

Article

Efectos del Entrenamiento de la Fuerza Sobre la Economía de la Carrera en Corredores Altamente Entrenados: Revisión Sistemática con Metaanálisis de Estudios Controlados

Carlos Balsalobre-Fernández¹, Jordan Santos-Concejero² y Gerasimos V. Grivas

¹Department of Physical Education, Sport and Human Movement, Autonomous University of Madrid, Spain

²Department of Physical Education and Sport, University of the Basque Country UPV/EHU, Vitoria-Gasteiz, Spain

³Department of Physical Education and Sport Science, University of Thessaly, Trikala, Greece

RESUMEN

El propósito de este estudio fue realizar una revisión sistemática y un metaanálisis de los estudios controlados para determinar el efecto de los programas de entrenamiento de la fuerza en la economía de la carrera (RE) de los corredores de alto nivel de media y larga distancia. En septiembre de 2015 se realizó una búsqueda en cuatro bases de datos electrónicas (Pubmed, SPORTDiscus, MEDLINE y CINAHL) de artículos de investigación originales. Después de obtener 699 artículos originales, para el análisis se realizó una selección de aquellos estudios que cumplieran los siguientes criterios: (a) los participantes eran corredores competitivos de medio fondo y/o fondo; b) los participantes tenían un VO₂max > a 60 mL Kg⁻¹ min⁻¹, (c) los estudios eran estudios controlados publicados en revistas sujetas a revisión por pares, (d) los estudios analizaban los efectos de los programas de entrenamiento de la fuerza que tuvieran una duración mayor a 4 semanas, e) la economía de la carrera (RE) se midió antes y después de la intervención de entrenamiento de la fuerza. Cinco estudios cumplieron con los criterios de inclusión, lo que arrojó un tamaño total de la muestra de 93 corredores competitivos de alto nivel de media y larga distancia. Cuatro de los cinco estudios incluidos utilizaron intensidades de entrenamiento bajas a moderadas (40-70% de una repetición máxima), y todos utilizaron un volumen de entrenamiento bajo a moderado (2-4 ejercicios de sobrecarga para los miembros inferiores y hasta 200 saltos y 5-10 sprints cortos) 2-3 veces por semana durante 8-12 semanas. El efecto meta-analizado de los programas de entrenamiento de la fuerza sobre la economía de carrera (RE) de corredores de alto nivel de media y larga distancia, arrojó un gran efecto beneficioso (diferencia de medias estandarizada [95% Intervalo de Confianza] = -1,42 [-2,23, -0,60].) En conclusión, un programa de entrenamiento de la fuerza que contemple ejercicios de sobrecarga de intensidad baja a alta y ejercicios pliométricos realizados 2-3 veces por semana durante 8-12 semanas, es una estrategia apropiada para mejorar la RE en los corredores altamente entrenados de media y larga distancia.

Palabras Clave: atletas de élite; carreras de fondo; rendimiento; entrenamiento de sobrecarga; pliometría

INTRODUCCIÓN

El rendimiento sostenido en las carreras depende de una compleja interacción de factores que producen un trabajo muscular eficiente y deben producir una marcha rápida y eficaz (25). Entre los factores que pueden predecir el rendimiento de carreras de media y larga distancia, la economía de la carrera (RE), comúnmente definida como el VO₂ en estado estable requerido a una determinada velocidad submáxima, ha captado mucha atención durante la última década, aunque frecuentemente todavía se la considere "*relativamente ignorada en la literatura científica*" (12).

Tradicionalmente, se ha observado que los factores biomecánicos (30, 50), la distribución de las fibras musculares (7, 38), la edad (28), el sexo (8) y los factores antropométricos (32) explican la variabilidad interindividual de la RE. Sin embargo, la RE también está influenciada en gran medida por estrategias de entrenamiento entre las que se incluyen una amplia gama de formas de entrenamiento de la fuerza, tales como entrenamiento de baja sobrecarga, entrenamiento de alta sobrecarga, entrenamiento explosivo y entrenamiento pliométrico (3). Se ha informado que estas diferentes modalidades de entrenamiento de la fuerza mejoran la RE no sólo en corredores recreacionales, sino también en corredores moderadamente entrenados y altamente entrenados (3, 4, 58).

Las mejoras en la RE como consecuencia de las intervenciones de entrenamiento de fuerza han sido atribuidas a la mejora de la coordinación de los miembros inferiores y a la co-activación muscular, lo que en última instancia, aumenta la rigidez muscular y disminuye los tiempos de contacto con el suelo (37). Del mismo modo, se ha sugerido que las intervenciones de entrenamiento de la fuerza aumentan la fuerza de las fibras de tipo I y II (53), lo que provoca una menor activación de unidades motoras para producir una fuerza dada (3). Este aumento en la fuerza también puede mejorar la eficiencia biomecánica y los patrones de reclutamiento muscular (43), permitiendo así que un corredor corra más eficientemente a una velocidad de carrera dada.

Sin embargo, a pesar del cuerpo de evidencia que apoya el uso del entrenamiento de la fuerza para mejorar la RE, tradicionalmente ha sido pasado por alto por los corredores de larga distancia y sus entrenadores hasta el punto de que los corredores que compitieron en Maratón Olímpica de EEUU en 2008 "incluyeron poco entrenamiento de la fuerza en sus programas de entrenamiento,.... y casi la mitad de los corredores no realizaron ningún entrenamiento de la fuerza" (26). Esto puede ser una consecuencia de que tanto los corredores de larga distancia como sus entrenadores no son conscientes de los beneficios potenciales del entrenamiento de fuerza para mejorar la RE y por lo tanto, el rendimiento.

Artículos de revisión anteriores sobre los efectos de los programas de entrenamiento de la fuerza sobre la ER no realizaron ningún meta-análisis, ya que sólo resumieron los datos disponibles (3, 4, 58). Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue realizar una revisión sistemática de la bibliografía científica para obtener investigaciones originales y realizar un meta-análisis de los efectos del entrenamiento de la fuerza en la RE en corredores altamente entrenados.

MÉTODOS

Enfoque experimental del problema

Se realizó una búsqueda bibliográfica el 25 de septiembre de 2015. Se realizaron búsquedas en las siguientes bases de datos: Pubmed, SPORTDiscus, Medline y CINAHL (Cumulative Index to Nursing and Allied Health Literature). Las bases de datos se registraron desde la fecha de inicio hasta septiembre de 2015, sin limitación de idioma. Se excluyeron los resúmenes y citas de conferencias científicas.

