

apunts

MEDICINA DE L'ESPORT

www.apunts.org



ARTÍCULO ORIGINAL

Valoración de la frecuencia cardíaca de recuperación después de un programa de entrenamiento de fuerza-resistencia en hipoxia

Jesús Álvarez-Herms^a, Sonia Julià-Sánchez^a, Francisco Corbi^b, Teresa Pagès^a, Ginés Viscor^{a,*}

^a Departamento de Fisiología e Inmunología, Facultad de Biología, Universidad de Barcelona, Barcelona, España

^b Instituto Nacional de Educación Física de Catalunya (INEFC), Centro de Lleida - Universidad de Lleida (UdL), Lleida, España

Recibido el 22 de junio de 2011; aceptado el 21 de julio de 2011; disponible online el 22 de septiembre de 2011.

PALABRAS CLAVE

Hipoxia;
Frecuencia cardíaca;
Entrenamiento de
fuerza-resistencia

Resumen

Objetivo: Determinar si 12 sesiones de entrenamiento de resistencia de los miembros inferiores a una altura simulada (2.500 m) son suficientes para provocar una mejora en la recuperación del índice de frecuencia cardíaca en los primeros 3 min de recuperación tras una sesión de saltos en contramovimiento.

Material y métodos: Doce sujetos jóvenes físicamente activos se dividieron en dos grupos equilibrados para entrenar en hipoxia (HYP) y normoxia (NOR). Los sujetos fueron asignados a cada grupo en base a los resultados en una prueba previa de salto en contramovimiento de 60 s (CMJ60). Ambos grupos realizaron durante 4 semanas un entrenamiento idéntico de fuerza (volumen, intensidad, carácter y condiciones de esfuerzo) en las extremidades inferiores (squat, half-squat y saltos).

Resultados: Ambos grupos mejoraron en todos los casos. Se analizó la evolución temporal de la frecuencia cardíaca durante la prueba CMJ60 y el posterior período de recuperación de 3 min. El grupo HYP (n = 5) refleja una mejoría del índice de recuperación de la frecuencia cardíaca en comparación con el grupo NOR (prueba t de Student) después de 2 (p = 0,03) y 3 (p = 0,05) minutos de finalizar el test de saltos.

Conclusiones: Concluimos que un protocolo de entrenamiento de fuerza-resistencia (12 sesiones en 4 semanas) de las extremidades inferiores en altitud simulada podría mejorar el índice de recuperación de la frecuencia cardíaca en comparación con el mismo entrenamiento realizado a nivel del mar.

© 2011 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

KEYWORDS

Hypoxia;
Heart rate;
Strength training

Changes in heart rate recovery index after a programme of strength/endurance training in hypoxia

Abstract

Objective: To determine whether twelve sessions of resistance training on lower limbs at simulated altitude (2500 m) were efficient to elicit an improvement in heart rate recovery index in the first 3 min of recovery after a maximal jump test.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: gviscor@ub.edu (G. Viscor).

Materials and methods: Twelve young physically active subjects were divided in two balanced groups for training in hypoxia (HYP) and normal oxygen (NOR). The subjects were assigned to each group based on previous test results in the 60 s counter-movement jump test (CMJ60).

Results: Both groups performed identical strength training (volume, intensity, character and effort conditions) on the lower limbs (squats, half-squats and jumps) for 4 weeks. Both groups improved the measured parameters in all cases. We analyzed the time course of heart rate during the CMJ60 test and the subsequent 3 min recovery period. HYP group (n = 5) improved the heart rate recovery index as compared to NOR group (Student's *t*-test) at minute 2 ($P = .03$) and minute 3 ($P = .05$).

Conclusions: We conclude that a protocol of resistance training on lower limbs (12 sessions in 4 weeks) at a simulated altitude could improve heart rate recovery index compared to the same training performed at sea level.

© 2011 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Introducción

La monitorización de la evolución de la frecuencia cardíaca en la fase de recuperación tras realizar esfuerzo físico es un método simple y no invasivo para valorar la salud cardiovascular y la condición física de los sujetos^{1,2}. Se ha encontrado una relación directa entre una reducción más rápida de la frecuencia cardíaca máxima a valores por debajo de las 130 pulsaciones/min y la mejora de adaptación cardiovascular³. Esta mejora se ha asociado a varios ajustes fisiológicos internos, de manera que una frecuencia cardíaca más baja en la fase de recuperación estaría relacionada con una reducción de la circulación de retorno y de las necesidades sistémicas⁴. El incremento de la frecuencia cardíaca como respuesta al ejercicio va acompañado de una reducción del tono vagal que se incrementa posteriormente sobre el nivel basal una vez finalizado el ejercicio⁵ mediante la activación del sistema nervioso autonómico, inmediatamente después de terminar la actividad máxima⁶.

