

Variables antropométricas, fisiológicas y biomecánicas determinantes del rendimiento en corredores de media maratón

Accésit SIBB 2013

A. OGUETA-ALDAY, J.A. RODRÍGUEZ-MARROYO, J. GARCÍA-LÓPEZ
Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte. Instituto de Biomedicina
Departamento de Educación Física y Deportiva. Universidad de León

Resumen

El objetivo es analizar la influencia de los factores antropométricos, fisiológicos y biomecánicos en el rendimiento de carreras de fondo. Participaron 48 corredores clasificados en 4 niveles según rendimiento en media maratón (hh:mm:ss): Grupo 1 (n=11, <1:10:00), Grupo 2 (n=13, <1:20:00), Grupo 3 (n=13, <1:30:00), Grupo 4 (n=11, <1:45:00). Realizaron una valoración antropométrica, prueba submáxima de economía de carrera y prueba máxima de VO2max. Estas últimas realizadas en tapiz rodante, registrándose parámetros fisiológicos y biomecánicos (análisis espacio-temporal). Se observaron diferencias entre grupos y correlaciones con el rendimiento en ciertas variables ligadas al entrenamiento (años de experiencia y kilómetros semanales), antropométricas (masa, IMC y sumatorio de pliegues), fisiológicas (VO2max, umbral anaeróbico y economía de carrera) y biomecánicas (tiempos de contacto en prueba submáxima; tiempos de contacto y amplitudes de zancada en prueba máxima). Las diferencias en los tiempos de contacto podrían explicarse por los distintos patrones de pisada de los corredores (talonadores vs planta entera/antepié), velocidad a la que se obtuvieron las variables fisiológicas (umbrales y VO2max) y, en menor medida, por el nivel de rendimiento. Así, a excepción de la amplitud de zancada, el resto de variables biomecánicas han mostrado ser poco sensibles al rendimiento obtenido en esta disciplina.

Palabras clave: Carreras de larga distancia, IMC, economía de carrera, análisis espacio-temporal.

Abstract

The aim of the study was to analyze the influence of anthropometric, physiological and biomechanical factors on long-distance running performance. Forty-eight runners participated in the study and were classified into 4 groups according to their performance level in half-marathon (hh:mm:ss): Group 1 (n=11, <1:10:00), Group 2 (n=13, <1:20:00), Group 3 (n=13, <1:30:00), Group 4 (n=11, <1:45:00). They performed an anthropometric evaluation, a submaximal running economy test and a maximal incremental test. Both running test were performed on a treadmill, registering simultaneously physiological and biomechanical (spatio-temporal) parameters. Significant differences between groups and correlations with performance were obtained with training-related variables (experience and km/week), anthropometrics (mass, BMI and sum of skinfolds), physiological (VO2max, anaerobic threshold and running economy) and biomechanical (contact times in submaximal test; contact times and step length in incremental test). Differences in contact times could be explained by the different runners' foot strike patterns (rearfoot vs midfoot/forefoot), speed where physiological variables were obtained (thresholds and VO2max), and to a less extend, to performance level. Thus, except from step length, the rest of biomechanical variables have shown to be not very sensitive to long-distance running performance.

Keywords: Long-distance running, body fat, running economy, spatio-temporal parameters.

Correspondencia:

Ana Ogueta Alday

FCAFD. Universidad de León. C/ Campus de Vegazana S/N. 24071 - León

E-mail: aogua@unileon.es. Teléfono: 649355787

Introducción

Las carreras de larga distancia en asfalto (running) han aumentado su popularidad desde hace pocos años atrás. Por ejemplo, en Estados Unidos la participación en este tipo de eventos se ha incrementado en, al menos, un 10% en los últimos dos años [37]. Podemos encontrar una amplia variedad de participantes en estas carreras, que va desde los mejores atletas del país hasta corredores de nivel más popular, siendo el abanico de rendimiento muy variado. Esto ha propiciado un marcado interés dentro de la comunidad científica, que se ha interesado por estudiar el rendimiento en este tipo de pruebas desde diferentes puntos de vista.

