



Revisión

Efectos del entrenamiento de la musculatura respiratoria sobre el rendimiento. Revisión bibliográfica

J. L. González-Montesinos^a, C. Vaz Pardal^b, J. R. Fernández Santos^a, A. Arnedillo Muñoz^c,
J. L. Costa Sepúlveda^a y R. Gómez Espinosa de los Monteros^a

^aFacultad de Ciencias de la Educación: Grado Ciencias de la Actividad Física y del Deporte. Universidad de Cádiz. Campus de Puerto Real. Puerto Real. Cádiz. España.

^bCentro Andaluz de Medicina del Deporte de Bahía Sur. Cádiz. España.

^cUnidad de Gestión Clínica de Neumología y Alergia. Hospital Universitario Puerta del Mar. Cádiz. España.

Historia del artículo:

Recibido el 1 de febrero de 2012

Aceptado el 29 de septiembre de 2012

Palabras clave:

Músculos respiratorios.

Entrenamiento.

Rendimiento.

RESUMEN

Actualmente, es aceptado por la comunidad científica que el sistema respiratorio puede limitar el ejercicio en personas con enfermedad pulmonar y/o cardiovascular. El objetivo del presente artículo es la revisión de algunos estudios realizados en relación al papel limitante del sistema respiratorio en el rendimiento físico de deportistas. Se realiza una breve descripción técnica de los dispositivos más utilizados para el entrenamiento de la musculatura respiratoria. Finalmente, se presentan los resultados más representativos, obtenidos por diversos investigadores y en distintas poblaciones, relacionados con el entrenamiento de la musculatura respiratoria y sus efectos en el rendimiento físico.

Los resultados obtenidos en las distintas investigaciones consultadas sobre el entrenamiento de los músculos respiratorios son dispares, puesto que algunos han mostrado mejoras significativas, mientras otros no han mostrado grandes efectos en el rendimiento. En todos ellos se refleja cómo el sistema respiratorio es un factor limitante del rendimiento físico en deportistas y es preciso plantearse nuevas metodologías, protocolos y planificaciones en el entrenamiento deportivo.

El entrenamiento de los músculos respiratorios, tanto mediante dispositivos umbral, de resistencia, o isocápnica, puede provocar mejoras en valores como la presión inspiratoria máxima y mejoras en el rendimiento de algunos deportes; sin embargo, son muy escasos los estudios que han encontrado mejoras en el consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}).

Las discrepancias entre los estudios analizados pueden estar provocadas por diferencias en las intensidades y duración de los ejercicios utilizados, así como por diferencias en el diseño experimental y el nivel de condición física de los sujetos.

© 2012 Revista Andaluza de Medicina del Deporte.

ABSTRACT

Effects of respiratory muscles training on performance. Literature review

It is currently accepted by the scientific community that the respiratory system may limit the exercise in people with lung disease and / or cardiovascular disease. The aim of this study is to review some studies about the limiting role of the respiratory system in the physical performance of athletes and the breath factors that can limit it. We make a brief technical description of the devices used for respiratory muscle training. Finally, we present the most representative results obtained by different researchers in different populations, related to respiratory muscle training and its effects on physical performance.

Results obtained in different studies about respiratory muscles training are uneven as some have shown significant improvements, while others have shown no major effects on the performance. All of them reflect that respiratory system is a limiting factor in the physical performance of athletes and it is necessary to consider new methodologies, protocols and plans in sports training.

Respiratory muscles training, either by a threshold device, resistance, or isocapnic, may cause improvements in the values of maximum inspiratory pressure and improvements in some sports performance, however, very few studies have found improvements in peak oxygen consumption.

Disagreements between the analyzed studies may be caused due to differences in intensity and duration of the exercises used in the tests, as well as by differences between the experimental design and the physical fitness level of subjects.

© 2012 Revista Andaluza de Medicina del Deporte.

Keywords:

Respiratory muscles.

Training.

Performance.

Correspondencia:

J. L. González-Montesinos.

Universidad de Cádiz.

Campus de Puerto Real.

Puerto Real 11519. Cádiz. España

Correo electrónico: jgmontesinos@uca.es

Introducción

Es aceptado por la comunidad científica que el sistema respiratorio puede limitar el ejercicio en personas con enfermedades pulmonares o cardiovasculares. ¿Hasta qué punto el sistema respiratorio puede jugar un papel importante en la limitación del rendimiento en personas sanas y en deportistas? ¿Cuáles son los factores respiratorios que pueden limitar el rendimiento físico?

Cada vez es más utilizada, en el ámbito de la clínica y del deporte, la realización de planes de entrenamiento de los músculos respiratorios (MR) dirigidos, principalmente, a la mejora de la capacidad aeróbica; bien para un aumento de la calidad de vida en enfermos¹⁻⁵ o para la mejora del rendimiento físico en personas sanas⁶⁻⁹.

En sujetos con sobrepeso y obesidad también se han realizado estudios sobre el entrenamiento de los MR. Así por ejemplo, en un estudio realizado por Frank et al¹⁰ obtuvieron, en una población de 26 sujetos y tras un programa de entrenamiento mediante hiperpnea normocápnica y un programa nutricional; una pérdida de peso, un mayor rendimiento físico y una menor percepción de la disnea respiratoria.

El entrenamiento de los MR, también es fundamental en poblaciones que desempeñan trabajos con alta exigencia física, como pueden ser militares, servicios de emergencias o rescatadores de alta montaña, los cuales suelen llevar consigo mochilas y cargas pesadas. Además, dichas poblaciones suelen usar mascarillas o aparatos respiratorios aumentando de esta forma el trabajo inspiratorio y espiratorio del ciclo respiratorio, precipitando de forma significativa la fatiga muscular y una reducción en la tolerancia al ejercicio¹¹.

En la actividad deportiva, en concreto en estudios realizados con ciclistas y atletas, distintos autores^{12,13} han demostrado cómo un correcto plan de entrenamiento de los MR aumenta la fuerza, la capacidad de resistencia de dicha musculatura y el rendimiento deportivo.

En este contexto se plantean las siguientes preguntas: ¿qué tipo de mejoras pueden obtenerse en el rendimiento físico con un entrenamiento específico de los MR? y ¿qué medios tecnológicos se utilizan actualmente para su entrenamiento?