Además de su utilidad para evaluar la condición física, la frecuencia cardíaca de recuperación (FCR) después de ejercicio máximo en los minutos inmediatamente posteriores a la finalización de la actividad también es un indicador válido del riesgo de muerte súbita durante el ejercicio⁷. Debido al número relativamente elevado de casos y a la notoriedad de este tipo de muertes, la monitorización de la FCR ha ganado importancia como herramienta no invasiva de gran utilidad para evaluar la salud cardiovascular y la condición física⁸.

Según nuestro conocimiento, no existen estudios previos que hayan analizado o evaluado la evolución de la FCR siguiendo un protocolo de entrenamiento de fuerza-resistencia en altitud simulada en las extremidades inferiores, ni se ha tratado el impacto del estímulo de entrenamiento sobre el sistema cardiovascular.

La investigación científica sobre los beneficios del entrenamiento y la exposición aguda, crónica o intermitente a la hipoxia en condiciones de altitud reales o simuladas es extensa^{9,10}. El interés en este tema surgió debido a los excelentes resultados en los eventos de resistencia (con metabolismo aeróbico predominante) logrados por los atletas africanos que vivían a altitudes moderadas¹¹. La incursión de estos atletas en los Juegos Olímpicos de México (1968) y su abrumadora superioridad en estos eventos esti-

muló los estudios que trataban de encontrar explicación a estas diferencias cuantitativas en el rendimiento físico^{12,13}.

El entrenamiento en altitud (real o simulado) es ampliamente conocido por favorecer el rendimiento aeróbico^{9,10}, pero también hay evidencias de una mejora en la capacidad anaeróbica¹⁴⁻¹⁶. En los últimos años, el entrenamiento en hipoxia está disponible para más personas mediante cámaras de altitud (hipoxia hipobárica) y tiendas hipóxicas (hipoxia normobárica). No se han asociado riesgos para la salud con estas prácticas¹⁷.

Los cambios hematológicos y las adaptaciones musculares son los principales beneficios de pasar tiempo a altitudes moderadas^{18,19}, mejorando, de este modo, el rendimiento. El incremento de la masa de glóbulos rojos y, posteriormente, del transporte de oxígeno y de la capacidad aeróbica²⁰ y las adaptaciones específicas mejoradas del músculo esquelético al entorno hipóxico podrían también favorecer la resistencia anaeróbica²¹, ya que la mejora del metabolismo anaeróbico en reposo puede incrementar la capacidad de almacenamiento y la eliminación de lactato muscular²².

Aquí estudiamos la respuesta del sistema cardiovascular tras una prueba anaeróbica máxima siguiendo un protocolo de entrenamiento de resistencia de las extremidades inferiores bajo un programa de exposición intermitente a altitud simulada. Evaluamos el descenso de la frecuencia cardíaca durante 3 min tras finalizar la prueba. Las pruebas estaban compuestas por 60 s de saltos con contramovimiento^{23,24} y se realizaron a nivel del mar. La FCR se consideró como indicador de la mejora de la condición física. El índice de recuperación de la frecuencia cardíaca (IRFC) se calculó mediante la aplicación de la fórmula descrita por Lamiel-Luengo^{1,3}.

Tabla 1 Datos antropométricos de los sujetos (n = 12)

Edad (años)	24,1 ± 4,21
Altura (cm)	174,3 ± 7,47
Masa corporal (kg)	68,9 ± 7,4
Índice de masa corporal	22,4 ± 1,81

Materiales y métodos

El diseño de este estudio es similar al de un ensayo clínico. El programa de entrenamiento se realizó en dos centros. Las edades de los sujetos estaban entre los 19 y los 33 años (tabla 1). Todos eran estudiantes o profesores de educación física que no practicaban deportes de élite pero tenían una condición física aceptable. Ninguno de los sujetos era fumador, y todos ellos estaban presumiblemente sanos. Todos los sujetos aceptaron participar en el estudio de forma voluntaria. Asistieron a dos sesiones informativas antes de comenzar el estudio. Durante la primera sesión fueron informados sobre los objetivos del estudio, la naturaleza y los riesgos del entrenamiento y las pruebas de evaluación que se les aplicarían. El estudio se diseñó de acuerdo con los estándares médicos del Comité Ético de la Universidad de Barcelona y los principios de la Declaración de Helsinki de 1975, revisada en 1983. En la segunda sesión los sujetos se familiarizaron con los procedimientos de entrenamiento. En base a los resultados de la prueba inicial (PRE), se les asignó al grupo de hipoxia (HIP, $n = 5$) o normoxia (NOR, $n = 7$) para lograr la homogeneidad en el género y en la condición física⁶. Ambos grupos entrenaron en las mismas condiciones de tiempo y horario, volumen de trabajo y material utilizado, con la única diferencia de la exposición a un entorno normóxico e hipóxico, respectivamente. Todos los sujetos fueron sometidos a 12 sesiones de entrenamiento específicas en las que se mantuvieron las características del esfuerzo a lo largo del programa, con un nivel de ejecución rápido pero sin alcanzar el fallo muscular. Cada sesión incluía ejercicios adicionales de estiramientos compensatorios (tendones, iliopsoas, cuádriceps, región lumbar, abdomen, etc.). El protocolo de entrenamiento para el grupo HIP se realizó en una cámara hipobárica en el campus de Bellvitge (Barcelona) a una presión barométrica de 760 hPa (570 mmHg), que equivale a 2.500 m sobre el nivel del mar, correspondientes a la presión barométrica geográfica en la mayoría de los centros de entrenamiento en altitud^{17,27}. El grupo NOR entrenó en el centro de Montjuïc (Barcelona) del Instituto Nacional de Educación Física de Cataluña (INEFC) (75 m sobre el nivel del mar).

