Research

Efecto del Entrenamiento Hipóxico de Alta Intensidad sobre el Rendimiento en Natación a Nivel del Mar

M. J Truijens[1,2], Benjamin D Levine[1], J. Dow[1] y H. M Toussaint[2]

[1]*Institute for Exercise and Environmental Medicine, Presbyterian Hospital, and University of Texas Southwestern Medical Center at Dallas, Dallas, Texas 75231.*
[2]*Department of Kinesiology, Faculty of Human Movement Sciences, Vrije Universiteit, 1081 BT Amsterdam, The Nederlands*

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar la hipótesis de que el entrenamiento hipóxico de alta intensidad mejora más el rendimiento al nivel del mar que el entrenamiento equivalente en normoxia. Dieciséis nadadores universitarios y masters bien entrenados (10 mujeres, 6 hombres) completaron un programa de entrenamiento de 5 semanas, que consistió en tres sesiones de entrenamiento de alta intensidad en un ergómetro acuático de corriente artificial y sesiones suplementarias de baja o moderada intensidad en pileta, cada semana. Los sujetos fueron agrupados por género, nivel de rendimiento, e historia de entrenamiento, y fueron asignados a un grupo de entrenamiento intervalado hipóxico [Hypo; fracción de O_2 inspirado (FI_{O2}= 15.3%, equivalente a una altitud simulada de 2500 m], o a un grupo de entrenamiento intervalado en normoxia [Norm; FI_{O2}=20.9%], en un diseño aleatorio, doble ciego. Todos los entrenamientos en pileta se realizaron bajo condiciones normalizadas. Las mediciones principales de rendimiento fueron las pruebas de 100 y 400 m de estilo libre. Los resultados de laboratorio incluyeron el máximo consumo de O_2 (VO_{2max}), capacidad anaeróbica (déficit de O_2 acumulado), y economía en el nado. Se hallaron mejoras significativas (p=0.02 y <0.001 para las pruebas de 100 y 400 m, respectivamente) en el rendimiento, tanto en los 100 m [-1.2% en el grupo Norm: -0.7 seg. (límite de confianza 95%: +0.2 a –1.7 seg.); -1.1% en el grupo Hypo: -0.8 seg. (límite de confianza de 95%: -0.1 a -1.5 seg)], como en los 400 mts [-1.2% en el grupo Norm: -3.6 seg. (-1.8 a -5.5 seg.), -1.7% en el grupo Hypo: -5.3seg. (-2.3 a -8.3 seg)]. No hubo diferencias significativas entre los grupos para cada distancia (ANOVA, interacción: p=0.91 y 0.36 para las pruebas de 100 y 400 mts. respectivamente). El VO_{2max} mejoró significativamente (Norm: 0.16±0.23 l/min, 6.4± 8.1 %; Hypo: 0.11±0.18 l/min, 4.2±7.0 %). No hubo diferencias significativas entre los grupos (p=0.58). Nuestra conclusión es que 5 semanas de entrenamiento en ergómetro acuático mejora los rendimientos en natación al nivel del mar y el VO_{2max} en nadadores bien entrenados, sin efectos adicionales del entrenamiento hipóxico.

Palabras Clave: hipoxia, capacidad aeróbica, capacidad anaeróbica

INTRODUCCION

El efecto del entrenamiento en la altura ocurre en función, tanto de la aclimatación a la altura y el ejercicio hipóxico (18). En los deportes de resistencia, predomina el efecto de la aclimatación y por ello se ha demostrado que “vivir en lo alto, y entrenar abajo” es una estrategia efectiva de entrenamiento en la altura para mejorar el rendimiento de resistencia a nivel del mar (18, 19, 32), con el ejercicio hipóxico empeorando, más que mejorando la ventaja de rendimiento para este enfoque.

Sin embargo, la efectividad del entrenamiento hipóxico sin aclimatación a la altura, llamado entrenamiento hipóxico intermitente (EHT), sigue siendo controversial. Un distinguido estudio sugirió que el entrenamiento hipóxico podría incluir adaptaciones locales a nivel muscular (incrementos en la mioglobina y las enzimas oxidativas) que podrían ser beneficiosas para el rendimiento de resistencia (35). Mas recientemente, se ha mostrado que el entrenamiento hipóxico incrementa la transcripción de ARMm, para el factor 1α inducible por hipoxia, aunque los beneficios de este proceso para el rendimiento en el ejercicio no fueron demostrados (42). Sistemáticamente, la mayoría de los estudios previos en esta área se han enfocado en atletas, y el entrenamiento ha sido predominantemente de naturaleza aeróbica (24, 36, 41). Sin embargo, los resultados de dicho entrenamiento no mostraron efectos significativos sobre los marcadores del rendimiento aeróbico, tal como el consumo máximo de oxigeno (VO_{2max}) (24, 36, 41).

En contraste, algunos reportes previos (4, 24, 36) han sugerido que el entrenamiento hipóxico intermitente puede mejorar el rendimiento “anaeróbico” o la alta producción de potencia. Esta sugerencia esta respaldada por la razón fisiológica de que, durante intensidades submáximas de ejercicio, en hipoxia, se ha observado un incremento de la dependencia sobre el metabolismo glucolítico (15, 25), aunque, aparentemente, la capacidad aeróbica máxima no es afectada (23). Además, varios estudios han demostrado que, para incrementar la capacidad anaeróbica, deben realizarse entrenamientos de alta intensidad (33, 34).

Hemos hipotetizado que para los deportes de relativamente alta intensidad y corta duración que requieren altas tasas del metabolismo anaeróbico para generar ATP, independientemente de la disponibilidad de oxigeno, la ventaja potencial del ejercicio hipóxico, si hay alguna, podría ser máximizada. La natación es un buen ejemplo de dichos deportes, en donde la mayoría de los eventos competitivos duran <2 minutos. Con respecto a esto, Ogita y Tabata (27) hallaron un 10% de incremento en la capacidad aeróbica, medida como el déficit de oxigeno acumulado (AOD) después de solo 2 semanas de entrenamiento hipóxico de alta intensidad en nueve nadadores de competición japoneses. Sin embargo, no se incluyó un grupo control. Por ello, persiste la cuestión de si la mejora fue un efecto de la adición de estímulos hipóxicos o solamente un efecto del entrenamiento en si mismo.

En suma, varios estudios sugieren efectos promisorios del entrenamiento hipóxico para la mejora de los rendimientos de relativamente alta intensidad y corta duración, sin embargo, ninguno de estos estudios ha generado evidencia conclusiva que respalde este método, y todos sufren de varias limitaciones.

De este modo, el presente estudio fue diseñado para investigar los efectos del entrenamiento hipóxico de alta intensidad en nadadores bien entrenados, utilizando un diseño de investigación doble ciego, aleatorio.

METODOS

Sujetos

Dieciséis nadadores competitivos (10 mujeres, 6 hombres) se reclutaron de equipos universitarios y de master de natación. Cinco compitieron en pruebas para el equipo olímpico de EE.UU, y 11 compitieron en campeonatos nacionales de Estados Unidos. Doce fueron premiados por la National Collegiate Athletic Association y/o por la US Masters Swimming All Americans; en el momento del estudio uno era el actual poseedor de múltiples récords mundiales en eventos para masters, y uno era el antiguo poseedor del récord americano. Otros tres eran nadadores recreacionales. Las características descriptivas individuales son proporcionadas en la Tabla 1.

Sujeto Nº	C/M	Genero	Especialización	Nivel	PB	RB* Fecha	Edad (años)	Altura (cm)	Masa Corporal (kg)	% de Grasa	VO_2 máx. (l/min)
Grupo Hipóxico											
1	C	F	Mariposa, Libre	OT, NCA, Nat.	59.4		20	173.5	70.5	17.1	64.6
2	C	F	IM	OT, NCAA, Nat.	62.5	62.5 (01)	19	160.3	54.7	12.9	58.4
3	C	F	Pecho	Nat	60.0		21	177.7	66.2	13.9	44.1
4	M	F	Pecho, Libre	USSM			27	166.8	68.2	17.1	54.7
5	M	M	Libre	OT, NCAA, Nat, USMS	51.4	51.7 (01)	30	187.5	81.9	8.5	48.4
6	M	M	Libre, Mariposa	NCAA, Nat, Int., USMS, WR Masters	53		38	185.8	87.2	13.5	47.8
7	M	M	Libre	USMS, Nat.	54	62.3 (00)	45	176.5	80.6	12.3	40.2
8	M	F	Libre	Recr.		75 (01)	31	166	60.5	17.1	43.2
Promedio							28.9	174.3	71.2	14.1	50.2
Grupo Normoxico											
1	C	F	Libre, Mariposa	Nat.	58.4	59.7 (01)	19	165.8	63	12.3	53.7
2	C	F	Libre	Nat.	60.2	61.2 (01)	19	176	68.7	18.2	41.5
3	C	F	Pecho	NCAA, Nat	61.7	63.5 (01)	21	175.3	65	13.8	45.9
4	M	F	Espalda, Mariposa	NCAA, Nat. Int., AR, OT, USMS	59.2		24	181	85.5	15.7	46.3
5	M	M	Espalda, Libre	OT, Nat.	52		27	185.9	77.3	8.5	56.3
6	M	M	IM, Espalda	USMS	57		39	171.1	80.6	19.1	45.8
7	M	M	Libre	Recr.			54	167.8	75.2	32.8	51.7
8	M	F	Libre	Recr		85 (01)	27	173	62.7	14	41.4
Promedio							28.8	174.5	72.3	15.7	47.8

Tabla 1. *Características de los sujetos. C/M, Universitarios o Masters; F, Mujer; M, Hombre; PB, mejor marca personal; RB, marca mas reciente; *i.e., mejor tiempo en los 100 m estilo libre dentro del año a partir del comienzo del estudio (entre paréntesis es el año de la marca, nótese que algunos especialistas de elite no poseen una mejor marca reciente en los 100 m estilo libre); VO_{2max}., máximo consumo de oxigeno medido durante la pre-evaluación; AR, Récord Americano, Int., Nivel Internacional; Nat, Nivel Nacional; NCAA, National Collegiate Athletic Association All American; OT, Pruebas Olímpicas; Recr., nivel recreacional; USMS, US Masters Swimming All-American; WR, récord mundial master.*

Todos los sujetos residían al nivel del mar e informaron por escrito de su consentimiento al protocolo aprobado por el Comité de Revisión Institucional del Texas Southwestern Medical Center y el Presbyterian Hospital de Dallas.

