



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

E. U. DE ENFERMERÍA Y FISIOTERAPIA

Titulación: GRADO EN FISIOTERAPIA

TRABAJO FIN DE GRADO

TRABAJO DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

**EFECTOS DEL ENTRENAMIENTO EN ALTITUD
O HIPOBÁRICO SOBRE EL ORGANISMO**

EFFECTS OF HYPOBARIC OR ALTITUDE TRAINING ON THE ORGANISM

Daniel Prada Martínez

Tutor: Miguel Santos del Rey

Salamanca, Junio 2019

ÍNDICE

1. Índice de abreviaturas	1
2. Resumen	2
3. Introducción	3
3.1. Hipoxia	3
3.2. Tipos de entrenamiento en altitud	4
4. Justificación	5
5. Objetivos	5
6. Estrategia de búsqueda y selección de estudios	5
7. Síntesis y análisis de los resultados	7
7.1. Efectos neuropsicológicos	7
7.2. Efectos sobre el sistema músculo-esquelético	8
7.3. Efectos sobre el sistema cardiovascular	9
7.4. Efectos sobre el sistema respiratorio	12
7.5. Efectos sobre el rendimiento	13
8. Discusión	14
8.1. Efectos neuropsicológicos	14
8.2. Efectos sobre el sistema músculo-esquelético	14
8.3. Efectos sobre el sistema cardiovascular	14
8.4. Efectos sobre el sistema respiratorio	15
8.5. Efectos sobre el rendimiento	15
9. Conclusiones	16
10. Bibliografía	17

1. ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
HH	Hipoxia hipobárica
NH	Hipoxia normobárica
2,3-DGP	2,3-difosfoglicerato
LHTH	Vivir en altura y entrenar en altura
LHTL	Vivir en altura y entrenar abajo
LLTH	Vivir abajo y entrenar en altura
IH	Hipoxia intermitente en reposo
REM	Movimiento ocular rápido
Mito VD	Densidad de volumen mitocondrial
IMF	Intermiofibrilares
SS	Subsarcolémicas
1RM	Fuerza máxima
P _{max}	Potencia muscular máxima
RCV	Riesgo cardiovascular
EPO	Eritropoyetina
XOD	Xantina oxidasa
GSH-PX	Glutación peroxidasa
CAT	Catalasa
UA	Ácido úrico
tHbmass	Masa de hemoglobina
V _{Omax}	Volumen de oxígeno máximo
Hb	Hemoglobina
ALT 1	Primer campo de entrenamiento
ALT 2	Segundo campo de entrenamiento
Hi-Hi	Grupo de entrenamiento en altitud clásico de 4 semanas
Hi-Hi3	Grupo entrenamiento en altitud clásico de 3 semanas
Hi-HiLo	Grupo de entrenamiento a baja y moderada altitud viviendo en moderada altitud
Lo-Lo	Grupo control que no entrena en altura
HIF-1	Factor inductible por hipoxia-1
VEFJ	Factor de crecimiento endotelial vascular
AMP	Adenosín monofosfato
AMPK	Proteína quinasa activada por el AMP
ROS	Estrés oxidativo
GLUT4	Transportador de glucosa tipo 4
PGC1 α	Peroxisome proliferator-activated receptor γ co-activator 1 α

2. RESUMEN

Objetivo: evaluar la repercusión que tiene el entrenamiento en altitud sobre el organismo humano.

Estrategia de búsqueda y selección de estudios: se realiza la búsqueda en la base de datos Pubmed, con dos estrategias: en la primera se han relacionado los términos “altitude training” AND “effects”, seleccionándose aquellos estudios que aborde el entrenamiento hipobárico en humanos y publicados de 2009 en adelante. La segunda se ha usado solo el término “Altitude training” acompañado del operador “Title”, seleccionándose los estudios relacionados con el entrenamiento hipobárico en humanos y publicados en 2009 en adelante. También hemos utilizado dos artículos extraídos de dos revistas importantes en el tema en cuestión: “Journal of High Andean Research” y “Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas”.

Resultados: los estudios que hemos analizado en esta revisión bibliográfica muestran resultados estadísticamente significativos a favor de numerosas adaptaciones que sufren los diferentes sistemas del organismo tras un programa de entrenamiento hipobárico. Los deportistas sufren tanto mejoras y ventajas adaptativas, como efectos no deseados tras la exposición.

Conclusión: el entrenamiento en altitud produce efectos negativos sobre el descanso, la función respiratoria nocturna y bienestar general durante la exposición. Por otro lado, el aparato cardiovascular y el músculo-esquelético no sufren demasiados efectos negativos y obtienen mejoras importantes tras la exposición. El rendimiento general de los atletas es mayor tras un campo en altitud en comparación con los que siguieron este modelo de trabajo.

3. INTRODUCCIÓN

El entrenamiento en altitud produce una serie de adaptaciones fisiológicas y bioquímicas en los deportistas, que les permite obtener ciertas mejoras en el rendimiento ⁽¹⁾.