El entrenamiento de fuerza específico de las extremidades inferiores se programó con el objetivo de mejorar su capacidad anaeróbica láctica y, de este modo, su capacidad de salto y su tiempo de reacción^{24,25}. El programa de entrenamiento incluía 12 sesiones (3 días por semana; 4 semanas) orientadas a entrenar específicamente la fuerza-resistencia de las extremidades inferiores mediante medias sentadillas, saltos de sentadilla y saltos. Todos los sujetos hicieron un calentamiento estándar en el que realizaron 4-5 min de ejercicio aeróbico (principalmente ciclismo estático) seguido de estiramientos estáticos y actividad dinámica. Posteriormente realizaron una serie de ejercicios de calentamiento con un volumen de trabajo inferior que los ejercicios individuales prescritos para cada sesión de entrenamiento. El entrenamiento principal era de intensidad elevada (con un volumen de trabajo prescrito de forma individual) y diseñado para ser adecuado para la naturaleza de la prueba de valoración del rendimiento propuesta (una de saltos con contramovimiento durante 60 s). El volumen de trabajo se incrementó ligeramente durante las 2 primeras semanas pero no alcanzó el nivel máximo. Se controló la velocidad de ejecución y los sujetos no separaron los

talones del suelo. El tiempo de recuperación entre ejercicios no se completó para inducir la fatiga y la acumulación muscular de metabolitos (lactato, H^+ , etc.). El objetivo era mejorar la capacidad anaeróbica láctica, la capacidad de almacenamiento muscular y la depuración sanguínea. Este entrenamiento puede describirse como una sucesión de intervalos cortos intensos. Durante las últimas 2 semanas del programa el entrenamiento principal se realizó a intensidad supramáxima pero con una marcada reducción del volumen en comparación con las 2 primeras semanas. La velocidad de ejecución máxima pertenecía a los saltos con carga (semana 3) y a los saltos sin carga (semana 4). Las recuperaciones entre series también eran superiores. El volumen aproximado era de 350-380 repeticiones/semana (semana 1), 500-530 repeticiones/semana (semana 2), 300-320 repeticiones/semana (semana 3) y 200-220 repeticiones/semana (semana 4). Un ejemplo de las sesiones para un individuo representativo sería:

- Semana 1, una serie, 15 repeticiones de 3 ejercicios con 1 min de recuperación entre ejercicios. La sesión completa consistió en 3 de estas series con una recuperación intermedia de 6 min.
- Semana 2, dos series, con 8 min de recuperación intermedia, compuestas de 4 ejercicios (25 repeticiones) con 90 s de recuperación entre ejercicios.
- Semana 3, tres series, con 5 min de recuperación entre ellas, compuestas de 5 repeticiones de 10 ejercicios con 45 s de recuperación entre ejercicios.
- Semana 4, tres series, con 6 min de recuperación entre ellas, compuestas de 2 ejercicios de 10 saltos con 2 min de recuperación entre ejercicios.

El material utilizado para las sesiones consistía en barras olímpicas y pesas libres. Se utilizaron metrónomos para controlar el ritmo de ejecución y la intensidad²⁶. La velocidad de ejecución varió de explosiva rápida controlada a rápida, siguiendo el paradigma de entrenamiento cruzado como método más apropiado para mejorar la capacidad de salto²⁵.

Para estudiar los cambios en la capacidad anaeróbica láctica, se realizó una prueba de saltos continuos durante 60 s. Se utilizó una plataforma de contactos (Chronojump) siguiendo el protocolo de Bosco^{23,24} para valorar la altura media y el tiempo de suspensión en el aire para cada salto. La frecuencia cardíaca se controló durante la prueba con cardiotacómetros estándar (Polar S810i y RS800) y el período de recuperación y los datos se transfirieron mediante puertos infrarrojos a un PC. Los datos se procesaron con software Polar (Polar Protrainer 5.0). Se recogieron datos desde la intensidad de implementación más alta y se examinó la FCR desde la frecuencia cardíaca máxima alcanzada, al finalizar la prueba CMJ 60 s. Al terminar las pruebas, los sujetos se tumbaron en una camilla y descansaron durante 15 min hasta recuperarse.