Así pues, y debido al creciente interés por el entrenamiento de la musculatura respiratoria, el objetivo del presente artículo ha sido la realización de una revisión bibliográfica sobre el entrenamiento de los músculos respiratorios, la instrumentación y métodos utilizados. Para ello, como fuente de datos y motor de búsqueda, se ha utilizado *PubMed-Med-Line* y *Sport-Discus*, sin restricción de idiomas en las consultas realizadas y utilizando como palabras claves: *músculos respiratorios, entrenamiento y rendimiento físico*.

Factores respiratorios y rendimiento físico

Los principales factores respiratorios limitantes del rendimiento físico de alta intensidad son: a) limitaciones de la mecánica pulmonar, b) limitación de la difusión pulmonar, c) reflejo metabólico respiratorio y d) fatiga muscular respiratoria. Los dos últimos factores se consideran fundamentales en cuanto a su relación con el entrenamiento de la musculatura respiratoria¹⁴.

Reflejo metabólico respiratorio

El reflejo metabólico respiratorio se produce como consecuencia de la fatiga de los MR ante un esfuerzo intenso y mantenido. En esta situación,

la respuesta del sistema nervioso simpático es una vasoconstricción que afecta al flujo sanguíneo de los músculos esqueléticos activos por medio de un reflejo metabólico mediado por la musculatura respiratoria. Como resultado, se provoca una disminución del flujo sanguíneo y aumento de la gravedad de la fatiga de los músculos esqueléticos, inducida por el ejercicio y redistribuyendo el flujo para preservar la función respiratoria sin comprometer la demanda energética de los MR. Un aumento en la fatiga de los músculos esqueléticos puede desempeñar un papel esencial en la determinación de la tolerancia al ejercicio a través de un efecto directo en el desarrollo de fuerza muscular¹⁵.

Durante ejercicios intensos, se ha estimado que los MR pueden llegar a utilizar un 16% del gasto cardíaco, disminuyendo la disponibilidad de oxígeno para la musculatura esquelética responsable del movimiento, por lo que se podría considerar al sistema respiratorio como un limitante del consumo de oxígeno máximo ($VO_2\max$) y, por lo tanto, del rendimiento en estos deportistas^{16,17}.

Por tanto, en caso de que las necesidades de oxígeno de los MR sean muy elevadas, se generará una demanda competitiva con respecto a los músculos esqueléticos activos, que podrían ver limitado el aporte de oxígeno a sus células, y ello provocar un descenso del rendimiento¹⁸. Los resultados de Harms et al^{16,17} mostraron correlaciones inversas entre el aumento del trabajo respiratorio y el flujo sanguíneo de los músculos, por ello, puede considerarse que el trabajo respiratorio durante un ejercicio máximo puede comprometer la perfusión y el consumo de oxígeno (VO_2) de los músculos¹³.

Así pues, esto produciría una competencia por el flujo total de sangre, disminuyendo el tiempo de trabajo y la fuerza producida¹⁹. Romer et al²⁰ estimaron, en sujetos sanos y tras provocar fatiga de los músculos respiratorios, una reducción del 30% en la fuerza del cuádriceps, lo cual significaría un descenso significativo en el rendimiento.

Por lo tanto, y ante la pregunta de si es preciso un entrenamiento de la musculatura respiratoria que complete el entrenamiento específico del deportista, McConnell et al¹⁹, reflejan cómo un adecuado protocolo de entrenamiento de los MR puede producir una mejora en la tolerancia a la fatiga y mayor eficiencia respiratoria, lo que podría retrasar la aparición del reflejo metabólico respiratorio. Esto tendría influencia positiva en el rendimiento deportivo, ya que el descenso de funcionalidad de los MR tiene influencia en el rendimiento aeróbico¹⁷. Así pues, estos autores han demostrado mejoras en el rendimiento tras la aplicación de un plan de entrenamiento de los MR.

Fatiga muscular respiratoria

La fatiga muscular respiratoria consiste en la disminución reversible de la fuerza que el músculo puede desarrollar durante la contracción sostenida o repetida, pudiendo llegar a no poder mantener el nivel de ventilación suficiente, de acuerdo a las necesidades requeridas. La fatiga muscular respiratoria puede aparecer por falta de la contractilidad de los músculos o porque la carga sea tan elevada que supere la eficiencia de los mismos. También predispone a la fatiga la contracción de la musculatura en condiciones geométricas desfavorables, como ocurre en algunas enfermedades^{21,22}.

En general, los MR se muestran resistentes a la fatiga, no obstante, se ha observado un descenso de la fuerza y del rendimiento físico de estos músculos después de realizar un ejercicio de resistencia aeróbica intenso²³.

En estudios precedentes, se consideraba que la ventilación pulmonar no era un limitante del rendimiento físico, puesto que su capacidad de

aumento durante el ejercicio es, en términos relativos, mucho mayor que la capacidad de incremento del gasto cardíaco (GC) o del VO_2 . Por lo tanto, el sistema respiratorio no parecía llegar a su límite teórico durante un esfuerzo aeróbico máximo²⁴. Actualmente el entrenamiento de los MR es parte fundamental en el entrenamiento físico y deportivo; así por ejemplo, se ha descrito fatiga de los MR en atletas de resistencia²⁵⁻²⁸.

Estudios con ratas han determinado que el entrenamiento aeróbico provoca un incremento de la actividad enzimática mitocondrial del diafragma. Vrabas et al²⁹ describieron un aumento de la capacidad oxidativa del diafragma en ratas sometidas a un entrenamiento aeróbico, así como un aumento de la resistencia a la fatiga.

El diafragma del cuerpo humano es considerado como un músculo con buena capacidad oxidativa, sin embargo, después de ejercicios de resistencia aeróbica prolongados se ha observado un agotamiento de las reservas de glucógeno tanto en diafragma como en los intercostales³⁰, lo que implica la posibilidad de que los MR puedan fatigarse por depleción de sustratos en este tipo de ejercicio. En este sentido se muestra que esta capacidad oxidativa puede ser mejorada mediante cargas de resistencia durante la inspiración³¹.

