos los factores citados han sido objeto de estudio en el campo de la investigación con programas de hipoxia intermitente (Tablas 1 y 2).

De esta forma, vamos a exponer en esta revisión los diferentes aspectos susceptibles de mejora cuando se realiza un programa de entrenamiento utilizando programas de exposición (IHE) o entrenamiento en condiciones de hipoxia intermitente (IHT).

EFFECTOS INDUCIDOS POR LOS PROGRAMAS DE HIPOXIA INTERMITENTE

Adaptaciones metabólico-musculares

Algunas de las adaptaciones producidas en el organismo que pueden incrementar el rendimiento tras un programa de IHT, no se relacionan con

Domingo J. Ramos Campo¹

Fernando Martínez Sánchez²

Paula Esteban García²

Jacobo. A. Rubio Arias¹

Susana Mendizábal Albizu¹

José F. Jiménez Díaz³

¹Doctor en Ciencias del Deporte.

²Licenciado en Ciencias del Deporte

³Doctor en Medicina

CORRESPONDENCIA:

Domingo J. Ramos Campo
Laboratorio de Rendimiento y Readaptación Deportiva.
Facultad de Ciencias del Deporte de Toledo. UCLM. Grupo de Investigación DEPORSALUD. Avda Carlos III s/n. Ed. 12.1.
Campus Tecnológico Antigua Fábrica de Armas. 45071. Toledo.
E-mail: domingojesusramos@gmail.com

Aceptado: 30.04.2012 / **Revisión n°** 242

TABLA 1. Resumen de los estudios que observan los efectos sobre el rendimiento deportivo de los programas de IHE

Autor (Año)	Caract sujetos
Babcock y Kirby (2008) ⁴⁶	18 ciclistas entrenados
Bonetti, Hopkins y Kilding (2006) ¹²	10 remeros
Bonetti y Hopkings (2009) ¹³	18 ciclistas y triatletas
Burtscher et al. (2010) ⁴⁹	11 corredores ½ distancia
Dobson (2009) ⁴⁸	24 jugadores de baloncesto
Frey et al. (2000) ⁵⁸	Sujetos entrenados
Friedmann et al. (2005) ⁴²	16 nadadores junior
Hamlin y Hellemans(2007) ⁵⁶	22 atletas multideporte
Hamlin, Hinckson, Wood y Hopkins (2008) ⁵⁷	22 jugadores de rugby
Hinckson, Hopkins, Downey y Smith (2006) ⁴¹	11 remeros
Hinckson, Hamlin, Wood y Hopkins (2007) ⁵⁹	10 jugadores de rugby
Julian, Gore, Wilber, Daniels, Fredericsson et al. (2004) ¹⁶	14 atletas elite
Katayama, Matsuo, Ishida, Mori y Miyamura (2003) ⁶⁶	12 atletas
Katayama, Sato, Matsuo, Hotta, Sun et al. (2004) ⁶⁷	15 atletas
Katayama, Sato, Hotta, Isida, Iwasaki et al. (2007) ¹⁸	18 atletas
Lundby, Nielsen y Dela (2005) ¹⁵	8 deportistas entrenados
Marshall, Hamlin, Hellemans y Murrel (2008) ¹⁷	5 ciclistas+3 triatletas
Ramos, Martínez, Rubio, Esteban, Mendizábal et al. (2010) ³⁹	11 ciclistas elite
Rodas, Parra, Sitja, Arteman y Viscor (2004) ⁶⁸	4 triatletas profesionales
Rodríguez et al. (2000)	13multideporte
Rodríguez et al. (2003)	16 nadadores alto nivel
Rodríguez, Truijens, Townsend, Straygundersen, Gore et al. (2007) ²⁵	13 nadadores y 10 atletas
Saunders et al. (2004) ⁴⁵	22 atletas de Resistencia
Tadibi et al. (2007) ¹⁴	20 atletas de resistencia
Truijens et al. (2008) ⁶⁹	13 nadadores y 10 atletas
Wood et al. (2006) ⁴⁰	29 jugadores hockey y fútbol

(hip=hipoxia; norm=normoxia; SpO₂=saturación de oxígeno; tprueba=tiempo de prueba; pot=potencia; max=máxima; VO₂max=consumo máximo de oxígeno; Uan= Umbral anaeróbico; FiO₂= fracción de oxígeno inspirado; VE=ventilación;frec card=frecuencia cardiaca; rend=rendimiento; int=intensidad; + mejora; = se mantiene; -disminuye)

parámetros hematológicos⁵ y tienen que ver con cambios moleculares y celulares, mejoras en la economía del movimiento o la mayor capacidad tampón y de regulación del pH en el músculo. También existen mejoras relacionadas con la mayor producción de los transportadores de monocarboxilato MCT 1 y MCT4 cuando se combina ejercicio intenso con programas de hipoxia intermitente. El protocolo utilizado en éste estudio tuvo una duración de 6 semanas, 5 sesiones a la semana con 2 sesiones semanales de trabajo en la zona VT2 (24-40 min) al 14,5% de FiO₂. Estos transportadores descritos con

anterioridad, son esenciales, ya que son los responsables de movilizar el lactato a través de las membranas plasmáticas en los eritrocitos⁶⁻⁷ y en las células músculo-esqueléticas⁸.

También se ha observado una respuesta ante los programas de IHE relacionada con la mejora en la capacidad de producir y soportar lactato durante el ejercicio⁹⁻¹⁰. En la fase aguda de adaptación a la hipoxia, se produce una hiperventilación que hace que se reduzca la PCO₂ y que deriva en un incremento del pH. Como consecuencia, se observa un incremento en la secre-