Diseño del Estudio

En la Figura 1 se muestra un bosquejo del diseño del estudio.

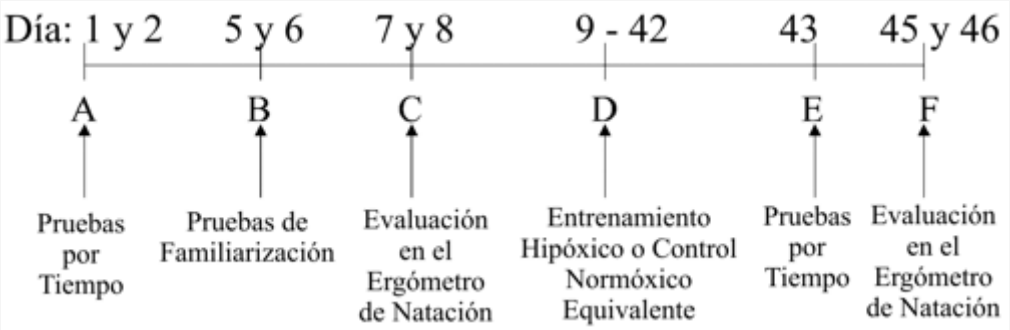

Figura 1. *El estudio consistió en las siguientes fases: Pruebas de tiempo iniciales en 100 y 400 mts (A), sesión única para la familiarización con los procedimientos de la evaluación y del entrenamiento (B); evaluación inicial de laboratorio (C); período de 5 semanas de entrenamiento con los nadadores divididos en 2 grupos por medio de un método aleatorio (D); repetición de las pruebas de tiempo (E), repetición de la serie de evaluaciones de laboratorio (F).*

Luego de familiarizarse con las técnicas de evaluación y de entrenamiento, se realizaron las pruebas de tiempo en pileta y en un ergómetro acuático de corriente artificial. Los sujetos fueron agrupados en pares por género, rendimiento en las pruebas de tiempo, e historia de entrenamiento, y asignados mediante aleatorización balanceada y estratificada al grupo control [vivir y entrenar en normoxia; fracción de oxigeno inspirado (FI_{O2})=20.9 ± 1.0%; n=8, 3 hombres ,5 mujeres] o al grupo experimental [vivir en normoxia y entrenar a alta intensidad en hipoxia (FI_{O2})=15.3 ± 0.1% en N2)]. Por medio de esta técnica, dentro de cada par agrupado, hubo un 50% de posibilidades de ser asignado al grupo control o al grupo experimental. Todos los sujetos participaron en un programa de entrenamiento de 5 semanas diseñado para incluir tres sesiones de entrenamiento de alta intensidad y al menos tres sesiones de entrenamiento de baja o moderada intensidad en cada semana. Las sesiones de entrenamiento de alta intensidad se realizaron en un ergómetro acuático de corriente artificial nadando solamente con brazadas de crawl frontal. Durante estas sesiones los nadadores usaban válvulas respiratorias especialmente diseñadas que fijaban verticalmente paralelos los tubos para la inspiración y expiración. Las válvulas en los tubos de inspiración y de expiración fueron ubicadas en una extensión de la boquilla para asegurar un mínimo “espacio muerto” de 30 ml (40). El tubo de inspiración (longitud: 1.65 m; diámetro: 36 mm) fue conectado a un gran reservorio que contenía la mezcla de gas para la normoxia o para la hipoxia, de acuerdo al diseño doble ciego. Ningún miembro de la investigación estuvo informado acerca de que sujetos pertenecían a cada grupo experimental o control, hasta que todos los datos fueron analizados. Por seguridad el contenido de oxigeno del gas inspirado desde el reservorio fue chequeado frecuentemente por un monitor independiente. Todos los gases se humidificaron antes de la inhalación. Los gases espirados pasaron a través de un tubo de 0.74 m de largo y 36 mm de diámetro. Las sesiones de entrenamiento en el ergómetro de natación fueron cuidadosamente controladas y monitoreadas por los miembros de la investigación.

Los programas de entrenamientos estuvieron basados en aquellos descriptos por Tabata y cols. (33, 34), y fueron diseñados para mejorar tanto la capacidad aeróbica como la anaeróbica. Estos consistieron en 10 repeticiones de 30 seg. de ejercicio con 15 seg. de pausa, 5 repeticiones de 1 minuto con 30 seg. de pausa y 5 repeticiones adicionales de 30 seg. con 15 seg de pausa entre cada repetición. Entre las series, la pausa fue de 2 min.. Los sujetos fueron vigorosamente alentados para completar las series; si eran capaces de completar >10 repeticiones, sumando las dos series de 5 repeticiones, la velocidad del ergómetro acuático era incrementada en 0.03-0.05 m/s.

Todos los entrenamientos de intensidad baja y moderada se realizaron en pileta, bajo condiciones de normoxia. Estos programas fueron determinados por los entrenadores de los nadadores. Sin embargo debido a que los sujetos agrupados eran miembros del mismo equipo universitario o master no hubo diferencias significativas en los programas de entrenamiento de pileta entre los grupos.

Evaluación del Rendimiento

El resultado principal de las mediciones de este estudio fue el rendimiento en la natación, medido tanto en pileta como en ergómetro acuático. En la Figura 1 se incluye un bosquejo del programa de evaluaciones.

Pruebas de Tiempo: 100 y 400 m estilo libre

Las pre- y post-evaluaciones de las pruebas de tiempo se realizaron en una piscina olímpica en Dallas entre las 4:30 y las 7:00 hs PM. Las pruebas de tiempo se realizaron en forma similar a los eventos normales de natación, largando las pruebas en grupos de cuatro a seis nadadores. Los sujetos nadaron primero la prueba de 100 m y tuvieron ~45 min. de descanso entre las pruebas. Las largadas se realizaron desde los cubos de largada utilizando un silbato como señal de partida. Los tiempos de llegada fueron medidos en duplicado utilizando cronómetros, con uno de los cronómetros funcionando solo como apoyo. La variabilidad día a día del rendimiento en los 100 m se determinó en series de pruebas de tiempo separadas y calculadas como la media ± el 95% del intervalo de confianza de la diferencia porcentual individual entre dos tiempos para los 100 m. Estas mediciones se realizaron 7 meses después del entrenamiento utilizando otros 13 nadadores (5 hombres, 8 mujeres) del mismo nivel de rendimiento y que representaban el mismo equipo universitario y, incluyendo 3 de los miembros del grupo preliminar de investigación. Los sujetos tuvieron 48 h entre las evaluaciones.

Evaluación en Ergómetro Acuático

Se utilizó un test supra-máximo para determinar el VO_{2max} y la capacidad anaeróbica. Luego de una entrada en calor de 10 minutos, los sujetos nadaron a un velocidad predeterminada (en base a las pruebas de familiarización y a los resultados de las pruebas de tiempo) hasta el agotamiento; este test estuvo diseñado para que la fatiga ocurriera entre los minutos 2 y 4. El agotamiento estuvo definido como la incapacidad para mantener el ritmo con la velocidad del flujo de agua (i.e. retroceder cerca de 2 m desde la posición inicial). Durante esta evaluación, los nadadores usaron la misma mascara descrita anteriormente, con el tubo para la inspiración en conexión abierta con el aire del cuarto, mientras que el tubo para la espiración estaba conectado, al final del mismo, a una serie de bolsas de Douglas.

VO_2 máx.

El consumo de oxigeno (VO_2) se midió simultáneamente con la técnica de bolsa de Douglas y mediante un sistema on-line para las mediciones respiración a respiración. Las bolsas de Douglas son consideradas como el patrón para todas las mediciones del VO_2. Los datos respiración a respiración sirvieron como apoyo y fueron utilizados para la identificación de estados estables, mesetas, y de patrones cinéticos en la curva VO_2–tiempo. El sistema on-line para las mediciones respiración a respiración consistía de cuatro válvulas de una vía para dirigir el flujo, dos líneas de muestreo para medir las fracciones de gases, y un sensor de turbina (VMM, Interface Associates) para medir la ventilación. Los datos del análisis respiración a respiración fueron almacenados en una computadora y analizados utilizando un programa especializado. Las fracciones de gas de las bolsas de Douglas fueron analizadas por un espectrómetro de masas (Marquette MGA 1100) que fue calibrado dos veces al día y ratificado después de cada evaluación, y que se utilizó tanto para las bolsas de Dougals como para el sistema respiración a respiración.

El volumen ventilatorio se midió con un espirómetro Tissot o con un medidor de gas seco (Rayfield Air Meter 9200). La comparación entre estos dos dispositivos inmediatamente antes del estudio confirmo su equivalencia (pendiente = 1.0, ordenada =0.0, r2 =1.0). El VO_{2max} fue definido como el valor más alto de VO_2 medido en al menos 30 seg. en una bolsa de Douglas. En el 100% de las evaluaciones, durante el nado supra-máximo, se alcanzó una meseta en el VO_2 que documentó la identificación del VO_{2max}. Se definió como meseta a la observación de que el VO_2 se mantuviera constante o disminuyera ligeramente durante el ejercicio continuo supra-máximo. Además, la frecuencia cardiaca fue monitoreada continuamente (Polar CIC, Port Washington, NY).