3.1 Hipoxia

La hipoxia se define como la disminución de la presión parcial de oxígeno en las células, limitando la difusión de oxígeno desde los pulmones y su transporte hacia los tejidos. En función de las causas que lo provoquen, encontraremos diferentes tipos de hipoxia: hipoxia hipóxica, hipoxia anémica, hipoxia isquémica e hipoxia histotóxica. En el presente trabajo, abordaremos la hipoxia hipóxica que es la empleada por los deportistas para las adaptaciones fisiológicas ⁽²⁾. Aquí tendremos que diferenciar dos tipos: normobárica e hipobárica. La hipoxia hipobárica o natural (HH) se basa en la disminución de la presión atmosférica sin variar los niveles de oxígeno que hay en el aire, por ejemplo entrenando en altitudes elevadas. Sobre este tipo de hipoxia será sobre la que nos centremos. La hipoxia normobárica (NH) busca replicar las condiciones de gran altitud, mediante el empleo de aparatos artificiales que nos permitan respirar aire con oxígeno en una baja concentración ⁽³⁾. También podemos hablar de una segunda clasificación que tiene en cuenta el tiempo de exposición a la hipoxia: aguda, crónica e intermitente. La hipoxia crónica consiste en períodos prolongados con poco oxígeno, por ejemplo, las personas que viven en altitudes permanentemente, con el problema de que se aumente excesivamente la concentración de 2,3-DPG en los eritrocitos. Esto disminuiría la afinidad de la unión de la hemoglobina (figura 1). Por el contrario, la hipoxia aguda no es más que una exposición a zonas de bajos niveles de oxígeno, durante poco tiempo ⁽²⁾. La hipoxia intermitente consiste en alternar períodos de hipoxia y normoxia, es decir, que los deportistas solo sean sometidos a hipoxia durante una parte del día. Este entrenamiento intermitente es breve e intenso, siendo el mecanismo más eficiente debido a su fácil desarrollo ^(1, 4, 5).

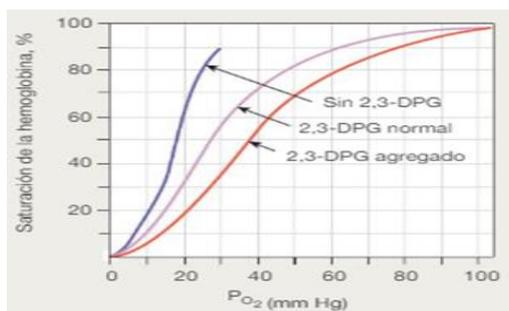


Figura 1: efecto del compuesto metabólico 2,3-DGP⁽¹⁾

3.2 Entrenamiento en altitud

El entrenamiento en altitud es un tipo de entrenamiento hipóxico que va a originar una serie de adaptaciones metabólicas, neuromusculares y cardiovasculares en los deportistas. Esto se debe a que los sujetos son introducidos en ambientes que tienen bajos niveles de oxígeno, por lo que el cuerpo se adaptará y mejorará la eficiencia de su uso⁽⁶⁾.

Vamos a diferenciar distintos modelos de entrenamiento en altitud: vivir en altura y entrenar en altura (LHTH), vivir en altura y entrenar abajo (LHTL), vivir abajo y entrenar en altura (LLTH) y la hipoxia intermitente en reposo⁽¹⁾.

El LHTH, que es el modelo clásico, defiende el desarrollo del entrenamiento en altura y el descanso también en altitud. Se centra en el aumento del número de glóbulos rojos y la inducción de un estímulo de entrenamiento adicional ocasionado por la hipoxia tisular. Ambas cosas determinadas siempre por la correcta aclimatación del deportista. El modelo LHTL, basado en el descanso en condiciones de altitud y el entrenamiento a nivel del mar, también se centra en aumentar la masa de glóbulos rojos pero sin tener que reducir el VO_2 máximo ni disminuir la intensidad del entrenamiento. Por otro lado, el entrenamiento LLTH está basado en el descanso a nivel del mar y el entrenamiento en altitud con el fin de reducir mucho más la presión parcial de oxígeno y producir una mayor respuesta al entrenamiento. Y por último la IH que alterna la respiración de aire hipóxico y aire normóxico en períodos de tiempo de corta duración^(1, 5, 6).

4. JUSTIFICACIÓN

El entrenamiento en hipoxia empezó a ganar fuerza tras los Juegos Olímpicos de México del año 1968, dado que Ciudad de México se encuentra a 2400 metros de altitud. Debido a la superioridad de los atletas aclimatados, empezó a llamar la atención a países como Estados Unidos, que tan solo dos años más tarde, ya comenzaba las primeras investigaciones sobre este tema ⁽⁶⁾.

En la actualidad, debido a la igualdad competitiva que hay, los deportistas de élite buscan formas de sacarle ventaja al resto de competidores mediante diferentes modelos de entrenamiento. Por ello considero conveniente realizar una revisión bibliográfica sobre el entrenamiento en altitud o hipobárico, con el fin de averiguar si se consiguen beneficios fisiológicos con este método de trabajo.

5. OBJETIVOS

Objetivo principal: analizar los efectos que produce el entrenamiento deportivo sobre el organismo, en situaciones de hipoxia hipobárica.

Objetivos secundarios:

- Estudiar los cambios que sufren la estructura y los componentes del tejido muscular.
- Comprender las respuestas de los aparatos cardiovascular y respiratorio, así como los efectos psicológicos, a las condiciones de la hipoxia hipobárica.
- Observar y analizar el rendimiento deportivo posterior a los programas de entrenamiento en altitud.

6. ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE ESTUDIOS

Para la elaboración de esta revisión bibliográfica hemos realizado búsquedas en la base de datos Pubmed.

En este trabajo, se incluyen aquellos textos relacionados con la actividad física en altitud y sus efectos. Además, también se utilizaron diferentes artículos que estaban incluidos en la bibliografía de los buscados en Pubmed.

También se utilizaron dos artículos extraídos de dos revistas de prestigio en el tema desarrollado: “Journal of High Andean Research” ⁽⁷⁾ y “Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas” ⁽¹²⁾.

En cuanto a la estrategia de búsqueda, se han realizado dos: la primera hemos utilizado el operador booleano “AND” como nexos entre los dos términos. La segunda ha ido dirigida a recoger más información general sobre las bases del entrenamiento en altura y por ello solo se ha utilizado un término, acompañado del operador “Title” (Tabla 1).

Término en inglés	Término en castellano
Altitude training AND effects	Entrenamiento en altitud AND efectos
Altitude training (Title)	Entrenamiento en altitud (Título)

Tabla 1: Relación de términos con el operador booleano AND

Con el fin de reducir el número de artículos y que fuese de una mayor actualidad, introducimos en nuestra búsqueda los siguientes filtros:

- Estudios realizados solo en humanos.
- Estudios que hayan sido publicados en los últimos 10 años.

Para continuar, se introducen los términos uno a uno. Una vez que aparecen los artículos empezamos a leer los títulos de cada uno para ir haciendo la selección. Posteriormente, se continuó con la lectura del abstract con la finalidad de reducir la búsqueda y hacerla más precisa (Tabla 2).

Término de búsqueda	Número de publicaciones	Publicaciones seleccionadas tras título	Publicaciones seleccionadas tras abstract
Altitude training AND effects	68	19	6
Altitude training (Title)	21	11	6

Tabla 2: Relación de términos, publicaciones encontradas, artículos según título y abstract

Criterios de inclusión:

- a) Aquellos que aborden el entrenamiento en altitud o hipobárico.
- b) Tener relación directa con los efectos que produce.
- c) Relacionados con el deporte y actividad física.

Criterios de exclusión:

- a) Los que no guarden relación con la hipoxia hipobárica.
- b) Muestras cuyos sujetos no sean deportistas.

7. SÍNTESIS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

7.1 Efectos neuropsicológicos

En el estudio de Tarqui ⁽⁷⁾ que tiene como objetivo la valoración, mediante escalas, de los efectos psicológicos que causa un entrenamiento de 21 días en altura con 45 deportistas de élite, muestra que a los 8 días, el 77'77% muestra malestar psicológico y físico en la escala de Borg (figura 2). Los atletas reflejaban niveles de tensión, depresión, vigor y fatiga muy altos, originando un sobreentrenamiento. A los 21 días, el 8'89% de los sujetos mantenía puntajes altos (figura 2). Los atletas muestran una mejoría y adaptación a dichas condiciones de agotamiento, lo que se convierte en un fiel indicador de una buena asimilación de todo el programa de entrenamiento, con un refuerzo importante en sus habilidades y estrategias psicológicas.

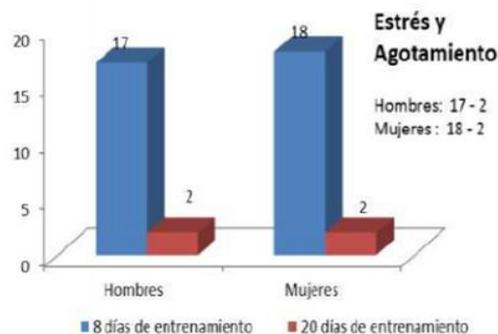


Figura 2: Variaciones del agotamiento en la Escala Subjetiva de Borg ⁽⁷⁾

En el estudio de Sperlich et al. ⁽⁸⁾ que utiliza una muestra de nueve miembros de un equipo nacional alemán de media y larga distancia en un programa de entrenamiento en altitud de tres semanas de duración, no se observaron síntomas psicológicos por

sobreentrenamiento en los participantes. Muchos sí que refirieron problemas para conciliar el sueño durante las etapas del programa.

También en el estudio Sargent et al. ⁽⁹⁾ realizado sobre 10 jugadores de fútbol masculino que pasaron 13 noches a gran altitud, se observó una disminución del sueño REM en la primera semana, con una disminución de la calidad y duración del sueño profundo en relación con la primera noche. A las dos semanas la eficiencia del sueño había aumentado y era mayor que el día de referencia. El resto de variables relacionadas con el sueño no variaron con el día de referencia al finalizar el programa.

Khodae et al. ⁽¹⁰⁾ también concluyeron que sus deportistas padecieron problemas de sueño en su estancia en altura. Destaca el insomnio, despertares frecuentes y sueño inquieto.

7.2 Efectos sobre el sistema músculo-esquelético

Un buen programa de entrenamiento en altitud protege el músculo esquelético mediante la estimulación de la autofagia, que elimina mitocondrias disfuncionales, consiguiendo una mejora de la eficiencia metabólica que satisface las demandas energéticas ⁽¹¹⁾.