En relación a la ventilación pulmonar, se ha demostrado un descenso de la máxima ventilación voluntaria (MVV) después de ejercicios físicos aeróbicos de larga duración, con descensos significativos de las presiones inspiratorias y espiratorias. Por otra parte, se ha observado un descenso del tiempo de resistencia al ejercicio, después de haber realizado durante un tiempo tasas de ventilación máxima o después de someterse a una carga de resistencia inspiratoria³².

Distintos estudios indican que el ejercicio induce a la fatiga muscular respiratoria^{33,34}, que puede limitar el rendimiento físico^{15,17,18,34}, que la resistencia de los MR puede ser entrenada³⁵ y que el entrenamiento de resistencia respiratoria mejora el rendimiento en el ejercicio de resistencia³⁶.

McConnell y Sharpe³⁶ investigaron si se llegaba a producir fatiga de los músculos inspiratorios después de un ejercicio de carácter máximo de corta duración en sujetos jóvenes. Se valoró, de forma indirecta, la fuerza de la musculatura respiratoria a través de mediciones estáticas de la presión inspiratoria en boca durante esfuerzos inspiratorios oclusivos. Se valoró el pico de presión y presión máxima promediada, después de haber realizado un ejercicio de tipo incremental diseñado para alcanzar el agotamiento en 10-15 minutos. Los resultados mostraron un descenso significativo tanto del pico de presión como de la presión máxima promediada. Los datos del presente estudio parecen soportar la existencia de fatiga inspiratoria tras ejercicio extenuante en jóvenes moderadamente entrenados. Así pues, se sugiere que los MR son resistentes a la fatiga en condiciones no patológicas y en reposo, pero que durante el ejercicio intenso y prolongado es posible la instauración de fatiga muscular respiratoria.

Conocidos los principales factores respiratorios limitantes del ejercicio físico aeróbico, se puede afirmar que el compromiso energético de los MR con respecto a los músculos esqueléticos activos y la fatiga propia de los MR, son los dos principales factores donde el entrenamiento de la musculatura respiratoria puede provocar las mayores mejoras en el rendimiento físico aeróbico máximo y submáximo.

Así pues, podemos encontrar suficientes estudios para afirmar que la limitación respiratoria al ejercicio en individuos entrenados puede estar relacionada con la fatiga de los MR, además del compromiso de aporte de oxígeno de los MR en competición con los músculos motores. Sin embargo, es difícil conocer en qué grado cada uno de estos factores contribuye a la claudicación final ante el ejercicio¹³.

Entrenamiento de la musculatura respiratoria

Revisadas las evidencias científicas por las cuales el rendimiento físico pueda estar limitado por factores respiratorios, resulta comprensible proponer que un entrenamiento específico de la musculatura inspiratoria puede mejorar la capacidad ante el esfuerzo. Las adaptaciones provocadas tras un correcto programa de entrenamiento pueden influir en el metabolismo energético de los MR, ganando en eficiencia y provocando una menor demanda de oxígeno con respecto a los músculos esqueléticos.

La valoración y cuantificación de la fatiga de los MR es un proceso bastante complejo en comparación con otros músculos del cuerpo humano, debido principalmente a la ubicación y función que tienen estos. Acceder a ellos como a sus nervios inervadores, es una tarea casi imposible, lo que puede traer problemas a la hora de la medición³⁷. Así por ejemplo, no existen investigaciones que analicen las consecuencias de un entrenamiento de la musculatura respiratoria sobre la actividad enzimática de las fibras musculares en humanos, debido a las dificultades éticas y de protocolo que ello conlleva, por lo que el efecto del entrenamiento específico de la musculatura respiratoria ha de realizarse en función de la mejora de los parámetros funcionales.

Desde el punto de vista de los parámetros funcionales, hoy en día está bien documentado que el entrenamiento de los músculos inspiratorios (EMI) mejora el rendimiento del ejercicio físico en sujetos no entrenados¹² y entrenados, por medio de una gama de deportes y ejercicios de resistencia³⁸ y durante *sprint repetidos*^{39,40}.

Por otro lado, se ha descubierto que el entrenamiento de los MR provoca una mejora en la cinética de aclaración del lactato y un descenso en las sensaciones de percepción del esfuerzo, tanto respiratorio como locomotor⁴¹.

Tipos de dispositivos de entrenamiento de la musculatura inspiratoria

Los dispositivos y métodos de EMI se iniciaron en los programas de rehabilitación en la década de los 80, con el objetivo de mejorar la fuerza y la resistencia de los MR, obteniendo como resultado una reducción en la sensación de disnea y un incremento de la tolerancia al ejercicio^{42,43}.

Hay tres tipos o categorías de dispositivos para el entrenamiento de la musculatura inspiratoria: dispositivos umbral, dispositivos de carga resistiva y dispositivos de hiperpnea isocápnica voluntaria.

Dispositivo umbral

El entrenamiento mediante umbral de carga respiratoria se obtiene mediante un pequeño dispositivo de mano que permite el flujo de aire durante la inspiración, únicamente después de alcanzar una cierta presión inspiratoria. El nivel del esfuerzo requerido por los músculos inspiratorios puede ajustarse mediante la tensión de un muelle o resorte y puede ajustarse de acuerdo con un porcentaje de la presión máxima inspiratoria del paciente (P_{imax}). La tensión del muelle determina la apertura de la válvula a una presión prefijada, con un rango entre 0 y 45 cm de agua. El dispositivo está concebido para que no haya flujo significativo por debajo del valor umbral; una vez superado éste y abierta la válvula, la resistencia lineal al incremento de flujo debe ser inapreciable (*Inspiratory Pressure Threshold Device*[®], Cedar Grove, NJ, EE.UU.).