Potencia y Capacidad Anaeróbica

La potencia anaeróbica se estimó por medio de la relación entre la producción de potencia metabólica total (P_{met}) y la velocidad de nado al cubo (V^3) de acuerdo al método de Medbo y cols. (23) adaptado para la natación (26). Los detalles de la derivación de esta relación están provistos en el APENDICE. El VO_2 se midió durante dos minutos a 5 velocidades submáximas en un rango de intensidades del 40 al 80% del VO_{2max}., asegurando que los sujetos nadaran en el rango del rendimiento aeróbico y fueran capaces de mantener una técnica de nado normal aun a la velocidad más baja. Alrededor de 10 min después del ultimo nado submáximo, los sujetos realizaron un nado supramáximo a una velocidad determinada individualmente para agotar al sujeto entre los minutos 2 y 4, como fue descrito en la evaluación en ergómetro acuático. La P_{met} a esta velocidad se predijo por extrapolación de la relación lineal entre la P_{met} y V^3. La diferencia entre la P_{met} y la potencia aeróbica, calculada por medio de la medición del VO_2 durante el nado, da la potencia generada por los procesos metabólicos anaeróbicos. La potencia fue transformada a su equivalente metabólico y expresada en mililitros por kilogramos por minuto, y en mililitros por kilogramo de masa magra por minuto. La masa libre de grasa se calculo por medio de las mediciones de pliegues cutáneos (Calibres para pliegues cutáneos Lange, Cambridge Scientific Industries, Cambridge, MA), tomados de ocho sitios y utilizando un programa especializado que emplea las ecuaciones de Siri (30).

El mismo procedimiento, incluyendo la determinación individual de la economía de nado, se realizo tanto, antes como después del entrenamiento. Para permitir la comparación con reportes previos en la literatura [Ogita y Tabata (27)], se realizó un calculo secundario de la capacidad anaeróbica por medio del uso solamente de la economía de nado medida antes del entrenamiento. Este enfoque no toma en cuenta pequeñas, pero mensurables variaciones en la economía de nado día a día, y solo se reporta con propósitos de comparación.

Economía de Nado Submáxima

Los 2 min de nado submáximo fueron utilizados para obtener una medición de la economía de nado, definida como la P_{met} que es requerida para nadar a una cierta velocidad. La economía de nado fue determinada como la pendiente de la recta de regresión de la relación de la Pmet con la V^3.

Otras Mediciones de Laboratorio

Se midieron la hemoglobina y el hematócrito y fueron usados como un monitoreo general de las tendencias hematológicas durante el entrenamiento. Las muestras de sangre fueron extraídas por punción de la vena antecubital. Los sujetos se sentaron en una silla, con el brazo reposando confortablemente sobre una tabla a nivel del corazón. El procedimiento total duró entre 1 y 2 minutos. La hemoglobina se determino utilizando un medidor de oxígeno de Instrumentation Laboratories. El hematócrito se midió en duplicado a través de centrifugación microcapilar.

Evaluación del Entrenamiento

Registro del Entrenamiento

Cada nadador mantuvo un registro detallado del entrenamiento que incluyó la duración, distancia e intensidad de cada sesión en la pileta. La intensidad del entrenamiento se estimó por medio de que cada sujeto calificara a la sesión de

entrenamiento como de baja, moderada o alta intensidad.

Caracterización del Entrenamiento

Para determinar precisamente las demandas de una sesión de entrenamiento característica en el ergómetro acuático durante el entrenamiento, se midieron la velocidad de nado, VO_2, ventilación minuto (VE), y frecuencia cardiaca. Para las sesiones de entrenamiento realizadas en pileta, la información de los registros del entrenamiento fue utilizada para la caracterización del mismo.

Análisis Estadísticos

La comparación estadística principal fue entre las sesiones de evaluación, antes y después del período de entrenamiento. Se utilizó el análisis de varianza ANOVA de dos vías para mediciones repetidas [efectos principales del tiempo (pre- vs. post-entrenamiento) y tratamiento (hipóxico vs. normal)] mediante el uso del programa estadístico SigmaStat 2.03 (SPSS). Se utilizo al análisis de varianza ANOVA de dos vías, el tipo de nadadores (universitarios vs. masters) y tratamiento (normal vs. hipóxico), para evaluar las diferencias entre atletas universitarios y masters. El nivel de significancia para todas las comparaciones fue establecido a una $p<0.05$. Cuando se obtuvo algún efecto significativo, se utilizo el test de Tukey para comparaciones post hoc. Se realizaron análisis de regresión múltiple para revelar si el cambio en el rendimiento estuvo relacionado a los cambios en las variables fisiológicas medidas. Los análisis se realizaron de acuerdo al procedimiento de regresión por pasos, utilizando la opción de criterios de selección hacia delante e ingresando el VO_{2max} como primer variable. Las variables incluidas en este análisis fueron determinadas a priori en base a la ecuación de balance de potencia para el nado (ver APENDICE), e incluyeron el VO_{2max}, la capacidad anaeróbica y la economía de nado. Los datos son presentados como medias±DS. Para las variables de rendimiento, también se incluyó el 95% de intervalo de confianza.

RESULTADOS

Los valores de los índices hematológicos y de rendimiento se muestran en la Tabla 2. Al comienzo del período de entrenamiento, no se hallaron diferencias significativas entre los grupos en términos de rendimiento en las pruebas de tiempo, $VO_{2máx.}$., capacidad anaeróbica, o en los parámetros hematológicos.

	Grupo	Normóxico	Hipóxico
Tiempo en 100 mts. (seg)			
Pre	69.39 ± 7.64	64.36 ± 5.23	66.43 ± 9.76
Post	64.62 ± 7.33 *	63.62 ± 5.76	65.62 ± 8.93
% de Cambio (95% del intervalo de confianza)	-1.2 (-0.3 a – 2.1)	-1.2 (+0.6 a – 3.0)	-1.1 (+0.0 a –2.2)
Tiempo en 400 m (seg)			
Pre	305.91 ± 33.19	301.08 ± 27.12	310.74 ± 39.65
Post	301.43 ± 32.09 *	297.46 ± 26.70 *	305.41 ± 38.18 *
% de Cambio (95% del intervalo de confianza)	-1.5 (-0.9 a -2.0)	-1.2 (-0.5 a –1.9)	-1.7 (-05 a –2.9)
VO_{2max} (l/min)			
Pre	2.99 ± 0.56	3.05 ± 0.58	2.92 ± 0.57
Post	3.12 ± 0.50 *	3.22 ± 0.48 *	3.03 ± 0.53
% de Cambio (95% del intervalo de confianza)	+5.3 (±7.4)	+6.4 (±8.1)	+4.2 (±7.0)
Cap. An. (ml/kg MLG)			
Pre	31.06 ±11.87	32.26 ± 8.16	29.86 ± 15.23
Post	27.95 ± 13.30	28.16 ± 14.33	27.75 ± 13.16
% de Cambio (95% del intervalo de confianza)	-2.0 (±51.0)	-12.1 (±35.2)	+8.1 (±64.1)
FC máx. (lat/min)			
Pre	184 ± 7	183 ± 6	186 ± 8
Post	187 ± 5	186 ± 2	188 ± 6
V_{Emax} BTPS (l/min)			
Pre	97.74 ± 20.63	98.91 ± 21.06	95.58 ± 21.58
Post	108.09 ± 19.94 *	110.80 ± 20.42 *	105.38 ± 20.45 *
Economía (W/V^3)			
Pre	460.5 ± 110.4	463.6 ± 89.9	457.3 ± 134.2
Post	435.9 ± 92.6	433.7 ± 84.2	438.1 ± 106.2
Hemoglobina (g/dl)			
Pre	14.5 ± 1.3	14.4 ± 1.3	14.5 ± 1.4
Post	14.5 ± 1.1	14.2 ± 0.9	14.7 ± 1.2
Hematócrito (%)			
Pre	40 ± 2.5	39.4 ± 2.9	40.5 ± 2.1
Post	39.5 ± 2.8	39.5 ± 3.2	39.5 ± 2.7

Tabla 2. *Parámetros hematológicos e índices de rendimiento. Los valores son medias±DS, Pre, antes del entrenamiento; Post, después del entrenamiento; % de cambio, media de las diferencias porcentuales individuales; VO_{2max}, consumo máximo de oxigeno; Cap. An., capacidad anaeróbica; FC máx., frecuencia cardiaca máxima, V_{Emax}, ventilación máxima; Grupo, todos los sujetos combinados; Normóxico, grupo normóxico, Hipóxico, grupo hipóxico. * Valor F estadísticamente significativo (p<0.05; test de Tukey). † Debido a problemas técnicos, los datos de la frecuencia cardiaca representan 13 sujetos (7 del grupo Norm., 6 del grupo Hipóx.) para la pre-evaluación y solo 5 sujetos (3 del grupo Norm., 2 del grupo Hipóx.) para la post-evaluación.*

Entrenamiento

Todos los sujetos completaron un mínimo de 12 entrenamientos en el ergómetro acuático (de un máximo de 14 sesiones). Tres sujetos perdieron dos sesiones y seis sujetos perdieron una sesión. Tanto durante las repeticiones de 30 seg. como en las de 1 min. el grupo hipóxico entreno con un VO_2 significativamente reducido ($p<0.02$) comparado con el grupo normóxico (grupo hipóxico: 69.0±13.9% del VO_{2max} pre-entrenamiento para las sesiones de 30 seg., y 75.7 ±9.2% para las sesiones de 1 min.; grupo normóxico: 90.9±10.3% para las sesiones 30 seg., y 93.8 ± 11.5 para las sesiones de 1 min.). Además, la producción de potencia durante el entrenamiento, expresada como porcentaje de la producción de potencia máxima determinada en la pre-evaluación, fue un 7.2±7.3% significativamente más baja en el grupo hipóxico ($p<0.01$) (ver Tabla 3). Estos datos indican que, para ambos grupos, aunque la mayoría de la energía fue generada aeróbicamente, una considerable parte del entrenamiento fue de naturaleza anaeróbica. Sin embargo, el porcentaje de energía aeróbica usado para nadar a la velocidad requerida fue significativamente más baja en el grupo hipóxico comparado con el grupo normóxico (65.2±12.7 % vs. 78.1±11.3%, para las repeticiones de 30 y 60 segundos, respectivamente).