Composición corporal

Sperlich et al. ⁽⁸⁾ recogieron el peso corporal de los deportistas durante todos los días de entrenamiento, siendo el peso medio inicial de 66.3 Kg y el peso medio final de 66.6 Kg (un aumento de 0.3 Kg de media al final de programa), por lo que no hubo pérdida de la masa corporal.

Calero et al. ⁽¹²⁾ desarrollaron un programa de entrenamiento en altitud de 31 deportistas paralímpicos de atletismo de 5 días de duración. Compararon el peso final de los atletas y observaron una disminución de 57.5 a 56.6 Kg (1Kg de diferencia) de media, siendo esta diferencia estadísticamente significativa ($p=0.034$).

En el estudio de Jacobs et al. ⁽¹³⁾ se realizó un programa de entrenamiento a 3454 metros de altura para 9 jóvenes deportistas con el fin de ver variaciones del músculo esquelético humano a nivel mitocondrial. Tras el programa y por medio de una biopsia del vasto externo bajo anestesia, no se observó ningún cambio en el porcentaje de

grasa, ni en la masa magra, ni en la sección transversal de la fibra. El único cambio que se encontró fue en relación a la Mito VD, en el que se observó un aumento de la densidad de volumen de las mitocondrias IMF de $11.5 \pm 92\%$ después de 28 días en altitud en comparación con el nivel del mar. Las mitocondrias SS no sufrieron cambios. La densidad total de volumen mitocondrial (IMF + SS) aumentó de $6.20 \pm 1.49\%$ a $6.62 \pm 1.35\%$.

Hauser et al. ⁽¹⁴⁾ llevaron a cabo un estudio con 28 triatletas varones divididos en tres grupos: HH (n=11), NH (n=10) y control (n=17). Realizaron un programa de entrenamiento LHTL de 18 días de duración. No se vieron diferencias significativas entre el peso corporal entre los grupos (PRE: HH=68.6 \pm 6.5, NH=70.4 \pm 4.8 y control=72.1 \pm 8.2 Kg/ POST: HH=68.6 \pm 5.6, NH=70.6 \pm 4.9 y control=72.7 \pm 8.5 Kg).

Potencia muscular

Ferliche et al. ⁽¹⁵⁾ realizaron un estudio experimental para valorar la potencia muscular después de un entrenamiento en altitud, utilizando como referencia 1RM de cada deportista en el ejercicio de press de banca. Se incluyeron 28 atletas olímpicos divididos en dos grupos independientes (G1: normoxia y HH, G2: normoxia y NH). Mientras que en el G2 no se observaron cambios significativos, en el G1 se produjo un incremento en 1RM (+5.73%; ES=0.3) y en la carga total correspondiente a la P_{max} (+3.29%; ES=0.2). Al comparar un grupo con otro, la hipoxia hipobárica solo se relacionó a una RM mayor (P=0.01; ES=0.3) y un aumento moderado de la P_{max} cerca de significado (P=0.09; ES=0.69).

7.3 Efectos sobre el sistema cardiovascular

Parámetros sanguíneos y frecuencia cardíaca

El RCV crece en un 7% entre los 1780 m y 2800 m, siendo los 2000 m el umbral de producción de glóbulos rojos. El aumento de glóbulos rojos a estos niveles sería de 1%/100 horas de exposición ⁽¹⁶⁾.

En el estudio de Sperlich et al. ⁽⁸⁾ midieron los parámetros sanguíneos durante todos los días para ver su variación entre el primer y último día de campamento (Tabla 3).

	Día 1	Día 19		Día 1	Día 19
Hematocrito (%)	47.7	47.3	Nitrógeno urea en sangre (U L -1)	4.2	3.7
Glóbulos rojos ($\times 10^6 \mu$ L -1)	5.5	5.4	Creatina quinasa (mmol L- 1)	182.2	341.1
Glóbulos blancos ($\times 10^6 \mu$ L -1)	6.0	6.4	Frecuencia cardíaca en reposo (lpm)	58.3	48.1

Tabla 3: Parámetros sanguíneos el primer día y a las 3 semanas del programa

Hauser et al. ⁽¹⁴⁾ observaron que los deportistas sometidos al modelo de hipoxia natural sufrieron una disminución de la EPO ($d=1.9$, $p<0.001$, -39.4%), en comparación con el grupo control ($d=0.3$, $p=0.48$, -8.4%). No se encontraron variaciones estadísticamente significativas ni en cuanto a glóbulos rojos (PRE: 5.2 ± 0.6 y POST: 5.2 ± 0.5 , $p<0.25$) ni hematocrito (PRE: 45.4 ± 3.6 y POST: 45.8 ± 3.1 , $p<0.24$).

El estudio de Calero et al. ⁽¹²⁾ vieron como la frecuencia cardíaca máxima de media entre el primer día y el último del programa, variaba significativamente ($p=0.012$). Se tomaba inmediatamente a la finalización del entrenamiento diario y pasó de 128.8 ppm a 96 ppm de media.

Tong et al. ⁽¹⁷⁾ estudiaron las alteraciones que sufre la homeostasis redox en sangre sobre 13 corredores a 1700 m de altitud, después de doce semanas de exposición. Se destacó una disminución de la actividad enzimática de la XOD y el GSH-PX, mientras que la CAT aumentó ($p<0.05$). Se produjo un aumento significativo del ácido úrico (UA) y una disminución glutatión reducido (GSH) en comparación con el PRE (Tabla 4).