Dispositivo de carga resistiva

Uno de los dispositivos más utilizados es el PFLEX Resistive Trainer (Respironics HealthScan Inc., Cedar Grove, Nueva Jersey.), el cual consiste en un pequeño dispositivo con una boquilla y un dial circular. Al girar el dial varía el tamaño de la abertura por la cual el sujeto debe respirar. Cuanto más pequeña es la abertura, mayor será la resistencia a la inspiración. En total cuenta con 6 resistencias inspiratorias u orificios que adaptan la entrada del aire al cuerpo del dispositivo. Los diámetros son de 0,45 mm (orificio 6), de 1,9 mm (orificio 5), de 2,7 mm (orificio 4), de 3,5 mm (orificio 3), de 4,5 mm (orificio 2) y de 5,35 mm (orificio 1). En este tipo de entrenamiento se le pide al sujeto que inspire por medio de estos orificios con diámetros progresivamente menores. El objetivo, al igual que en el resto de los dispositivos es aumentar la carga sobre los músculos inspiratorios. El nivel de carga se va incrementando progresivamente, siempre y cuando se garantice que entre un incremento y otro la frecuencia respiratoria, el volumen corriente (VT) y el tiempo inspiratorio permanezcan constantes⁴⁴. Son muy numerosos los estudios que utilizan este dispositivo como medio de entrenamiento de los MR^{12,39,40,45,46}.

Destacar también, por su extendido uso, el dispositivo *PowerBreathe*^{47,48}, patentado por *IMT Technologies LTD*. Consiste en un aparato de entrenamiento de la musculatura inspiratoria que comprende una boquilla, un cuerpo principal y un regulador que, mediante una válvula, permite controlar la resistencia del paso del aire, permitiendo de esta forma el entrenamiento de los músculos inspiratorios. Presenta en total 12 modelos diferenciados, agrupados en 4 series y 3 niveles de resistencia cada uno, adaptados a las características de la población a la que va dirigido (fig. 1).

Hiperpnea isocápnic voluntaria (voluntary isocapnic hyperpnea -VIH-)

Este dispositivo consiste en un aparato en el cual se aumenta el nivel de ventilación del sujeto hasta un nivel previamente determinado, que suele estar entre el 60-70% de la MVV. Esta hiperventilación provoca un aumento de la frecuencia respiratoria, que puede llegar a alcanzar 50-60 rpm, y del VT, de 2,5 a 3,5 l. Este modo de entrenamiento de la MR requiere que el paciente realice períodos prolongados de hiperpnea con



Fig. 1. Dispositivo *PowerBreathe*, de IMT Technologies LTD.

una duración de hasta 15 minutos y con una frecuencia de dos veces al día, de 3 a 5 veces por semana, durante 4-5 semanas³⁵. El indicador clave para determinar el nivel de hiperpnea que debe alcanzar el paciente es la capacidad ventilatoria máxima sostenida, que se define como el nivel máximo de ventilación que puede ser mantenido en condiciones isocápnicas durante 15 minutos. Para evitar la consiguiente hipocapnia, este tipo de entrenamiento se debe realizar respirando por medio de un circuito isocápnico, es decir, que mantenga los niveles estables de CO₂. Por ello, y debido a lo complejo del circuito de reinhalación requerido para esta modalidad de entrenamiento, los estudios al respecto son escasos pero, sin excepción, han demostrado mejoría del 20 al 55 % en la resistencia a la fatiga de los músculos ventilatorios^{35,49}. Este tipo de entrenamiento mejora principalmente la resistencia respiratoria, en vez de la fuerza, dado que el tipo de carga al que se someten los músculos es de baja intensidad y larga duración.

Un dispositivo que utiliza el principio de hiperpnea isocápnica es el *SpiroTiger*[®] (fig. 2), desarrollado por *Ideag Lab* (Suiza). El entrenamiento de los MR mediante este dispositivo consiste en mantener una frecuencia de respiración elevada pero manteniendo una concentración de CO₂ en sangre constante; para lo cual incorpora una bolsa calibrada donde se recoge el aire exhalado por el paciente y se mezcla con aire ambiente en la siguiente inspiración.

Efectos del entrenamiento de los MR en el rendimiento deportivo

Como se ha comentado, históricamente la actividad física no se ha considerado limitada por la ventilación o por la función muscular respiratoria y actualmente es ya conocido que después de ejercicio submáximo prolongado y de ejercicio máximo en periodos cortos, se produce una fatiga de los MR⁴⁵. Sin embargo, ¿cuál es la evidencia científica y los estudios realizados sobre los efectos del entrenamiento de la musculatura respiratoria en el rendimiento deportivo? A continuación se reflejan algunas de las investigaciones más representativas a este respecto y se muestra una tabla resumen con los protocolos, sujetos y resultados obtenidos (tabla 1).

Se ha demostrado no solo la evidencia científica sobre la fatiga que sufren los MR durante el ejercicio, como por ejemplo después de carre-



Fig. 2. Dispositivo *SpiroTiger*. Laboratorios Ideag AG. Suiza.

Tabla 1

Resumen de los resultados de distintas investigaciones relacionadas con el entrenamiento de los MR y su influencia en el rendimiento físico