Búsqueda de literatura

En cada base de datos se analizaron los campos de búsqueda de título, resumen y palabras clave. Se utilizaron las siguientes palabras clave combinadas con los operadores booleanos (AND, OR): "Economía de la carrera", "costo de la carrera", "entrenamiento de la fuerza", "entrenamiento con sobrecarga", "entrenamiento con pesas", "levantamiento de pesas", "pliométrico", "entrenamiento con trineo", "sprints repetidos/resistidos" y "salto". No se utilizaron filtros adicionales o limitaciones de búsqueda.

Criterios de inclusión

Los estudios fueron elegibles para análisis adicionales si se cumplían los siguientes criterios de inclusión: (a) los participantes eran corredores de media y larga distancia (se excluyeron los estudios con triatletas o cualquier otro tipo de

atletas); (b) los participantes tenían un valor de $VO_{2max} > 60\text{mL kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$; (c) los estudios eran estudios controlados publicados en revistas revisadas por pares; d) los estudios analizaron programas de entrenamiento de fuerza con una duración superior a 4 semanas; (e) la RE se midió antes y después de la intervención de entrenamiento de la fuerza.

Dos observadores independientes revisaron los estudios y decidieron individualmente si la inclusión era apropiada. En caso de desacuerdo, se consultó a un tercer observador para determinar la inclusión del estudio. Un diagrama de flujo de la estrategia de búsqueda y selección de los estudios se presenta en la Figura 1.

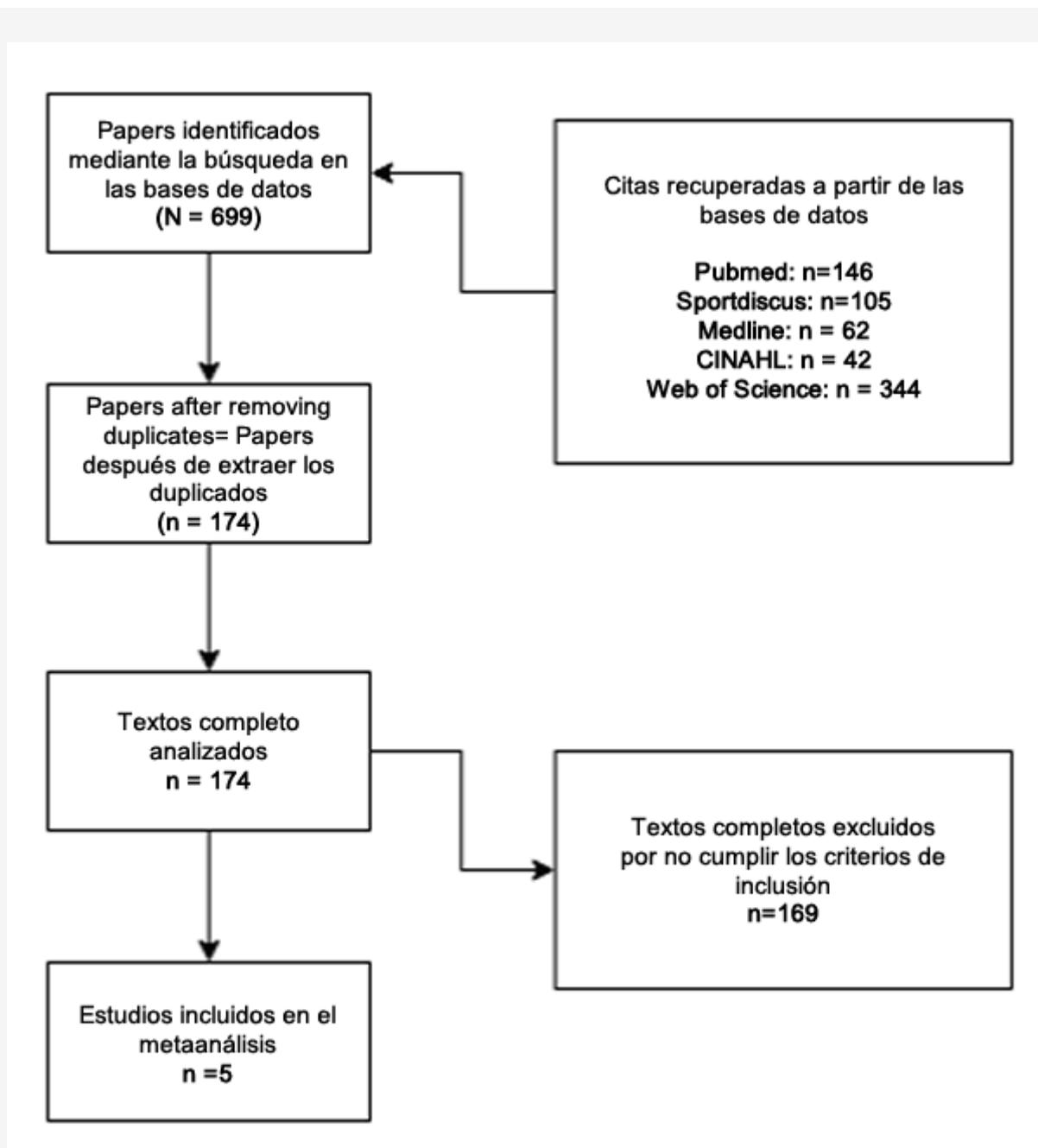


Figura 1. Diagrama de flujo de la estrategia de búsqueda y selección de artículos.

Evaluación de calidad

Dos observadores independientes utilizaron la escala de la Base de Datos de Evidencia en Fisioterapia (PEDro) (34) y los niveles de evidencia de Oxford (36) para evaluar la calidad metodológica de los artículos incluidos en el meta análisis. El nivel de evidencia de Oxford toma valores que van desde 1a hasta 5, donde 1a es para revisiones sistemáticas de ensayos

controlados aleatorios de alta calidad y 5 opiniones de expertos. La escala PEDro consiste en 11 ítems diferentes relacionados con el rigor científico. Los ítems 2-11 pueden ser clasificados con 0 o 1, por lo que el mayor valor en la escala PEDro es 10, y el menor es 0.

Análisis estadístico

La diferencia de medias estandarizada (SMD) con Intervalos de Confianza (IC) del 95% entre los grupos que realizaron entrenamiento de fuerza y los grupos controles fueron calculadas con el software RevMan 5.3.5 para Mac usando un modelo de efectos aleatorios. Las medias y las desviaciones estándar de las variables de medición se pudieron obtener en cada artículo original por lo que no fue necesario contactar a los autores para obtener más datos. La significancia para un efecto global se fijó en $p < 0,05$. La heterogeneidad de los estudios analizados se evaluó mediante una prueba de I cuadrado, fijando el nivel de significancia en $p < 0,01$. En los casos en que la heterogeneidad fuera significativa, se realizó un análisis adicional (eliminación de estudios para detectar la posible fuente de heterogeneidad). Por otra parte, la contribución (%) de cada estudio con el efecto total combinado de la intervención, se calculó como una proporción inversa de la varianza dentro del estudio (20). Finalmente, los efectos de las intervenciones (programas de entrenamiento de fuerza) fueron evaluados cualitativamente utilizando el siguiente umbral para la diferencia de medias estandarizada, específicamente diseñado para atletas de alto nivel (40): $< 0,25$, trivial; $0,25-0,50$, pequeño; $0,50-1,0$, moderado; $> 1,0$, grande.