			$\%VO_{2max}$		$\%P_{max}$		%Aer	
	$\%FC_{max}$ Entrenamiento	$\%V_{Emax}$ Entrenamiento	30 seg	60 seg	30 seg	60 seg	30 seg	60 seg
Norm.	96.4 ± 1.6	105.% ± 13.5	90.8 ± 10.3	93.8 ± 11.5	109.1 ± 6.3	99.9 ± 4.8	78.1 ± 11.3	81.5 ± 8.7
Hipox.	96.5 ± 3.0	111% ± 13.4	69.0 ± 13.9 *	75.7 ± 9.1*	102.1 ± 3.2 *	92.5 ± 2.5 *	65.2 ± 12.7 *	74.1 ± 6.5

Tabla 3. *Características del entrenamiento en el ergómetro acuático. Los valores son presentados como medias±DS. %FC máx., porcentaje de la frecuencia cardiaca máxima; %VE máx., Porcentaje de la ventilación máxima; $\%VO_{2max}$, porcentaje del VO_{2max}; y %P máx., intensidad del ejercicio relacionada a la producción de potencia máxima obtenida durante la pre-evaluación; %Aer, porcentaje del $\%VO_{2max}$. El % P máx. y el % Aer se dividieron en intervalos de 30 y 60 seg. * Valores t estadísticamente significativos (p<0.05, test t desapareados).*

Ambos grupos entrenaron con ventilaciones (grupo normóxico: 105±13.5%; grupo hipóxico 111±13.4% de la máxima V_E, medida en la pre-evaluación) y frecuencias cardiacas muy altas (grupo normóxico: 96.4±1.6%; grupo hipóxico: 96.5±3.0% de la frecuencia cardiaca máxima medida en la pre-evaluación), consistente con un esfuerzo máximo. No se hallaron diferencias significativas entre los grupos. En resumen, el entrenamiento de alta intensidad bajo condiciones hipóxicas se llevo a cabo con un flujo de oxigeno substancialmente reducido, y consecuentemente requirió una mayor contribución anaeróbica en comparación con el entrenamiento en normoxia.

El entrenamiento fuera del ergómetro acuático fue similar entre los grupos, determinado a partir de la información obtenida de los registros de entrenamiento con respecto a la frecuencia (p=0.6 a través del test t para datos no apareados), distancia (p=0.4), e intensidad de entrenamiento estimada (ver Tabla 4). Todos los entrenamientos fuera del ergómetro fueron clasificadas como de baja o de moderada intensidad: entre el 35 y 46% las sesiones semanales fuera del ergómetro acuático fueron clasificadas como entrenamientos de baja intensidad, con el porcentaje restante clasificado como de intensidad moderada. Cuatro sujetos (2 pares agrupados de los nadadores masters) no fueron capaces de completar el mínimo de tres sesiones semanales en pileta debido a limitaciones logísticas.

Estos sujetos si completaron todas las sesiones de entrenamiento en el ergómetro acuático.

	Semana 1				Semana 2				Semana 3				Semana 4				Semana 5			
	Normoxia		Hipoxia		Normoxia		Hipoxia		Normoxia		Hipoxia		Normoxia		Hipoxia		Normoxia		Hipoxia	
	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C
Frecuencia	1.3 ± 1.3	6.7 ± 0.6	1.5 ± 1.7	7.3 ± 0.6	1.8 ± 1.5	7.3 ± 1.2	2.3 ± 1.2	8.0 ± 2.0	2.0 ± 1.2	7.7 ± 0.6	2.0 ± 1.4	8.3 ± 1.5	1.8 ± 1.5	5.7 ± 2.0	1.5 ± 1.7	6.3 ± 2.3	1.3 ± 1.0	5.7 ± 2.3	1.3 ± 1.2	5.3 ± 3.1
Distancia (km)	3.7 ± 4.1	35.8 ± 6.9	4.2 ± 4.9	39.8 ± 5.9	4.7 ± 4.5	39.6 ± 8.9	6.3 ± 3.4	44.7 ±11.8	5.1 ± 3.4	44.3 ± 4.1	5.4 ± 3.9	46.7 ± 7.9	4.4 ± 4.2	34.6 ± 6.1	4.1 ± 4.8	38.1 ±17.7	2.5 ± 1.9	33.2 ±14.4	3.7 ± 3.2	31.4 ±19.6
Intensidad	Baja - Moderada		Baja - Moderada		Baja - Moderada		Baja - Moderada		Baja - Moderada		Baja - Moderada		Baja - Moderada		Baja - Moderada		Baja - Moderada		Baja - Moderada	

Tabla 4. *Características de los entrenamientos fuera del ergómetro acuático. Los valores son presentados como medias±DS; M, nadadores masters (n = 5; los datos de los registros de entrenamiento no estuvieron disponibles en uno de los pares de nadadores masters, por lo tanto en la tabla están calculados a partir de 4 nadadores masters); C, nadadores universitarios (n=3).*

Al final del estudio, se les pidió a los sujetos que adivinaran que tipo de intervención recibieron con el fin de determinar la efectividad del diseño doble ciego. Los sujetos no fueron capaces de responder correctamente (p=0.85; por medio de la evaluación de x2 con el test de Fisher), indicando el éxito del diseño.

Respuesta al Entrenamiento

Cambios Hematológicos

No se observaron cambios significativos en la hemoglobina o el hematócrito.

Rendimiento en las Pruebas de Tiempo

Ambos grupos mejoraron significativamente (p=0.02 en la prueba de 100 m, p<0.001 en la prueba de 400 mts.) el

rendimiento en los 100 m [grupo normóxico: 0.7 seg. (intervalo de confianza del 95% +0.2 a 1.7 seg.) y 1.2% (intervalo de confianza del 95% +0.6 a 3.0%); grupo hipóxico: 0.8 seg (intervalo de confianza del 95% 0.1 a 1.5 seg.) y 1.1% (intervalo de confianza del 95% +0.0 a 2.2%)] y en los 400 m estilo libre [grupo normóxico: 3.6 seg. (intervalo de confianza del 95% 1.8 a 5.5 seg.) y 1.2% (intervalo de confianza del 95% 0.5 a 1.9%); grupo hipóxico: 5.3 seg. (intervalo de confianza del 95% 2.3 a 8.3 seg.) y 1.7% (95% intervalo de confianza 0.5 a 2.9%)]. No hubo diferencias significativas entre los grupos para los rendimientos en cada distancia (ANOVA para interacción entre variables p=0.91 y 0.36 para las pruebas de 100 y 400 m, respectivamente). Esta diferencia fue aproximadamente cinco veces mayor que la media de las diferencias individuales entre dos pruebas de tiempo de 100 m de –0.3% (intervalo de confianza del 95%, +0.5 a 1.0%) (Figura 2A y 2B). No se observaron diferencias significativas entre los nadadores masters y los nadadores universitarios (ANOVA para la interacción de variables, p=0.43 y 0.49, para las pruebas de 100 y 400 m, respectivamente)

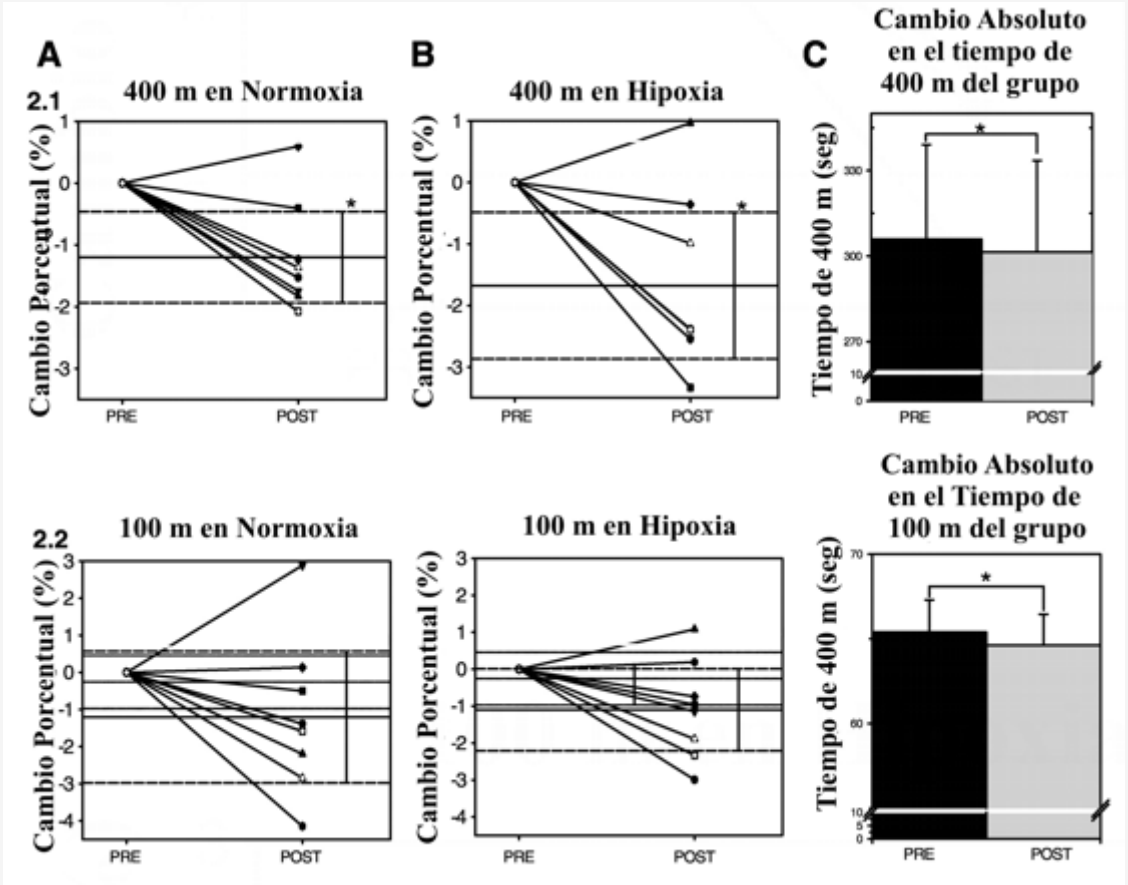

Figura 2. *Porcentaje de cambio en los rendimientos individuales en los 400 m (parte superior) y 100 m (parte inferior) de los sujetos entrenando en normoxia (A) e hipoxia (B); y cambios absolutos para todos los sujetos juntos (C), antes (pre) y después (post) del período de entrenamiento. Se utilizaron símbolos similares para cada par de sujetos agrupados. Las líneas paralelas continuas representan el intervalo de confianza del 95%; las líneas paralelas punteadas representan la media±el intervalo de confianza del 95% para las diferencias individuales entre dos pruebas de tiempo de 100 m en un grupo similar de atletas, incluyendo a 3 nadadores del grupo actual. * Valor F estadísticamente significativo (P<0.05) (ANOVA para mediciones repetidas).*

VO_{2max}, V_E máxima y Frecuencia Cardiaca

Ambos grupos mejoraron significativamente el VO_{2max} (p=0.02) (grupo normóxico: +0.16±0.23 l/min, +6.4±8.1%; grupo hipóxico: +0.11±0.18 l/min, +4.2±7.0%) (Figura 3 A y 3 B). No se pudieron detectar diferencias significativas entre los grupos (p=0.58).