	PRE	POST
XOD	20.8 ± 4.2	15.9 ± 4.9
GSH-PX	114.5 ± 24.1	88.1 ± 32.8
CAT	1.48 ± 0.50	2.16 ± 0.60
UA	34.3 ± 9.0	38.1 ± 7.5
GSH-PX	6.88 ± 1.60	5.65 ± 1.29

Tabla 4: Estado de variables redox antes y después del acondicionamiento ($p<0.05$)

Masa de hemoglobina y $V_{O_{2max}}$

En el estudio de Sperlich et al. ⁽⁸⁾ la tHbmass no varió mucho durante el entrenamiento (Figura 3).

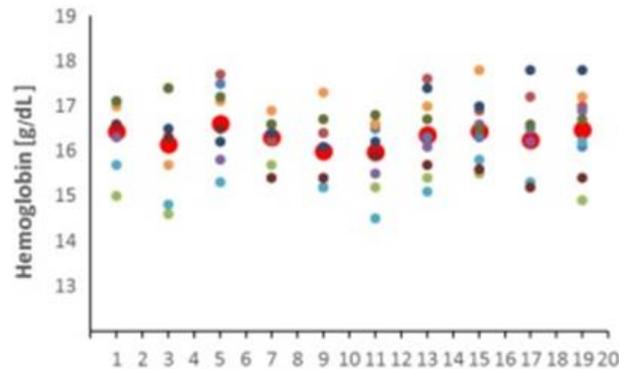


Figura 3: Variación de la hemoglobina en 20 días ⁽⁸⁾

En el trabajo de Hauser et al. ⁽¹⁴⁾ la tHbmass se incrementó después de programa en el grupo HH ($d=0.05$, $p<0.001$, + 4.4%), mientras que en el control no aparecieron cambios significativos.

Gore ⁽¹⁶⁾ recoge que, junto con el aumento de la tHbmass, se producía también un incremento proporcional del $V_{O_{2max}}$ (4 ml O_2 /min por cada gramo de Hb).

McLean et al. ⁽¹⁸⁾ realizaron un estudio comparativo entre dos campos de entrenamiento en altitud moderada, con 12 futbolistas. El primero de 19 días y el segundo de 18 días de duración, separados por doce meses. Además, otros 20 jugadores participaron solo en el ALT2 (32 jugadores, de los cuales 5 presentaron alguna lesión). La masa de Hb, de los 12 que completaron ambos entrenamientos, en PRE fue distinta en ALT1 ($1023\pm 143g$) y en ALT2 ($1017\pm 135g$). Individualmente, la masa de hemoglobina aumentó en el POST1 de ALT1 ($3.7\pm 2.5\%$) y a los 17 días en el ALT2 ($4.2\pm 2.4\%$). En el ALT2 tenemos que tener en cuenta los sujetos lesionados para los resultados (Figura 4), ya que variará la tHbmass media que haya ganado el grupo. Los futbolistas sanos aumentaron su masa de hemoglobina en valores próximos al 4%.

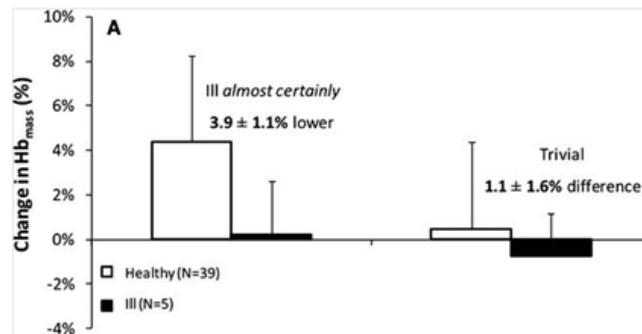


Figura 4: Variación de la masa de Hb en sujetos sanos y lesionados ⁽¹⁸⁾

En el estudio realizado por Friedmann et al. ⁽¹⁹⁾ repartieron a 54 nadadores profesionales en 4 grupos según la duración (3 ó 4 semanas) y modalidad del entrenamiento a efectuar. El VO_{2max} no presentó cambios significativos al finalizar el programa (Δ con respecto a PRE, $p < 0.05$) en los grupos que entrenaron en altitud: Hi-Hi3 ($1.5\% \pm 2.5\%$), Hi-Hi ($1.1\% \pm 2.6\%$) o Hi-HiLo ($1.3\% \pm 1.4\%$), pero fueron mayores que los de Lo-Lo ($1.9\% \pm 1.5\%$). La variación de la masa de hemoglobina se recoge en la figura 5. No se estableció una relación significativa entre la tHbmass y el VO_{2max} .