RESULTADOS

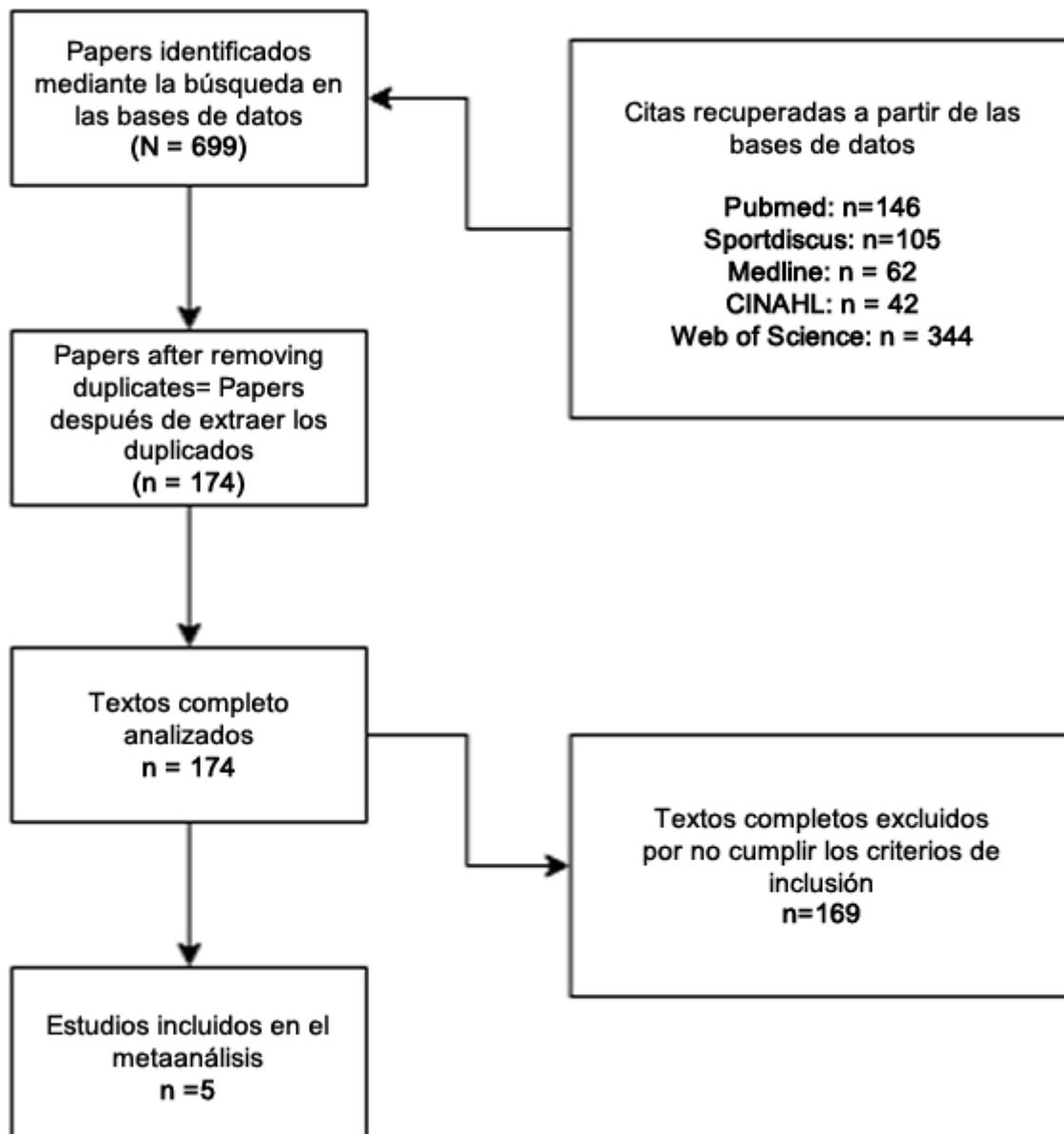
Estudios seleccionados

La estrategia de búsqueda arrojó 699 citas totales tal como se observa en la Figura 1. Después de eliminar los duplicados y revisar los 174 artículos de texto completo resultantes, 5 estudios cumplieron con los criterios de inclusión (33, 37, 51, 52, 54). Los estudios excluidos tenían por lo menos una de las siguientes características: a) los participantes tenían valores de $VO_{2max} < 60$ ml kg^{-1} min^{-1} , b) los participantes no eran corredores de medio fondo y/o de fondo, c) ausencia de un grupo de control, (d) las intervenciones de entrenamiento de la fuerza tenían una duración inferior a 4 semanas, e) no se midió la economía de la carrera (RE). Por lo tanto la muestra global para el presente meta-análisis quedó conformada por 93 corredores de alto nivel de media y larga distancia con $VO_{2max} > 60$ ml kg^{-1} min^{-1} .

Nivel de evidencia y calidad de los estudios

Tres de los 5 estudios incluidos tenían un nivel de evidencia 1b (estudios controlados aleatorizados de alta calidad). Los dos estudios restantes tenían un nivel de evidencia 2b porque los participantes no fueron asignados al azar a los grupos de intervención o control. Además, la puntuación media en la escala PEDro fue de 5,4, con valores que oscilaron entre 5 y 6 (Tabla 1).

Tabla 1. Calificaciones PEDro y niveles de evidencia de los estudios incluidos



* Items en la escala PEDro: 1 = se especificaron los criterios de elegibilidad; 2 = los sujetos fueron asignados aleatoriamente a los grupos; 3 = la asignación estaba oculta; 4 = los grupos fueron similares al inicio del estudio en relación a los indicadores pronósticos más importantes; 5 = cegamiento de todos los sujetos; 6 = cegamiento de todos los profesionales que administraron la terapia; 7 = cegamiento de todos los evaluadores que midieron al menos 1 resultado clave; 8 = se obtuvieron medidas de 1 resultado clave de .85% de los sujetos asignados inicialmente a los grupos; 9 = todos los sujetos a los cuales se les realizó la determinación de las variables de medición fueron asignados al grupo tratamiento o control o, en caso contrario, los datos de al menos 1 resultado clave fueron analizados por "intención de tratar"; 10 = en al menos un resultado clave se informaron los resultados de las comparaciones estadísticas entre grupos; 11 = el estudio aportó tanto medidas puntuales como medidas de variabilidad para al menos 1 variable clave.

