PubliCE, (PubliCE) 1999

Research

El Entrenamiento de la Fuerza Explosiva Mejora el Tiempo de una Carrera de 5 km mediante el Mejoramiento de la Economía de Carrera y de la Potencia Muscular

Heikki Rusko[1], Leena Paavolainen[1], Keijo Häkkinen[2], Ari Nummela[1] y Ismo Hämäläinen[1]

[1]*KIHU-Research Institute for Olympic Sports.*
[2]*Neuromuscular Research Center and Department of Biology of Physical Activity, University of Jyväskylä, SF-40700 Jyväskylä, Finland.*

RESUMEN

Para investigar los efectos simultáneos del entrenamiento de la fuerza explosiva y el entrenamiento de la resistencia sobre las características del rendimiento físico, 10 atletas experimentales (E), y 8 atletas control (C) especializados en resistencia, entrenaron durante 9 semanas. El volumen total del entrenamiento se mantuvo igual en ambos grupos, pero el 32% del entrenamiento en el grupo E y el 3% en el grupo C fue reemplazado por entrenamiento de la fuerza de tipo explosivo. Se realizaron en una pista las siguientes evaluaciones, una prueba de tiempo de 5 km de carrera (5K), economía de carrera (RE), velocidad máxima de carrera en 20 metros (V_{20m}), y 5 saltos (5J). Para determinar la máxima velocidad anaeróbica (V_{MART}) y el consumo máximo de oxígeno (VO_2 máx.) se utilizaron evaluaciones de carrera máxima anaeróbica (MART) y aeróbica en cintaergómetro. El tiempo en 5K, la RE, y V_{MART} mejoraron (P<0.05) en el grupo E, pero no fueron observados cambios en el grupo C. La V_{20m} y los 5J se incrementaron en el grupo E (P<0.01) y cayeron en el grupo C (P<0.05). El VO_2 máx. se incrementó en el grupo C (P<0.05), pero no fueron observados cambios en el grupo E. En la combinación de datos, los cambios de la velocidad en 5K durante 9 semanas de entrenamiento correlacionaron (P<0.05) con los cambios en la RE [consumo de O_2 (r = -0.54)] y V_{MART} (r = 0.55). En conclusión, el presente entrenamiento simultáneo de fuerza explosiva y resistencia mejoró el tiempo de 5K en atletas bien entrenados en resistencia sin cambios sobre su VO_2 máx. Esta mejoría fue debida a un perfeccionamiento de las características neuromusculares que fueron transferidas en una mejora en V_{MART} y en la economía de carrera.

Palabras Clave: carrera de larga distancia, características neuromusculares, máximo consumo de óxigeno, carrera anae

INTRODUCCIÓN

El entrenamiento de resistencia aumenta la función del sistema cardiorrespiratorio, la capacidad oxidativa y los depósitos de glucógeno muscular (e.g., Ref. 1, 20). El entrenamiento de fuerza de alta intensidad resulta en adaptaciones neuronales

e hipertrofia muscular que son reconocidos por ser los principales responsables de la mejora del rendimiento de la fuerza (e.g., Ref. 13, 15). Un tipo específico de entrenamiento de la fuerza, el entrenamiento de la fuerza explosiva, puede conducir a adaptaciones neuronales específicas, tal como el incremento de la frecuencia de activación de unidades motoras, mientras que los vestigios de hipertrofia muscular son muchos menores que durante un entrenamiento de fuerza típico de alta intensidad (13, 15, 39).

Se ha sugerido que el entrenamiento simultáneo de fuerza y resistencia puede estar asociado con un limitado desarrollo de la fuerza durante las últimas semanas de entrenamiento, mientras que el desarrollo del máximo consumo de O_2 (VO_2 máx.) no es influenciado en forma suficiente (e.g., Ref. 10, 16, 18, 22). Estas observaciones están principalmente basadas en estudios en los cuales ha predominado el entrenamiento de la fuerza de alta intensidad y los sujetos han sido previamente desentrenados. Sin embargo, el entrenamiento de la fuerza adecuado usado simultáneamente con el entrenamiento de resistencia puede resultar en algunas mejoras en el rendimiento de la fuerza de atletas especializados en resistencia (22, 35).

Muchos deportes de resistencia requieren una alta potencia aeróbica, y el VO_2 máx. predice adecuadamente el rendimiento en resistencia en sujetos desentrenados. Sin embargo, otros factores, como la economía de carrera (RE) o el rendimiento pico de carrera en cinta ergométrica, pueden predecir mejor el rendimiento en resistencia, en un grupo homogéneo de atletas bien entrenados en resistencia (e.g., Ref. 4, 6, 30, 32). Los atletas de resistencia asimismo, deberían ser capaces de mantener una velocidad relativamente alta durante el curso de una carrera. Esto enfatiza el rol de las características neuromusculares relacionadas con la activación neuronal voluntaria y refleja, fuerza y elasticidad muscular, y mecánica de carrera (13), así como el rol de las características anaeróbicas en atletas de elite especializados en resistencia. Bulbulian et al. (5) y Houmard et al. (21) han demostrado que las características anaeróbicas pueden diferenciar a atletas bien entrenados en resistencia de acuerdo a su rendimiento en carreras de distancia. El entrenamiento de la fuerza de alta intensidad ha mejorado el rendimiento en resistencia en sujetos previamente desentrenados (e.g., Ref. 17, 28, 29) o la RE en corredoras de distancia (24) sin cambios en el VO_2 máx., sugiriendo que las características neuromusculares también pueden ser importantes para el rendimiento en resistencia. Consecuentemente, Noakes (31) Green y Patla (12) han sugerido que el VO_2 máx. y el rendimiento en resistencia pueden estar limitados no sólo por factores centrales relacionados con el consumo de oxígeno (VO_2), sino también por los llamados factores de "potencia muscular," afectados por una interacción de características neuromusculares y anaeróbicas.

En el presente estudio, la potencia muscular es definida como una habilidad del sistema neuromuscular de producir potencia durante el ejercicio máximo, cuando la producción de energía glucolítica y/u oxidativa son altas y la contracción muscular puede estar limitada. El pico de velocidad (V_{VO2max}) alcanzada durante la evaluación del VO_2 máx. en cinta ergométrica ha demostrado ser un buen indicador del rendimiento de resistencia en carreras de media y larga distancia (e.g., Ref. 4, 31, 32). Noakes (31) ha sugerido que la V_{VO2max} también puede ser usada como una medición del factor de potencia muscular en corredores de resistencia. Sin embargo además de las características neuromusculares y anaeróbicas, los procesos aeróbicos también son fuertemente involucrados en la V_{VO2max} (e.g., Ref. 19). Recientemente se ha sugerido, que el pico de velocidad en la evaluación de la carrera anaeróbica máxima (V_{MART}), la cual es influenciada tanto por la potencia como por la capacidad anaeróbica y por las características neuromusculares, sin la influencia del VO_2 máx., puede ser utilizada como una medición de la potencia muscular (38).