Protocolo	Resultados
15 sesiones/ 77-100% SpO ₂	+ tprueba 15 km = tprueba 3 km
15 sesiones/60 min/5 min hip-5 norm/ 76-90% SpO ₂	+ pot media test anaeróbico + pico pot test VO ₂ max, = VO ₂ max = Uan = economía
15 sesiones/60 min/3-5 min hip-3-5 norm/76-90% SpO ₂	= pot media test Wingate + pot pico test incremental + mejora pot en Uan
15 sesiones/ 120 min/ 11-15% FiO ₂	+ economía Carrera
15 sesiones/37 min/7 min hip-3 norm/ 86-75% SpO ₂	= VO ₂ max + economía carrera
21 días/ 6400 m /75 min sesión.	= tprueba
3 semanas/240 min/ 15% FiO ₂	+ Uan
15 sesiones/90 min/5 min hip-5 norm/ 13-11% FiO ₂	+ tprueba 3 Km
9-13 sesiones/60 min/ 6 min hip-4 norm/ 10-13% FiO ₂	= test de sprints repetidos
15 sesiones/90 min/6 min hip-4 norm/80-92% SpO ₂	= tiempo de prueba 5 Km
14 sesiones/60 min/6 min hip-4 norm/76-100% SpO ₂	-rendimiento sprint = rend. Aeróbico
20 sesiones/70 min/5 min hip-5 norm/ 12-10% FiO ₂	= VO ₂ max y tprueba 3 Km.
9 sesiones/ 90 min /4500 m	+ tiempo de prueba 3 Km, + VO ₂ a int submáximas
14 sesiones/ 180 min / 12.3% FiO ₂	= tprueba, =VO ₂ max
1 semana/ 60 min/15.5-12.3% FiO ₂	= VO ₂ max; = VO ₂ int submáximas
14 sesiones/ 2 horas/ 4100 m	= tprueba; = VO ₂ max; = VO ₂ a int submáximas
10 días/90 min/7 min hip+3 min norm/ 80% SpO ₂	=pico pot =VO ₂ max
32 sesiones/60min/5 min hip+5 min norm/88-75%SpO ₂	= VO ₂ max; = Uan = tprueba
12 sesiones/180 min/ 4000-5500 m	+ tprueba 5.4 Km ciclismo
3 semanas/ 3 veces por semana/180 min/ 5500 m	=pot max, VO ₂ max, VE. + pot en Uan
14 sesiones/180 min/ 4000-5500 m	+ tprueba 200 m +VO ₂ max;
20 sesiones/ 180 min/ 4000-5500 m	= tprueba, +VO ₂ max y VO en el Uan en nadadores;
20 sesiones/9-12 horas/ 2000-3100 m	+ economía Carrera
15 sesiones/60 min/6 min hip-4 norm/ 10-11% FiO ₂	=pot max test de Wingate = VO ₂ max
20 sesiones/ 180 min/ 4000-5500 m	=economía, = velocidad VO ₂ max, = Lactato
15 sesiones/60 min/6 min hip-4 norm/77-100% SpO ₂	+ rend sprint + vel max, frec, card y Uan

ción renal de bicarbonato que sirve para reducir los iones H⁺ y amortiguar la concentración de ácido láctico. Esto produce un incremento del 5-6% en la capacidad de tamponamiento del músculo en estudios realizados con atletas entrenados que vivieron durante 2 semanas a 2000 m¹¹ o a 2700 m de altura¹⁰. Estos resultados también se obtienen con programas de altitud simulada, ya que Gore, Hahn, Aughey, Martin, Ashenden, Clark *et al* (2001)⁹ observaron un incremento del 18% en la capacidad de tamponamiento muscular tras 23 días de LHTL a 3000 m de altitud.

Efectos en el rendimiento aeróbico

Efectos sobre el VO₂max

La importancia del VO₂max sobre el rendimiento físico en deportes de resistencia hace que muchos estudios de la literatura midan la modificación del VO₂max tras un programa de entrenamiento o exposición a hipoxia intermitente. Sin embargo, ninguno de los trabajos encontrados que aplicaban programas de IHE y que incorporaban un grupo control en su diseño, obtenían una mejora significativa de esta variable¹²⁻²⁰.

TABLA 2. Resumen de los estudios que observan los efectos sobre el rendimiento deportivo de los programas de IHT

Autor (Año)	Características sujetos
Casas, Casas y Pages (2000) ⁷⁰	6 alpinistas
Czuba et al. (2011) ³⁷	20 ciclistas elite
Dufour et al. (2006) ³⁶	15 atletas resistencia
Emonson, Aminuddin, Wight, Scroop y Gore (1997) ²⁹	18 sujetos activos
Geiser, Vogt y Billeter (2001) ²⁸	33 desentrenados
Hamlin et al. (2010) ⁵⁴	16 deportistas entrenados
Hellemans (1999) ⁵⁵	10 atletas de resistencia
Hendricksen y Meeuwsen (2003) ³⁰	16 triatletas
Meeuwsen et al. (2001) ³³	16 triatletas
Morton y Cable (2005) ⁴⁴	16 jugadores de deportes colectivos
Neya et al. (2007) ⁵⁰	25 corredores 1/2 distancia
Robertson et al. (2010) ³⁵	17 atletas 1/2 distancia
Roels, Millet, Marcoux, Coste, Bentley et al. (2005) ³⁴	33 ciclistas
Roels, Bentley, Coste, Mercier y Millet (2007) ³⁸	19 deportistas entrenados
Terrados et al. (1988) ²⁶	8 ciclistas
Truijens et al. (2003) ³²	16 nadadores
Vallier, Chateaou, y Guezennec (1996) ²⁷	5 triatletas
Zoll et al. (2006) ⁸	15 atletas resistencia

(hip=hipoxia; norm=normoxia; SpO₂=saturación de oxígeno; tprueba=tiempo de prueba; pot=potencia; max=máxima; VO_{2max}=consumo máximo de oxígeno; Uan= Umbral anaeróbico; FiO₂= fracción de oxígeno inspirado; VE=ventilación; frec card=frecuencia cardiaca; rend=rendimiento; int=intensidad; + mejora; = se mantiene; -disminuye)

Esta evidencia es contraria a la teoría inicial de que la hipoxia incrementa el rendimiento debido a una mejora en las variables hematológicas capaz de provocar una mayor capacidad para captar y transportar el oxígeno²¹⁻²³. Por el contrario, en los estudios mencionados, se observa una mejora del rendimiento en otros parámetros como el tiempo de prueba, que sugieren que pueden existir otros mecanismos que juegan un rol fundamental en el incremento del rendimiento deportivo después de un programa de IHE.

En este sentido, en un estudio de Rodríguez, Murio y Ventura (2003)²⁴, se sometió a 23 nadadores y atletas bien entrenados a un programa de IHE hipobárica a 4000-5000 m, observado una mejora significativa del 3.3% en el VO_{2max} y del 8.1% en la ventilación máxima. Sin embargo, tanto en este estudio, como en otro del mismo autor²⁵

que también observa un incremento del VO_{2max} después de un programa de IHE hipobárica, no existen diferencias con respecto al grupo control que obtiene las mismas mejoras.