Características de los participantes

En la Tabla 2 se presenta un resumen de las características de los participantes. El número total de participantes fue 93 (78 hombres y 15 mujeres) con una edad comprendida entre los 17,3 y los 29,8 años. El VO₂máx de los participantes osciló entre 61,2-71,1 ml kg⁻¹ min⁻¹. Todos los participantes compitieron en eventos de carrera de media y larga distancia a nivel nacional y/o internacional.

Tabla 2. Características de los estudios y de los participantes

Estudio	Valores en la escala PEDro *											Niveles de evidencia	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		Total
Paavolainen et al. 1999	No			1				1	1	1	1	5	2b
Saunders et al. 2006	Si	1		1				1	1	1	1	6	1b
Mikkola et al. 2007	Si			1		1		1	1	1	1	5	2b
Støren et al. 2008	Si	1						1	1	1	1	5	1b
Sedano et al. 2013	Si	1		1				1	1	1	1	6	1b

Referencias: RE = economía de la carrera; M/F = mujer/varón; VO₂max = consumo de oxígeno máximo. *Los valores de RE y VO₂max se midieron en ml kg⁻¹ min⁻¹, excepto en Støren et al., en donde la RE se midió en ml kg^{-0,75} min⁻¹, y en Saunders et al., en donde la RE se midió en L min⁻¹.

Características de los programas de entrenamiento

Las características de los programas de entrenamiento de cada estudio se presentan en la Tabla 3. Tres estudios (51, 52, 54) asignaron aleatoriamente a los participantes a los grupos de intervención o control, mientras que los otros dos (33, 37) formaron los grupos de modo no aleatorizado en función de la edad y el nivel de entrenamiento. Las intervenciones de entrenamiento variaron de 8 a 12 semanas: 2 estudios utilizaron programas de 8 semanas (33, 54), 2 estudios utilizaron programas de 9 semanas (37, 51) y 1 estudio utilizó un programa de 12 semanas (52). Los participantes entrenaron 3 veces por semana en 4 estudios (33, 37, 51, 54) y 2 veces por semana en el otro estudio (52). La duración del entrenamiento varió de 15 a 90 minutos y 4 de los 5 estudios implementaron sesiones de más de 30 minutos (33, 37, 51, 52).

Un estudio (54) utilizó cargas elevadas (85% de una repetición máxima, 1-RM) y solo el ejercicio de media sentadilla para el grupo que realizó la intervención. En contraste, cuatro estudios (33, 37, 51, 52) utilizaron 4 ejercicios de sobrecarga con 1-3 series de 4-10 repeticiones en intensidades bajas y moderadas (40-70% 1RM) en combinación con 2-6 ejercicios pliométricos sin carga con un total de 30-200 saltos y/o 5-10 repeticiones de sprints de 20-150 m.

Tabla 3. Características de los programas de entrenamiento.

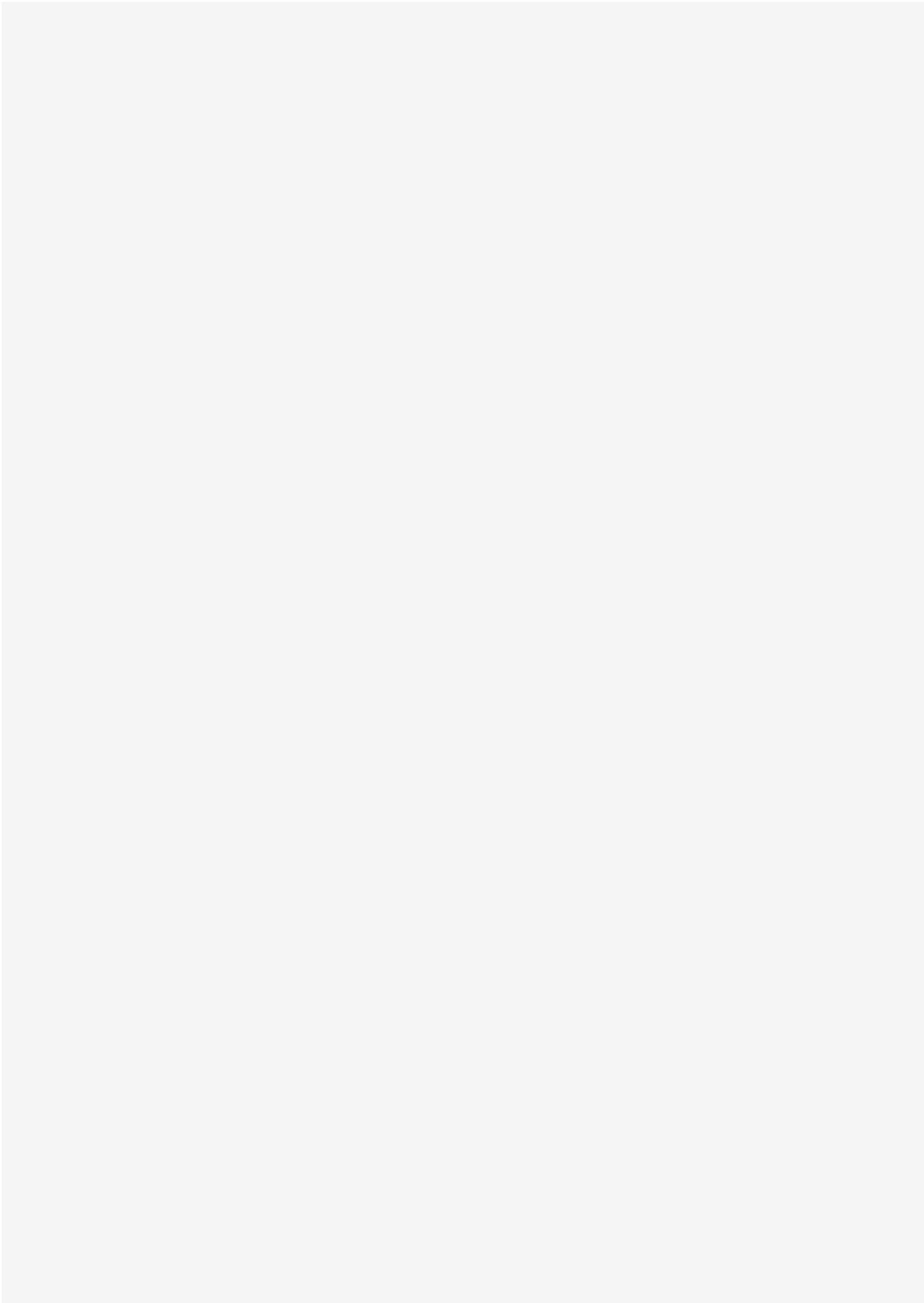
Primer autor, año.	Participantes			Diseño del estudio	
	Cantidad (M/F)	Edad (años.)	VO ₂ Max (mL kg ⁻¹ min ⁻¹)	Aleatorizado SI/NO	Variable principal*
Paavolainen et al. 1999	18 (18/0)	23.3±3	63.3±2.1	NO	RE a 15 km/h; VO ₂ max
Saunders et al. 2006	15 (15/0)	24.2±2.3	71.1±6.0	SI	RE a 18 km/h, VO ₂ max
Mikkola et al. 2007	25 (18/7)	17.3±0.5	62.6±3.9	NO	RE a 14 km/h, VO ₂ max
Støren et al. 2008	17 (9/8)	29.1±6.1	61.2±3.9	SI	RE a 70 % VO ₂ max, VO ₂ max
Sedano et al. 2013	18 (18/0)	23.8 ± 1.2	69.6±2.0	SI	RE a 12 km/h, VO ₂ max