La relación entre las variables fisiológicas y el rendimiento en carreras de larga distancia es a día de hoy bastante conocida. Un elevado VO_{2max} , un alto umbral anaeróbico y una buena economía de carrera están directamente relacionados con el rendimiento en este tipo de pruebas [3]. Algunos autores han discutido que algunas de estas variables tienen más influencia en el rendimiento que otras [19]; y mientras unos se decantan por el umbral anaeróbico [3, 35], otros lo hacen por la economía de carrera [40] o por la velocidad aeróbica máxima [19]. No obstante, también se propone la combinación de alguna de estas variables fisiológicas a la hora de predecir el rendimiento [38].

Algunas variables antropométricas también juegan un papel fundamental a la hora de describir un buen rendimiento, o al afectar a las variables fisiológicas previamente mencionadas [2, 13, 21, 24, 28, 30, 43]. Un bajo peso [24, 43], índice de masa corporal [13, 21, 43], porcentaje de grasa [13, 30, 43] y sumatorio de pliegues del tren inferior [2, 28, 43] optimizan el rendimiento en carreras de larga distancia. Sin embargo, existen otras variables antropométricas cuya influencia en el rendimiento es todavía desconocida o confusa. Por ejemplo, mientras unos estudios observan relaciones entre una baja estatura y el rendimiento [30, 43] o la economía de carrera [38], otros no las han observado [24, 25]. La discrepancia es todavía mayor en variables antropométricas como la longitud de las extremidades inferiores o los perímetros de los brazos y piernas [26, 24, 25, 31, 43]. Es posible que la comparación de atletas de diferentes razas [26, 31] haya condicionado, en parte, la interpretación de los resultados.

La posible influencia de las variables biomecánicas en el rendimiento en carreras de larga distancia es muy confusa. El patrón de pisada (talonador

vs planta entera/antepié) ha sido identificado clave por algunos autores que observan una mayor distribución de corredores de planta entera/antepié en los primeros puestos de las clasificaciones [16, 23]. Sin embargo, otros estudios no han observado esta tendencia [27]. El único estudio que ha analizado conjuntamente los parámetros espacio-temporales de la carrera (frecuencia y amplitud de zancada, tiempo de contacto) en el rendimiento no ha obtenido ninguna relación [38]. Por el contrario, otros han afirmado que un menor tiempo de apoyo se asocia con un mejor rendimiento [16, 35] sin considerar que el tiempo de apoyo es una variable dependiente de la velocidad [32, 34]. Además, la mayoría de los estudios mencionados no tienen en cuenta el patrón de pisada de los corredores, que condiciona aproximadamente un 10% el tiempo de apoyo [32, 34].

Según se ha comentado, la relación de algunas de las variables mencionadas con el rendimiento en carreras de larga distancia podría estar condicionada por la diferente raza de los sujetos analizados y su influencia en las variables antropométricas (i.e. altura y perímetro de la pierna), o por una relación indirecta entre la velocidad de carrera o el patrón de pisada y algunas variables biomecánicas (i.e. tiempo de apoyo). Igualmente, algunos estudios que han querido relacionar estas variables con el rendimiento lo han hecho con un escaso número ($n < 15$) de corredores [8, 38] o en sujetos de un único nivel de rendimiento [2, 8, 12, 30, 31, 34, 35, 40]. Teniendo en cuenta todos estos factores, el objetivo de este estudio es analizar la influencia de las variables antropométricas, fisiológicas y biomecánicas en el rendimiento en media maratón de un amplio grupo de corredores caucásicos de diferente nivel.

Materiales y métodos

Sujetos

Participaron 48 corredores de fondo después de acordarse los siguientes criterios de inclusión: 1) que fueran de origen caucásico, 2) que hubiesen participado en al menos una media maratón en las 6 semanas anteriores a la realización de las pruebas, y 3) que su rendimiento en dicha prueba fuese inferior a 1:45:00 hh:mm:ss, determinado por el tiempo del “chip” (tiempo desde la salida a la línea de meta después de los 21.097 m). Los corredores fueron divididos en 4 grupos en función de su nivel de rendimiento: Grupo 1 ($n=11$, $< 1:10:00$ hh:mm:ss), Grupo 2 ($n=13$, entre 1:10:00 y 1:20:00 hh:mm:ss), Grupo 3 ($n=13$,