El propósito de este estudio fue investigar los efectos simultáneos del entrenamiento de la fuerza explosiva y el entrenamiento de resistencia sobre el rendimiento en una carrera de 5 km, la potencia aeróbica, RE, las características neuromusculares seleccionadas, y la potencia muscular en atletas bien entrenados en resistencia.

MÉTODOS

Sujetos

El grupo experimental (E) estaba compuesto por 12 y el grupo control (C) por 10 corredores de cross-country de elite, los grupos fueron emparejados con respecto al VO_2 máx. y al tiempo de carrera en la prueba de 5-km. Durante el período de estudio, dos atletas E y dos C fueron excluidos debido a lesiones o enfermedad. Las características físicas de ambos grupos antes y después del periodo experimental son presentadas en la Tabla 1. El porcentaje de grasa corporal fue estimado del grosor de cuatro pliegues cutáneos (tríceps braquial, bíceps braquial, subescapular, y suprailíaco) (11). Se midieron los perímetros de la pantorrilla y muslo derecho, con una cinta aplicada alrededor de los músculos relajados. Este estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la Universidad de Jyväskylä, Jyväskylä, Finlandia.

Variables	Grupo Experimental (n = 10)		Grupo Control (n = 8)	
	Antes	Después	Antes	Después
Edad (años)	23 ± 3		24 ± 5	
Años de Entrenamiento	8 ± 3		9 ± 4	
Entrenamiento h/año	532 ± 27		562 ± 31	
Sprint y fuerza explosiva Frecuencia / sem.	0-1		0-1	
Altura (cm)	179.3 ± 5.3	179.3 ± 5.3	181.5 ± 6.2	181.5 ± 6.2
Peso corporal (kg)	71.9 ± 4.9	72.3 ± 4.4	70.2 ± 4.2	69.4 ± 3.9
Grasa %	9.5 ± 2.1	9.2 ± 2.7	8.9 ± 1.8	8.6 ± 1.5
Perímetro de la pantorrilla, cm	35.7 ± 1.4	35.9 ± 1.7	35.2 ± 1.8	35.1 ± 1.9
Perímetro de muslo (cm)	51.6 ± 2.1	51.7 ± 2.2	50.8 ± 1.9	50.7 ± 2.0

Tabla 1. *Antecedentes de Entrenamiento de los grupos control y experimental y sus características físicas antes y después de 9 semanas de entrenamiento. Los valores son presentados como medias ± DS. n, N° de sujetos.*

Entrenamiento

El período experimental de entrenamiento duró 9 semanas y fue realizado después de la temporada de competición. El volumen total de entrenamiento fue el mismo en los grupos E y C (8.4 ± 1.7 h y 9 ± 2 veces/semana y 9.2 ± 1.9 h y 8 ± 2 veces/semana, respectivamente), pero el 32% de las horas de entrenamiento en el grupo E y el 3% en el grupo C fueron reemplazadas por entrenamiento de la fuerza explosiva específica del deporte. El resto del entrenamiento en ambos grupos fue entrenamiento de resistencia y entrenamiento en circuito (Figura 1). Las sesiones de entrenamiento de la fuerza explosiva duraron entre 15-90 min y consistieron en varios sprints (5-10) x (20-100 m) y ejercicios de saltos [saltos alternados, contramovimientos bilaterales, saltos en profundidad, saltos de valla, saltos con 1 pierna, evaluación de 5 saltos (5J)] sin peso adicional o con la barra sobre los hombros y press de piernas y ejercicios de extensión y flexión de rodilla con cargas bajas, pero con velocidades de movimiento altas o máximas (30-200 contracciones/sesión de entrenamiento y 5/20 repeticiones/serie). La carga de los ejercicios varió entre 0 y 40% de una repetición máxima (1RM). El entrenamiento de resistencia de ambos grupos consistió en carreras de cross country o de carreras en terrenos llanos por 0.5-2.0 h a una intensidad por debajo (84%) o encima (16%) del umbral láctico individual (LT). El entrenamiento en circuito fue similar en ambos grupos; el grupo C entrenó mas frecuentemente que el grupo E, el entrenamiento en circuito consistió en ejercicios específicos para abdominales y piernas con docenas de repeticiones a una velocidad de movimiento lenta y sin ninguna carga externa.

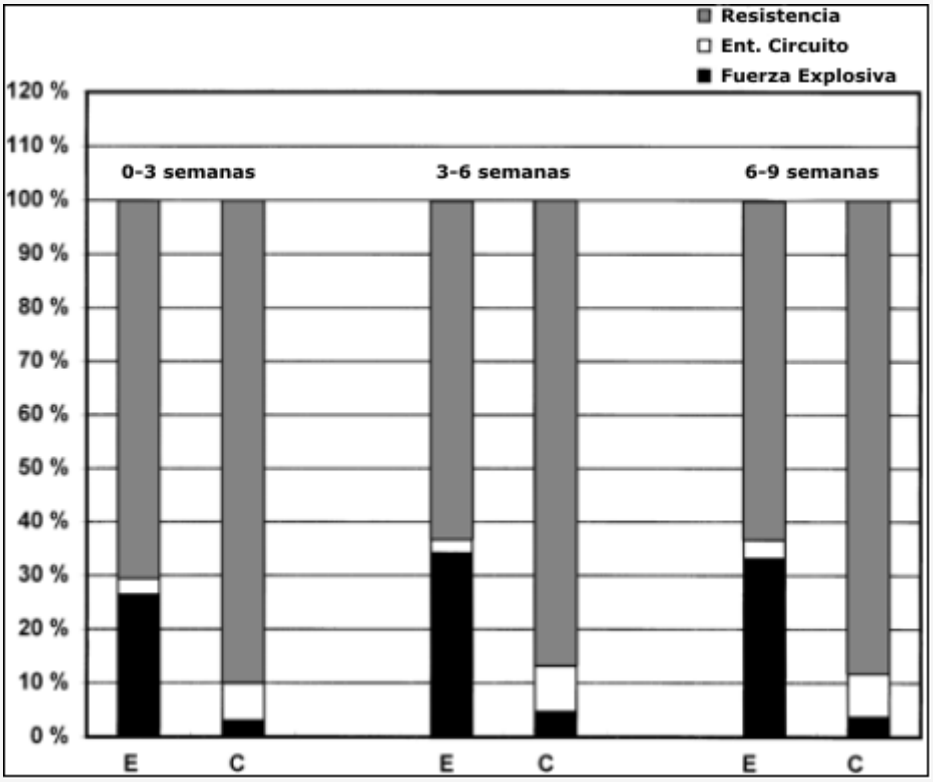


***Figura 1**. Volúmenes porcentuales de los diferentes modos de entrenamiento en los grupos experimental (E) y control (C) durante el curso de 9 semanas de entrenamiento simultáneo de la fuerza de tipo explosivo y el entrenamiento de resistencia.*

Mediciones

Los grupos E y C fueron examinados antes del entrenamiento y después de 3, 6, y 9 semanas de entrenamiento, excepto en la prueba de tiempo de 5 km (5K), la cual fue solo realizada antes y después de 6 y 9 semanas de entrenamiento. La programación de los dos días de evaluación es mostrada en la Tabla 2. En el primer día, después de las mediciones antropométricas y de un calentamiento, se midió la fuerza isométrica máxima de los músculos extensores de la rodilla en un dinamómetro electromecánico (15). Se realizaron de tres a cinco contracciones isométricas máximas en la rodilla y la cadera en un ángulo de 110°. La fuerza en cada contracción fue colectada por una microcomputadora (Toshiba T3200 SX) mediante la utilización de un conversor analógico-digital AT Codas (Dataq Instruments).