Centrándonos en los programas de IHT, numerosos estudios²⁶⁻³¹ no encuentran cambios o mejoras significativas en el VO_{2max} normóxico al compararlo con el grupo control que entrena a nivel del mar. Otros estudios³², observan un incremento en este valor tanto en el grupo experimental como en el grupo control. Por otro lado, hay estudios^{8,33-37} que obtienen mejoras de un 4-5% en el VO_{2max} normóxico obtenido a través de la realización de un test incremental en cicloergómetro. Por último, cuando el programa de IHT combina entrenamiento continuo a baja intensidad (60% VO_{2max}) y entrenamiento interválico al 100% de la potencia del VO_{2max}, 3 veces en semana, no se encuentran cambios en la

Protocolo	Resultados
17 días / 3-5 horas al día/4000-5500 m	+ Uan
3 semanas / 3 sesiones/60 min/ 15.2% FiO ₂	+ VO ₂ max + VO ₂ en Uan+Uan + tprueba; + pot media
12 sesiones/60 min/ 14.5% FiO ₂	+ VO ₂ max + tprueba + vVt1 +vVt2 +vVO ₂ max = economía
5 semanas/3 veces por semana/2500 m/ 45 min	+ VO ₂ max y + tprueba en grupo de hip y norm
6 semanas/ 5 días por semana/ 30 min/ 3850 m	+ VO ₂ max +pot media 30 min +densidad mitocondrial vastos laterales
10 días/ 90 minutos/ 88-82% SpO ₂	+ pot media test Wingate =pot max test Wingate, pot media y tprueba 20 Km
18 sesiones/ 1 hora/ 2 veces al día/ 10-9 % FiO ₂	+ tprueba
10 días / 2 horas / 2500 m	+pot max 20 Km =VO ₂ max + pot media-pico Wingate
10 sesiones/ 2 horas / 2500 m	+ VO ₂ max, + pot media
4 semanas/ 3 sesiones/ 30 minutos/ 15 % FiO ₂	Grupo hip y norm:+ VO ₂ max, pot max, Uan y pot media y pico pot test Wingate
12 sesiones/ 30 minutos/ 3000 m	+ Economía carrera a int submáximas.=VO ₂ max
IHT: 3 semanas/ 4 sesiones/ 2200 m; IHE: 3 semanas/	IHT:+VO ₂ max, tprueba =Economía; IHE:+ VO ₂ max; =Economía
14 horas al día/ 3000 m	
14 sesiones/ PiO ₂ = 100-160 mmHg	+pot media en 10 min cicloergómetro +VO ₂ max =eficiencia
3 semanas/ 5 sesiones/60-90 minutos/ 3000 m	=VO ₂ max + pot pico en grupo hip y norm
4-5 veces a la semana durante 4 semanas	+Capacidad de trabajo y la pot máxima
5 semanas /3 sesiones/ 15.2% FiO ₂	+ tprueba 100 m/400 m y VO ₂ max en grupo hip y norm
3 semanas / 3 sesiones/ 4000 m	=VO ₂ max + rend submáximo a 2000 m -VE a= int
12 sesiones/60 min/ 14.5% FiO ₂	+ VO ₂ max + tprueba;

potencia aeróbica máxima con respecto al entrenamiento al nivel del mar³⁸.

En conclusión, los efectos que producen los programas de hipoxia intermitente sobre el VO₂max son muy divergentes. Según la literatura, los programas de IHE no influyen de forma positiva sobre la potencia aeróbica, mientras que este parámetro se puede incrementar un 4-5% utilizando un programa de IHT. Sin embargo, esta modificación depende probablemente de una correcta combinación de la dosis de hipoxia y de la intensidad de ejercicio.

Efectos sobre el umbral anaeróbico

El umbral anaeróbico se ha medido en numerosos estudios que aplican programas de intervención con entrenamiento o exposición a hipoxia intermitente, si bien difieren en la forma

de medición. Así encontramos trabajos que miden la potencia en el umbral anaeróbico^{12,39}, la velocidad de carrera en el umbral anaeróbico⁴⁰ o la potencia generada a 4 mMol de lactato^{14,41}. Dentro de estos estudios con IHE, los realizados por Bonetti, Hopkins, Lowe, Boussana y Kilding (2009)¹³ o Wood, Dowson y Hopkins (2006)⁴⁰ observan una mejora de la potencia (6,5%) o la velocidad (3,7%) en el umbral anaeróbico respectivamente. También Friedmann, Frese, Menold, Kauper, Jost *et al* (2005)⁴² observan un incremento del 3% en el umbral anaeróbico tras un programa de IHE de 4 horas de exposición al día. Estos resultados concuerdan con los que obtiene Rodríguez, Ventura y Casas (2000)⁴³, que observaron un incremento significativo en la potencia desarrollada en el umbral anaeróbico en ciclistas. Por el contrario, otros estudios^{12,14,39,41} no observan cambios en la medición del umbral anaeróbico.

En cuanto a los resultados de los efectos que producen los programas de IHT sobre el umbral anaeróbico, se observa una clara mejora de esta variable. Dufour, Ponsot, Zoll, Doutreleau, Geny y Lampert (2006)³⁶ observaron un incremento del 4% en el umbral anaeróbico de atletas de resistencia de alto nivel. Estos resultados también los obtienen Czuba, Waskiewicz, Zajac, Poprzecki, Cholewa y Roczniok (2011)³⁷ con ciclistas elite. Sin embargo, estos datos no se obtienen en deportes colectivos, tal como afirma Morton y Cable (2005)⁴⁴, que observaron cómo se mantenía el umbral anaeróbico en jugadores de deportes colectivos después de 4 semanas de IHT, cuyo entrenamiento consistía en 30 minutos de ciclismo a alta intensidad 3 veces por semana.