Para valorar la FCR, se aplicó la siguiente fórmula:

$$IRFC = \frac{FC_{max} - HR_i}{HR_{max\ teor} / FC_{max}}$$

donde FC_{max} es la frecuencia cardíaca máxima alcanzada en la prueba, HR_i es la frecuencia de latido en los minutos 1,

Tabla 2 Valores individuales de masa corporal y frecuencias cardíacas basal (FCB) y pico (FCP) en normoxia e hipoxia

Código de sujeto	Edad	Masa corporal	FCB	FCM
<i>Grupo normoxia</i>				
NOR 1	20	70,6 (-0,8)	81 (-6)	182 (+1)
NOR 2	24	71 (-0,4)	77 (-6)	179 (+11)
NOR 3	24	64,6 (+0,6)	91 (-22)	186 (-1)
NOR 4	19	61 (-1,9)	73 (-7)	180 (+4)
NOR 5	33	74,3 (-0,9)	54 (-1)	176 (-1)
NOR 6	26	85,2 (-0,8)	71 (-13)	175 (+7)
NOR 7	25	79,0 (-0,5)	59 (+2)	188 (+7)
NOR media	24,4 ± 4,6	72,2 ± 8,2	72,3 ± 12,7	179,8 ± 4,8
<i>Grupo hipoxia</i>				
HIP 1	29	70,8 (0)	46 (-4)	149 (+13)
HIP 2	24	70,2 (-0,2)	56 (+8)	160 (+5)
HIP 3	22	59,2 (-1,8)	81 (-9)	184 (-1)
HIP 4	18	66 (+0,6)	74 (-11)	186 (-19)
HIP 5	27	59,0 (+1)	59 (-5)	161 (+1)
HIP media	24,0 ± 4,3	65,0 ± 5,7	63,2 ± 14,1	168 ± 16,2

Los valores son pre-entrenamiento. Los paréntesis muestran la diferencia en la prueba post-entrenamiento.

2 y 3 del período de recuperación respectivamente y HR_{\max}^{teor} es la frecuencia cardíaca máxima teórica para cada sujeto utilizando el siguiente cálculo: Hombres: 220 - edad en años y Mujeres: 226 - edad en años.

Cada sujeto cumplimentó un formulario de seguimiento diario durante el programa de entrenamiento. Se pidió a los sujetos que realizaran una comprobación diaria de la frecuencia cardíaca basal al despertar (al despertar, en reposo) durante 60 s. Además, en un intento por asociar la percepción de estrés individual con el posible efecto del entrenamiento en variables fisiológicas cuantificables, se pidió a los sujetos que proporcionaran un análisis subjetivo de la percepción de fatiga acumulativa y la sensación de recuperación de la sesión de entrenamiento anterior.

Análisis estadístico

Se comparó el IRFC entre los dos grupos experimentales utilizando la prueba t de Student para muestras pareadas (resultados pre y post en cada grupo) y la prueba-t entre grupos. Para considerar el nivel de significación se utilizó

$p < 0,05$. Los errores medios y estándar de la muestra se presentan mediante el acrónimo ± EE.

Resultados

En la tabla 1 se muestran los datos antropométricos de los sujetos que participaron en el estudio.

La tabla 2 muestra los cambios individuales en la masa corporal y las frecuencias cardíacas basal y pico al comparar las dos pruebas realizadas antes y al finalizar (diferencia en paréntesis relativa a la prueba anterior) el programa de entrenamiento. La tabla 3 presenta los valores del IRFC para los primeros 3 min tras la finalización de la prueba de salto. La tabla 4 muestra el análisis estadístico de los datos del IRFC y los valores P correspondientes y su significación estadística (fig. 1).

Cambios en la masa corporal

El grupo NOR registró un descenso del peso corporal tras el programa de entrenamiento ($1,8 \pm 0,74\%$). En el grupo HIP

Tabla 3 Índice de recuperación de la frecuencia cardíaca (IRFC) en los primeros 3 min tras finalizar la prueba. Los valores se presentan para los grupos en normoxia e hipoxia. Protocolos pre y post entrenamiento