entre 1:20:00 y 1:30:00 hh:mm:ss) y Grupo 4 (n=11, entre 1:30:00 y 1:45:00 hh:mm:ss). Además, siguiendo los criterios de Hasegawa et al [16], los corredores fueron clasificados en función de su patrón de pisada como talonadores o planta entera/antepié. El protocolo para llevar a cabo el estudio fue aprobado por el Comité Ético de la Universidad de León (España) estando conforme con la declaración de Helsinki para la investigación humana. Todos los participantes firmaron un consentimiento informado por escrito para participar en el estudio, y fueron informados de los objetivos del mismo.

Diseño experimental

Para la realización de las pruebas los corredores acudieron al laboratorio 2 días diferentes, separados por al menos una semana. El primer día se llevó a cabo una valoración antropométrica y un test incremental de consumo máximo de oxígeno. El segundo día, un test submáximo de economía de carrera a diferentes velocidades. Las valoraciones se realizaron a la misma hora del día (entre las 10 y 13 h), bajo las mismas condiciones medioambientales (~800 m de altitud, 20-25 °C, 20-35% de humedad relativa). Durante estos días se les recomendó una correcta ingesta de carbohidratos e hidratación [31]. En ambos días se realizó un calentamiento estandarizado de 10 min de carrera continua a 10-12 km•h⁻¹ en tapiz rodante, seguido de 5 min de estiramientos y movilidad articular. Los corredores utilizaron el mismo tipo de zapatillas durante todas las pruebas (250-300 g de peso en cada pie) para evitar la influencia de esta variable en la economía de carrera [11].

Las pruebas de carrera se realizaron en tapiz rodante (HP Cosmos Pulsar, HP Cosmos Sports & Medical GMBH, Nussdorf-Traunstein, Alemania) con un 1% de inclinación para simular el gasto energético debido a la resistencia del viento [22]. Se colocaron dos ventiladores, uno enfrente y otro en un lateral del tapiz rodante, a ~50-100 cm del corredor, con el objetivo de refrigerarlo durante las pruebas [31]. En ambas pruebas de carrera, el intercambio de gases (Medical Graphics System CPX-Plus, Medical Graphics Corporation, St. Paul, MN, EEUU) y la frecuencia cardiaca (Polar Team, Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia) fueron registrados continuamente. Los parámetros espacio-temporales de la carrera (tiempo de contacto, tiempo de vuelo, frecuencia y amplitud de zancada) también fueron registrados mediante una plataforma láser (SportJUMP System PRO, DSD Inc., España) instalada en un tapiz rodante,

conectada a un software específico (Sport-Bio-Running®, DSD Inc., España) y validada anteriormente por estudios previos [32]. El tiempo de registro de los parámetros espacio-temporales de la carrera fue de 20 s para registrar al menos 32-64 pasos consecutivos, necesarios para reducir el efecto de la variabilidad intraindividual de zancada [4]. El patrón de pisada de los corredores se determinó utilizando una cámara de vídeo de alta velocidad (Casio Exilim Pro EX-F1, CASIO Europe GMBH, Norderstedt, Alemania) colocada en el lateral derecho del tapiz rodante (~1 m), perpendicular al plano sagital a una altura de 0,4 m. Todos los corredores fueron analizados por el mismo observador, quien identificó el patrón de pisada de cada corredor a su velocidad específica de carrera. Esta velocidad fue calculada teniendo en cuenta el tiempo requerido para completar la media maratón (e.g. 18 km•h⁻¹ para un corredor con un tiempo de 1:10:00 hh:mm:ss en media maratón). Debido al bajo porcentaje de corredores de planta entera y antepié en las carreras de larga distancia, la mayoría de los estudios los clasifican dentro de la misma categoría [16, 27, 34]. Así, en este estudio los corredores fueron clasificados en 2 grupos: talonadores vs planta entera/antepié.