Abreviaturas: ST=entrenamiento de sprint. Los sprints cortos se realizaron en la velocidad máxima prevista; PLY=entrenamiento pliométrico; RT = entrenamiento con sobrecarga; BW = peso corporal; RM = 1 repetición máxima; SMD = diferencia de medias estandarizada entre los grupos experimental y control, sesgo corregido (g de Hedge) según lo reportado por el software RevMan 5.3; CI = intervalos de confianza. * El intervalo de cargas se indica en forma de porcentaje del BW para ST y PLY, y como porcentaje de RM en caso de RT.

Efectos del entrenamiento de fuerza en la economía de la carrera

El cambio promedio en la economía de la carrera (RE) fue -2,32±2,07 y 0,57±2,48 ml kg⁻¹ min⁻¹ para el grupo que realizó la intervención y el grupo control, respectivamente. El metaanálisis permitió observar un efecto beneficioso general, significativo y grande de las intervenciones de entrenamiento de la fuerza sobre la RE cuando se comparó con el grupo

control (SMD [IC del 95%] = -1,43 [-2,23, -0,64], Z = 3,53, p <0,001). Cuatro estudios observaron un efecto importante de la intervención (SMD > 1,0) y un estudio observó un efecto moderado. Figura 2.



Primer autor, año.	Tipo de Programa	Ejercicios dentro del programa	Rango de Cargas (%BW/RM)*	#semanas de intervención	Sesiones por semana	Duración (min)	SMD [95% CI]
Paavola n et al. 1999	ST/PLY/RT	ST: (5-10 rep de 20-100m); PLY: (saltos alternados, CMJ, salto desde sentadillas, salto profundo, total de saltos 30-200); RT: (extensión de piernas, curl de piernas, press de piernas, 1serie/5-10 rep)	ST/PLY: 0; RT: 40	9	No se informó 2,7h por semana en función de la duración de la sesión; probablemente 3	15-90	-3.78 [-5.45, -2.1]
Saunders et al. 2006	PLY/RT	PLY: (brincos alternados, saltos hacia arriba, saltos con un solo pie, CMJ, saltos con vallas, saltos tijera, 1-2series/6-15rep; cantidad total de saltos 36-180; RT (press de piernas, curl de isquiotibiales, 1-2series/6-10rep)	PLY: 0; RT: 60	9	3	30	-0.54 [-1.58, 0.49]
Mikkola et al. 2007	ST/PLY/RT	ST: (5-10rep de 30-150m); PLY: (saltos alternados, <i>calf jumps</i> , saltos desde sentadillas, saltos profundos. Nno se informó la cantidad de rep/series); RT (media sentadilla, extensión de rodillas, levantamiento de pantorrillas, abdominales, extensiones de espalda, 2-3series/6-10rep)	ST/PLY: 0; RT: Cargas bajas, SIN repeticiones hasta la falla, %RM no informado	8	3	30-60	-1.03 [-1.87, -0.18]
Storen et al. 2008	RT	RT: (medias sentadillas, 4series/4rep)	85	8	3	No se informó. Teniendo en cuenta la cantidad de ejercicio , de series y de repeticiones, se estima 15min	-1.45 [-2.56, -0.35]
Sedano et al. 2013	RT/PLY	RT: (sentadillas con barra, curl de piernas acostados, levantamiento de pantorrillas sentados, extensión de piernas 3series/7rep); PLY: (saltos profundos, saltos horizontales, 6series/10rep; 120 saltos en total)	RT: 40-70; PLY: 0	12	2	No se informó. Teniendo en cuenta la cantidad de ejercicio , de series y de repeticiones, se estima alrededor de 45-60 min	-1.17 [-2.24, -0.10]

Figura 2. Diagrama de bosque que muestra los efectos individuales y combinados de la intervención sobre la economía de la carrera (RE). El cuadrado negro con líneas horizontales indica la diferencia de medias estandarizada (SMD), con el intervalo de confianza (IC) del 95% entre los grupos de intervención (experimental) y el grupo control para cada estudio, mientras que el diamante negro representa los valores totales de SMD y CI para todos los estudios del metaanálisis. La media y la DE representan medidas absolutas de RE en ml kg⁻¹ min⁻¹.

El test I-cuadrado arrojó una heterogeneidad significativa entre los estudios incluidos ($I^2 = 61\%$, $p=0,03$). Sin embargo, un análisis posterior demostró que la eliminación del estudio realizado por Paavolainen et al. (37) redujo la heterogeneidad a 0 ($I^2 = 0\%$, $p=0,77$), lo que reveló que este estudio era el responsable de la heterogeneidad. Además, la contribución de este estudio en particular fue la más baja de los 5 estudios (13,5% vs. 20,3-24,1%). Al retirar el estudio mencionado, el cambio promedio en la economía de la carrera (RE) calculado fue $-1,88 \pm 2,31$ y $0,51 \pm 2,76$ ml kg⁻¹ min⁻¹ para el grupo que realizó la intervención y para el grupo control, respectivamente. Esto resultó en un efecto global, beneficioso y significativo de las intervenciones de entrenamiento de la fuerza (SMD [IC 95%] = $-1,06$ [$-1,56$, $-0,56$], $Z = 4,16$, $p < 0,001$).