Autor	n	Método	Cambios rendimiento y Pimax
Volianitis et al ⁷	14 sujetos (7 GE-7 GC)	GE: 50% Pimax, 2d/s, 11 semanas	GE: Pimax + 45% y mejoría prueba remo. CC: Pimax + 5%
Sonetti et al ⁵⁷	17 sujetos ciclistas (GE: 9 GP:8)	GE: entrenamiento respiratorio hiperpnea durante 5 semanas, 25 sesiones, 30 min/día, 5 días a la semana), entrenamiento muscular respiratorio	GE: + 8% Pimax. Test 8 km +26%
Stuessi et al ⁵⁵	28 sujetos ciclistas (13 GE, 15 GC)	GE: 40 sesiones de 30 min. GC: no entrenó	GP: +3,7 Pimax. Test 8 km: +16%, GE: + 5,2% resistencia muscular respiratoria GC: no mostraron mejoras
Gething et al ¹²	15 sujetos (5 GE, 5 GC, 5 GP)	EMR: hiperpnea isocapnica GE: 80% Pimax, 3 d/s, 10 semanas GP: carga mínima GC: no EMI	GE: Pimax + 34% GP: sin cambios GC: sin cambios Todos: sin cambios en VO ₂ max, ni Wmax Mejoría en prueba <i>time-trial-test</i> GE: +12% resistencia muscular respiratoria
Holm et al ⁵⁶	20 sujetos ciclistas (10 GE, 6 GC, 4 GP)	GE: 20 sesiones de 45 min GP: 20 sesiones de 5 min. GC: no entrenó	Mejora en VE, VO ₂ y disminución del PCO ₂ Mejora rendimiento contrarreloj ciclista en un 4,7%
Griffiths et al ³⁸	17 sujetos remeros (GE: 7 GC: 10)	EMR: hiperpnea isocapnica Entrenamiento respiratorio 4 semanas + 6 semanas entrenamiento habitual + ER. Pimax 50%	GC y GP: no mostraron mejoras GE: Pimax +26%. PEmax: 31%
Aznar-Láin et al ⁵⁸	18 sujetos ancianos	GE: entrenamiento respiratorio 8 semanas (EMI)	No mejoras en test ergómetro remo de 6 min máximo El GE mejoró la fuerza de los músculos inspiratorios, el tiempo hasta el agotamiento en una prueba de esfuerzo y el tiempo dedicado a realizar ejercicio moderado a vigoroso
Dickinson et al ⁴⁸	1 atleta JJOO Atenas 2004	GP: 8 semanas simulacro de entrenamiento Entrenamiento respiratorio hiperpnea de 11 semanas 5 veces por semana. <i>Power Breathe</i> : 60% Pimax	Pimax +31%
Kilding et al ⁵²	16 nadadores	Entrenamiento respiratorio umbral 30 repeticiones 2 veces al día 6 semana	Reducción tiempo de recuperación entre carreras Prueba 100 m. Mejora tiempo: -1,7%
Frank et al ¹⁰	26 sujetos con sobrepeso y obesidad (IMC = 31,3)	GE: entrenamiento resistencia hiperpnea normocápica durante 5 semanas, 30 min + nociones de nutrición durante 6 meses. GC: nociones de nutrición 6 meses	Prueba 200 m. Mejora tiempo: -1,5% Prueba 400 m. Empeora tiempo: +0,6% Pérdida de peso similar en ambos grupos (4,2 frente a 3,7 kg P < 0,005). Test de ciclismo: GE mayor distancia recorrida que GC: (1678 frente a 1824 m; P < 0,001).GE: menor percepción de la disnea

N: número de sujetos; GE: grupo experimental; GC: grupo control; GP: grupo placebo; EMI: entrenamiento musculatura inspiratoria; Pimax: presión inspiratoria máxima; PEmax: presión inspiratoria máxima; Wmax: trabajo máximo; d/s: días semana; km: kilómetros; m: metros.

ras de larga distancia como la maratón, sino que además esta fatiga muscular se puede prolongar hasta tres días después de haber finalizado el ejercicio⁵⁰. Además, se ha estimado que la fatiga de los MR puede provocarse en ejercicios de corta duración pero de mayor intensidad⁴⁹.

En deportes como la natación, los nadadores de competición requieren de una habilidad de regulación para conseguir un patrón de respiración hermética a volúmenes y ratios de flujo que son mucho más altos que el ejercicio terrestre. De acuerdo con esto, una musculatura inspiratoria y espiratoria bien acondicionada es un prerrequisito para una eficiente mecánica cardiovascular. Desde este punto de vista, la demanda sobre los MR incluye la necesidad de expandir las paredes de la cavidad torácica contra la presión adicional provocada por la inmersión en el agua, aumento del flujo de carga resistiva debido a las tasas de alto flujo durante la inspiración y la espiración, un aumento de la velocidad de contracción de los MR y mayor rendimiento de los músculos accesorios para ayudar a los movimientos de natación⁵¹. Desde esta perspectiva, se demuestra que un entrenamiento de los MR en nadadores crea una tendencia a la mejora de la velocidad en competición, y mejoras de las fun-

ciones pulmonares tales como la Pimax y potencia espiratoria máxima⁵². Kilding et al⁵², aplicaron a un grupo de nadadores, especialistas en tres distancias distintas, un entrenamiento de los músculos inspiratorios de 6 semanas de duración, obteniendo resultados positivos. El grupo control mejoró, con respecto al grupo placebo, en tiempos de las pruebas de 100 m y 200 m, con cambios significativos en la Pimax y en la percepción de esfuerzo subjetivo.

Inbar et al⁵³ entrenaron de forma específica los MR de un grupo de atletas de resistencia con el fin de valorar su influencia sobre la capacidad aeróbica. Durante 10 semanas y seis sesiones por semana, con una duración de 30 minutos, los atletas recibieron un entrenamiento de los músculos inspiratorios con una resistencia igual al 80% de la presión inspiratoria máxima. Los resultados mostraron un aumento de la fuerza y de la resistencia de los músculos inspiradores, pero no se observaron cambios en los parámetros ergoespirométricos máximos (VEmax), saturación arterial de oxígeno, ni del VO₂max.

Se han estudiado los efectos del entrenamiento de los MR y su relación sobre la concentración de lactato en sangre, el VO₂ durante el ejer-

cicio y su relación con el rendimiento físico. En este estudio, una población de 20 sujetos activos físicamente, realizó entrenamiento de los MR mediante sesiones de 30 minutos de hiperpnea isocápnica, durante 4 semanas, 5 días a la semana. Los resultados obtenidos mostraron una mejora significativa en los tests de resistencia respiratoria y del tiempo de resistencia en cicloergómetro. Con respecto al consumo de oxígeno no se modificó en ninguna de las condiciones, mientras que el lactato alcanzó menores concentraciones en sangre después del entrenamiento de los MR. La disminución del lactato sanguíneo estuvo causada por un aumento de su consumo por los MR entrenados⁵⁴.

Boutellier et al³⁵ realizaron una investigación sobre los efectos del entrenamiento de los MR sobre la capacidad de resistencia. Durante 4 semanas y mediante la realización de hiperventilación voluntaria de 85-160 l/minutos durante 30 minutos al día, los sujetos entrenaron sus MR. Antes y después del período de entrenamiento los sujetos realizaron un test de resistencia respiratoria (hiperventilación voluntaria manteniendo una frecuencia respiratoria de entre 42-48 rpm, y un volumen tidal entre 2,5-3,25 l) y ergoespirométricos para evaluar los efectos del entrenamiento de los MR. Los resultados mostraron un aumento del tiempo de resistencia de los MR y disminución de la ventilación pulmonar (VP) en una determinada intensidad. Sin embargo, los valores del umbral anaeróbico (UA) y del VO_2max no se modificaron después del entrenamiento.