Valoración antropométrica

Se registraron peso y talla, obteniendo a partir de ellos el índice de masa corporal (IMC). Se registraron 6 pliegues cutáneos (tricipital, subescapular, suprailiaco, abdominal, medial del muslo y de la pierna) utilizando el material convencional (HSB-BI, British Indicators LTD, West Sussex, Reino Unido). También se obtuvieron los perímetros máximos del muslo y de la pierna y mínimo de tobillo (Holtain LTD; Crymych, Reino Unido), así como la altura trocantérea y la longitud de la pierna (desde la cabeza del peroné hasta el suelo) (Harpender anthropometer, CMS instruments, London, Reino Unido). Todas las medidas antropométricas se realizaron por el mismo investigador, siguiendo las consideraciones del Grupo Español de Cinenantropometría [1, 9], y son similares a las registradas en estudios previos sobre corredores de fondo [31].

Test incremental de consumo máximo de oxígeno

El test comenzaba a 6 km•h⁻¹, con un incremento gradual de la velocidad de carrera de 1 km•h⁻¹ cada minuto hasta el agotamiento. Fueron aceptados como VO₂max y frecuencia cardiaca máxima los valores más altos obtenidos durante 30 s antes de la extenuación [34]. Los umbrales

aeróbico y anaeróbico fueron determinados de acuerdo al criterio de Davis [6]. Los parámetros biomecánicos fueron registrados en los últimos 20 s de cada estadio de velocidad, a partir de los 10 km•h⁻¹ (cuando empezaba a haber fase de vuelo en la carrera) y hasta la máxima velocidad alcanzada.

Prueba submáxima de economía de carrera

Los sujetos corrieron a 11, 13 y 15 km•h⁻¹ durante 6 minutos, con descansos completos de 5 minutos entre cada velocidad. El intercambio de gases fue registrado continuamente, aunque para el análisis de datos (VO₂, RER y FC) solo se tuvieron en cuenta los 3 últimos minutos de cada estadio [31]. La economía de carrera (coste energético de la carrera) se expresó en ml•kg⁻¹•km⁻¹ y ml•kg^{-0,75}•km⁻¹. También se obtuvo el coeficiente propuesto por Storen et al [38], que establece una relación o ratio entre la máxima energía disponible y la energía gastada para desplazar la masa corporal (VO₂max / EC en min•m⁻¹). Durante esta prueba de economía, en los últimos 30 s de cada

estadio de velocidad, se registraron los parámetros espacio-temporales de la carrera tal y como se ha descrito anteriormente.

Análisis gráfico y estadístico

Los datos se presentan como valores medios y desviaciones estándar de la media (media ± DS). Se aplicó el test de Kolmogorov-Smirnov para confirmar una distribución normal de los resultados y se utilizó un análisis de la varianza de una vía (ANOVA) para analizar las diferencias entre los 4 grupos de nivel. Cuando se encontraba una F significativa, se aplicó el análisis post hoc de Newman-Keuls para analizar las diferencias entre grupos. El test de Pearson fue utilizado para el cálculo de las correlaciones entre variables. El registro de los datos y análisis gráfico se realizaron con el software Microsoft Office Excel-2007, mientras que el análisis estadístico se realizó con el programa estadístico-informático SPSS ver.17 (SPSS, Inc., Chicago, IL, EEUU). Valores de p < 0.05 fueron considerados estadísticamente significativos.

	G1 (n= 11)	G2 (n= 13)	G3 (n= 13)	G4 (n=11)	r
Rendimiento (s)	4017±137*†#	4378±203†#	5109±152#	5758±194	---
Edad (años)	30.0±6.0	29.3±6.3	34.4±6.3	34.5±9.3	
Experiencia entrenamiento (años)	16.5±5.6*†#	11.0±3.7†#	4.5±3.3	3.6±4.2	-0.75
Volumen entrenamiento (km/sem)	118.6±30.3*†#	85.8±23.3†#	51.7±21.3	43.3±15.4	-0.80
Masa (kg)	66.5±5.3†#	68.1±5.0†	73.0±5.6	73.0±8.9	0.45
Talla (cm)	176.4±5.0	179.7±4.1	177.0±6.2	173.9±6.8	
Índice de masa corporal (km•m⁻²)	21.4±1.4†#	21.1±0.9†#	23.3±1.3	24.1±2.4	0.64
∑ de 6 pliegues (mm)	37.4±9.1†#	40.4±6.3†#	58.6±13.8#	70.3±15.9	0.78
Perímetro máximo de muslo (cm)	50.6±4.1	50.3±1.8	51.7±2.2	51.6±3.9	
Perímetro máximo de pierna (cm)	36.5±1.2	36.6±1.8	37.2±1.8	37.0±2.1	
Perímetro mínimo de tobillo (cm)	21.4±0.9	22.0±1.2	22.6±1.1	22.8±2.0	
Altura trocánterea (cm)	89.3±3.0	91.5±3.3	90.2±5.1	88.9±4.9	
Longitud de la pierna (cm)	43.8±1.4	45.3±1.6	45.3±4.3	44.4±2.4	