Efectos sobre la economía del movimiento

La economía del ejercicio se define como la energía demandada para generar una potencia en un trabajo submáximo⁴⁵. Actualmente, hay muy pocos estudios que midiendo la economía del ejercicio tras un programa de IHE han observado mejoras significativas en estas variables. De forma más específica, Babcock y Kirby (2008)⁴⁶ apreciaron un incremento no significativo ($p=0.075$) en la economía del ejercicio medido a través del índice de VO_2 max (calculado como VO_2 por vatio medio). Otros estudios también realizaron la medición de la economía del ejercicio y no encontraron cambios en esta variable después del programa de IHE^{12-14,32,35,47}.

Por otro lado, Dobson (2009)⁴⁸ observó una mejora en la economía de carrera (4,6%) en jugadores de baloncesto expuestos a un programa de IHE. Estos resultados fueron confirmados por Burtscher, Brandstatter y Gatterer (2010)⁴⁹, que encontraron un descenso significativo del consumo de oxígeno a las velocidades submáximas de 12, 14 y 16 km/h de 4.3 ml/kg/min. En un estudio similar, Neya, Enoki, Kumai, Sugot y Kawahara (2007)⁵⁰ observaron una mejora del 5% en la economía de carrera a velocidades submáximas después de un programa de 12 días de IHE a 3000 m de altitud simulada. Estos resultados sugieren, que al igual que como sucede con los programas de LHTL, los protocolos de hipoxia intermitente

causan un descenso de los requerimientos de energía durante ejercicios submáximos⁵⁰. El aporte de oxígeno a intensidades submáximas es una función de los factores centrales (capacidad de transporte de oxígeno en sangre y flujo cardíaco) y periféricos (utilización de oxígeno en el músculo), debiéndose la mejora del rendimiento en gran parte a los cambios en la función muscular y en menor proporción a los factores que casi no se modifican con los programas de hipoxia intermitente, como son la frecuencia cardíaca del ejercicio o la concentración de hemoglobina⁵¹.

Los mecanismos que pueden mejorar la economía del ejercicio se relacionan con la reducción del VO_2 a intensidades submáximas y con el descenso del coste de la ventilación^{9,51}. Además, numerosos estudios afirman que la aclimatación a la hipoxia produce una mayor eficiencia en la utilización de la betaoxidación de grasas para la obtención de ATP en detrimento de los carbohidratos, que pueden derivar en una mejora del 10% de la eficacia energética^{9,51-53}. También, se ha observado un menor consumo de ATP a nivel muscular después de la exposición a hipoxia⁵¹, según Neya *et al* (2007)⁵⁰ por una mayor eficacia mitocondrial. Sin embargo, los estudios que miden la economía del ejercicio tras un programa de IHT^{8,32,35-36} tan solo observan un mantenimiento en esta variable.

Efectos en el rendimiento anaeróbico

La literatura sobre los efectos que producen los programas de hipoxia intermitente en el rendimiento anaeróbico no es muy abundante ya que el interés de la investigación siempre se ha relacionado con el deporte de resistencia de larga duración.

A pesar de ello, encontramos el estudio de Zoll, Ponsot, Dufour, Doutreleau, Ventura, Vogt y Fluck (2006)⁸, cuyos resultados muestran cambios significativos en la concentración de lactato muscular y la regulación del pH después de 6 semanas de IHT. Estos cambios pueden derivar en un beneficio del rendimiento anaeróbico, aunque esta relación no se midió en el estudio. Por otro lado, encontramos el estudio de Meeuwssen, Hendriksen y Holewjin (2001)³³, que publicaron

un aumento del rendimiento anaeróbico después de un programa de IHT, medido a través del test de Wingate, que mide de forma específica la capacidad anaeróbica. Los resultados mostraban un incremento del 5% en la potencia máxima y potencia media en el test tras 9 días de aplicación del programa de entrenamiento en hipoxia, no observando estos datos en el grupo control, que entrenaba a nivel del mar. Estos resultados también los obtiene en su estudio Hamlin et al (2010)⁵⁴, que observó un incremento del 3% en la potencia media desarrollada en un test de Wingate y Hendriksen y Meeuwsen (2003)³⁰, que comprobaron un incremento de la potencia media y de la potencia pico en el mismo test anaeróbico tras un programa de IHT de 10 días de duración.

Los resultados del estudio de Morton y Cable (2005)⁴⁴ también muestran un incremento en la potencia máxima y potencia media durante el test de Wingate tras un programa de IHT, sin embargo, estas diferencias no son significativas al compararlas con el grupo control. Del mismo modo, Truijens, Toussaint, Dow y Levine (2003)³² y Tadibi, Dehnert, Menold y Bartsch (2007)¹⁴, tampoco encontraron diferencias entre el grupo control y el grupo que llevó a cabo el programa de hipoxia.

Por lo tanto, los datos obtenidos son probablemente insuficientes para concluir si un programa de IHT puede tener un efecto positivo sobre el rendimiento anaeróbico. Sin embargo, tal como hemos comentado anteriormente, existen algunos factores relacionados con la regulación del pH y el transporte de lactato que se modifican tras un programa de IHT⁸ y que teóricamente pueden producir una mejora en el proceso de la glucólisis anaeróbica y por lo tanto justificar el incremento del rendimiento anaeróbico del deportista. Por ello, son necesarios más estudios que nos aporten información relacionada con este campo.

Efectos en el tiempo de prueba

Los resultados de las investigaciones a cerca de la efectividad de los programas de hipoxia intermitente sobre el tiempo de prueba, son muy diversos.

Por un lado, encontramos estudios llevados a cabo en Nueva Zelanda^{17,55-57} que utilizan programas de IHE normobárica con un FIO_2 entre 0.1 y 0.13 y que encuentran mejoras de entre el 1.5 % y el 3% en el tiempo de prueba. Estas mejoras son corroboradas por otros trabajos, que observan un aumento que varía del 1,7 al 8,2% en función de la variable de rendimiento medida. Algunos de estos trabajos utilizan como variable el tiempo en recorrer 15 Km en ciclismo⁴⁶, el tiempo en recorrer 3 Km corriendo⁵⁶, la potencia generada en cada escalón de un test incremental en cicloergómetro¹²⁻¹³ y la velocidad aeróbica máxima⁴⁰. Además, cabe destacar, que las mejoras observadas en el tiempo de prueba se obtienen 3 días después de terminar el programa de hipoxia¹²⁻¹³, manteniéndose los resultados a los 10 días¹² y a los 14 días¹³ de la finalización de la exposición.