Día 1: Mediciones en Cinta Ergómetro				
Eval. en el dinamómetro de la fuerza isométrica máxima	Recup. (10 min)	Eval. la potencia aeróbica, $VO_{2\,máx}$; LT	Recup. (20 min)	VMART, MART
Día 2: Mediciones en Pista				
Eval. de 20-m y 5J, $V_{20\,m}$ y distancia CT, m.	Recup. (10 min)	Carrera submáxima $RE_{track\,1}$, $RE_{track\,2}$	Recup. (10 min)	5K, V_{5K} CVLs, CT, SR, SL, F_z, F_y

***Tabla 2.** Presentación cronológica de las mediciones realizadas en los días 1 y 2. VO_2 máx., máximo consumo de oxígeno; LT, umbral láctico; MART, evaluación de carrera anaeróbica máxima; V_{MART}, máxima velocidad en el MART; 5J, 5 saltos hacia delante; $V_{20\,m}$, velocidad máxima en 20 m.; CT, tiempo de contacto; RE, economía de carrera; 5K, prueba de tiempo en 5 km; V_{5K}, velocidad promedio en 5K; CVL, vuelta de velocidad constante (200 m); CT, tiempo de contacto; SR, frecuencia de zancada; SL, longitud de zancada; Fz y*

Fz, fuerza de reacción vertical y horizontal, respectivamente.

El VO_2 máx. y el LT fueron determinados durante la evaluación de la potencia aeróbica máxima en la cinta ergométrica. La velocidad e inclinación inicial fueron 2.22 m/s y 1°, respectivamente. La velocidad fue incrementada en 0.28 m/s después de cada etapa de 3 min hasta que fue alcanzada una velocidad de 4.75 m/s, excepto por un doble incremento de la velocidad de 0.52 m/s en la mitad de la evaluación. Después de que fue alcanzada una velocidad de 4.75 m/s, la velocidad se mantuvo constante pero la inclinación fue incrementada en 1° por cada minuto hasta el agotamiento. Para determinar la concentración de lactato sanguíneo a través de un método electroenzimático (EBIC 666, Ependorf-Netherler-Hinz) fueron extraídas muestras sanguíneas del extremo del dedo después de cada velocidad. La ventilación y el VO_2 fueron medidos, por cada periodo de 30 segundos, a través del uso de un analizador de O_2 telemétrico portatil (Cosmed K2) (7). El LT al VO_2 ($ml \bullet kg^{-1} \bullet min^{-1}$) respectivo fue determinado en el punto en el cual la concentración de lactato sanguíneo se incrementó de manera distinta de su línea de base de 1-2 mmol/l (2, 23) y fue verificado mediante la utilización de datos respiratorios (2, 40). El VO_2 máx. fue tomado como el promedio más alto de VO_2 de dos mediciones consecutivas de 30 segundos ($ml \bullet kg^{-1} \bullet min^{-1}$). Debido a que durante las últimas etapas de la evaluación la inclinación de la cinta ergométrica fue incrementada y la velocidad fue mantenida constante, el rendimiento pico en cinta ergómetro fue calculado, no como el pico de la velocidad ($V_{VO2máx}$), pero si como la demanda de oxígeno de la carrera durante el último minuto antes del agotamiento ($VO_{2\ máx.\ demand}$) mediante la utilización de la fórmula del Colegio Americano de Medicina del Deporte (1991):

VO_2 ($ml \bullet kg^{-1} \bullet min^{-1}$) = 0.2 • v (m/min) + 0.9 – grados (frac) • v (m/min) + 3.5

Dónde v es la velocidad de la cinta ergométrica, grado es la inclinación de la cinta ergométrica expresada como la tangente del ángulo de la cinta ergométrica con la horizontal, y frac es fracción.

Después de 20 minutos de recuperación los sujetos realizaron un MART (37), el cual consistió en una serie de carreras de 20 segundos en cinta ergométrica con 100 segundos de recuperación entre carreras. Una fase de aceleración de 5 segundos no fue incluida en el tiempo de carrera. La primera carrera fue realizada a una velocidad de 3.71 m/seg. y a una inclinación de 4°. Posteriormente, la velocidad de la cinta ergométrica fue incrementada en 0.35 m/s para cada carrera consecutiva hasta el agotamiento. El agotamiento en el MART fue determinado como el tiempo en el que el sujeto no podía prolongar la carrera a la velocidad de la cinta ergométrica. La V_{MART} fue determinada a partir de la velocidad de la última carrera completa de 20" y del tiempo hasta el agotamiento de la carrera siguiente a mayor velocidad (37).

En el segundo día, los sujetos realizaron cuatro evaluaciones en una pista techada de 200 metros: una evaluación de velocidad máxima de 20 m ($V_{20\ m}$), una evaluación de 5J, una evaluación submáxima de la RE, y la evaluación de 5K (Tabla 2). Después de un calentamiento de 20 min los sujetos corrieron tres veces la carrera máxima de 20-m con una carrera de inicio de 30 m y realizaron la evaluación de 5J de tres a cinco veces. El tiempo de carrera de los 20-m fue medido por dos fotocélulas (Newtest, Oulu, Finland) conectadas a un cronómetro electrónico, y así fue registrada la $V_{20\ m}$. Los 5J saltos comenzaron desde una posición estática, y los sujetos trataron de cubrir la mayor distancia realizando una serie de 5 saltos hacia delante con contactos alternados de pierna derecha e izquierda. La distancia de los 5J fue medida con una cinta.

Diez minutos después de las evaluaciones de $V_{20\ m}$ y 5J, los sujetos realizaron la evaluación de la RE (2•5 min). La velocidad de las carreras fue guiada por un sistema de control de velocidad con una lámpara ("light rabbit", Naakka, Finland). El VO_2 durante las carreras fue medido mediante la utilización de un analizador de O_2 telemétrico portátil (Cosmed K2) y la RE en pista fue calculada como el estado estable de VO_2 ($ml \bullet kg^{-1} \bullet min^{-1}$), durante el último minuto de carrera a las velocidades de 3.67 y 4.7 m/s.