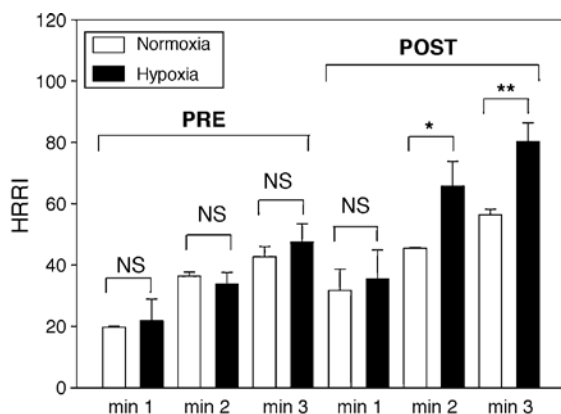
	NOR		HIP	
	Pre	Post	Pre	Post
FCB	72,2 ± 12,7	64 ± 6,76	63,2 ± 14,1	59 ± 10,2
FCP	179,8 ± 4,8	183,5 ± 10,21	168,0 ± 16,2	167,8 ± 8,8
IRFC 1 min	19,7 ± 0,5	32,55 ± 6,2	23,8 ± 7,0	37,4 ± 7,5
IRFC 2 min	35,7 ± 2,0	45,6 ± 0,2	33,7 ± 12,6	63,2 ± 10,5*
IRFC 3 min	43,5 ± 2,5	56 ± 2,2	46,88 ± 14,9	75,6 ± 14,6*

FCB: frecuencia cardíaca basal; FCP: frecuencia cardíaca pico; IRFC 1 min, IRFC 2 min, IRFC 3 min: índice de recuperación de la frecuencia cardíaca en los minutos 1, 2 y 3 tras la finalización de la prueba; NOR: grupo normoxia; HIP: grupo hipoxia.

* Significación estadística entre NOR e HIP en los datos post entrenamiento.

Tabla 4 Análisis estadístico (prueba t de Student) entre los grupos sobre la base de los datos pre y post entrenamiento. El nivel de significación estadística (SS) se consideró $p < 0,05$

Prueba t pre entrenamiento NOR versus HIP			Prueba t post entrenamiento NOR versus HIP		
Tiempo (min)	Valor P	SS	Tiempo (min)	Valor P	SS
1	0,22	NO	1	0,38	No
2	0,46	NO	2	0,03	Sí
3	0,41	NO	3	0,02	Sí
Prueba t pareada PRE versus PRO en el grupo normoxia			Prueba t pareada PRE versus PRO en el grupo hipoxia		
Tiempo (min)	Valor P	SS	Tiempo (min)	Valor P	SS
1	0,07	NO	1	0,04	Sí
2	0,01	SÍ	2	0,005	Sí
3	0,02	SÍ	3	0,005	Sí



* Significación estadística entre grupos post-entrenamiento en el índice de recuperación de la frecuencia cardíaca en el minuto 2 ($p = 0,03$).

** Significación estadística entre grupos post-entrenamiento en el índice de recuperación de la frecuencia cardíaca en el minuto 3 ($p = 0,02$).

Figura 1 Significaciones estadísticas entre grupos en el post entrenamiento.

se encontró la tendencia inversa, un leve incremento del peso corporal ($0,5 \pm 1,07\%$). Sin embargo, estas diferencias no eran significativas a nivel estadístico.

Valores de frecuencia cardíaca basal y pico

Con alguna variabilidad individual, la frecuencia cardíaca basal mostró un descenso en ambos grupos tras el programa de entrenamiento. En el grupo NOR hubo un descenso significativo a nivel estadístico de $-11,5\%$ ($p = 0,045$) de PRE a POST, mientras que en el grupo HIP se encontró un cambio no significativo a nivel estadístico ($p = 0,273$) de $-5,2\%$. La frecuencia cardíaca pico (FCP) en ambos grupos no mostró cambios relevantes o significativos a nivel estadístico al comparar los datos PRE versus POST.

IRFC

La tabla 4 muestra la significación estadística al comparar los valores de IRFC en condiciones de PRE y POST entrenamiento entre los grupos NOR e HIP (panel superior). No se

detectaron diferencias significativas a nivel estadístico entre los grupos NOR e HIP en condiciones de PRE entrenamiento. Sin embargo, hubo una mejora significativa en los minutos 2 ($p = 0,03$) y 3 ($p = 0,05$) en el grupo HIP en la prueba POST entrenamiento en comparación con el grupo NOR.

Ambos protocolos de entrenamiento (normoxia e hipoxia) mejoraron el IRFC (panel inferior). En el grupo HIP esta mejora era significativa a nivel estadístico durante los 3 primeros minutos, pero sólo en los minutos 2 y 3 en el grupo NOR.