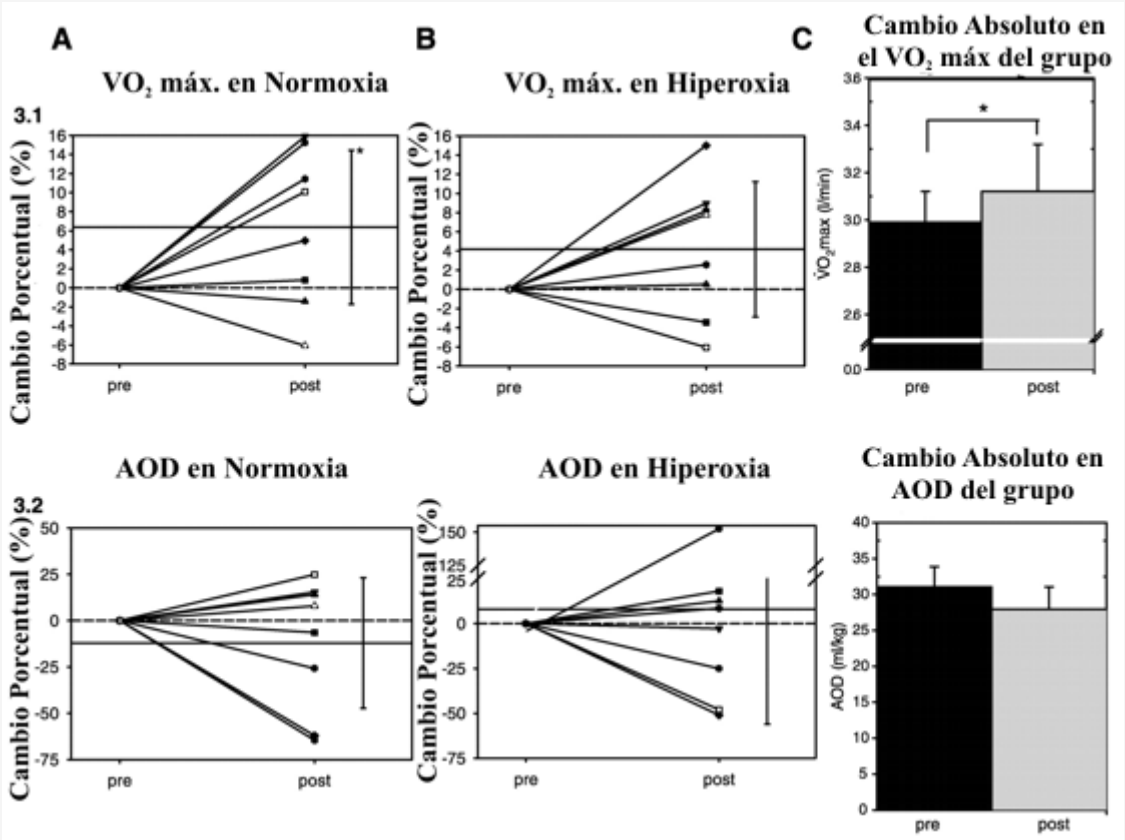

Figura 3. *Porcentaje de cambio en el máximo consumo de oxigeno (VO_{2max}.; parte superior) y en la capacidad anaeróbica (parte inferior) para cada sujeto entrenando en normoxia (A) e hipoxia (B); y cambios absolutos para todos los sujetos juntos (C), antes y después del período del entrenamiento. Las líneas completas, junto con barras verticales representan la media±DS. La línea punteada horizontal representa el nivel cero. * Valor F estadísticamente significativo (p<0.05, ANOVA para medidas repetidas).*

La V_E máxima se incremento significativamente en ambos grupos ($p<0.001$) (grupo normóxico: 11.90 l/min, 13.6±12.7%; grupo hipóxico: 8.81 l/min, 10.0±7.6%). No hubo diferencias significativas entre los grupos ($p=0.71$). No se observaron cambios en la frecuencia cardiaca máxima.

Potencia y Capacidad Anaeróbica

Todas las correlaciones individuales entre el VO_2 submáximo y la V^3 fueron altamente lineales (r= 0.98±0.03). No hubo diferencias significativas en la capacidad anaeróbica entre ($p=0.79$) o dentro ($p=0.80$) de los grupos luego del entrenamiento (Figura 3 y Tabla 2).

Economía Submáxima de Nado

Las pendientes de las líneas de regresión que relacionaban la P_{met} a la V^3 no fueron significativamente diferentes ($p=0.21$), sugiriendo que la economía submáxima de nado no cambio tanto en hipoxia como en normoxia.

Predicción del Rendimiento en la Natación: Regresiones Múltiples

Con los datos del VO_{2max}, la capacidad anaeróbica y la economía de nado, fue posible predecir los tiempos en 100 y 400 m con una precisión del 72% (error estándar de estimación: 4.1 seg.) y del 67% (error estándar de estimación: 19.6 seg.), respectivamente. Sin embargo el cambio en el rendimiento que resultó del período de entrenamiento no se pudo predecir con este modelo lineal simple de tres variables ($p=0.26$).

DISCUSION

El presente estudio mostró que el entrenamiento de alta intensidad en ergómetro acuático de corriente artificial mejoro significativamente el rendimiento de natación en pileta tanto en la prueba de 100 m como en la de 400 m. Sin embargo, esta mejora no fue realzada por la realización de dicho entrenamiento bajo condiciones hipóxicas. Esta conclusión es reforzada por la cuidadosa formación de los grupos que contenían nadadores bien entrenados, y por la naturaleza aleatoria, y doble ciego, de la intervención. De esta manera, nuestra hipótesis acerca de que el entrenamiento intermitente hipóxico mejora el rendimiento en la natación más que el entrenamiento bajo condiciones de normoxia, fue rechazada.

Trabajos Previos con Entrenamiento Intermitente Hipóxico

Varios estudios investigaron los efectos del entrenamiento hipóxico en sujetos relativamente desentrenados (8, 17, 21). Juntos, estos estudios demuestran claramente que el entrenamiento intermitente hipóxico, no tiene efectos benéficos en comparación con un entrenamiento equivalente al nivel del mar, en individuos desentrenados. En dichos sujetos, el efecto del entrenamiento en si, parece ser predominante, sobrepasando cualquier efecto adicional de la hipoxia. Sin embargo, estos resultados podrían ser diferentes en atletas bien entrenados, en los cuales el efecto del entrenamiento per se ha de ser maximizado.

Un número de investigadores han reportado una pequeña cantidad de estudios en atletas competitivos, donde se han examinado los efectos del ejercicio hipóxico. Por ejemplo, Terrados y cols. (36) investigaron los efectos del entrenamiento intermitente hipóxico en ocho ciclistas de elite aleatoriamente asignados a entrenamiento en hipoxia hipobárica (2300 m de altura) o en normoxia (nivel del mar) y no hallaron diferencias entre los grupos, tanto para la capacidad de trabajo, como para la máxima producción de potencia. Similarmente, Vallier y cols. (41) no hallaron diferencias significativas en el VO_{2max} o en la máxima producción de potencia en cinco triatletas de elite, luego de un entrenamiento intermitente hipóxico (4000 m), aunque en este estudio no se incluyo un grupo control. Más recientemente, Meeuwsen y cols. (24) evaluaron la eficacia del entrenamiento intermitente hipóxico en un mayor número de triatletas (n=16). Ocho atletas entrenaron en una cámara hipobárica que simuló una altitud de 2500 m, mientras que un grupo de ocho sujetos con un nivel similar de aptitud física sirvieron de grupo control y entrenaron al nivel del mar. Nuevamente, no se hallaron diferencias significativas entre los grupos luego de la realización de la primera evaluación post-entrenamiento. Sin embargo, una segunda evaluación, realizada 9 días después del período de entrenamiento, revelo diferencias significativas entre los grupos tanto en la máxima producción de potencia, medida durante un test incremental en ciclo ergómetro, como en la potencia pico y potencia media medida durante el Wingate test. No se hallaron diferencias significativas en el VO_{2max} entre los grupos. Desafortunadamente el entrenamiento no se controló durante este período intermedio, lo cual limita la fuerza de la conclusión.