Diez minutos después de la evaluación de la RE, los sujetos realizaron los 5K sobre la pista techada de 200-m. Se calculó la velocidad promedio de los 5K (V_{5K}). Al comienzo de los 5K y después de correr 2.5 y 4 km, todos los sujetos corrieron una vuelta de 200 m a velocidad constante de 4.55 m/s a través de las fotocélulas. La velocidad de la CVL fue guiada por el sistema de control de velocidad por lámpara. Las CVL se corrieron sobre una plataforma de fuerza especial de 9.4 m de longitud, que consistió en cinco placas de fuerza bi- y tridimensionales (0.9/1.0 m, TR Testi, con una frecuencia natural en la dirección vertical de 170 Hz) y una plataforma de fuerza tridimensional (0.9/0.9 m, 400 Hz Hoeycomb, Kistler, Switzerland) conectadas en series y cubiertas con un manta de tartán. Cada placa de fuerza registró los componentes verticales (Fz) y horizontales (Fy) de la fuerza de reacción. Las Fz, y Fy y los tiempos de contactos (CT) fueron grabados por una microcomputadora (Toshiba T 3200 SX), utilizando un conversor analógico digital Codas AT (Dataq Instruments), con un muestreo de frecuencia 500 de Hz. La frecuencia de las zancadas (SR) fue calculada utilizando los CTs y los tiempos de vuelo (FT) [1/(CT/FT)] y la longitud de la zancada usando la velocidad y SRs (V/SR). Cada carrera incluyó de 4 a 6 contactos sobre el sistema de plataforma de fuerza. La curva fuerza vs. tiempo horizontal fue utilizada para separar el CT y los componentes de fuerza Fz y Fy en las fases de frenado y propulsión. Para obtener la fuerza promedio de la totalidad de

la fase de contacto y de las fases de frenado y propulsión separadamente se calcularon las integrales de la curva fuerza tiempo de las fases de frenado y propulsión y se dividieron según los períodos de tiempos respectivos.

MétodosEstadísticos

Las medias y los DS fueron calculados por métodos estándar, y los coeficientes de correlación de Pearson fueron usados para evaluar la relación entre las variables. La significancia de los cambios entre los valores de las evaluaciones y las diferencias en los grupos E y C fueron evaluadas por análisis de varianza múltiple para mediciones repetidas (MANOVA). Cuando era observado un valor F significativo, se utilizaba un test-t de Student para identificar las diferencias dentro de los grupos. Debido a las escasas diferencias iniciales entre grupos, se emplearon análisis de covarianza utilizando los valores pre-evaluación como la covariación para determinar las diferencias significativas entre las medias ajustadas de las pos-evaluaciones en el grupo E y en aquellas del grupo C.

RESULTADOS

El tiempo en 5K no difirió significativamente entre los grupos antes del entrenamiento, pero, de acuerdo con los análisis de covarianza los tiempos en 5K en el grupo E y C fueron diferentes ($P<0.05$) después del entrenamiento. Se encontró una interacción significativa de grupo x entrenamiento en el tiempo de 5K después de 9 semanas de entrenamiento. Este decreció ($P<0.05$) durante el periodo de entrenamiento del grupo E, mientras que no se observaron cambios significativos en el grupo C (Fig. 2). Durante las CVL de los 5K, los CT cayeron en el grupo E ($P<0.001$) y se incrementaron en el grupo C ($P<0.05$) durante el periodo de entrenamiento (Figura 3). Se observaron diferencias significativas ($P<0.001$) en las medias ajustadas de los CT de las CVL entre el grupo E y C después del entrenamiento. No se observaron diferencia o cambios significativos durante el periodo de entrenamiento en los grupos E o C en la fuerza de reacción, SR, o la duración de las zancadas en las CVL durante los 5K.

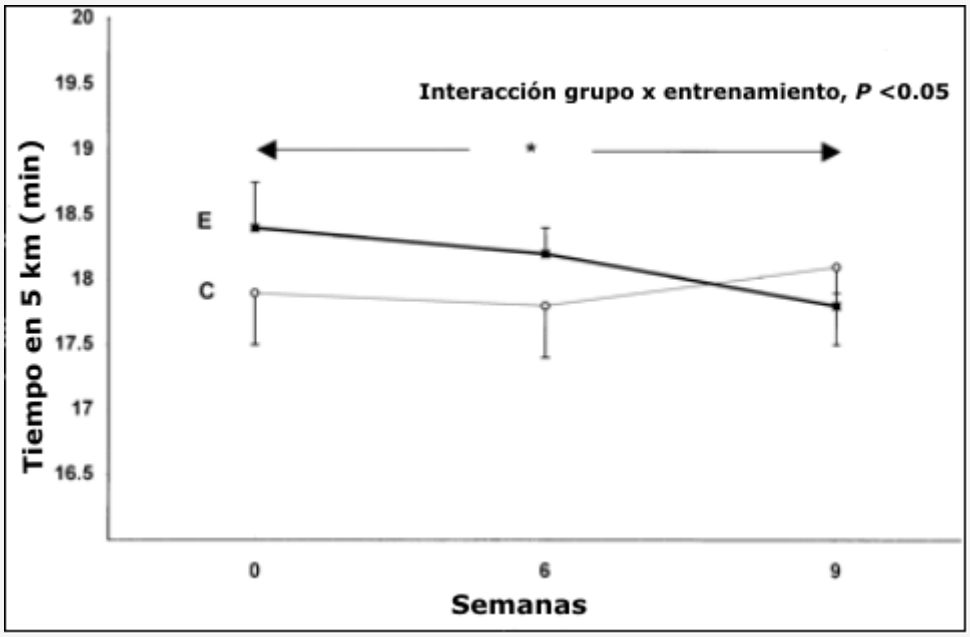


***Figura 2**. Promedio (±DS) en el tiempo de la carrera de 5-km en los grupos E y C durante el curso de 9 semanas de entrenamiento de la fuerza de tipo explosivo y entrenamiento de resistencia. *P<0.05.*

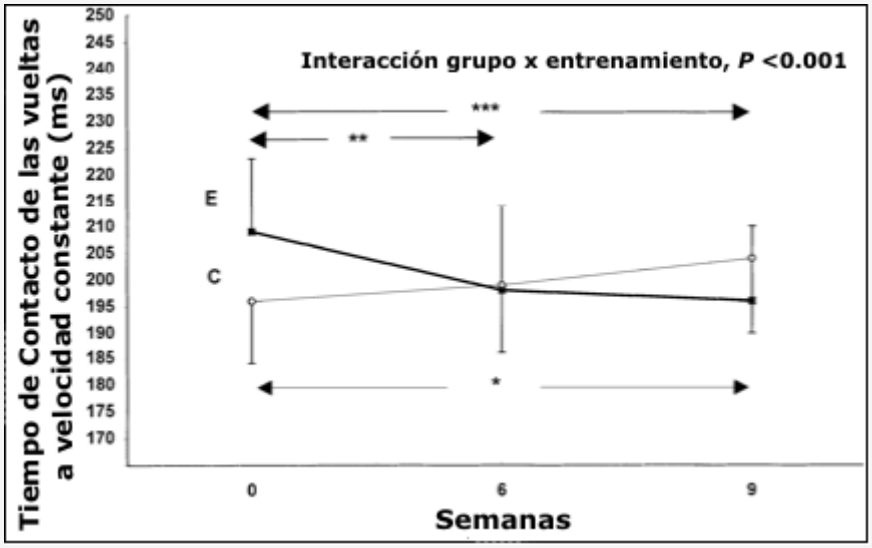


Figura 3 *.Promedio (±DS) del tiempo de contacto de las vueltas de velocidad constante en los grupos E y C durante el curso de 9 semanas de entrenamiento de la fuerza de tipo explosivo y el entrenamiento de resistencia. *P<0.05. **P<0.01. ***P<0.001.*