En ciclistas también se han encontrado mejoras en el rendimiento de los músculos inspiratorios y en el rendimiento físico. Se han demostrado cambios positivos en las funciones pulmonares dinámicas, en la percepción de esfuerzo y las pruebas específicas de este deporte²⁰ (20 km y 40 km). Se han encontrado mejoras en el rendimiento de ciclistas mediante el entrenamiento de la MR con hiperpnea isocápnica, con incrementos del + 5,2% y + 12% de la resistencia muscular respiratoria, respectivamente^{55,56}. Sonetti et al⁵⁷, en un estudio con 17 ciclistas, encontraron mejoras en la Pimax y en el rendimiento físico en un test de 8 km.

En un estudio realizado con remeros⁴⁵, se les aplicó tres propuestas diferentes en el calentamiento: calentamiento submáximo específico de remo, calentamiento específico de remo y calentamiento "plus" que consistió en combinar el específico de remo con la suma de un entrenamiento específico para los MR. Los resultados sugieren que la combinación del calentamiento específico de la musculatura respiratoria y del específico de remo es el idóneo en la preparación de la competición para mejorar valores de potencia media durante una prueba de esfuerzo máximo en 6 minutos. El remo es un deporte que requiere una gran potencia aeróbica y ventilación por minuto, normalmente mayor de 200 l/min¹ en la élite masculina, el pico de flujo espiratorio puede obtener valores sobre 15 l/s¹. La carga de la respiración durante el remo provoca una demanda adicional para los MR, que deben estabilizar el tórax durante la batida con la pala, como también lograr la respiración con sus debidos movimientos de la caja torácica. Además, una alteración de los patrones de reclutamiento de los MR puede tener efectos en la eficiencia de la mecánica de la respiración y en la acción de remar, por sus perjudiciales consecuencias para el rendimiento. Griffiths et al³⁸ demostraron mejoras en estos deportistas en los valores del Pimax y de la potencia. La prueba consistió en un test de 6 minutos al máximo esfuerzo en un grupo control sobre el grupo no entrenado, después de un entrenamiento de la musculatura inspiratoria y espiratoria de seis semanas de duración.

Gething et al¹² valoraron el efecto de 10 semanas de entrenamiento de los músculos inspiratorios sobre el rendimiento en deportistas, los cuáles desarrollaron un test de carga constante. Observaron que, después del periodo de entrenamiento, se atenúa la frecuencia cardíaca,

la ventilación pulmonar y la percepción subjetiva del esfuerzo, mejorando además el tiempo hasta el agotamiento.

También se han realizado estudios sobre el entrenamiento de los MR en personas ancianas⁵⁸. Se valoraron los efectos de 8 semanas de entrenamiento de los músculos inspiratorios sobre 18 sujetos ancianos moderadamente activos. Se observaron mejoras significativas en la fuerza de los músculos inspiratorios, en el tiempo hasta el agotamiento en una prueba de esfuerzo máximo y en el tiempo dedicado a realizar actividad de intensidad moderada a vigorosa.

Sabine et al⁹ tras una revisión sistemática de 46 estudios sobre el entrenamiento MR en sujetos sanos observaron que los dos tipos más comunes de entrenamiento de la musculatura respiratoria, fuerza muscular inspiratoria y entrenamiento de la resistencia muscular respiratoria, poseen efectos parecidos, aunque se obtenían mejoras superiores en los practicantes de deportes de mayor duración. Por otro lado, observaron mejores efectos en aquellos estudios que combinaron el entrenamiento de la MR inspiratoria/espiratoria. Finalmente, concluye como el entrenamiento de los MR se puede utilizar para mejorar el rendimiento del ejercicio, pero se debe ser meticuloso respecto a las pruebas clínicas utilizadas para investigar las posibles mejoras.

En resumen, los resultados demuestran que el sistema respiratorio es limitante del rendimiento en atletas de resistencia, y que el entrenamiento específico de los MR puede mejorar ese rendimiento.

Así pues, tras la revisión realizada, diversos autores han utilizado distintos protocolos para el entrenamiento de los MR y diferentes han sido las respuestas al entrenamiento en función de la metodología y dispositivos utilizados. Por ello, las investigaciones que involucran protocolos de entrenamiento de los MR no han arrojado resultados concluyentes en todos los casos. La variabilidad de datos puede ser producto de las diversas metodologías de entrenamiento, los sujetos y los protocolos empleados.

Conclusiones y recomendaciones finales

Conclusiones

Del análisis de los trabajos publicados se deduce que el sistema respiratorio es un factor limitante en el rendimiento físico, por lo que es pertinente su entrenamiento.

Existen diversos dispositivos para el entrenamiento de los MR, tanto de umbral, como de resistencia, como isocápnica y en los estudios realizados se muestra cómo se puede provocar mejoras en valores como el Pimax y mejoras en el rendimiento de algunos deportes; sin embargo, son muy escasos los estudios que han encontrado mejoras en el VO_2max , y se desprende una mayor efectividad en el rendimiento de pruebas submáximas.

Las investigaciones consultadas nos revelan que determinados protocolos de entrenamiento de los MR producen buenos resultados en el rendimiento deportivo, sobre todo en actividades caracterizadas por mantener altos niveles de intensidad durante tiempos prolongados; por lo cual, sería conveniente establecer el método de entrenamiento de los MR más adecuado que afecte de forma positiva a la mecánica y eficiencia ventilatoria.

En algunos estudios se ha evaluado el efecto del entrenamiento específico de los MR en el desarrollo del ejercicio, en estos casos la literatura no ha sido muy concluyente, puesto que algunos han mostrado mejoras, mientras otros no han mostrado efectos en el rendimiento. Entre los es-

tudios que reflejan mejoras en los parámetros de rendimiento físico destacan aumentos en la capacidad aeróbica, velocidad de competición en nadadores y en ciclistas, y aumentos en la potencia media en remeros, entre otros. Sin embargo, otros estudios no encuentran mejora significativa en el consumo máximo de oxígeno, valor fundamental en deportes de resistencia aeróbica. Según la bibliografía consultada, las mejoras observadas son mayores en los individuos menos aptos y en los deportes de mayor duración.