Casi todos los estudios de la literatura se llevan a cabo con sujetos cuyas características o nivel de actividad física, hacen que se clasifiquen como entrenados. Existen excepciones que utilizan sujetos con características descritas como “habilidades mixtas”⁵⁶, observando que los sujetos con menor nivel de entrenamiento obtenían mayores mejoras en su rendimiento cuando corrían 3 Km, tras someterlos al programa de IHE, que los sujetos que estaban más entrenados. Estos resultados sugieren que los atletas de menos entrenados son más susceptibles a incrementar su rendimiento o mejorar su tiempo de prueba con un estímulo de entrenamiento de similar carga que los sujetos más entrenados.

Por otro lado, encontramos estudios que no encuentran diferencias significativas en el tiempo de prueba, como es el caso de Rodríguez et al (2000)⁴³, que expuso a un programa de IHE a ciclistas entrenados o de Frey, Zenjausern y Colmbani (2000)⁵⁸, que no encontraron cambios en el rendimiento máximo y submáximo en deportistas moderadamente entrenados. Desafortunadamente, estos estudios no incorporan grupo control. Del mismo modo, tampoco se encuentran modificaciones en el tiempo de prueba en estudios que si incluyen grupo control en nadadores²⁴, atletas¹⁴⁻¹⁶ o remeros^{41,59}. Según Dobson (2009)⁴⁸, estos estudios no consiguen

mejorar el rendimiento aeróbico a través del tiempo de prueba de su muestra por el protocolo de IHE que utilizan, que tiene una intensidad de hipoxia significativamente inferior que otros estudios (Tabla 1).

Otros estudios, utilizan el test Repeated Sprint Ability (RSA) o habilidad de repetir sprints a alta intensidad, como test para medir la capacidad aeróbica debido a su gran correlación⁶⁰⁻⁶¹. Los estudios de la literatura afirman que existen unas adaptaciones asociadas a los programas de hipoxia intermitente que producen efectos beneficiosos en el rendimiento de RSA en deportes colectivos^{40,48}, observando un incremento sustancial del rendimiento en el test de RSA del 3-5%. Estas mejoras también se han observado en trabajos que han realizado el test de RSA después de programas de IHE con ciclistas¹³ y remeros¹², en el que se observó un incremento del 8,3%.

Además, es importante distinguir entre rendimiento a nivel del mar y rendimiento en altitud. Mientras que existen numerosos estudios que confirman la mejora del rendimiento en altitud derivado de un programa de IHT^{26,28,36}, los resultados con respecto a la mejora del rendimiento a nivel del mar son controvertidos. Así, encontramos estudios como el de Dufour *et al* (2006)³⁶, en el que se observan un incremento del 35% del tiempo hasta la extenuación en el test de carrera en laboratorio después de 6 semanas de IHT en atletas de resistencia muy entrenados. Los autores atribuyen a la combinación del estímulo de la hipoxia y del entrenamiento a alta intensidad (aproximadamente a la intensidad del umbral anaeróbico), tales los resultados. Previamente, Terrados, Melichna, Sylven y Jansson (1988)²⁶ utilizaron el entrenamiento interválico de alta intensidad en hipoxia 4-5 veces a la semana durante 4 semanas, encontrando un aumento en la capacidad de trabajo y la potencia máxima en ciclistas elite durante un test de laboratorio en normoxia.

En un trabajo con IHT de Robertson, Saunders, Pyne, Gore y Anson (2010)³⁵ se observa un incremento del 1,1% en el tiempo de prueba de 3000 m lisos en atletas de media distancia después de un programa de 3 semanas de duración a 3000 m de

altitud simulada. También en un estudio reciente³⁷ con ciclistas de alto nivel, que llevaron a cabo un programa de IHT de 3 semanas de duración incluyendo 3 sesiones semanales de 60-70 minutos de duración, un 15,2% FIO_2 y una intensidad de entrenamiento comprendida entre el 80-95% del umbral anaeróbico. Los resultados mostraron una mejora del tiempo de prueba en 30 Km (2,6%) y de la potencia media del test (5,6%).

Sin embargo, otros estudios como el de Truijens *et al* (2003)³² o el de Hamlin, Marshall, Hellemans, Ainslie y Anglem (2010)⁵⁴ no confirman la eficacia del entrenamiento de alta intensidad en combinación con IHT sobre el tiempo de prueba, ya que no encuentran mejoras en sus resultados. Según Millet, Roels, Schmitt, Woorons y Richalet (2010)¹, la corta duración de las series a alta intensidad de estos estudios (30 s – 1 min) en comparación con los estudios de Dufour *et al* (2006)³⁶ o Terrados *et al* (1988)²⁶ (12-20 min) pueden explicar en parte la divergencia de los resultados encontrados.

En conclusión, tal como hemos visto en este análisis, podemos afirmar que los estudios con programas de IHE obtienen menos beneficios sobre el rendimiento físico del grupo de deportistas participantes en las investigaciones. Sin embargo, si nos centramos en los estudios que utilizan programas de hipoxia intermitente IHT y si tenemos en cuenta los resultados significativos obtenidos a nivel muscular en algunos estudios citados con anterioridad, podríamos esperar una mejora en el rendimiento aeróbico y por lo tanto del tiempo de prueba tras, la aplicación de un programa de IHT. Es decir, los programas de IHT pueden provocar un efecto positivo superior que los de IHT sobre el tiempo de prueba, pero dependen de la combinación adecuada de la duración del ejercicio e intensidad, así como del grado de hipoxia durante el entrenamiento, los cuales deben seguir las recomendaciones que se describen en el siguiente punto.

RECOMENDACIONES Y ASPECTOS DE INTERÉS

Es común que los deportistas de alto nivel, especialmente de deportes de resistencia de

larga duración, intenten optimizar al máximo su rendimiento incorporando a su rutina de entrenamientos diferentes métodos y medios que favorecen su recuperación o que le ayudan a mejorar su estado de forma.

Por lo tanto, la utilización de un protocolo determinado de hipoxia intermitente dependerá de la competición y del momento de la temporada en el que nos encontramos, siendo más adecuado el desarrollo de unos contenidos u otros. En líneas generales, utilizaremos un programa de IHT en la fase precompetitiva y competitiva del macrociclo, combinándolo con el método IHE. Recientes estudios⁶² demuestran que los mejores efectos se consiguen con altitudes de 2500-3500 m aplicados con programas de IHE durante 9,5 horas al día por un periodo de 2 semanas o con protocolos de una duración de más de 28 días a 2000-2500 m de altura durante 20 horas⁶³.