La RE, la V_{MART}, y el $VO_{2máx.\ demand}$ no difirieron entre grupos antes del estudio, pero después de 9 semanas de entrenamiento la RE (P<0.01) y la V_{MART} (P<0.01) ajustadas, fueron diferentes en los grupos E y C. Se encontró una interacción significativa de grupo por entrenamiento, en la RE y la V_{MART} después del periodo del entrenamiento, y la RE, la V_{MART}, así como el $VO_{2max.\ demand}$, mejoraron (P<0.05) en el grupo E, mientras que no se observaron cambios en el grupo C (Tabla 3 y Figuras. 4 y 5). También se encontró una interacción significativa de grupo x entrenamiento (P<0.05) en el VO_2 máx. después de 9 semanas de entrenamiento, con un incremento en el grupo C (P<0.01) y sin cambios en el grupo E (Tabla 3). No se encontraron cambios o diferencias significativas en el grupo E o C en LT durante el periodo de entrenamiento (Tabla 3).

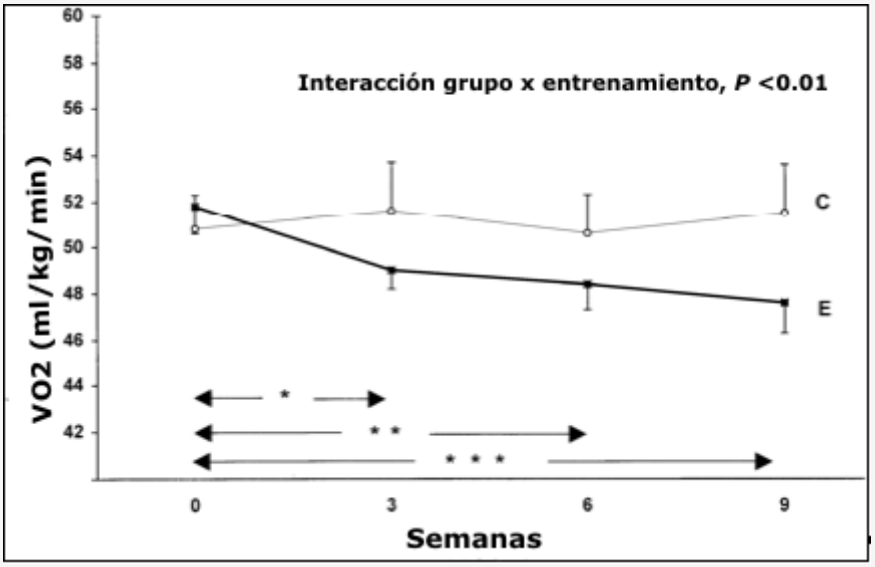


Figura 4*. Media (± DS) del consumo de oxígeno en estado estable durante el último minuto de carrera a la velocidad submáxima de 4.17 m/s en los grupos E y C durante el curso de 9 semanas de entrenamiento simultáneo de la fuerza de tipo explosivo y entrenamiento de resistencia. *P<0.05. **P<0.01. *** P<0.001.*

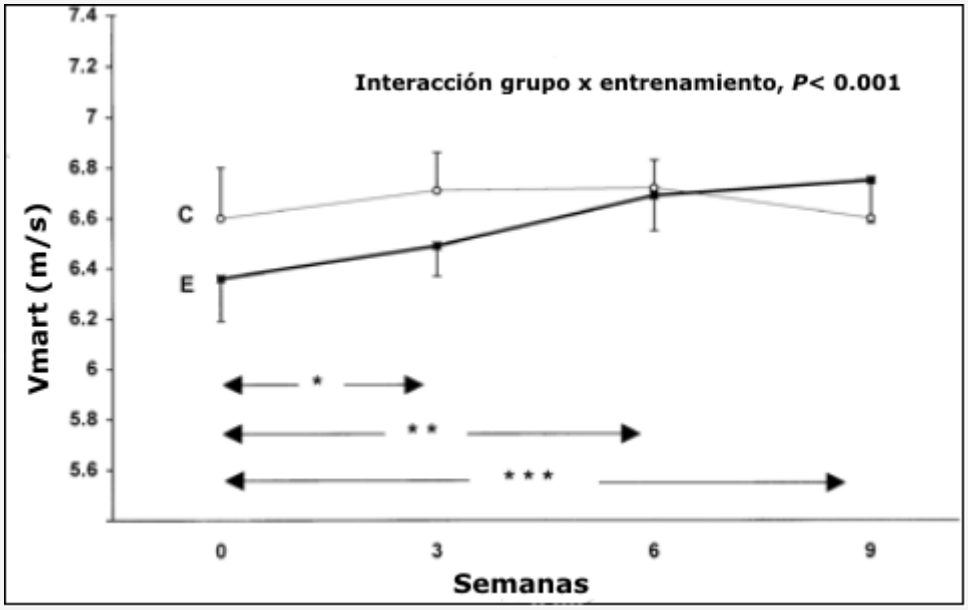


Figura 5. *Media (± DS) del pico de velocidad en la evaluación de la carrera anaeróbica máxima (MART) en los grupos E y C durante el curso de 9 semanas de entrenamiento simultáneo de la fuerza de tipo explosivo y entrenamiento de resistencia. *P<0.05. **P<0.01. *** P<0.001.*

La fuerza isométrica máxima de los músculos extensores de la pierna, V 20m, y 5J no difirieron significativamente entre los grupos E y C antes del estudio, pero los análisis de covarianza mostraron diferencias significativas (P<0.01) después de 9 semanas de entrenamiento (Tabla 4). La fuerza isométrica máxima tendió a incrementarse en el grupo E y a caer en el grupo C durante el periodo de entrenamiento. Los cambios no fueron estadísticamente significativos, pero se encontró una interacción significativa de grupo x entrenamiento en la fuerza isométrica máxima (Tabla 4). La $V_{20\,m}$ y 5J se incrementaron en el grupo E en 3.6-4.7% (P<0.01) y cayeron en el grupo C en 1.7-2.4% (P<0.05) después de 9 semanas de entrenamiento y también fue observada una interacción significativa de grupo x entrenamiento (Tabla 4).

DISCUSIÓN

Se ha demostrado (36) que atletas adultos especializados en resistencia que continúan con su entrenamiento de resistencia por varios años parecen alcanzar un evidente límite mayor o menor en el VO_2 máx. y en el rendimiento de resistencia. Algunos estudios previos (17, 28, 29) han encontrado que el entrenamiento de la fuerza puede llevar a mejorar el rendimiento en resistencia de sujetos previamente desentrenados. El presente estudio demostró que el entrenamiento simultáneo de la fuerza explosiva específica del deporte y el entrenamiento de resistencia pueden mejorar también el rendimiento de una carrera de 5-km (y el pico de rendimiento de carrera sobre cinta ergómetrica, i.e., $VO_{2\ max.\ demand}$) en atletas bien entrenados en resistencia.