Discusión

Los sujetos fueron correctamente asignados a los dos grupos para homogeneizar la muestra, como puede observarse al examinar los valores iniciales de forma física (comparación de los datos PRE entre los dos grupos). Además, nuestro protocolo de entrenamiento de fuerza-resistencia (12 sesiones, 4 semanas, 3 días a la semana) mejoró el IRFC en los sujetos NOR e HIP. A partir de los resultados obtenidos, concluimos que la fuerza-resistencia de las extremidades inferiores mejoró en hipoxia y normoxia, aumentando, de este modo, la capacidad de salto de todos los sujetos. Sin embargo, esta mejora fue mayor en los sujetos entrenados en hipoxia. Nuestros resultados muestran que el IRFC del grupo HIP era mejor que el del grupo de control (NOR). Se detectaron diferencias estadísticas significativas entre los grupos en los minutos 2 ($p = 0,03$) y 3 ($p = 0,05$) del post entrenamiento. El grupo HIP mostró valores de recuperación más altos, llegando casi a alcanzar valores basales en el minuto 3. Este hallazgo indica una mejora en la adaptación cardiovascular al ejercicio y, de este modo, una mejor forma física^{2,7,14}.

El entrenamiento en altitud produce una mayor intensidad en el punto de partida del entrenamiento, particularmente durante los cambios de enzimas musculares específicas y, de este modo, tienen como resultado un incremento de la intensidad de la carrera en el entrenamiento^{24,26}. Proponemos que la mejora observada en el IRFC se debe a un estímulo del entrenamiento superior a altitud simulada, a pesar de aplicar la misma cantidad de trabajo a intensidad relativa que a nivel del mar. De este modo, con el

mismo grado de esfuerzo que a nivel del mar, el entrenamiento en un entorno hipóxico incrementa la intensidad del ejercicio, desde puntos de vista subjetivos y objetivos. El estímulo adicional de hipoxia puede provocar respuestas adaptativas más intensas a nivel muscular mediante el incremento de la intensidad relativa del esfuerzo. Así, según nuestros resultados, un programa de entrenamiento en fuerza-resistencia realizado en hipoxia moderada podría ser tan útil para mejorar la forma física y la FCR de los atletas como un entrenamiento igual en normoxia. Por lo tanto, debemos considerar que el tamaño de la muestra era demasiado reducido para establecer conclusiones definitivas, y es necesario llevar a cabo más estudios.

El ejercicio físico en hipoxia implica una serie de cambios cardiovasculares. Hay un incremento de la frecuencia cardíaca en reposo y una mayor hiperventilación para compensar la reducción del oxígeno disponible²⁸. Así pues, al menos parcialmente, el ejercicio de alta intensidad no logra frecuencias cardíacas tan altas como a nivel del mar²⁹. La hipoxia afecta directamente al tono vascular de los vasos de resistencia pulmonar y sistémica e incrementa la ventilación y la actividad simpática mediante la estimulación de quimiorreceptores periféricos³⁰. Como resultado de la hipoxia aguda, el corazón incrementa la frecuencia cardíaca (en reposo y durante el ejercicio), la contractilidad miocárdica y el gasto cardíaco. El incremento de la frecuencia cardíaca está directamente relacionado con una mejora de la actividad simpática y un descenso de la actividad vagal. Así, la frecuencia cardíaca es superior en altitud, aunque la frecuencia cardíaca máxima es inferior que en normoxia. La mejora de la actividad neuronal parasimpática justifica la reducción de la frecuencia cardíaca durante el ejercicio. Además, en hipoxia aguda, las arterias coronarias epicárdicas se dilatan y se incrementa repentinamente la contractilidad cardíaca³¹.

La mejora de la respuesta cardiorrespiratoria observada en el grupo HIP podría deberse a una mayor intensidad relativa de la misma cantidad de trabajo que en el grupo NOR.

La reducción de la frecuencia cardíaca en el post ejercicio es típicamente exponencial³².

La reducción durante el primer minuto está marcada por variables como el bloqueo parasimpático. Por el contrario, en la segunda fase (tras el primer minuto), se considera que actúa la reducción gradual de la actividad simpática y la eliminación constante de metabolitos plasmáticos (adrenalina, lactato, H⁺, etc.) causada por el ejercicio de intensidad alta³³. Sobre la base de esta idea, el protocolo de entrenamiento cambió de forma significativa el descenso de la FCR del grupo HIP frente al grupo NOR durante el post entrenamiento. Esta observación podría atribuirse a la marcada actividad simpática y al incremento de la eliminación de metabolitos plasmáticos, como se reflejó en el grupo HIP mediante la mejora en el tiempo del IRFC. De este modo, la eliminación de metabolitos plasmáticos y la actividad plasmática se alteró tras 12 sesiones de hipoxia intermitente.

La valoración de la FCR desde el ejercicio máximo en los primeros minutos tras la realización de ejercicio es un cálculo válido del riesgo de muerte súbita. Debido al incremento en el número de casos de muerte súbita, este enfo-

que proporciona una útil herramienta no invasiva para valorar la salud y la forma física de los sujetos⁸.