DISCUSIÓN

El presente metaanálisis nos permitió evidenciar un gran efecto beneficioso general de las intervenciones de entrenamiento de la fuerza en la RE en corredores de media y larga distancia altamente entrenados, en comparación con el grupo control. Cuatro de los 5 estudios incluidos presentaron una diferencia de medias estandarizada (SMD) absoluta mayor que 1, lo que se considera un gran efecto cuando se estudian atletas de alto nivel (40), y el quinto estudio mostró un efecto moderado a alto. Por otra parte, el IC del 95% global varió de $-2,23$ a $-0,64$ SMD, es decir, no sobrepasó el 0 ni tomó valores positivos, lo que habría significado efectos triviales o negativos de la intervención. Así, el 100% de los estudios presentaron un efecto beneficioso y significativo de las intervenciones de entrenamiento de la fuerza en la economía de la carrera (RE) en corredores de media y larga distancia altamente entrenados. Curiosamente, un estudio en particular (37) presentó una SMD muy grande, que fue mayor que las observadas en los otros estudios (es decir, $-3,78$ frente a $-1,43$ para el efecto global). Sin embargo, no pudimos encontrar ninguna explicación en particular para los mayores beneficios de la intervención utilizada en Paavolainen et al. (37) dado que la cantidad de sesiones de entrenamiento de la fuerza realizadas (3 sesiones), su contenido (sobrecarga, ejercicios pliométricos y ejercicios de esprint), el rango de cargas utilizadas (0-40 % 1-RM) y la duración de la intervención (9 semanas) fueron muy similares a las de los otros estudios (Tabla 2).

Una de las principales preocupaciones cuando se realiza entrenamiento simultáneo de la fuerza y la resistencia es el ampliamente conocido fenómeno de la interferencia, a través del cual el desarrollo de una de estas capacidades se ve perjudicado por el entrenamiento de la otra (15). Por lo tanto, encontrar el equilibrio justo entre las sesiones de entrenamiento de la fuerza y las sesiones de entrenamiento de la resistencia parece ser crucial (1, 13, 16). Se ha informado previamente que una sola sesión de entrenamiento con sobrecarga por semana no es suficiente para aumentar la fuerza ni la potencia muscular en los corredores de élite de mediana y larga distancia, probablemente debido a la elevada relación entrenamiento de resistencia: entrenamiento de la fuerza (2). En este sentido, aunque todos los estudios de este metaanálisis utilizaron una configuración diferente de ejercicios e intensidades de entrenamiento, todos incluyeron al menos 2 sesiones de entrenamiento de la fuerza por semana durante la intervención, y la mayoría de los estudios (4/5) realizaron 3 sesiones por semana (Tabla 3). Teniendo en cuenta que los corredores realizaron 6-9 sesiones de entrenamiento de resistencia por semana, esto significa una proporción de entrenamiento resistencia:entrenamiento de la fuerza de 6:2 - 9:3 semanal. Todos los estudios analizados encontraron mejoras significativas en la fuerza muscular, producción de potencia, altura de salto y RE (33, 37, 51, 52, 54); por lo tanto, de acuerdo a nuestro análisis, las sesiones de entrenamiento de la fuerza que fueron ~ 30% de las sesiones de entrenamiento totales podrían ser una estrategia válida para mejorar la RE y la fuerza muscular concurrentemente en corredores altamente entrenados.

Los programas de entrenamiento de la fuerza más comunes en los estudios analizados consistieron en ejercicios de sobrecarga para la parte inferior del cuerpo, tales como sentadillas de espalda o extensiones de piernas combinadas con ejercicios pliométricos (33, 37, 51, 52, 54). Ambos tipos de modalidades de entrenamiento de la fuerza han sido probados, tanto de manera aislada como combinados (11, 41, 55) para mejorar varias variables relacionadas con el desempeño neuromuscular, tales como la fuerza máxima, producción de potencia muscular, rigidez de los tendones y tasa de desarrollo de la fuerza (9, 11, 17, 29, 42). Si bien estos factores han sido estudiados especialmente en atletas de fuerza o explosivos como los levantadores de pesas, jugadores de rugby o velocistas (5, 18, 44), existe un creciente número de investigaciones que destacan la importancia del rendimiento neuromuscular en corredores de media y larga distancia (4, 10, 38, 39). Por ejemplo, se ha observado una correlación significativa entre la capacidad de salto y el tiempo para recorrer 800, 3000 y 5000 m en corredores altamente entrenados (21). Del mismo modo, estudios recientes que describen las

propiedades de músculos y tendones de corredores kenianos de clase mundial, observaron que estos atletas tienen mayor capacidad de salto, y potencia muscular y menores amplitudes de estiramiento-acortamiento y tiempos de contacto más cortos que los atletas japoneses de nivel nacional (47, 48); variables que probablemente estén relacionadas con su economía de carrera (RE) más eficiente (31, 35, 42).

Cabe señalar que la mayoría de los programas de entrenamiento de la fuerza (4 de 5 de los estudios incluidos en el presente metaanálisis) utilizaron intensidades de entrenamiento de baja a moderada para los ejercicios de sobrecarga (40-70 % 1-RM), y todos utilizaron volúmenes de entrenamiento de bajo a moderado (2-4 ejercicios de sobrecarga para los miembros inferiores, 200 saltos y 5-10 sprints cortos, con una duración total de la sesión de 30-60 min). Sólo un estudio usó cargas pesadas (85 % 1-RM), pero cada sesión de entrenamiento con sobrecarga consistió en sólo 4 series de 4 repeticiones de sentadillas con barra durante unos 15 minutos. Además, ninguno de los estudios utilizó repeticiones hasta la falla, una práctica común en el fisiculturismo que maximizaría la hipertrofia muscular (11, 45), pero que puede perjudicar el rendimiento muscular y producir un nivel de fatiga excesivo (19, 23, 24, 57).

El entrenamiento hasta la falla (realizar el número máximo de repeticiones posible dentro de una serie para una determinada carga) produce una enorme fatiga metabólica y neuromuscular (19, 46) que podría conducir a una transición hacia el tipo de fibra de contracción lenta (14) y reducir la producción de potencia muscular (19, 23). Por lo tanto, dado que las variables relacionadas con la potencia muscular son cruciales para el rendimiento en las carreras de larga distancia, la metodología de no realizar ejercicios hasta la falla que apunte a mejorar el rendimiento neuromuscular podría ser más apropiada para corredores de media y larga distancia altamente entrenados.

La principal limitación del presente metaanálisis es el pequeño número de estudios incluidos. Aunque el papel del entrenamiento de la fuerza en la mejora del rendimiento en carreras ha recibido mucha atención durante la última década (4, 42, 58), la gran mayoría de los estudios reclutaron corredores recreacionales en lugar de atletas altamente entrenados (27, 35, 38). Teniendo en cuenta que los corredores altamente entrenados tienen diferentes perfiles biomecánicos y fisiológicos que los atletas que no son de élite (6, 48, 49, 56), es necesario realizar investigaciones futuras con corredores de élite. Esto podría aportar información valiosa para entrenadores y científicos que sea aplicable a la gestión continua de los programas de entrenamiento de élite y podría ser especialmente relevante en el contexto de un enfoque multifactorial para alcanzar hitos históricos como el maratón sub-2h.