Se recomienda una duración del programa de al menos 5 semanas, utilizando una frecuencia semanal de 2 a 3 sesiones de IHT a la semana, complementarias al entrenamiento habitual. La duración de estas sesiones oscilará entre los 60-90 minutos pudiendo llegar a las 2 horas. La altitud simulada durante la sesión oscilará entre los 2500-3000 m o un 14,5-15 % de FiO_2 . El programa de IHT se complementa con 3-5 sesiones a la semana de IHE de 90-180 minutos de duración a una altitud de unos 3000 m⁶⁴. Estas adaptaciones pueden perdurar en el tiempo durante 3 o 4 semanas⁶⁵.

Otro de los parámetros a tener en cuenta es la intensidad de la sesión de IHT, la cual debe de estar próxima al umbral anaeróbico del deportista, medido en condiciones de hipoxia a cada una de las alturas que vayamos a simular. Este programa debe de contemplarse en la planificación de la temporada, secuencializando y distribuyendo de forma correcta las cargas en función del objetivo del mesociclo y del microciclo en el que nos encontremos. Además, debemos de cuantificar la carga de estas sesiones, para determinar el impacto del entrenamiento sobre el deportista y no producir síndromes de sobrecargas o sobreentrenamiento.

RESUMEN

Entre las estrategias de entrenamiento en condiciones de altitud simulada más utilizadas, destaca la exposición a hipoxia intermitente (IHE), la cual se aplica mediante la estancia pasiva en habitaciones con ambiente hipóxico o a través de la respiración de aire con menos concentración de O_2 , junto con el método denominado entrenamiento en hipoxia intermitente (IHT), que consiste en llevar a cabo sesiones de entrenamiento en condiciones de hipoxia¹.

Los efectos de los programas de exposición y entrenamiento en hipoxia intermitente se relacionan con un incremento de la eritropoyesis, una mejora de parámetros fisiológicos relacionados con el rendimiento aeróbico como el umbral anaeróbico o el consumo máximo de oxígeno y un incremento del rendimiento anaeróbico.

Tal como observamos en la literatura, los programas IHT parecen ser mucho más beneficiosos que los de IHE para incrementar el rendimiento deportivo, ya que se observa una mejora del rendimiento deportivo con entrenamientos de alta intensidad en hipoxia (aproximadamente en la zona del umbral anaeróbico) debido al incremento de la eficiencia mitocondrial y de la regulación del pH y del lactato². Fundamentalmente esto se debe a que el ejercicio intenso en hipoxia juega un rol importante en las adaptaciones moleculares del tejido muscular, si bien, en este campo de investigación aun hay preguntas básicas que deben ser contestadas³.

Palabras clave: IHT. IHE. Altitud simulada. Hipoxia intermitente. LLTH.

SUMMARY

Between simulated altitude conditions strategies for training used, highlights the exposure to intermittent hypoxia (IHE), which is implemented through the passive stay in rooms with hypoxic ambient or by breathing air with a lower concentration of O_2 and the method called intermit-

tent hypoxic training (IHT), which is doing by hypoxia training sessions¹.

The effects of exposure and training programs in intermittent hypoxia are associated with increased erythropoiesis, an improvement of physiological parameters related to aerobic performance as anaerobic threshold or maximum oxygen consumption and increased anaerobic performance.

As noted in the literature, IHT programs appear to be much more beneficial than IHE to improve

athletic performance as it is an improvement of athletic performance with high-intensity training in hypoxia (approximately the area of anaerobic threshold) due to increased mitochondrial efficiency and pH regulation and lactate², this is due mainly to intense exercise in hypoxia plays an important role in molecular adaptations of muscle tissue, although in this field of research there are still basic questions to be answered³.

Key words: IHT. IHE. Simulated altitude. Intermittent hypoxia. LLTH.

B I B L I O G R A F Í A

1. Millet GP, Roels B, Schmitt L, Woorons X y Richalet JP. Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Med* 2010;40(1):1-25.
2. Wilber RL. Application of altitude/hypoxic training by elite athletes. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39(9):1610-1624.
3. Hoppeler H y Vogt M. Muscle tissue adaptations to hypoxia. *J Exp Biol* 2001;204(Pt 18):3133-3139.
4. Millet GP, Faiss R, Pialoux V, Mounier R y Brugniaux JV. Point: Counterpoint "Hypobaric hypoxia induces / does not induce different responses than normobaric hypoxia". *J Appl Physiol* 2012.
5. Gore CJ, Clark SA y Saunders PU. Nonhematological mechanisms of improved sea-level performance after hypoxic exposure. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39(9):1600-1609.
6. Clark SA, Aughey RJ, Gore CJ, Hahn AG, Townsend NE y Kinsman TA. Effects of live high, train low hypoxic exposure on lactate metabolism in trained humans. *J Appl Physiol* 2004;96(2):517-525.
7. Juel C, Lundby C, Sander M, Calbet JA y Hall G. Human skeletal muscle and erythrocyte proteins involved in acid-base homeostasis: adaptations to chronic hypoxia. *J Physiol* 2003;548(Pt 2):639-648.
8. Zoll J, Ponsot E, Dufour S, Doutreleau S, Ventura-Clapier R y Vogt M. Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. III. Muscular adjustments of selected gene transcripts. *J Appl Physiol* 2006;100:1258-1266.
9. Gore CJ, Hahn AG, Aughey R, Martin D, Ashenden MJ y Clark SA. Live high-train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiol Scand* 2001;173:275-286.
10. Mizuno M, Juel C y Bro-Rasmussen T. Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude. *J Appl Physiol* 1990;68:496-502.
11. Saltin B, Kim CK y Terrados N. Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports* 1995;5:209-221.
12. Bonetti DL, Hopkins WG y Kilding AE. High-intensity kayak performance after adaptation to intermittent hypoxia. *Int J Sports Physiol Perform* 2006;1(3):246-260.