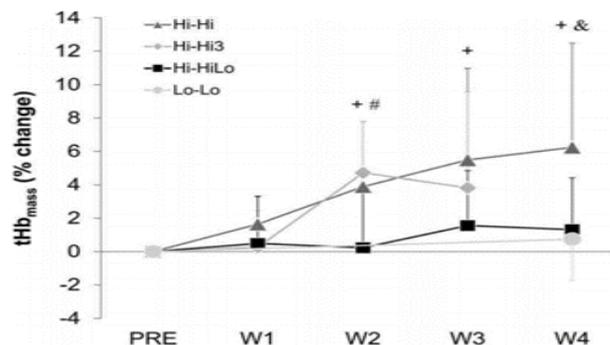


Figura 5: Cambios porcentuales en tHbmass desde mediciones PRE hasta la última semana ($p < 0.05$). Las diferencias entre los grupos Hi-HiLo vs HiHi se representan con +; entre Hi-HiLo vs Hi-Hi3 con #; y Hi-Hi vs LoLo con & ⁽¹⁹⁾

7.4 Efectos sobre el sistema respiratorio

Sargent et al. ⁽⁹⁾ observaron dificultades respiratorias durante la noche y se incrementaron tanto las hipopneas como las apneas centrales. Destacan las diferencias individuales a la hora de padecer una respiración periódica que solo afectó a la mitad de los participantes.

El trabajo de Khodae et al. ⁽¹⁰⁾ defiende que tras una exposición crónica a la altitud, se produce una disminución del CO₂ alveolar, un aumento del volumen sanguíneo capilar del pulmón y un incremento de la capacidad de difusión pulmonar. Destacan que la hipoxia crónica puede generar efectos negativos tales como: hiperventilación secundaria, acompañada de hipocapnia y una disminución del impulso ventilatorio; seguido de una apnea.

7.5 Efectos sobre el rendimiento

Zhang et al. ⁽¹¹⁾ describen los mecanismos que desencadena el entrenamiento hipobárico y que van a producir mejoras en el rendimiento deportivo de los atletas (Figura 6).

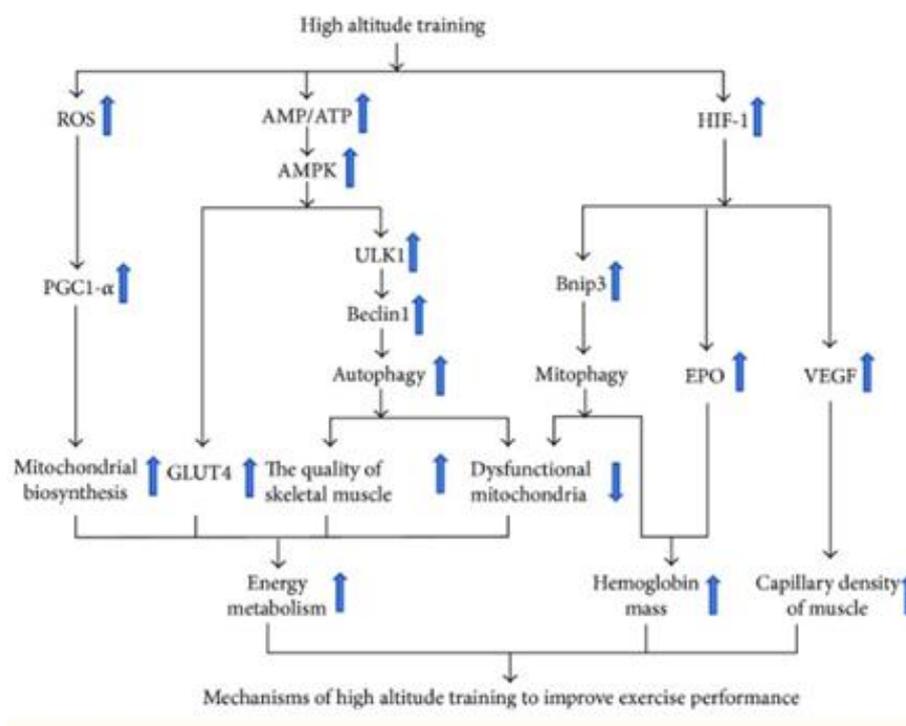


Figura 6: Efectos del entrenamiento en altitud sobre el rendimiento ⁽¹¹⁾

Hauser et al. ⁽¹⁴⁾ vieron como los deportistas entrenados en hipoxia hipobárica habían disminuido los tiempos de carrera de 3km: de 643 ± 57 segundos a 618 ± 51 segundos, d=0.2, p=0.031, -2.1%.

Los nadadores del estudio de Friedmann et al. ⁽¹⁹⁾ obtuvieron mejoras significativas del rendimiento en los diferentes estilos, al compararse con los del grupo control. En la prueba de 50 metros: Hi-Hi3 ($\Delta t = -3.4\%$, $\pm 4.0\%$, $P < 0.001$) y Hi-Hi ($\Delta t = -3.7\%$, $\pm 1.2\%$, $P < 0.001$). En las de 100 y 200 metros: Hi-Hi3 ($\Delta t = -3.1\%$; $\pm 0.9\%$; $P < 0.001$) y Hi-Hi ($\Delta t = -3.4\%$, $\pm 1.0\%$, $P < 0.001$). En la prueba de 400 metros: Hi-Hi ($\Delta t = -3.3\%$,

$\pm 1.3\%$, $P < 0.001$) y Hi-HiLo ($\Delta t = -4.7\%$, $\pm 1.1\%$, $P < 0.001$), en comparación con el grupo control Lo-Lo ($\Delta t = -1.6\%$, $\pm 1.1\%$, $P < 0.03$).

8. DISCUSIÓN

8.1 Efectos neuropsicológicos

Los tres estudios que valoraron la calidad del sueño ^(8, 9, 10) muestran resultados significativos en relación a que la exposición continuada a la altitud afecta negativamente en el descanso y sueño de los deportistas.