Variables	Grupo Experimental (n = 10)				Grupo Placebo (n = 8)				
	Antes	Después 3 s	Después 6 s	Después 9 s	Antes	Después 3 s	Después 6 s	Después 9 s	Interacción
$VO_{2max\ demand}$ ml·kg^{-1}·$^{-1}$	67.7 ± 2.8	68.4 ± 3.1	68.9 ± 2.8	70.2 ± 2.5*	68.3 ± 3.1	68.4 ± 3.1	68.9 ± 2.8	69.2 ± 3.1	NS
VO_{2max} ml·kg^{-1}·min^{-1}	63.7 ± 2.7	63.9 ± 1.9	63.4 ± 3.7	62.9 ± 3.2	65.1 ± 4.1	65.3 ± 5.9	67.1 ± 4.1	68.3 ± 3.4†	P<0.05
LT ml·kg^{-1}·min^{-1}	47.3 ± 3.3	47.9 ± 2.5	47.8 ± 3.4	48.1 ± 3.5	48.9 ± 4.5	48.9 ± 3.3	49.1 ± 2.1	49.3 ± 2.8	NS

Tabla 3. *$VO_{2\ max.\ demand}$.,VO_2 máx., y LT en los grupos experimental y control en la evaluación de potencia aeróbica sobre la cinta ergométrica, antes y después de 3, 6 y 9 semanas de entrenamiento. Los valores son presentados como medias ± DS. $VO_{2máx.\ demand}$, pico de rendimiento en carrera cuesta arriba; NS, no significativo. *Diferencia significativa con respecto a la medición anterior, P<0.05. †Diferencia significativa con respecto a la medición anterior, P<0.01.*

Variables	Grupo Control (n = 10)				Grupo Experimental (n = 8)				
	Antes	Después 3 s	Después 6 s	Después 9 s	Antes	Después 3 s	Después 6 s	Después 9 s	Inter.
F (N)	4094 ± 891	4123 ± 913	4226 ± 987	4385 ± 1132	3899 ± 635	3712 ± 362	3651 ± 498	3396 ± 648	P < 0.01
V_{20max}, (m/s)	7.96 ± 0.57	8.05 ± 0.53	8.11 ± 0.51	8.23 ± 0.54† **	8.28 ± 0.35	8.21 ± 0.38	8.14 ± 0.21*	8.08 ± 0.31*	P < 0.001
5J (m)	12.47 ± 0.90	12.60 ± 0.85	12.86 ± 0.95†	13.04 ± 0.83†† **	13.17 ± 0.46	13.08 ± 0.59	13.10 ± 0.47	12.95 ± 0.50*	P < 0.001

Tabla 4. *F, V_{20m}, y 5J en los grupos experimental y control, antes y después de 3, 6 y 9 semanas de entrenamiento. Los valores son presentados como medias ± DS. F, fuerza isométrica máxima. *Diferencia significativa con respecto a la medición anterior P<0.05. †Significativamente diferente con respecto a la medición anterior, P<0.01. ††Significativamente diferente con respecto a la medición anterior, P< 0.001. **Significativamente diferente del grupo control P<0.01.*

El presente entrenamiento de la fuerza de tipo explosivo de 9 semanas resultó en mejoras considerables en las características neuromusculares seleccionadas, aunque un gran volumen de entrenamiento de resistencia fue realizado concomitantemente. Esto fue demostrado por las mejoras significativas en $V_{20\ m}$ y 5J y por el acortamiento del CT durante las CVL de los 5K, mientras no fueron observados cambios en la fuerza de reacción o fuerza máxima de los músculos entrenados. Estos resultados sostienen nuestros hallazgos previos (35) que en atletas bien entrenados en resistencia las mejoras de las características neuromusculares inducidas por el entrenamiento pueden no estar inhibidas completamente por el entrenamiento simultáneo de fuerza explosiva y resistencia.

Se ha sugerido (3, 26) que el sistema nervioso juega un importante rol en la regulación del stifness muscular y en la utilización de la elasticidad muscular durante ejercicios que incluyan el ciclo estiramiento-acortamiento, en los cuales son usadas altas velocidades de contracción. El presente incremento del rendimiento de las características neuromusculares puede ser debido principalmente a adaptaciones neuronales, aunque no fueron realizadas mediciones electromiográficas para sustentar esta sugerencia. Aunque las cargas utilizadas en el presente entrenamiento de la fuerza explosiva fueron bajas, se sabe que los músculos tuvieron una alta activación debido a la máxima velocidad de movimiento utilizada (13). Se ha demostrado que este tipo de entrenamiento de la fuerza explosiva resulta en incrementos en la cantidad de flujos neuronales a los músculos, observable durante acciones rápidas dinámicas e isométricas (e.g., Ref. 14, 15), sugiriendo que el incremento neto en la excitación de las motoneuronas puede resultar a partir del incremento del flujo excitatorio, de la reducción de los flujos inhibitorios, o de ambos (39). Es aparente que las alteraciones en el control neuronal, inducidas por

el entrenamiento, durante los ejercicios que incluyen el ciclo estiramiento-acortamiento como correr y saltar pueden tener lugar tanto en la activación voluntaria como en los reflejos inhibidores y/o facilitadores (13, 26, 26 39). Aunque la activación neuronal de los músculos entrenados durante el entrenamiento de fuerza de tipo explosivo es muy alta, el tiempo de esta activación durante cada acción muscular única es usualmente tan corto que la hipertrofia muscular y el desarrollo de la fuerza máxima inducidas por el entrenamiento toman lugar en un grado drásticamente menor que durante un entrenamiento típico de fuerza de alta intensidad (13). Consecuentemente, se ha sugerido (35) que, durante períodos de entrenamiento relativamente cortos de algunas semanas, las mejoras en los sprints y/o la capacidad de producción de fuerza explosiva, especialmente en atletas especializados en resistencia, podrían provenir principalmente de adaptaciones neuronales sin una hipertrofia muscular observable (ver también Ref., 17, 18). El hallazgo acerca de que no hubo cambios en las circunferencias de la pantorrilla y del muslo en nuestros atletas especializados en resistencia durante el presente periodo de entrenamiento avala esta sugerencia.

La base lógica de este estudio estuvo basada en la hipótesis (ver Figura 6) acerca de que el rendimiento de resistencia y que el pico de rendimiento de carrera en cinta ergométrica están influenciados no sólo por la potencia aeróbica y la RE sino también por el llamado factor de potencia muscular, que está relacionado a las características neuromusculares y anaeróbicas (e.g., Ref. 12, 31). Esta hipótesis esta avalada por el presente hallazgo de que la correlación entre la mejora de V_{5K} y $VO_{2\ máx.\ demand}$ estuvieron asociadas con los cambios en la RE y la V_{MART}. Un hallazgo interesante que avala al factor de potencia muscular fue que, aunque las mejoras de las características neuromusculares ($V_{20\ m}$, 5J, CT de CVL) no correlacionaron directamente con los cambios del rendimiento en la carrera de 5-km, éstos correlacionaron directamente con V_{MART}, el cual estuvo asociado con la mejora de V_{5K}. Durante el MART y 5K, los atletas tuvieron que usar sus características neuromusculares cuando el VO_2 y la concentración de lactato sanguíneo fueron considerablemente incrementadas sobre los valores de reposo. Estudios previos han demostrado que durante condiciones de fatiga, un incremento en la concentración de H^+, el cual está asociado con el aumento en la concentración de lactato sanguíneo durante la presente carrera de 5K, deteriora las propiedades contráctiles de los músculos (e.g. Ref. 27). Además, durante una carrera de media distancia y el sky cross-country de montaña, por ejemplo, el gasto energético puede exceder la máxima potencia aeróbica y los atletas deben ser capaces de mantener una velocidad relativamente alta durante el curso de una carrera, aunque su concentración de lactato sanguíneo y muscular sea alta (9, 33; ver también Ref. 38). Esto además enfatiza la importancia del factor de potencia muscular (la habilidad del sistema neuromuscular de producir potencia durante el ejercicio máximo cuándo la producción de energía glucolítcia y/u oxidativa son altas y la contractilidad muscular puede estar limitada) en deportes de resistencia (38).