En resumen, los trabajos previos tanto en sujetos desentrenados como en atletas bien entrenados, no han demostrado convincentemente un efecto aditivo de la hipoxia sobreimpuesta al entrenamiento de resistencia para mejorar la potencia aeróbica, al menos durante ejercicios de ciclismo para todo el cuerpo. En base a estos datos limitados, otros investigadores (4, 28, 35, 45) han especulado que los beneficios del entrenamiento hipóxico, si existe alguno, son probablemente de naturaleza anaeróbica. Desafortunadamente, estas especulaciones no han sido respaldadas por evidencia experimental. Un factor que contribuye a esta falta de respaldo puede ser que los estudios previos se han enfocado en atletas de resistencia y que el entrenamiento fue predominantemente de naturaleza aeróbica (en un rango del 60 al 85% del VO_{2max}). Varios estudios en un número diferente de deportes han indicado que para incrementar la capacidad anaeróbica, debe realizarse un entrenamiento de alta intensidad (33, 34). Con respecto a esto, el estudio de Ogita y Tabata (27) es notable. Estos investigadores estudiaron el efecto de 2 semanas de entrenamiento intermitente hipóxico hipobárico (3000 m) de alta intensidad, sobre la capacidad anaeróbica y el VO_{2max}, en nueve nadadores universitarios. En este estudio no se observaron cambios en el VO_{2max}. En contraste la capacidad anaeróbica se incremento significativamente en un 10%. Sin embargo, este estudio sufrió de varias limitaciones. Primero, no se incluyo un grupo control que realizara un entrenamiento similar en normoxia. De esta manera, es imposible determinar si la mejora fue un efecto de la adición de un estímulo hipóxico o un efecto del entrenamiento en si mismo. Segundo, no se incluyeron mediciones de rendimiento. De esta manera sigue siendo incierto si la mejora en la capacidad anaeróbica resulto en mejores tiempos en la natación. Tercero, solo 14 minutos de la carga de entrenamiento de 2 horas fue especificada, en tanto que los otros 106 minutos de cada sesión eran poco claros. Por ello, es difícil interpretar cual fue la contribución de las series de ejercicio de alta intensidad a la mejora del 10% en la capacidad anaeróbica que observaron los investigadores. Finalmente durante la evaluación post-entrenamiento, se midió el déficit de oxigeno acumulado a tasas de flujo de agua más rápidas que durante la pre-evaluación. Esto es diferente que en presente estudio y en la mayoría de los otros estudios en donde se midió el déficit de oxigeno acumulado. El presente estudio supera la mayoría de estas limitaciones, utilizando una cuidadosa formación de los grupos, y la intervención aleatoria, doble ciego. Por último, los resultados de este estudio fueron consistentes con observaciones previas y extiende este análisis para incluir a la natación; en donde, aunque se hallaron mejoras significativas en el rendimiento y el VO_{2max},

tanto con entrenamiento normóxico como hipóxico, no se detectaron diferencias entre los grupos. Además, en contraste con el estudio de Ogita y Tabata (27), no se identificaron cambios en la capacidad anaeróbica en ninguno de los grupos.

Entrenamiento y Capacidad Anaeróbica

Para explicar la discrepancia entre el estudio de Ogita y Tabata (27) y el presente estudio, es útil examinar la evidencia que respalda los cambios en la capacidad anaeróbica con el entrenamiento. Una cuidadosa revisión de los estudios previos, eleva serios cuestionamientos con respecto a si la capacidad anaeróbica puede efectivamente ser mejorada por el entrenamiento. En otras palabras, ¿es el músculo entrenado efectivamente capaz de acumular más déficit de oxigeno?. Se ha reportado ampliamente que los rendimientos en los cuales el metabolismo anaeróbico tiene un rol importante, pueden ser mejorados como resultado del entrenamiento (14, 22, 34). Sin embargo, no hay datos que respalden inequívocamente que estos incrementos en el rendimiento están directamente relacionados al metabolismo anaeróbico en si mismo. Es altamente improbable que con el incremento en la intensidad del entrenamiento ocurran incrementos en el número de fibras tipo II (2) o cambios en la actividad de las enzimas anaeróbicas (43, 44). El entrenamiento de alta intensidad, como el utilizado por los atletas, parece resultar principalmente en adaptaciones aeróbicas, debido a una incrementada utilización de altas tasas de metabolismo aeróbico durante el entrenamiento (10, 44). En efecto, varios estudios indican que el entrenamiento de alta intensidad resulta en un incremento en el VO_2 y en la capacidad de transporte de oxigeno (14, 34), hallazgos que apoyan los resultados del presente estudio. Debe ser destacado que el incremento en el VO_{2max} no estuvo relacionado a una diferencia en la hemoglobina, debido a que no se observaron cambios en la misma. La falta de cambio en la hemoglobina es probablemente debido al corto tiempo de exposición hipóxica, y esta en concordancia con los hallazgos de Emmonson y cols (8) y de Vallier y cols (41). Considerando la especificidad del entrenamiento en ergómetro acuático, la relativamente pequeña masa muscular involucrada en el nado, y el transcurso del período de entrenamiento, nosotros sugerimos que el incremento observado en el VO_{2max} puede ser explicado por las adaptaciones neuromusculares, posiblemente acompañados de cambios estructurales en las fibras musculares. Esta bien documentado que las adaptaciones en la actividad de las enzimas mitocondriales, densidad mitocondrial, y densidad capilar pueden ocurrir rápidamente como resultado del entrenamiento (1).

Otro mecanismo por el cual se sugiere que el entrenamiento de alta intensidad resulta en mejoras en la capacidad aeróbica puede ser la mejora en la regulación celular (14, 31), la cual incrementa la tolerancia para los productos del metabolismo anaeróbico y retrasa la aparición de la fatiga. En efecto, a menudo se piensa que la hipoxia incrementa este efecto a través de la provocación de un estrés adicional sobre el cuerpo (28).

Ogita y Tabata (27) especularon que el incremento del 10% el déficit de oxigeno acumulado, resulto de un incremento en la capacidad de amortiguación. En efecto, Mizuno y cols. (25) y Saltin y cols. (29) reportaron un incremento en la capacidad de amortiguación muscular con la aclimatación a la altura y relacionaron este incremento a una mejora en la capacidad anaeróbica. Sin embargo, debido a que los sujetos de estos estudios vivían y entrenaban en la altura, no es claro si el incremento observado en la capacidad de amortiguación muscular fue un efecto de la aclimatación o del entrenamiento hipóxico per se. Gore y cols. (13) proveyeron evidencia para respaldar la primacía del efecto de aclimatación, y reportaron incrementos significativos en la capacidad de amortiguación muscular en triatletas bien entrenados luego de un período de 3 semanas de “vivir en la altura” (a una altura simulada de 3000 m) y “entrenar abajo” en normoxia al nivel del mar. Para nuestro conocimiento, no se ha reportado ningún estudio que haya investigado el efecto del entrenamiento hipóxico intermitente sobre la capacidad de amortiguación del músculo humano.

Además, no es claro si hay realmente un mayor “estrés” o estímulo para la adaptación durante el ejercicio hipóxico. Ciertamente, el entrenamiento en hipoxia “se siente más duro”, con un incremento en la ventilación, frecuencia cardiaca, y lactato durante el ejercicio a intensidades submáximas (15). Sin embargo, en el presente estudio, el protocolo de entrenamiento, fue tal que todos los sujetos, independientemente de la intervención, entrenaron a intensidades máximas o supramáximas, tal que el mismo apenas les permitió completar con el número de repeticiones prescriptas en cada serie de entrenamiento, sin considerar la mezcla de gas inspirado. De esta manera ambos grupos entrenaron a similares intensidades relativas (muy altas), lo cual esta respaldado por los datos de la frecuencia cardiaca y la ventilación, así como también por el hecho de que los sujetos no pudieron determinar si entrenaron en hipoxia o normoxia. El único protocolo que demostró una ventaja potencial del ejercicio hipóxico fue usado por Terrados y cols. (35). Entrenando una pequeña masa muscular (una pierna), estos investigadores permitieron que los sujetos entrenaran a la misma tasa de trabajo en hipoxia y normoxia. Sin embargo en el presente estudio, el grupo hipóxico entreno a un porcentaje significativamente mas bajo de la máxima producción de potencia ($p<0.01$), obtenida durante la evaluación pre-entrenamiento. Este no fue un hallazgo inesperado debido a que varios estudios han hallado que la producción de potencia seleccionada por el sujeto, disminuye cuando se respira gas hipóxico (5, 17). De esta manera durante el ejercicio supramáximo sostenido que dura al menos 1 min., el trabajo se reduce proporcionalmente a la reducción en el VO_2, ya que aparentemente la capacidad anaeróbica no se ve afectada por la hipoxia (23).

En resumen, la adición de estrés hipóxico a una ya intensidad máxima de ejercicio no parece aumentar el efecto del

entrenamiento. La hipoxia solo acorta el tiempo hasta el agotamiento y/o causa una reducción en la máxima producción de potencia y deriva en una reducción del flujo de oxigeno.

En vista de estas inquietudes, los hallazgos del presente estudio acerca de que el entrenamiento de alta intensidad (con o sin hipoxia) no resultan en mejoras de la capacidad anaeróbica en atletas bien entrenados, puede no resultar sorprendente después de todo. Cuando se mida un incremento en el máximo déficit de oxigeno, debe tenerse en cuenta que este puede resultar de un incremento en la masa muscular activa, más que de mejoras en la capacidad muscular para acumular déficit de oxigeno. El entrenamiento hipóxico resulta principalmente en una reducción de la producción de potencia y en una reducción del flujo de oxigeno, y por ello, no parece proveer de alguna ventaja a los atletas bien entrenados.