En cuanto al funcionamiento mental y el bienestar general, los atletas de Tarqui ⁽⁷⁾ sí que sufrieron malestar psicológico la primera semana. Al contrario, los deportistas de Sperlich et al. ⁽⁸⁾ no sufrieron síntomas psicológicos por sobreentrenamiento en ningún momento. La diferencia de resultados seguramente se deba al uso de escalas para su cuantificación, ya que son medidas subjetivas, y a la respuesta individual de cada atleta o su preparación mental previa a la altura.

8.2 Efectos sobre el sistema músculo-esquelético

Solo en el estudio de Calero et al. ⁽¹²⁾, de los cuatro estudios que abordan la composición corporal ^(8, 12, 13, 14), se obtuvo una variación de la composición corporal estadísticamente significativa. Lo cual se debe a la corta duración de su programa de entrenamiento, ya que si se hubiese prolongado más, los atletas habrían recuperado sus niveles de masa corporal por la aclimatación (lo que sucedió en el resto de estudios). No obstante, cabe destacar que Jacobs et al. ⁽¹³⁾ evidenciaron un aumento de la densidad del volumen mitocondrial (Mito VD), cuya explicación sea la exposición a altitudes extremas (3454m).

8.3 Efectos sobre el sistema cardiovascular

Tanto Sperlich et al. ⁽⁸⁾ como Calero et al. ⁽¹²⁾ observaron una disminución de la frecuencia cardíaca al finalizar sus programas de entrenamiento, lo cual se atribuye a una adaptación positiva tras la exposición a la altitud.

En los artículos que valoraron el resto de parámetros sanguíneos ^(8, 14, 17) se obtuvieron adaptaciones importantes evidenciando mejoras claras de los diferentes componentes hematológicos. Destaca la una ausencia de variación significativa en los niveles de glóbulos rojos y hematocrito ^(8, 14), al contrario de lo que nos decía Gore ⁽¹⁶⁾, el cual

marcaba los 2000m como el umbral de producción de glóbulos rojos tras un entrenamiento en hipoxia. Por otro lado, Hauser et al. ⁽¹⁴⁾ si evidenció una disminución de la EPO que es el principal precursor de la formación de glóbulos rojos. La falta de coincidencia se deba quizás a la falta de tiempo de exposición, que sería insuficiente en los que no se observan cambios.

De los estudios analizados sobre la tHbmass, tres de ellos ^(14, 18, 19) obtuvieron un aumento estadísticamente significativo, mientras que en el estudio de Sperlich et al. ⁽⁸⁾ no vieron variaciones significativas. No se encuentra explicación para ello ya que los estudios están hechos en condiciones muy similares.

Gore ⁽¹⁶⁾ relacionaba el aumento de VO_{2max} con en el aumento de tHbmass, mientras que McLean et al ⁽¹⁸⁾ no obtuvieron cambios significativos de VO_{2max} por lo que no establecieron una relación con el aumento de tHbmass en sus deportistas. Podríamos atribuirlo a que sea necesario alcanzar una altitud muy elevada, es decir, un umbral de altitud muy alto para establecer una relación significativa entre la VO_{2max} y tHbmass.

8.4 Efectos sobre el sistema respiratorio

Los dos artículos analizados ^(9, 10) muestran una afectación respiratoria, especialmente durante el sueño, tras una exposición aguda en altura. Por lo que podríamos relacionarlo con las alteraciones y dificultades que sufren los deportistas en altitud para conciliar el sueño.

8.5 Efectos sobre el rendimiento

Tanto Zhang et al. ⁽¹¹⁾ que obtuvieron mejoras muy importantes en el metabolismo energético con un programa de entrenamiento en altitud, como Hauser et al. ⁽¹⁴⁾ y Friedmann et al. ⁽¹⁹⁾ que vieron mejorar las marcas de sus atletas, nos evidencia de que tras un buen programa de entrenamiento en altitud se consiguen mejoras competitivas estadísticamente significativas. Al comparar diferentes modalidades de deportes se demuestra un aumento del rendimiento tanto aeróbica como anaeróbicamente.

9. CONCLUSIONES

Después de realizar una revisión bibliográfica sobre la repercusión que el entrenamiento en altitud o hipobárico tiene sobre sus deportistas, hemos llegado a las siguientes conclusiones:

Primera: El entrenamiento en altitud provoca cambios neuropsicológicos que afectan negativamente al descanso y bienestar general, siendo mayores en las primeras semanas y produciéndose una adaptación progresiva en el tiempo. Además, se producen alteraciones respiratorias de predominio nocturno asociadas a los trastornos del sueño.

Segunda: Sobre la composición corporal no se producen cambios negativos cuando la exposición es prolongada, se mejora el volumen mitocondrial en el músculo y aumenta la potencia muscular. La hipoxia puede ser un elemento que favorezca la recuperación de lesiones musculares.

Tercera: El entrenamiento en hipoxia hipobárica produce modificaciones sobre los parámetros sanguíneos del atleta, tales como la disminución de la frecuencia cardíaca que nos indica una adaptación a las condiciones de hipoxia. Sin embargo, las variaciones de tHbmass no parecen claras y podrían ser debidas a una respuesta individual de los deportistas, por lo que habrá que seguir investigando esta variable.