APLICACIONES PRÁCTICAS

El presente metaanálisis demostró un efecto general, indiscutible, grande y beneficioso del entrenamiento de la fuerza en la economía de la carrera (RE) de corredores de media y larga distancia altamente entrenados, en comparación con lo observado en el grupo control. Parecería que un programa de entrenamiento de la fuerza compuesto por 2-4 ejercicios de sobrecarga a 40-70 % de 1-RM sin llegar a la falla, además de ejercicios pliométricos realizados 2-3 veces por semana que mantenga una relación general entrenamiento resistencia:entrenamiento de la fuerza de 3: 1 y con una duración de 8-12 semanas, es una estrategia segura para mejorar la economía de la carrera (RE). Esto podría ayudar a los corredores de media y larga distancia altamente entrenados a alcanzar un rendimiento óptimo.

REFERENCIAS

1. Baar, K. (2014). Using molecular biology to maximize concurrent training. *Sports Med.* 44 Suppl. 2: 117-125.
2. Balsalobre-Fernández, C., Tejero-González, C.M., and del Campo-Vecino, J. (2015). Seasonal strength performance and its relationship with training load on elite runners. *J. Sports Sci. Med* 14: 9-15.
3. Barnes, K.R. and Kilding, A.E. (2015). Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sport Med. Open* 1.
4. Beattie, K., Kenny, I.C., Lyons, M., and Carson, B.P. (2014). The effect of strength training on performance in endurance athletes. *Sport Med.* 44: 845-865.
5. Bevan, H.R., Bunce, P.J., Owen, N.J., Bennett, M.A., Cook, C.J., Cunningham, D.J., et al. (2010). Optimal loading for the development of peak power output in professional rugby players. *J. Strength Cond. Res.* 24: 43-47.
6. Billar, V., Lepretre, P.M., Heugas, A.M., Laurence, M.H., Salim, D., and Koralsztejn, J.P. (2003). Training and bioenergetic characteristics in elite male and female Kenyan runners. *Med. Sci. Sport Exerc.* 35: 297-304.
7. Bosco, C., Montanari, G., Ribacchi, R., Giovenali, P., Latteri, F., Iachelli, G., et al. (1987). Relationship between the efficiency of muscular work during jumping and the energetics of running. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 56: 138-43.
8. Bransford, D.R. and Howley, E.T. (1977). Oxygen cost of running in trained and untrained men and women. *Med. Sci. Sports* 9:

9. Cormie, P., McGuigan, M.R., and Newton, R.U. (2010). Adaptations in athletic performance after ballistic power versus strength training. *Med. Sci. Sport Exerc.* 42: 1582-1598,
10. Damasceno, M. V., Lima-Silva, A.E., Pasqua, L.A., Tricoli, V., Duarte, M., Bishop, D.J., et al. (2015). Effects of resistance training on neuromuscular characteristics and pacing during 10-km running time trial. *Eur. J. Appl. Physiol.*
11. Folland, J.P. and Williams, A.G. (2007). The adaptations to strength training. *Sport Med.* 37: 145-168.
12. Foster, C. and Lucia, A. (2007). Running economy: the forgotten factor in elite performance. *Sports Med.* 37: 316-9.
13. Francesca-Piacentini, M., De Ioannon, G., Comotto, S., Spedicato, A., Vernillo, G., and La Torre, (2013). A. Concurrent strength and endurance training effects on running economy in master endurance runners. *J Strength Cond Res* 27: 2295-2303..
14. Fry, A.C. (2004). The role of resistance exercise intensity on muscle fibre adaptations. *Sport Med.* 34: 663-679..
15. Fyfe, J.J., Bishop, D.J., and Stepto, N.K. (2014). Interference between concurrent resistance and endurance exercise: molecular bases and the role of individual training variables. *Sports Med.* 44: 743-762.
16. García-Pallarés, J. and Izquierdo, M. (2011). Strategies to optimize concurrent training of strength and aerobic fitness for rowing and canoeing. *Sport Med.*: 41:329-343.
17. González-Badillo, J.J., Gorostiaga, E.M., Arellano, R., and Izquierdo, M. (2005). Moderate resistance training volume produces more favorable strength gains than high or low volumes during a short-term training cycle. *J. Strength Cond Res* 19: 689-697
18. González-Badillo, J.J., Izquierdo, M., and Gorostiaga, E. (2006). Moderate volume of high relative training intensity produces greater strength gains compared with low and high volumes in competitive weightlifters. *J. Strength Cond. Res.* 20: 73-81
19. Gorostiaga, E.M., Navarro-Amézqueta, I., Calbet, J.A.L., Hellsten, Y., Cusso, R., Guerrero, M., et al. (2012). Energy metabolism during repeated sets of leg press exercise leading to failure or not. *PLoS One* 7: e40621.
20. HajGhanbari, B., Yamabayashi, C., Buna, T.R., Coelho, J.D., Freedman, K.D., Morton, T.A., et al. (2013). Effects of respiratory muscle training on performance in athletes: a systematic review with meta-analyses. *J. Strength Cond. Res.* 27: 1643- 63.
21. Hudgins, B., Scharfenberg, J., Triplett, N.T., and McBride, J.M. (2013). Relationship between jumping ability and running performance in events of varying distance. *J. Strength Cond. Res.* 27: 563-567,
22. Hunter, S.K., Joyner, M.J., and Jones, A.M. (2014). The two-hour marathon: what's the equivalent for women? *J. Appl. Physiol.*
23. Izquierdo, M., Ibañez, J., González-Badillo, J.J., Häkkinen, K., Ratamess, N.A., Kraemer, W.J., et al. (2006). Differential effects of strength training leading to failure versus not to failure on hormonal responses, strength, and muscle power gains. *J. Appl. Physiol.* 100: 1647-1656
24. Izquierdo-Gabarrén, M., De Txabarri Expósito, R.G., García-Pallarés, J., Sánchez-Medina, L., De Villarreal, E.S.S., and Izquierdo, M. (2010). Concurrent endurance and strength training not to failure optimizes performance gains. *Med. Sci. Sport Exerc.* 42: 1191-1199,
25. Joyner, M.J. (1991). Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *J. Appl. Physiol* 70: 683-7,
26. Karp, J.R. (2007). Training characteristics of qualifiers for the U. S. *Olympic Marathon Trials.* *Int J Sports Physiol Perform* 2: 72-92.
27. Kelly, C.M., Burnett, A.F., and Newton, M.J. (2008). The effect of strength training on three-kilometer performance in recreational women endurance runners. *J. Strength Cond. Res* 22: 396-403
28. Krahenbuhl, G.S. and Pangrazi, R.P. (1983). Characteristics associated with running performance in young boys. *Med. Sci. Sports Exerc.* 15: 486-90
29. Kyrolainen, H., Avela, J., McBride, J.M., Koskinen, S., Andersen, J.L., Sipila, S., et al. (2005). Effects of power training on muscle structure and neuromuscular performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 15: 58-64
30. Kyröläinen, H., Belli, A., and Komi, P. V. (2001). Biomechanical factors affecting running economy. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33: 1330-7
31. Lacour, J.R. and Bourdin, M. (2015). Factors affecting the energy cost of level running at submaximal speed. *Eur. J. Appl. Physiol.*
32. Lucia, A., Esteve-Lanao, J., Oliván, J., Gómez-Gallego, F., San Juan, A.F., Santiago, C., et al. (2006). Physiological characteristics of the best Eritrean runners—exceptional running economy. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 31: 530-540
33. Mikkola, J., Rusko, H., Nummela, A., Pollari, T., and Hakkinen, K. (2007). Concurrent endurance and explosive type strength training improves neuromuscular and anaerobic characteristics in young distance runners. *Int. J. Sports Med.* 28: 602-611
34. de Morton, N.A.. (2009). The PEDro scale is a valid measure of the methodological quality of clinical trials: a demographic study. *Aust. J. Physiother.* 55: 129-33
35. Nummela, A.T., Paavolainen, L.M., Sharwood, K.A., Lambert, M.I., Noakes, T.D., and Rusko, H.K. (2006). Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. *Eur J. Appl. Physiol.* 97: 1-8
36. Oxford Centre for Evidence-based Medicine. (2009). Levels of evidence. *Univ Oxford.* 4-5
37. Paavolainen, L., Häkkinen, K., Hämmäläinen, I., Nummela, A., and Rusko, H. (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J. Appl. Physiol.* 86: 1527-1533,
38. Pellegrino, J., Ruby, B.C., and Dumke, C.L. (2015). Effect of plyometrics on the energy cost of running and mhc and titin isoforms. *Med. Sci. Sports Exerc.*
39. Ramirez-Campillo, R., Alvarez, C., Henriquez-Olguin, C., Baez, E.B., Martinez, C., Andrade, D.C., et al. (2014). Effects of plyometric training on endurance and explosive strength performance in competitive middle- and long-distance runners. *J. Strength Cond. Res.* 28: 97-104.,
40. Rhea, MR. (2004). Determining the magnitude of treatment effects in strength training research through the use of the effect size. *J Strength Cond Res* 18: 918-920
41. Rønnestad, B., Kojedal, Ø., Losnegard, T., Kvamme, B., Raastad, T., Rønnestad, B.R., et al. (2012). Effect of heavy strength training on muscle thickness, strength, jump performance, and endurance performance in well-trained Nordic Combined athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* 112: 2341-2352.