Mejoras con el Entrenamiento de Alta Intensidad en Ergómetro Acuático

Sin tener en cuenta la intervención, se hallaron mejoras significativas en el rendimiento en las pruebas de 100 y 400 m y en el VO_{2max} en ambos grupos. Aunque en el presente estudio no se incluyó una medición directa del pico de potencia, tenemos fuerte evidencia de una mejora en el pico de potencia como resultado del entrenamiento en ergómetro acuático; los cambios en el rendimiento del nado y el VO_{2max} ocurrieron sin cambios en la economía de nado o en la capacidad anaeróbica. Este resultado es probablemente atribuido a las características únicas del nado en ergómetro acuático. Un ergómetro acuático no permite relajación en ninguna parte de la brazada y hace que el nadador este fuertemente consciente de todos sus movimientos en el agua. Los sujetos reportaron sentimientos de agotamiento similares a aquellos experimentados en el entrenamiento de sobrecarga, sugiriendo que el entrenamiento de alta intensidad en ergómetro puede ser una forma específica de entrenamiento de sobrecarga para nadadores, con los consecuentes incrementos en la producción máxima de potencia y en la velocidad de nado. Por ello, nosotros especulamos, aunque no probamos (considerando que no hubo un grupo control que realizara un entrenamiento similar en pileta), que el entrenamiento de natación de alta intensidad en ergómetro acuático puede ser útil en la preparación para los eventos de natación.

Limitaciones del Presente Estudio

Una limitación del presente estudio que puede haber enmascarado las diferencias entre los grupos fue la ausencia de un período supervisado de introducción antes del estudio (18). El efecto de este período de entrenamiento puede ser especialmente importante en el presente estudio ya que el método aplicado fue nuevo para todos los sujetos y altamente diferente de su modo normal de entrenamiento. Sin embargo, el cuidadoso agrupamiento de los sujetos, creó pares que tenían una preparación similar al comienzo del estudio, lo cual puede dar cuenta de al menos parte del efecto del entrenamiento de campo (18).

Tampoco podemos excluir la posibilidad de que la cantidad de entrenamiento realizado fuera de las sesiones de entrenamiento en el ergómetro y la recuperación entre las sesiones pudieron haber influenciado los resultados del presente estudio. Los nadadores universitarios nadaron 14±4 h/semana en una distancia semanal de 38.1±11.7 km, fuera de las sesiones en el ergómetro. Por ello, consideramos si este entrenamiento adicional pudo conducir a alguna clase de sobreentrenamiento, lo que limitó la mejora a partir del entrenamiento hipóxico intermitente. Sin embargo, ambos grupos estuvieron bien agrupados para el entrenamiento fuera del ergómetro. Más importante aún, la magnitud de la mejora fue similar en los atletas master, quienes tuvieron mucho menos entrenamiento fuera del ergómetro, y por ende haciendo improbable esta posibilidad.

Además, en el presente estudio, el estímulo hipóxico efectivo durante cada sesión de entrenamiento fue solo de ~20 min. Esto puede parecer más bien bajo comparado con estudios previos, donde el estímulo hipóxico fue al menos de una hora por cada sesión. Sin embargo, los estudio de Terrados y cols. (35) y de Vogt y cols. (42) demostraron que los estímulos hipóxicos de media hora, tres a cinco veces por semana, son suficientes para establecer efectos significativos, al menos a nivel muscular. Además, la combinación de ejercicio de alta intensidad e hipoxia incrementan considerablemente la severidad del estímulo hipóxico local debido a la hipoxemia exagerada inducida por el ejercicio (7).

Finalmente, es posible que el déficit de oxigeno acumulado no fuera suficientemente sensible para detectar pequeñas diferencias en la capacidad anaeróbica. En efecto, las mediciones de la capacidad anaeróbica usando el déficit de oxigeno acumulado tienen un número de limitaciones bien reconocidas. 1) Algunos estudios sugieren que la relación entre la intensidad del ejercicio puede no ser lineal (46). 2) Cuando se asume una relación lineal entre la intensidad del ejercicio y el VO_{2max}, se considera que la eficiencia mecánica total es constante, i.e., independiente de la intensidad del ejercicio. La eficiencia mecánica total de un sistema total es, sin embargo, determinada por la eficiencia de los sistemas aeróbicos y anaeróbicos, y esta eficiencias pueden de hecho no ser iguales (6, 12). 3) La contribución de producción de energía anaeróbica a altas intensidades de ejercicio submáximo no es a menudo tomada en cuenta en el cálculo de la demanda de energía durante el ejercicio supramáximo.

Sin embargo, la alta linealidad de las relaciones de la producción de potencia aeróbica (PVO_2) –V^3 durante el pre-test

(r2=0.97) y el post-test (r2=0.99) justifica la utilización de estas relaciones para la estimación del déficit de oxigeno acumulado, de acuerdo al método de Medbo y cols. (23). Sin embargo, se observaron grandes variaciones en el cambio de la capacidad anaeróbica. El porcentaje medio de cambio fue –2.0 ±51.0% mientras que otros estudios de entrenamiento que midieron el déficit de oxigeno acumulado de acuerdo al método de Medbo y cols., reportaron cambios de +28% (34) y +10% (27). En contrate con el presente estudio, en esos estudios no se expresaron las desviaciones estándar, por ende la variabilidad de cambio en la capacidad anaeróbica permanece abierta a la discusión. Además, estos estudios utilizaron los valores pre-test para las ecuaciones de regresión en la determinación del déficit de oxigeno acumulado tanto, durante el pre-test como el post-test. De esta manera, se ignora una posible fuente de variabilidad [i.e., la variabilidad día a día en el VO_2 submáximo a cierta intensidad (V^3)], aun cuando no se observaron cambios significativos en la economía de nado. En efecto, las comparaciones post hoc demostraron que si aplicamos esta estrategia a la serie de los presentes datos, el porcentaje medio de cambio fue de 2.1%, con una desviación estándar más pequeña (±32.9). De esta manera la observación de una gran variabilidad podría ser distinguida mediante el uso de las ecuaciones de regresión pre-test para los análisis de los datos tanto de los pre- como post-test.

En conclusión, 5 semanas de entrenamiento de alta intensidad en ergómetro acuático mejoraron significativamente el rendimiento de nado al nivel del mar y el VO_{2max} en nadadores bien entrenados. No hubo un efecto aditivo significativo del entrenamiento hipóxico bajo las condiciones controladas de este experimento.

APENDICE

La ecuación para equilibrar la potencia de nado (39) es tomada como punto inicial para determinar la relación entre la producción de potencia (PO) y la velocidad de nado

$P_O - (P_d + P_k) = dE/dt$ (A1)

En la cual Pd es la potencia que supera la resistencia de fricción acuática, Pk es la potencia que se pierde en dar un cambio a la energía cinética del agua y dE/dt es la tasa de gasto energético. La potencia mecánica esta relacionada a la potencia metabólica (P_{met}) de acuerdo a (16)

$P_O = P_{met} \bullet e_m$ (A2)

En la cual em es la eficiencia mecánica total. Cuando se considera que el cuerpo humano puede generar ATP por medio de procesos aeróbicos y anaeróbicos, la producción de P_{met} es igual

$P_{met} = P_{met,aer} + P_{met,an}$ (A3)

Donde los sufijos aer y an identifican las mediciones aeróbicas y anaeróbicas, respectivamente. Combinando las ecuaciones 1-3 tenemos:

$P_{mec} = P_{met,aer} \bullet e_{m,aer} + P_{met,an} \bullet e_{m,an} = P_O - (P_d + P_k) = dE/dt$ (A4)

Donde P_{mec} es la potencia mecánica.

De acuerdo a la segunda ley de Newton, debe haber un equilibrio entre la producción y la perdida de potencia cuando se nada a una velocidad constante, y entonces

$DE/dt = 0$ y $P_o = P_d + P_k$ (A5)

Varios estudios demostraron que la resistencia de fricción acuática activa esta relacionada al cuadrado de la velocidad de nado (38, 37). Consecuentemente la potencia para superar la resistencia de fricción acuática esta relacionada a la V^3 ($V \bullet V^2$) y a un factor de fricción acuática (K)

$P_d = kV^3$ (A6)

Como Pk esta relacionada a la velocidad, no esta perfectamente claro todavía. Introducir el concepto de eficiencia en la propulsión (e_p) (16, 37) puede ayudar a resolver este problema. Nadando a una velocidad constante

$ep = P_d / P_o = P_d / (P_d + P_k)$ (A7)

Asumiendo que e_p es independiente de la velocidad de nado (la cual de acuerdo a nuestros datos parece ser al menos razonable para nadadores de alto nivel), la P_o puede ser calculada de acuerdo a

$P_o = P_d / e_p = K \bullet V^3 / e_p = K / e_p \bullet V^3$ (A8)

K/ep es constante, y por ende P_o esta relacionada a V^3. La evidencia de esta relación está experimentalmente apoyada por Toussaint y cols. (37). Combinando las ecuaciones 2 y 8 nos da las expresiones para el gasto metabólico de energía

$P_{met} = K \bullet V^3 / e_m \bullet e_p$ (A9)

Cuando se asume que e_m es constante, la relación lineal entre P_{met} y V^3 queda establecida. La relación esta experimentalmente respaldada por Toussaint y cols (37) y Ogita y cols (26).

Cuando se considera que a intensidades bajas de ejercicio la producción de potencia mecánica total es principalmente generada por medio de procesos aeróbicos y que la medición del VO_2 es una medida confiable de la producción de energía aeróbica, la relación puede ser transformada en;

$VO_2 = KV^3$ (A10)

La cual puede ser transformada en su equivalente de potencia de acuerdo a

$PVO_2 = 1/60 \bullet 103 \bullet [4.18 + RER)] \bullet VO_2$ (A11)

Donde el RER es el índice de intercambio respiratorio.

La relación lineal entre la PVO_2 y la V^3 solo se sostiene para ejercicios en estado estable dentro del rango del rendimiento aeróbico (37), i.e. por debajo del 80% del VO_{2max} (1). Ahora, mediante la medición del VO_2 a varias intensidades submáximas, la relación lineal puede ser establecida experimentalmente y usada para la extrapolación a intensidades de ejercicio más altas para determinar la capacidad anaeróbica.

Agradecimientos

Este proyecto involucro el respaldo coordinado y el esfuerzo de mucha gente. Agradecemos a los atletas que participaron en el proyecto, a Brian McFarlin por los esfuerzos en la preparación de este estudio, a Dak Quarles por el excelente apoyo técnico, a Paul Chase, Joel Dow, Ron Ben Meir, Dean Palmer, Juan Jose Polo Carbayo, y Sarah Witkowski por el gran apoyo durante los experimentos y las sesiones de entrenamiento.