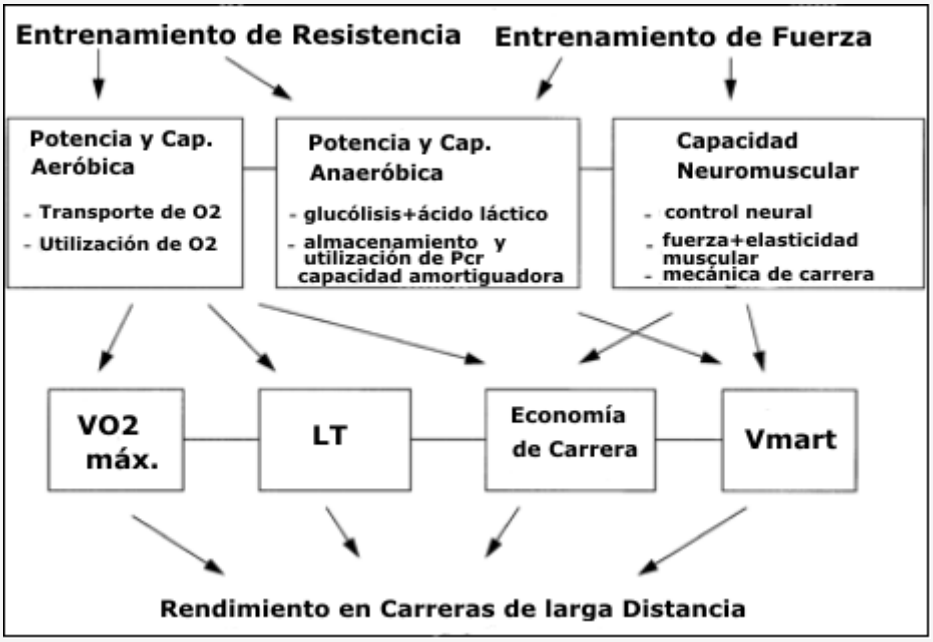


***Figura 6**. Modelo hipotético de cómo son afectados los factores determinantes del rendimiento de la carrera de distancia en atletas bien entrenados en resistencia por el entrenamiento de fuerza y resistencia. PCr, fosfocreatina, VO_2 máx., máximo consumo de oxígeno, LT umbral láctico; V_{MART}, pico de velocidad en el MART.*

Las mejoras del rendimiento en la carrera de 5K de los atletas del grupo E tuvo lugar sin cambios en el VO_2 máx. o LT.

Interesantemente, se observó una correlación negativa ecuánime entre los cambios individuales en el VO_2 máx. y los cambios en la velocidad en 5K. El grupo C mostró incrementos en el VO_2 máx. pero no demostró cambios en el rendimiento de la carrera de 5K. Además, la V_{MART} no correlacionó con el VO_2 máx.. Todos estos resultados avalan la hipótesis de Noakes (31) y de algunos otros investigadores (e.g., Ref. 12) acerca de que el rendimiento en resistencia puede ser limitado no sólo por factores centrales relacionados al VO_2 máx. sino también por el factor de potencia muscular.

Las mejoras de las características neuromusculares de los atletas del grupo E estuvieron correlacionadas con la V_{MART} y la RE. Las mejoras en $V_{20\ m}$, 5J, y Ct de las CVL correlacionaron con la mejora en la V_{MART} durante el periodo de entrenamiento. Estos resultados avalan la observación de Nummela et al. (34) de que el entrenamiento, utilizando varios saltos y ejercicios de sprint con altas velocidades de contracción y fuerza de reacción, resulta en mejoras en ejercicios que incluyen el ciclo estiramiento-acortamiento como carreras de velocidad y también permiten mejoras en la V_{MART}. Además, estos resultados, concuerdan con observaciones previas acerca de que la V_{MART} está influenciado por la interacción de las características neuromusculares y anaeróbicas y que puede ser utilizado como una medición de la potencia muscular (37, 38).

Otro posible mecanismo para la mejora del rendimiento en la carrera de 5K podría estar relacionado a la RE. Se ha reportado (24) que el entrenamiento de la fuerza de alta intensidad mejoró la RE de mujeres corredoras de larga distancia. La importancia de las características neuromusculares en la determinación de la RE y por ello del rendimiento en la carrera ha sido también recientemente tenida en cuenta por Dalleau et al. (8). Ellos demostraron que el costo energético de una carrera esta significativamente relacionado al *stiffness* de la pierna propulsora, lo cual se demostró también por la presente caída en los Ct de CVL y por un incremento en $V_{20\ m}$ y 5J en el grupo E. Se ha sugerido (9) que una caída del costo energético de la carrera del 5% explica una mejora del rendimiento en el tiempo de carrera de distancia de ~3.8%. Esto concuerda con los resultados del presente estudio, en el cual la RE y el tiempo en 5K en el grupo E mejoraron en un 8.1 y 3.1%, respectivamente, sin que se observaran cambios en el VO_2 máx.. Además, la presente correlación entre las mejoras de las características neuromusculares y la RE fueron estadísticamente significativas. Todos estos hallazgos, juntos con la relación entre la mejora de la V_{5K} y la RE, sugieren que el entrenamiento de la fuerza explosiva tiene una influencia positiva sobre la RE y el rendimiento debido a la mejora de las características neuromusculares. Sin embargo, la RE en carrera regulada es diferente de la carrera a velocidad submáxima. La correlación significativa entre la RE y el V_{MART} sugiere que la potencia muscular puede influenciar la RE a velocidades sumáximas y mas probablemente durante una carrera regulada.

En conclusión, el entrenamiento simultáneo de la fuerza explosiva, incluyendo sprints y entrenamiento de la resistencia, produjo una mejora significativa del rendimiento en una carrera de 5-km en atletas bien entrenados en resistencia sin cambios en el VO_2 máx. u otras variables de potencia aeróbica. Se sugiere que esta mejora es debida al perfeccionamiento de las características neuromusculares que fueron transferidas en una mejora de la potencia muscular y la RE.

Agradecimientos: Los autores agradecen a Margareetta Tummavuori, Matti Salonen, y Harri Mononen por la asistencia técnica y análisis de los datos.