13. **Bonetti DL, Hopkins WG, Lowe TE, Boussana A y Kilding AE.** Cycling performance following adaptation to two protocols of acutely intermittent hypoxia. *Int J Sports Physiol Perform* 2009;4(1):68-83.
14. **Tadibi V, Dehnert C, Menold E y Bartsch P.** Unchanged anaerobic and aerobic performance after short-term intermittent hypoxia. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39(5):858-864.
15. **Lundby C, Nielsen T y Dela F.** The influence of intermittent altitude exposure to 4100 m on exertion and blood capacity and blood variables. *Scand J Med Sci Sports* 2005;15:182-187.
16. **Julian CG, Gore CJ, Wilber RL, Daniels JT, Fredericsson M y Stray-Gundersen J.** Intermittent normobaric hypoxia does not alter performance or erythropoietic markers in highly trained distance runners. *J Appl Physiol.* 2004;96:1800-1807.
17. **Marshall HC, Hamlin MJ, Hellemans J, Murrell C, Beattie N y Hellemans I.** Effects of intermittent hypoxia on SaO₂, cerebral and muscle oxygenation during maximal exercise in athletes with exercise-induced hypoxemia. *Eur J Appl Physiol* 2008;104(2):383-893.
18. **Katayama K, Sato K, Hotta N, Ishida K, Iwasaki K y Miyamura M.** Intermittent hypoxia does not increase exercise ventilation at simulated moderate altitude. *Int J Sports Med* 2007;28(6):480-487.
19. **Ramos DJ, Rubio JA, Mendizábal S, Martínez F, Esteban P, Jiménez JF.** Efectividad de un programa de hipoxia intermitente de 8 semanas de duración en ciclistas elite. *Arch Med Deporte* 2009;26(3):202.
20. **Ramos DJ, Martínez F, Esteban P, Rubio JA, Jiménez JF.** Efectividad de un programa de hipoxia intermitente de 8 semanas de duración en sujetos entrenados y no entrenados. *Arch Med Deporte.* 2010;XXVII(136):133-134.
21. **Levine BD.** Effect of high-altitude exposure in the elderly: the tenth mountain division study. *Circulation* 1997;96:1224-1232.
22. **Levine B y Stray-Gundersen J.** A practical approach to altitude training: where to live and train for optimal performance enhancement. *Int. J. Sports Med* 1992;Suppl.1:209-212.
23. **Stray-Gundersen J, Chapman R y Levine B.** "Living high-training low" altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *J Appl Physiol* 2001;91:1113-1120.
24. **Rodríguez FA, Murio J y Ventura JL.** Effects of intermittent hypobaric hypoxia and altitude training on physiological and performance parameters in swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35:115.
25. **Rodríguez FA, Truijens M, Townsend N, Stray-Gundersen J, Gore J, Levine BD.** Performance of runners and swimmers after four weeks of intermittent hypobaric hypoxic exposure plus sea level training. *J Appl Physiol.* 2007;103:1523-1535.
26. **Terrados N, Melichna J, Sylven C y Jansson E.** Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *Eur J Appl Physiol.* 1988;57:203-209.
27. **Vallier JM, Chateaou P y Guezennec CY.** Effects of physical training in a hypobaric chamber on the physical performance of competitive triathletes. *Eur. J Appl. Physiol* 1996;21:73-80.
28. **Geiser J, Vogt M y Billeter R.** Training high-living low: changes of aerobic performance and muscle structure with training at simulated altitude. *Int. J. Sports Med* 2001;22:579-585.
29. **Emonson DL, Aminuddin AH, Wight RL, Scroop GC y Gore CJ.** Training-induced increases in sea level VO₂max and endurance are not enhanced by acute hypobaric exposure. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1997;76(1):8-12.
30. **Hendriksen IJ y Meeuwse T.** the effect of intermittent training in hypobaric hypoxia on sea-level exercise: a cross-over study in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2003;88:396-403.
31. **Debetet T, Amon M, Keramidas M, Kounalakis N, Pisot R y Mekjavic I.** Normoxic and Hypoxic Performance Following 4 Weeks of Normobaric Hypoxic Training. *Av Sp Envir Med* 2010;81(4):387-393.
32. **Truijens MJ, Toussaint HM, Dow J y Levine BD.** Effect of high-intensity hypoxic training on sea-level swimming performances. *J Appl Physiol* 2003;94(2):733-743.
33. **Meeuwse T, Hendriksen IJ y Holewijn M.** Training-induced increases in sea-level performance are enhanced by acute intermittent hypobaric hypoxia. *Eur J Appl Physiol* 2001;84(4):283-290.
34. **Roels B, Millet GP, Marcoux CJ, Coste O, Bentley DJ y Candau RB.** Effects of hypoxic interval