Cuarta: Tras un programa de entrenamiento en altitud podemos afirmar que, cuando se compite en alturas inferiores a la de entrenamiento, los deportistas obtienen mejores marcas que aquellos que entrenaron a nivel del mar.

Quinta y última: Tanto la duración de la exposición como la altura a la que se deben someter para alcanzar sus objetivos, son dos puntos a valorar y seguir investigando ya que parece ser que pueden hacer variar los resultados obtenidos sobre determinados parámetros entre unos campamentos y otros. Por lo tanto, a la vista de los resultados publicados creemos conveniente la realización de más estudios estandarizados para conocer la influencia que esta modalidad de entrenamiento tiene sobre los diferentes sistemas del organismo.

10. BIBLIOGRAFÍA

1. Lundby C, Millet GP, Calbet JA, Bärtsch P, Subudhi AW. Does 'altitude training' increase exercise performance in elite athletes? *Br J Sports Med.* 1 de septiembre de 2012;46(11):792-5.
2. Silverthorn DU, Bruce RJ, William CO. *Fisiología Humana, un enfoque integrado.* 6th. Ed. México: Editorial Médica Panamericana; 2014.
3. Coppel J, Hennis P, Gilbert-Kawai E, Grocott MP. The physiological effects of hypobaric hypoxia versus normobaric hypoxia: a systematic review of crossover trials. *Extreme Physiol Med.* 26 de febrero de 2015;4:1-19
4. Intermittent Hypoxia Research in the Former Soviet Union and the Commonwealth of Independent States: History and Review of the Concept and Selected Applications | *High Altitude Medicine & Biology* [Internet]. [citado 14 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://www.liebert-pub.com/doi/10.1089/15270290260131939>
5. Aughey RJ, Buchheit M, Garvican-Lewis LA, Roach GD, Sargent C, Billaut F, et al. Yin and yang, or peas in a pod? Individual-sport versus team-sport athletes and altitude training. *Br J Sports Med.* diciembre de 2013;47(18):1150-4.
6. Girard O, Chalabi H. Could altitude training benefit team-sport athletes? *Br J Sports Med.* diciembre de 2013;47(Suppl 1):i4-5.
7. Leonardo Tarqui Silva. Grado de impacto de la evolución psicológica durante el entrenamiento en altura con atletas de élite. *Rev.Investig. Altoandin.* 2015; 17(2): 201-206.
8. Sperlich B, Achtzehn S, de Marées M, von Papen H, Mester J. Load management in elite German distance runners during 3-weeks of high-altitude training. *Physiol Rep.* 1 de junio de 2016;4(12):e12845.
9. Sargent C, Schmidt WF, Aughey RJ, Bourdon PC, Soria R, Claros JCJ, et al. The impact of altitude on the sleep of young elite soccer players (ISA3600). *Br J Sports Med.* diciembre de 2013;47(Suppl 1):i86-92.

10. Khodae M, Grothe HL, Seyfert JH, VanBaak K. Athletes at High Altitude. *Sports Health*. marzo de 2016;8(2):126-32.
11. Zhang Y, Chen N. Autophagy Is a Promoter for Aerobic Exercise Performance during High Altitude Training. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2018;2018:1-11.
12. Calero S, Caizaluisa RC, Morales CF, Vera AM, Moposita FG, Fernandez RR. Effects of hypoxia on paralympic athletes receiving phased altitude training. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*. 2017;36(1)
13. Jacobs RA, Lundby A-KM, Fenk S, Gehrig S, Siebenmann C, Flück D, et al. Twenty-eight days of exposure to 3454 m increases mitochondrial volume density in human skeletal muscle. *J Physiol*. 2016;594(5):1151-66.
14. Hauser A, Schmitt L, Troesch S, Saugy JJ, Cejuela-Anta R, Faiss R, et al. Similar Hemoglobin Mass Response in Hypobaric and Normobaric Hypoxia in Athletes. *Med Sci Sports Exerc*. abril de 2016;48(4):734.
15. Feriche B, García-Ramos A, Calderón-Soto C, Drobnic F, Bonitch- Góngora J, Galilea P et al. Effect of Acute Exposure to Moderate Altitude on Muscle Power: Hypobaric Hypoxia vs. Normobaric Hypoxia. *PLoS ONE*. 2014;9(12):e114072.
16. Gore C. The challenge of assessing athlete performance after altitude training. *Journal of Applied Physiology*. 2014;116(6):593-594.
17. Tong T, Kong Z, Lin H, He Y, Lippi G, Shi Q et al. Effects of 12-Week Endurance Training at Natural Low Altitude on the Blood Redox Homeostasis of Professional Adolescent Athletes: A Quasi-Experimental Field Trial. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2016;2016:1-9.
18. McLean BD, Buttifant D, Gore CJ, White K, Kemp J. Year-to-year variability in haemoglobin mass response to two altitude training camps. *Br J Sports Med*. diciembre de 2013;47(Suppl 1):i51-8.

19. Friedmann B, Frese F, Menold E. Variación individual en la respuesta eritropoyética al entrenamiento de altitud en nadadores de élite junior. *Br J Sports Med* 2005; 39: 148-53.