Se ha informado de diferentes protocolos para medir el esfuerzo percibido, que está estrechamente relacionado con los efectos fisiológicos del entrenamiento. De hecho, se ha mostrado que los factores fisiológicos tienen una influencia mayor que los psicológicos en la percepción de la fatiga, ya que el entrenamiento cambia la forma en la que se percibe la tensión³⁴.

En nuestro caso, la percepción subjetiva del esfuerzo era superior en el grupo HIP (datos no publicados), apoyando de este modo la hipótesis descrita más arriba. Dado que no es posible valorar el efecto de la autosugestión o de un placebo, y que también es imposible realizar un estudio experimental doble ciego (los sujetos saben si están entrenando en la cámara o no), sólo podemos comparar dos grupos diferentes²⁷.

Un efecto negativo importante del entrenamiento en altitud en ciertas modalidades deportivas es la limitación de la intensidad de la cantidad de trabajo (relativa a nivel del mar) y la dificultad de mantener intensidades altas de ejecución motora. Ambos factores pueden impedir la realización de entrenamientos específicos válidos en hipoxia. Se ha argumentado que la dificultad en la ejecución motora, a altitud real o simulada, reduce la eficacia de la coordinación motora necesaria para la implementación de medidas técnicas específicas (zancada, brazada, cadencia, etc.) debido a la dificultad de mantener las mismas intensidades que a nivel del mar³⁵. En nuestro caso, la realización de saltos de sentadilla se mantuvo y se realizó técnicamente de la misma forma por ambos grupos.

Concluimos que un programa de entrenamiento físico de alta intensidad (fuerza-resistencia) (4 semanas, 3 días por semana) en hipoxia mejora el IRFC en los primeros 3 min tras la finalización del ejercicio comparado con el mismo entrenamiento a nivel del mar. Nuestros protocolos de entrenamiento en hipoxia han permitido una mejor recuperación desde la estimulación máxima y también han mejorado la forma física y el rendimiento. Además, la percepción individual subjetiva del esfuerzo (mayor en HIP que en NOR) apoya la hipótesis de un incremento de la intensidad relativa del esfuerzo en el entrenamiento del grupo a altitud simulada.

Los efectos fisiológicos y psicológicos del entrenamiento en una cámara hipobárica podrían explicar la mejora en el rendimiento del grupo HIP en comparación con el mismo entrenamiento del grupo NOR. Además, para evaluar de forma objetiva la mejora en el rendimiento debería considerarse el posible incremento de la intensidad relativa del esfuerzo realizado en hipoxia. Consideramos que nuestras conclusiones pueden contribuir a nuevas aplicaciones en el campo del entrenamiento de alto rendimiento para atletas.

Presentación

Los datos de la frecuencia cardíaca en la fase de recuperación se presentaron en el VI Congreso Internacional de la Asociación Española de Ciencias del Deporte en Elche, el 6 de octubre de 2010. Se realizó una presentación en póster de 10 min, con preguntas abiertas, de 11 a 11.15 h.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Este estudio no habría sido posible sin la generosa colaboración de todos los voluntarios. Los autores también agradecen al Dr. Casimiro Javierre (Facultad de Medicina, UB) y a Rubén Martínez (HUB) su ayuda y supervisión médica. Los autores también agradecen a D. Ignacio Montoya (ZR Barcinova) y D. Santiago Blázquez (Fibre Medic) su cooperación y el material prestado.