Así pues, tras la revisión bibliográfica realizada, se puede concluir que el sistema respiratorio puede limitar el rendimiento físico durante el ejercicio, el cual, sobrepasada cierta intensidad, induce a la fatiga de los MR. Dicha musculatura, mediante un adecuado entrenamiento, mejora el rendimiento físico.

Recomendaciones finales

Con la pertinente cautela, se sugiere que las discrepancias entre estudios pueden estar provocadas por diferencias en las intensidades y duración de los estímulos utilizados, en el diseño experimental y el nivel de condición física de los sujetos evaluados; por ello, es preciso determinar correctamente metodología, protocolo y planificación en el entrenamiento deportivo de los MR para que éste sea efectivo y mejore el rendimiento físico.

Bibliografía

- Weiner P, McConnell A. Respiratory muscle training in chronic obstructive pulmonary disease: Inspiratory, expiratory, or both?, *Current Opinion in Pulmonary Medicine*. 2005;11(2):140-4.
- McConnell AK. The role of inspiratory muscle function and training in the genesis of dyspnoea in asthma and COPD. *Primary Care Respiratory Journal*. 2005;14(4):186-94.
- Turner LA, Mickleborough TD, McConnell AK, Stager JM, Tecklenburg-Lund S, Lindley MR. Effect of inspiratory muscle training on exercise tolerance in asthmatic individuals. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43(11):2031-8.
- How SC, Romer LM, McConnell AK. Acute effects of inspiratory pressure threshold loading upon airway resistance in people with asthma. *Respiratory Physiology and Neurobiology*. 2009;166(3):159-63.
- Mickleborough TD, Turner LA, Tecklenburg S, Stager JM, Lindley MR, McConnell AK. Inspiratory Muscle Training Improves Exercise Tolerance and Attenuates Inspiratory Muscle Fatigue and the Perception of Dyspnea in Asthmatic Individuals. *Med Sci Sports Exerc*. 2008;40(5):305-15.
- Edwards RH. Human muscle function and fatigue. *Human muscle fatigue: Physiological mechanism*. London: Whelan; 1981.
- Volianitis S, McConnell AK, Koutedakis Y, McNaughton L, Backx K, Jones DA. Inspiratory muscle training improves rowing performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2001;33(5):803-9.
- Edwards AM, Wells C, Butterly R. Concurrent inspiratory muscle and cardiovascular training differentially improves both perceptions of effort and 5000m running performance compared with cardiovascular training alone. *Br J Sports Med*. 2008;42(10):823-7.
- Sabine IK, Held UF, Frank I, Spengler C. Effect of Respiratory Muscle Training on Exercise Performance in Healthy Individuals: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*. 2012;(42)8:707-24.
- Frank I, Briggs R, Spengler CM. Respiratory Muscles, Exercise Performance, and Health in Overweight and Obese Subjects. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;(43)4:714-27.
- Brown PI, McConnell AK. Respiratory-Related Limitations in Physically Demanding Occupations. *Aviation Space and Environmental Medicine*. 2012; 83(4):424-30.
- Gething AD, Williams M, Davies B. Inspiratory resistive loading improves cycling capacity: a placebo controlled trial. *Br J Sports Med*. 2004;38:730-6.
- Abeijon B. Efectos del entrenamiento del diafragma y músculos accesorios de la inspiración en atletas de élite. Facultad de Medicina. Universidad Autónoma. Barcelona, 2007. Tesis Doctoral.
- López-Chicharro J, Fernández-Vaquero A. Fisiología del Ejercicio. 3ª ed. En: Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2001.
- Romer LM, Polkey MI. Exercise-induced respiratory muscle fatigue: implications for performance. *Journal of Applied Physiology*. 2008;104:879-88.
- Harms CA, Babcock MA, McClaran SR, Pegelow DF, Nickele GA, Nelson WB, et al. Respiratory muscle work compromises leg blood flow during maximal exercise. *J Appl Physiol*. 1997;82:1573-83.
- Harms CA, Wetter TJ, McClaran SR, Pegelow DF, Nickele GA, Nelson WB, et al. Effects of respiratory muscle work on cardiac output and its distribution during maximal exercise. *J Appl Physiol*. 1998;85:609-18.
- Dempsey JA, Romer L, Rodman J, Miller J, Smith C. Consequences of exercise-induced respiratory muscle work. *Respir Physiol Neurobiol*. 2006;151:242-50.
- McConnell AK, Lomax M. The influence of inspiratory muscle work history and specific inspiratory muscle training upon human limb muscle fatigue. *J Physiol*. 2006;577:445-57.
- Romer LM, Lovering AT, Haverkamp HC, Pegelow DF, Dempsey JA. Effect of inspiratory muscle work on peripheral fatigue of locomotor muscles in healthy humans. *J Physiol*. 2006;571:425-39.
- Aubier M. Respiratory muscle fatigue. *Intensive Care Med*. 1989;15(1):17-20.
- DeVito E, Grassino AE. Respiratory muscle fatigue 2ª ed. En: Roussos C, editors. *The Thorax*. New York: Marcel Dekker; 1995. p. 1857-79.
- Mador MJ, Acevedo FA. Effect of respiratory muscle fatigue on subsequent exercise performance. *J Appl Physiol*. 1991;70:2059-65.
- Guyton A. Tratado de Fisiología Médica. 9ª ed. México: Mc Graw Hill editors; 1992.
- Dempsey JA, Hanson PG, Henderson KS. Exercise-induced arterial hypoxemia in healthy human subjects at sea level. *J Physiol*. 1984;355:161-75.
- Powers S, Dodd S, Lawler J, Landry G, Kirtley M, McKnight T, et al. Incidence of exercise hypoxemia in elite endurance athletes at sea level. *Eur J Appl Physiol*. 1988;58:298-302.
- Prefaut C, Durand F, Mucci P, Caillaud C. Exercise-induced arterial hypoxaemia in athletes. *Sports Med*. 2000;30:47-61.
- Perlovitch R, Gefen A, Elad D, Ratnovsky A, Kramer MR, Halpern P. Inspiratory muscles experience fatigue faster than the calf muscles during treadmill marching. *Respir Physiol Neurobiol*. 2006;156(1):61-8.
- Vrabas IS, Dodd SL, Powers SK. Endurance training reduces the rate of diaphragm fatigue in vitro. *Med Sci Sport Exerc*. 1999;31(11):1605-11.
- Ianuzzo CD, Hamilton N, O'Brien PJ, Desrosiers C, Chiu R. Biochemical transformation of canine skeletal muscle for use in cardiac assist device. *J Appl Physiol*. 1990;68:1481-5.
- Powers SK, Lawler J, Criswell D, Dodd S, Grinton S, Bagby G, et al. Endurance training induced cellular adaptations in respiratory muscles. *J Appl Physiol*. 1990;68:2114-18.
- Martin BJ, Stager JM. Ventilatory endurance in athletes and non athletes. *Med Sci Sport Exerc*. 1981;13(1):21-6.
- Johnson BD, Babcock MA, Suman OE, Dempsey JA. Exercise induced diaphragmatic fatigue in healthy humans. *J Physiol*. 1993;460:385-405.
- Mador MJ, Magalang UJ, Rodis A, Kufel TJ. Diaphragmatic fatigue after exercise in healthy human subjects. *Am Rev Respir Dis*. 1993;148:1571-75.
- Boutellier U, Büchel R, Kundert A, Spengler C. The respiratory system as an exercise limiting factor in normal trained subjects. *Eur J Appl Physiol*. 1992;65:347-53.
- McConnell AK, Sharpe GR. The effect of inspiratory muscle training upon maximum lactate steady-state and blood lactate concentration. *Eur J Appl Physiol* 2005;94(3):277-84.
- Romer LM, Miller JD, Haverkamp HC, Pegelow DF, Dempsey JA. Inspiratory muscles do not limit maximal incremental exercise performance in healthy subjects. *Respir Physiol Neurobiol*. 2007;156:653-61.
- Griffiths LA, McConnell AK. The influence of inspiratory and expiratory muscle training upon rowing performance. *Eur J Appl Physiol*. 2007;99:457-66.
- Romer LM, McConnell AK, Jones DA. Inspiratory muscle fatigue in trained cyclists: effects of inspiratory muscle training. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34:785-92.
- Romer LM, McConnell AK, Jones DA. Effects of inspiratory muscle training upon time trial performance in trained cyclists. *J Sports Sci*. 2002;20:547-62.
- Brown PI, Sharpe GR, Johnson MA. Loading of trained inspiratory muscles speeds lactate recovery kinetics. *Med Sci Sports Exerc*. 2010;42:1103-12.
- De Lucas P, Rodríguez González-Moro JM, García de Pedro J, Santacruz A, Tatay E, Cubillo JM. Entrenamiento de los músculos inspiratorios en la enfermedad pulmonar obstructiva crónica: su repercusión en parámetros funcionales y tolerancia al ejercicio. *Arch Bronconeumol*. 1998;34:64-70.
- Jardim JR, Mayer AF, Camelier A. Músculos respiratorios y rehabilitación pulmonar en asmáticos. *Arch Bronconeumol*. 2002;36(04):181-8.
- Bustamante V, Gáldiz JB, Gorostiza A, Camino J, Talayero N, Sobradillo V. Comparación de 2 métodos de entrenamiento muscular inspiratorio en pacientes con EPOC. *Arch Bronconeumol*. 2007;43(8):431-8.
- Volianitis S, McConnell AK, Jones DA. Assessment of maximum inspiratory pressure: prior submaximal respiratory muscle activity ('Warm-Up') enhances maximum. Inspiratory activity and attenuates the learning effect of repeated measurement. *Respiration*. 2001;68:22-7.