Notas al Pie: Este estudio estuvo financiado en gran parte por subsidios del Ministerio de Educación de Finlandia.

Dirección para el pedido de reimpresiones y otras correspondencias: L. Paavolainen, KIHU-Research Institute for Olimpyc Sports, Rautpohjankatu 6, SF-40700 Jyväskylä, Finland (Correo electrónico: lpaavola@kiu.jyu.fi). Recibido 16 de Mazo 1998, aceptado en forma final 4 de Enero 1999.

REFERENCIAS

1. Aunola, S., and H. Rusko (1986). Aerobic and anaerobic thresholds determined from venous lactate or from ventilation and gas exhange in relation to muscle fiber composition. *Int. J. Sports Med. 7: 161-166*
2. Aura, O., and P. V. Komi (1986). Effects of prestretch intensity on mechanical efficiency of positive work and on elastic behaviour of skeletal muscle in stretch-shortening cycle exercise. *Int. J. Sports Med. 7: 137-143*
3. Billat, L. V., and J. P. Koralsztein (1996). Significance of the velocity at O2 max and time to exhaustion at this velocity. *Sports Med. 22: 90-108*
4. Bulbulian, R., A. R. Wilcox, and B. L. Darabos (1986). Anaerobic contribution to distance running performance of trained cross-country athletes. *Med. Sci. Sports Exerc. 18: 107-113*
5. Conley, D. L., and G. S. Krahenbuhl (1980). Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med. Sci. Sports Exerc. 12: 357-360*
6. Crandall, C. G., S. L. Taylor, and P. B Raven (1994). Evaluation of the Cosmed K2 portable telemetric oxygen uptake analyzer. *Med. Sci. Sports Exerc. 26: 108-111*

7. Dalleau, G., A. Belli, M. Bourdin, and J.-R. Lacour (1998). The spring-mass model and the energy cost of treadmill running. *Eur. J. Appl. Physiol. 77: 257-263*
8. Di Prampero, P. E., C. Capelli, P. Pagliaro, G. Antonutta, M. Girardis, P. Zamparo, and R. G. Soule (1993). Energetics of best performances in middle-distance running. *J. Appl. Physiol. 74: 2318-2324*
9. Dudley, G. A., and R. Djamilj (1985). Incompatibility of endurance- and strength-training modes of exercise. *J. Appl. Physiol. 59: 1446-1451*
10. Durnin, J., and M. Rahaman (1967). The assessment of the amount of fat in the human body from the measurements of skinfold thickness. *Br. J. Nutr. 21: 681-689*
11. Green, H. J., and A. E. Patla (1992). Maximal aerobic power: neuromuscular and metabolic considerations. *Med. Sci. Sports Exerc. 24: 38-46*
12. Hickson, R. C (1980). Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance. *Eur. J. Appl. Physiol. 215: 255-263*
13. Hickson, R. C (1980). Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance. *Eur. J. Appl. Physiol. 215: 255-263*
14. Hickson, R. C., M. A. Rosenkoetter, and M. M. Brown (1980). Strength training effects on aerobic power and short-term endurance. *Med. Sci. Sports Exerc. 12: 336-339*
15. Hill, D. W., and A. L. Rowell (1996). Running velocity at O2 max. *Med. Sci. Sports Exerc. 28: 114-119*
16. Holloszy, J., and E. Coyle (1984). Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J. Appl. Physiol. 56: 831-838*
17. Houmard, J. A., D. L. Costill, J. B. Mitchell, S. H. Park, and T. C. Chenier (1991). The role of anaerobic ability in middle distance running performance. *Eur. J. Appl. Physiol. 62: 40-43*
18. Hunter, G., R. Demment, and D. Miller (1987). Development of strength and maximum oxygen uptake during simultaneous training for strength and endurance. *J. Sports Med. Phys. Fit. 27: 269-275*
19. Ivy, J. L., R. T. Withers, P. J. Van Handel, D. H. Elger, and D. L. Costill (1980). Muscle respiratory capacity and fiber type as determinants of the lactate threshold. *J. Appl. Physiol. 48: 523-537*
20. Johnston, R. E., T. J. Quinn, R. Kertzer, and N. B. Vroman (1997). Strength training in female distance runners: impact on running economy. *J. Strength Cond. Res. 11: 224-229*
21. Mainwood, G. W., and J. M. Renaud (1985). The effect of acid-base balance on fatigue of skeletal muscle. *Can. J. Physiol. Pharmacol. 63: 403-416*
22. Marcinik, E. J., J. Potts, G. Schlabach, S. Will, P. Dawson, and B. F. Hurley (1991). Effects of strength training on lactate threshold and endurance performance. *Med. Sci. Sports Exerc. 23: 739-743*
23. McCarthy, J. P., J. C. Agre, B. K. Graf, M. A. Pozniak, and A. C. Vailas (1995). Compatibility of adaptive responses with combining strength and endurance training. *Med. Sci. Sports Exerc. 3: 429-436*
24. Morgan, D. W., F. D. Baldini, P. E. Martin, and W. M. Kohrt (1989). Ten kilometer performance and predicted velocity at O2 max among well-trained male runners. *Med. Sci. Sports Exerc. 21: 78-83*
25. Noakes, T. D (1988). Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a contemporary perspective. *Med. Sci. Sports Exerc. 20: 319-330*
26. Noakes, T. D., K. H. Myburgh, and R. Schall (1990). Peak treadmill running velocity during the O2 max test predicts running performance. *J. Sports Sci. 8: 35-45*
27. Norman, R., S. Ounpuu, M. Fraser, and R. Mitchell (1989). Mechanical power output and estimated metabolic rates of nordic skiers during Olympic competition. *Int. J. Sports Biomech. 5: 169-184*
28. Nummela, A., A. Mero, and H. Rusko (1996). Effects of sprint training on anaerobic performance characteristics determined by the MART. *Int. J. Sports Med. 17, Suppl. 2: S114-S119*
29. Rusko, H (1992). Development of aerobic power in relation to age and training in cross-country skiers. *Med. Sci. Sports Exerc. 24: 1040-1047*
30. Rusko, H., A. Nummela, and A. Mero (1993). A new method for the evaluation of anaerobic running power in athletes. *Eur. J. Appl. Physiol. 66: 97-101*
31. Rusko, H. K., and A. T. Nummela (1996). Measurement of maximal and submaximal anaerobic power. *Int. J. Sports Med. 17, Suppl. 2: S89-S130*
32. Sale, D (1991). Neural adaptation to strength training. *In: Strength and Power in Sports. The Encyclopedia of Sports Medicine, edited by P. V. Komi. Oxford, UK: Blackwell, p. 249-265*
33. Wasserman, K., B. J. Whipp, S. N. Koyal, and W. L. Beaver (1973). Anaerobic threshold and respiratory gas exhange during exercise. *J. Appl. Physiol. 35: 236-243*

Cita Original

Leena Paavolainen, Keijo Häkkinen, Ismo Hämäläinen, Ari Nummela, and Heikki Rusko. Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. J Appl Physiol; 86: 1527-1533, 1999