Notas al Pie

Queremos agadecer a la University of Noth Texas Health Science Center, Fort Worth, Texas, por el apoyo a Joel Dow durante este estudio. Este proyecto fuer respaldado por una beca de Gerrit Jan van Igen Schenau, una beca Stichting VSB Fonds y Dittmerfonds. El respaldo institucional se recibió del Institute for Exercise and Environmental Medicine y de la Faculteit der Bewegingswetenschapen.

Dirección para el pedido de reimpresiones y otras correspondencias

B.D. Levine, Inst. for Exercise and Environmental Medicine, Presbyterian Hospital of Dallas, 7232 Greenville Ave., Suite 435, Dallas, TX 75231 (E-mail: BenjaminLevine@texashealth.org).

REFERENCIAS

1. Baldwin, KM, and Haddad F (2001). Invited Review: Effects of different activity and inactivity paradigms on myosin heavy chain gene expression in striated muscle. *J Appl Physiol 90: 345-357*
2. Bangsbo, J, Michalsik L, and Petersen A (1993). Accumulated O2 deficit during intense exercise and muscle characteristics of elite athletes. *Int J Sports Med 14: 207-213*
3. Banister, EW, and Woo W (1978). Effects of simulated altitude training on aerobic and anaerobic power. *Eur J Appl Physiol 38: 55-69*
4. Brosnan, MJ, Martin DT, Hahn AG, Gore CJ, and Hawley JA (2000). Impaired interval exercise responses in elite female cyclists at moderate simulated altitude. *J Appl Physiol 89: 1819-1824*

5. Coyle, EF, Sidossis LS, Horowitz JF, and Beltz JD (1992). Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. *Med Sci Sports Exerc 24: 782-788*
6. Dempsey, JA, and Wagner PD (1999). Exercise-induced arterial hypoxemia. *Appl Physiol 87: 1997-2006*
7. Emonson, DL, Aminuddin AHK, Wight RL, Scroop GC, and Gore CL (1997). Training-induced increases in sea-level O2 max and endurance are not enhanced by acute hypobaric exposure. *Eur J Appl Physiol 76: 8-12*
8. Fulco, CS, Rock PB, and Cymerman A (1998). Maximal and submaximal exercise performance at altitude. *Aviat Space Environ Med 69: 793-801*
9. Gaitanos, GC, Williams C, Boobis LH, and Brooks S (1993). Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *J Appl Physiol 75: 712-719*
10. Garby, L, and Astrup A (1987). The relationship between the respiratory quotient and the energy equivalent of oxygen during simultaneous glucose and lipid oxidation and lipogenesis. *Acta Physiol Scand 129: 443-444*
11. Goldspink, G (1987). Energy turnover during contraction of different muscle types. *In: Biomechanics VI-A, edited by Asmussen E, and Jjorgensen K.. Baltimore, MD: University Park Press, p. 27-39*
12. Gore, CJ, Hahn AG, Aughey RJ, Martin DT, Ashenden MJ, Clark SA, Carnham AP, Roberts AD, Slater GJ, and McKenna MJ (2001). Live high: train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiol Scand 173: 275-286*
13. Harmer, AR, McKenna MJ, Sutton JR, Snow RJ, Ruell PA, Booth J, Thompson MW, Mackay NA, Stathis CG, Crameri RM, Carey MF, and Eager DM (2000). Skeletal muscle metabolic and ionic adaptations during intense exercise following sprint training in humans. *J Appl Physiol 89: 1793-1803*
14. Ibanez, J, Rama R, Riera M, Prats MT, and Palacios L (1993). Severe hypoxia decreases oxygen uptake relative to intensity during submaximal graded exercise. *Eur J Appl Physiol 67: 7-13*
15. Ingen-Schenau van, GJ, and Cavanagh PR (1990). Power equations in endurance sports. *J Biomech 23: 865-881*
16. Levine, BD, Friedman DB, Engfred K, Hanel B, Kjaer M, Clifford PS, and Secher NH (1992). The effect of normoxic or hypobaric hypoxic endurance training on the hypoxic ventilatory response. *Med Sci Sports Exerc 24: 769-775*
17. Levine, BD, and Stray-Gundersen J (1992). A practical approach to altitude training: where to live and train for optimal performance enhancement. *Int J Sports Med 13, Suppl 1: S209-S212*
18. Levine, BD, and Stray-Gundersen J (1997). Living high-training low: effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J Appl Physiol 83: 102-112*
19. Linnarsson, D, Karlsson J, Fagraeus L, and Saltin B (1974). Muscle metabolites and oxygen deficit with exercise in hypoxia and hyperoxia. *J Appl Physiol 36: 399-402*
20. Loeppky, JA, and Bynum WA (1970). Effects of periodic exposure to hypobaria and exercise on physical work capacity. *J Sports Med Phys Fitness 10: 238-247*
21. Medbo, JI, and Burgers S (1990). Effect of training on the anaerobic capacity. *Med Sci Sports Exerc 22: 501-507*
22. Medbo, JI, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O, and Sejersted OM (1988). Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O2 deficit. *J Appl Physiol 64: 50-60*
23. Meeuwsen, T, Hendriksen IJM, and Holewijn M (2001). Training-induced increases in sea-level performance are enhanced by acute intermittent hypobaric hypoxia. *Eur J Appl Physiol 84: 283-290*
24. Mizuno, M, Juel C, Bro-Rasmussen T, Mygind E, Schibye B, Rasmussen B, and Saltin B (1990). Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude. *J Appl Physiol 68: 496-502*
25. Ogita, F, Hara M, and Tabata I (1996). Anaerobic capacity and maximal oxygen uptake during arm stroke, leg kicking and whole body swimming. *Acta Physiol Scand 157: 435-441*
26. Ogita, F, and Tabata I (1999). The effect of high-intensity intermittent training under a hypobaric hypoxic condition on anaerobic capacity and maximal oxygen uptake. *In: Biomechanics and Medicine of Swimming VIII, edited by Keskinen KL, Komi PV, and Hollander AP.. Jyvaskyla, Finland: Gummerus Printing, p. 423-427*
27. Saltin, B (1996). Exercise and the environment: focus on altitude. *Res Q Exerc Sport 67: 1-10*
28. Saltin, B, Kim CK, Terrados N, Larsen H, Svedenhag J, and Rolf CJ (1995). Morphology, enzyme activities and buffer capacity in leg muscles of Kenyan and Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports 5: 220-230*
29. Siri, WE (1993). Body composition from fluid spaces and density: analysis of methods. *Nutrition 9: 480-491*
30. Stathis, CG, Febbraio MA, Carey MF, and Snow RJ (1994). Influence of sprint training on human skeletal muscle purine nucleotide metabolism. *J Appl Physiol 76: 1802-180*
31. Stray-Gundersen, J, Chapman RF, and Levine BD (2001). "Living high-training low" altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *Appl Physiol 91: 1113-1120*
32. Tabata, I, Irisawa K, Kouzaki M, Nishimura K, Ogita F, and Miyachi M (1997). Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Med Sci Sports Exerc 29: 390-395*
33. Tabata, I, Nishimura K, Kouzaki M, Hirai Y, Ogita F, Miyachi M, and Yamamoto K (1996). Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and O2 max. *Med Sci Sports Exerc 28: 1327-1330*
34. Terrados, N, Jansson E, Sylven C, Jansson E, and Kaijser L (1990). Is hypoxia a stimulus for synthesis of oxidative enzymes and myoglobin?. *J Appl Physiol 68: 2369-2372*
35. Terrados, N, Melichna J, and Sylven C (1988). Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *Eur J Appl Physiol 57: 203-209*
36. Toussaint, HN, Beelen A, Rodenburg A, Sargeant AJ, de Groot G, Hollander AP, and Ingen Schenau GJ (1988). Propelling efficiency of front crawl swimming. *J Appl Physiol 65: 2506-2512*
37. Toussaint, HM, de Groot G, Savelsberg HHCM, Vervoorn K, Hollander AP, and Ingen Schenau GJ (1988). Active drag related to velocity in male and female swimmers. *J Biomech 21: 435-438*
38. Toussaint, HM, and Hollander AP (1994). Energetics of competitive swimming: implications for training programmes. *Sports Med 18: 384-405*
39. Toussaint, HM, Meulemans A, de Groot G, Hollander AP, Schreurs AW, and Vervoorn K (1986). Respiratory valve for oxygen

uptake measurements during swimming. *Eur J Appl Physiol 56: 363-366*
40. Vallier, JM, Chateau P, and Guezennec CY (1996). Effects of physical training in a hypobaric chamber on the physical performance of competitive triathletes. *Eur J Appl Physiol 73: 471-478*
41. Vogt, M, Puntschart A, Geiser J, Zuleger C, Billeter R, and Hoppeler H (2001). Molecular adaptations in human skeletal muscle to endurance training under simulated hypoxic conditions. *J Appl Physiol 91: 173-182*
42. Weston, AR, Myburgh KH, Lindsay FH, Dennis SC, Noakes TD, and Hawley JA (1997). Skeletal muscle buffering capacity and endurance performance after high-intensity interval training by well-trained cyclists. *Eur J Appl Physiol 75: 7-13*
43. Westra, HG, de Haan A, van Doorn JE, and de Haan EJ (1985). The effect of intensive interval training on the anaerobic power of the rat quadriceps muscle. *J Sports Sci 3: 139-150*
44. Wilber, RL (2001). Current trends in altitude training. *Sports Med 31: 249-265*
45. Zoladz, A, Rademaker ACHJ, and Sargeant AJ (1995). Non-linear relationship between O2 uptake and power output at high intensities of exercise in humans. *J Physiol 488: 211-217*

Cita Original

M. J. Truijens, H. M. Toussaint, J. Dow, and B. D. Levine Effect of high-intensity hypoxic training on sea-level swimming performances. J. App. Physiol. 94: 733-743, 2003