Bibliografía

- Calderon FJ, Cruz E, Montoya J. Estudio comparado de la recuperación de la frecuencia cardíaca en deportistas de fondo: triatletas, atletas, nadadores y ciclistas. Área de fisiología del ejercicio-Rendimiento deportivo, 261. I Congreso de la Asociación deportiva de Ciencias del deporte. Universidad de Extremadura.
- Darr K, Basset B, Morgan B, Thomas D. Effects of age and training status on heart rate recovery after peak exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 1988;254:H340-3.
- Calderón Montero FJ, Brita Paja JL, González C, Machota V. Estudio de la recuperación de la frecuencia cardíaca en deportistas de élite. *Revista Española de la Medicina de la Educación Física y el Deporte.* 1997;6:101-5.
- Savin WM, Davidson DM, Haskell WL. Autonomic contribution to heart rate recovery from exercise in humans. *J Appl Physiology.* 1982;53:1572-6.
- Imai K, Sato H, Hori M. Vagally mediated heart rate recovery after exercise is accelerated in athletes but blunted in patients with chronic heart failure. *J Am Coll Cardiol.* 1994;24:1529-35.
- Arai Y, Saul JP, Albrecht P. Modulation of cardiac autonomic activity during and immediately after exercise. *Am J Physiol.* 1989;256:H132-41.
- Cole C, Blackstone E, Pashkow F, Snader C, Lauer M. HRR immediately after exercise as a predictor of mortality. *Hellenic Endocr Soc.* 1999;341:1351-7.
- Jouven X, Empana JP, Schwartz P, Desnos M, Courbon D, Ducimetiere P. Heart rate recovery during exercise as a predictor of sudden death. *N Engl J Med.* 2005;352:1951-8.
- Levine BD. Intermittent hypoxic training: fact and fancy. *High Alt Med Biol.* 2002;3:177-93.
- Martino M, Myers K, Bishop P. Effects of 21 days training at altitude on sea-level anaerobic performance in competitive swimmers. *Med Sci Sports Exerc.* 1996;27:55.
- Weston AR, Mbambo Z, Myburgh KH. Running economy of African and Caucasian distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32:1130-4.
- Frisancho AR, Martinez C, Velasquez T, Sanchez J, Montoye H. Influence of developmental adaptation on aerobic capacity at high altitude. *J Appl Physiol.* 1973;34:176-80.
- Kollias J, Powers SK, Thompson D. Work capacity of longtime residents and newcomers to altitude. *J Appl Physiology.* 1968;64:1486-92.
- Bayley D, Davies B. Physiological implications of altitude training for endurance performance at sea level: a review. *Br J Sports Med.* 1997;31:183-90.
- Hendriksen IJ, Meeuwse T. The effect of intermittent training in hypobaric on sea level a cross over study in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2003;88 4-5:396-403.
- Ogida F, Tobata T. The effects of high-intensity intermittent training under a hypobaric hypoxia condition on anaerobic capacity and maximal oxygen uptake. En: Keskinen KL, Komi PV, Hollander AP, editores. *Biomechanics and Medicine of Swimming VIII.* Jyväskylä, Finlandia: Gummerus Printing; 1999. p. 423-7.
- Stray-Gundersen J, Chapman RF, Levine B. "Living high, training low" altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *J Appl Physiol.* 2001;91:1113-20.
- Burtscher M, Nachbauer W, Baumgartl P, Philadelphia M. Benefits of training at moderate altitude versus sea level training in amateur runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1996;74: 558-63.
- Levine BD, Stray-Gundersen J. "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J Appl Physiol.* 1997;83:102-12.
- Brugniaux JV, Schmitt L, Robach P, Nicolet G, Fouillot JP, Moutereau S, et al. Eighteen days of "living high, training low" stimulate erythropoiesis and enhance aerobic performance in elite middle-distance runners. *J Appl Physiol.* 2006;100:203-11.
- Bonnetti DL, Hopkins WG, Kilding AE. High-intensity kayak performance after adaptation to intermittent hypoxia. *Int J Sports Physiol Perform.* 2006;1:246-60.
- Gore CJ, Hahn AG, Aughey RJ, Martin DT, Ashenden MJ, Clark SA, et al. Live high:train low increases muscle buffering capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiol Scand.* 2001;173:275-86.
- Bosco C, Luhtanen P, Komi PV. A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *Eur J Appl Physiol.* 1983;50: 273-82.
- Bosco C, Komi PV, Thyhany G, Feleke G, Apor P. Mechanical power test and fibre composition of human leg extensor muscles. *Eur J Appl Physiol.* 1983;51:129-35.
- Verhoshansky Y. Teoría y metodología del entrenamiento deportivo. Barcelona: Paidotribo; 2001.
- Moras G, Rodríguez-Jimenez S, Busquets A, Tous-Fajardo J, Pozzo M, Mujika I. A Metronome for controlling the mean velocity during the bench press exercise. *J Strength Cond Res.* 2009;23:926-31.
- Beedie CJ. Placebo effects in competitive sports: qualitative data. *J Sports Sci Med.* 2007;6:21-8.
- Heistad DD, Abboud FM. Circulatory adjustments to hypoxia. *Circulation.* 1980;61:463-70.
- Bärtsch P, Gibbs SR. Effect of altitude on the heart and the lungs. *Circulation.* 2007;116:2191-202.
- Perini R, Orizio C, Comandè A, Castellano M, Beschi M, Veicsteinas A. Plasma norepinephrine and heart rate dynamics during recovery from submaximal exercise in man. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1989;58:879-83.
- Buchheit M, Papelier Y, Laursen P, Ahmadi S. Noninvasive assessment of cardiac parasympathetic function: postexercise heart rate or heart rate variability? *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 2007;293:H8-10.
- Noakes TD. Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. *Scand J Med Sci Sports.* 2000;10:123-40.
- Platonov V. La adaptación en el deporte. Barcelona: Paidotribo; 1991.
- Borg G, Borg E. A new generation of scaling methods: level-anchored ratio scaling. *Psychologica.* 2001;28:15-45.
- Amann M, Pegelow DF, Jacques AJ, Dempsey JA. Inspiratory muscle work in acute hypoxia influences locomotor muscle fatigue and exercise performance of healthy humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2007;293:R2036-45.