- training on cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 2005;37(1):138-146.
35. **Robertson EY, Saunders PU, Pyne DB, Gore CJ y Anson JM.** Effectiveness of intermittent training in hypoxia combined with live high/train low. *Eur J Appl Physiol* 2010;110(2):379-387.
 36. **Dufour S, Ponsot E, Zoll J, Doutreleau S, Geny B y Lampert E.** Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners I. Improvement in aerobic performance capacity. *J Appl Physiol* 2006;100:1238-1248.
 37. **Czuba M, Waskiewicz Z, Zajac A, Poprzecki S, Cholewa J y Rocznik R.** The effects of intermittent hypoxic training on aerobic capacity and endurance performance in cyclists. *J Sport Sci Med* 2011;10:175-183.
 38. **Roels B, Bentley DJ, Coste O, Mercier J y Millet GP.** Effects of intermittent hypoxic training on cycling performance in well-trained athletes. *Eur J Appl Physiol* 2007;101(3):359-368.
 39. **Ramos DJ, Martínez F, Rubio JA, Esteban P, Mendizábal S y Jiménez JF.** Modificaciones en parámetros fisiológicos tras un programa de hipoxia intermitente en sujetos entrenados y no entrenados. *J Sport Health Res* 2010;2(2):151-166.
 40. **Wood MR, Dowson MN y Hopkins WG.** Running performance after adaptation to acutely intermittent hypoxia. *Eur J Appl Physiol* 2006;6(3):163-172.
 41. **Hinckson EA, Hopkins WG, Downey BM y Smith TB.** The effect of intermittent hypoxic training via a hypoxic inhaler on physiological and performance measures in rowers: a pilot study. *J Sci Med Sport* 2006;9(1-2):177-180.
 42. **Friedmann B, Frese F, Menold E, Kauper F, Jost J y Bartsch P.** Individual variation in the erythropoietic response to altitude training in elite junior swimmers. *Br J Sports Med* 2005;39(3):148-153.
 43. **Rodríguez FA, Ventura JL y Casas M.** Erythropoietin acute reaction and haematological adaptations to short, intermittent hypobaric hypoxia. *Eur J Appl Physiol*. 2000;82(3):170-177.
 44. **Morton JP y Cable NT.** Effects of intermittent hypoxic training on aerobic and anaerobic performance. *Ergonomics* 2005;48(11-14):1535-1546.
 45. **Saunders PU, Telford RD, Pyne DB, Cunningham RB, Gore CJ y Hahn AG.** Improved running economy in elite runners after 20 days of simulated moderate-altitude exposure. *J Appl Physiol* 2004;96:931-937.
 46. **Babcock CJ y Kirby TE.** The effect of intermittent simulated altitude exposure via re-breathing on cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 2008;40(5):s51.
 47. **Riera J, Galilea P, Pons V y Drobnic F.** Intermittent normobaric hypoxia and running economy. *Arch Med Deporte* 2008;25(128):456-457.
 48. **Dobson B.** The effect of intermittent simulated-altitude training on physical performance in trained basketball players. Auckland University, 2009.
 49. **Burtscher M, Gatterer H, Faulhaber M, Gerstgrasser W y Schenk K.** Effects of intermittent hypoxia on running economy. *Int J Sports Med* 2010;31(9):644-650.
 50. **Neya M, Enoki T, Kumai Y, Sugoh T y Kawahara T.** The effects of nightly normobaric hypoxia and high intensity training under intermittent normobaric hypoxia on running economy and hemoglobin mass. *J Appl Physiol* 2007;103(3):828-834.
 51. **Green HJ, Roy B, Grant S, Hughson R, Burnett M y Otto C, et al.** Increases in submaximal cycling efficiency mediated by altitude acclimatization. *J Appl Physiol* 2000;89(3):1189-1197.
 52. **Roberts AC, Butterfield GE, Cymerman A, Reeves JT, Wolfel EE y Brooks GA.** Acclimatization to 4,300-m altitude decreases reliance on fat as a substrate. *J Appl Physiol* 1996;81(4):1762-1771.
 53. **Roberts AC, Reeves JT, Butterfield GE, Mazzeo RS, Sutton JR y Wolfel EE.** Altitude and beta-blockade augment glucose utilization during submaximal exercise. *J Appl Physiol* 1996;80(2):605-615.
 54. **Hamlin MJ, Marshall HC, Hellemans J, Ainslie PN y Anglem N.** Effect of intermittent hypoxic training on 20 km time trial and 30 s anaerobic performance. *Scand J Med Sci Sports* 2010;20(4):651-661.
 55. **Hellemans J.** Intermittent hypoxic training: a pilot study. Proceedings of the Second Annual International Altitude Training Symposium 1999:145-154.
 56. **Hamlin MJ y Hellemans J.** Effect of intermittent normobaric hypoxic exposure at rest on haematological, physiological, and performance parameters in multi-sport athletes. *J Sports Sci* 2007;25(4):431-441.

57. **Hamlin MJ, Hinckson EA, Wood MR y Hopkins WG.** Simulated rugby performance at 1550-m altitude following adaptation to intermittent normobaric hypoxia. *J Sci Med Sport* 2008;11(6):593-599.
58. **Frey WO, Zenhausern R y Colmbani PC.** Influence of intermittent exposure to normobaric hypoxia on hematological indexes and exercise performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000;Suppl 32(5):S65.
59. **Hinckson EA, Hamlin MJ, Wood MR y Hopkins WG.** Game performance and intermittent hypoxic training. *Br J Sports Med* 2007;41(8):537-539.
60. **Bishop D, Edge J y Goodman C.** Muscle buffer capacity and aerobic fitness are associated with repeated-sprint ability in women. *Eur J Appl Physiol* 2004;92(4-5):540-547.
61. **Tomlin DL y Wenger HA.** The relationship between aerobic fitness and recovery from high intensity intermittent exercise. *Sports Med* 2001;31(1):1-11.
62. **Lancaster K y Smart N.** Live-High Train-Low Altitude Training on Maximal Oxygen Consumption in Athletes. A systematic review and Meta-Analysis. *Int J Sport Sci Coach* 2012;7(1):1-13.
63. **Duke J, Chapman R y Levine B.** Live-High Train-Low Altitude Training on Maximal Oxygen Consumption in Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Int J Sport Sci Coach* 2012;7(1):15-20.
64. **Millet GP, Woorons X y Roels B.** Effects of intermittent hypoxia training on peak performance in elite athletes. In: Xi L, Serebrovskaya S, editors. *Intermittent Hypoxia*. New York: Nova Science, 2009:459-471.
65. **Vogt M y Hoppeler H.** Is hypoxia training good for muscles and exercise performance? *Prog Cardiovasc Dis* 2010;52(6):525-533.
66. **Katayama K, Matsuo H, Ishida K, Mori S y Miyamura M.** Intermittent hypoxia improves endurance performance and submaximal exercise efficiency. *High Alt. Med. Biol* 2003;4(3):291-304.
67. **Katayama K, Sato K, Matsuo H, Ishida K, Iwasaki K y Miyamura M.** Effect of intermittent hypoxia on oxygen uptake during submaximal exercise in endurance athletes. *Eur J Appl Physiol* 2004;92(1-2):75-83.
68. **Rodas G, Parra J, Sitja J, Arteman J y Viscor G.** Efecto de un programa combinado de entrenamiento físico e hipoxia hipobárica intermitente en la mejora del rendimiento físico de triatletas de alto nivel. *Apunts: Med l'esport*. 2004;144:5-10.
69. **Truijens M, Rodríguez FA, Townsend N, Stray-Gundersen J, Gore CJ y Levine BD.** The effect of intermittent hypobaric hypoxic exposure and sea level training on submaximal economy in well-trained swimmers and runners. *J Appl Physiol*. 2008;104:328-337.
70. **Casas M, Casas H y Pagés T.** Intermittent hypobaric hypoxia induces altitude acclimatization and improves the lactate threshold. *Av Sp Envir Med* 2000;71:125-130.