42. Ronnestad, B.R. and Mujika, I. (2013). Optimizing strength training for running and cycling endurance performance: A review. *Scand. J. Med. Sci. Sports in press*, 2013.
43. Sale, D.G. (1988). Neural adaptation to resistance training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 20: S135-45.
44. Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez de Villarreal, E., et al. (2015). A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scand. J. Med. Sci. Sports*.
45. Sampson, J.A. and Groeller, H. (2015). Is repetition failure critical for the development of muscle hypertrophy and strength? *Scand. J. Med. Sci. Sports*
46. Sanchez-Medina, L. and González-Badillo, J.J. (2011). Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Med. Sci. Sport Exerc.* 43: 1725- 1734
47. Sano, K., Ishikawa, M., Nobue, A., Danno, Y., Akiyama, M., Oda, T., et al. (2013). Muscle-tendon interaction and EMG profiles of world class endurance runners during hopping. *Eur. J. Appl. Physiol.* 113: 1395-1403
48. Sano, K., Nicol, C., Akiyama, M., Kunimasa, Y., Oda, T., Ito, A., et al. (2014). Can measures of muscle-tendon interaction improve our understanding of the superiority of Kenyan endurance runners? *Eur. J. Appl. Physiol.*
49. Santos-Concejero, J., Billaut, F., Grobler, L., Oliven, J., Noakes, T.D., and Tucker, R. (2014). Maintained cerebral oxygenation during maximal self-paced exercise in elite Kenyan runners. *J. Appl. Physiol.* jap.00909.2014, 2014.
50. Santos-Concejero, J, Tam, N, Granados, C, Irazusta, J, Bidaurrezaga-Letona, I, Zabala-Lili, J, et al. (2014). Interaction effects of stride angle and strike pattern on running economy. *Int J Sport Med* 35: 1118-1123
51. Saunders, P.U., Telford, R.D., Pyne, D.B., Peltola, E.M, Cunningham, R.B., Gore, C.J., et al. (2006). Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *J. Strength Cond. Res.* 20: 947-54.
52. Sedano, S., Marín, P.J., Cuadrado, G., and Redondo, J.C. (2013). Concurrent training in elite male runners: the influence of strength versus muscular endurance training on performance outcomes. *J. Strength Cond. Res.* 27: 2433-43,
53. Staron, R.S., Karapondo, D.L., Kraemer, W.J., Fry, A.C., Gordon, S.E., Falkel, J.E., et al. (1994). Skeletal muscle adaptations during early phase of heavy-resistance training in men and women. *J. Appl. Physiol.* 76: 1247-55.
54. Støren, Ø., Helgerud, J., Støa, E.M., and Hoff, J. (2008). Maximal strength training improves running economy in distance runners. *Med. Sci. Sport Exerc.* 40: 1087- 1092.
55. de Villarreal, E.S.S., Izquierdo, M., and Gonzalez-Badillo, J.J. (2011). Enhancing jump performance after combined vs. maximal power, heavy-resistance, and plyometric training alone. *J. Strength Cond. Res.* 25: 3274-3281
56. Wilber, R.L. and Pitsiladis, Y.P. (2012). Kenyan and Ethiopian distance runners: what makes them so good? *Int. J. Sport Physiol. Perform.* 7: 92-102.
57. Willardson, J.M., Emmett, J., Oliver, J.A., and Bressel, E. (2008). Effect of short-term failure versus nonfailure training on lower body muscular endurance. *Int. J. Sport Physiol. Perform.* 3: 279-293
58. Yamamoto, L.M., Lopez, R.M., Klau, J.F., Casa, D.J., Kraemer, W.J., and Maresh, C.M. (2008). The effects of resistance training on endurance distance running performance among highly trained runners: a systematic review. *J. Strength Cond. Res.* 22: 2036-2044

Cita Original

Carlos Balsalobre-Fernández, Jordan Santos-Concejero, Gerasimos V Grivas. The effects of strength training on running economy in highly trained runners: a systematic review with meta-analysis of controlled trials. *The Journal of Strength and Conditioning Research*. December 2015