46. Downey AE, Chenoweth LM, Townsend DK, Ranum JD, Ferguson CS, Harms CA. Effects of inspiratory muscle training on exercise responses in normoxia and hypoxia. *Respir Physiol Neurobiol.* 2007;156:137-46.
47. McConnell AK, Caine MP, Lacy GK. Inspiratory muscle training device with variable loading. IMT Technologies Ltd. Pat. EUR: A63B23/18 EP1123142 (A1). 2001-08-16.
48. Dickinson J, Whyte G, McConnell A. Inspiratory muscle training: a simple cost-effective treatment for inspiratory stridor. *Case Reports. British Journal of Sports Medicine.* 2007;41:694-5.
49. Spengler CM, Lenzin C, Stüssi C, Markov G, Boutellier U. Decreased perceived respiratory exertion during exercise after respiratory endurance training. *Am J Respir Crit Care Med.* 1998;157-82.
50. Ross E, Middleton N, Shave R, George K, McConnell A. Changes in respiratory muscle and lung function following marathon running in man. *J Sports Sci.* 2008;26(12):1295-1301.
51. Jakovljevic DG, McConnell AK. Influence of different breathing frequencies on the severity of inspiratory muscle fatigue induced by high-intensity front crawl swimming. *J Strength Cond Res.* 2009;23(4):1169-74.
52. Kilding AE, Brown S, McConnell AK. Inspiratory muscle training improves 100 and 200 m swimming performance. *Eur J Appl Physiol.* 2010;108:505-11.
53. Inbar O, Weiner P, Azgad Y, Rotstein A, Weinstein Y. Specific inspiratory muscle training in well-trained endurance athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32:1233-37.
54. Spengler CM, Roos M, Laube SM, Boutellier U. Decreased blood lactate concentrations after respiratory endurance training. *Eur J Appl Physiol.* 1999;79:299-305.
55. Stuessi C, Spengler CM, Knopfli C, Markov G, Boutellier U. Respiratory muscle endurance training in humans increases cycling endurance without affecting blood gas concentrations. *European Journal of Applied Physiology.* 2001;84:582-586.
56. Holm P, Sattler A, Fregosi RF. Endurance training of respiratory muscles improves cycling performance in fit young cyclists. *BMC Physiol.* 2004;4:9.
57. Sonetti DA, Wetter TJ, Pegelow DF, Dempsey JA. Effects of respiratory muscle training versus placebo on endurance exercise performance. *Respiration Physiology.* 2001;127:185-99.
58. Aznar-Lain S, Webster AL, Cañete S, San Juan AF, López Mojares LM, Pérez M, et al. Effects of inspiratory muscle training on exercise capacity and spontaneous physical activity in elderly subjects: a randomized controlled pilot trial. *Int J Sports Med.* 2007;28(12):1025-29.