Nota: Rendimiento, tiempo (s) en completar la media maratón. G1, G2, G3, G4, grupos de corredores en función de su nivel de rendimiento en media maratón (< 1:10:00, < 1:20:00, < 1:30:00 y ≥ 1:30:00 hh:mm:ss, respectivamente). ∑ de 6 pliegues, sumatorio de 6 pliegues. Los pliegues fueron tríceps, subscapular, supra-iliaco, abdominal, muslo y pierna. *: Diferencias significativas con el Grupo 2; †: Diferencias significativas con el Grupo 3; #: Diferencias significativas con el Grupo 4. r: correlación significativa (p<0.05).

Tabla 1. Características y variables antropométricas (media ± DS) de los diferentes grupos de corredores. Correlaciones (r) con el rendimiento (tiempo en completar la media maratón).

Resultados

En la Tabla 1 se muestran las características y variables antropométricas de los corredores en función de su nivel de rendimiento en la media maratón. Se observó un efecto significativo del grupo en los años de experiencia en el entrenamiento ($F = 23.5$ y $p < 0.001$) y volumen de entrenamiento semanal ($F = 23.3$ y $p < 0.001$). A su vez, los corredores de mayor nivel presentaron menor masa ($F = 3.3$ y $p < 0.01$), índice de masa corporal ($F = 10.6$ y $p < 0.001$) y sumatorio de pliegues ($F = 20.0$ y $p < 0.001$) que los corredores de menor nivel, sin diferencias en el resto de variables antropométricas. Todas las variables en las que se encontraron diferencias significativas se correlacionaron con el rendimiento.

La Tabla 2 muestra las variables fisiológicas obtenidas en los tests incremental y submáximo en los diferentes grupos de corredores. Se observó un efecto significativo del nivel en el VO_{2max} expresado en $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ ($F = 15.9$ y $p < 0.001$)

y $ml \cdot kg^{-0.75} \cdot min^{-1}$ ($F = 13.5$ y $p < 0.001$), velocidad pico ($F = 71.1$ y $p < 0.001$) y velocidad en los umbrales aeróbico ($F = 16.2$ y $p < 0.001$) y anaeróbico ($F = 43.2$ y $p < 0.001$). No se observaron diferencias en la frecuencia cardiaca máxima y porcentajes de VO_{2max} en los umbrales aeróbico y anaeróbico. Además, se observó un efecto significativo del nivel en la economía de carrera expresada en $ml \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$ ($F = 3.5$ y $p < 0.01$) y $ml \cdot kg^{-0.75} \cdot km^{-1}$ ($F = 5.0$ y $p < 0.01$), así como en el cociente VO_{2max} / EC ($F = 27.5$ y $p < 0.001$). Las variables que más se correlacionaron con el rendimiento fueron aquéllas donde más diferencias entre grupos se observaron; es decir, las velocidades pico y en el umbral anaeróbico, seguidas del cociente VO_{2max} / EC , el VO_{2max} y la velocidad en el umbral aeróbico, y por último, con la economía de carrera.

La Figura 1 muestra la distribución de los corredores según el tipo de apoyo en cada grupo de nivel. El nivel influyó en el porcentaje de corredores de planta entera/antepié ($F = 5.2$ y $p < 0.01$), que fue mayor en el Grupo 1 respecto al resto de grupos.

	G1 (n= 11)	G2 (n= 13)	G3 (n= 13)	G4 (n= 11)	r
VO_{2max} ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)	69.2±5.0*†#	64.4±5.7†#	56.9±4.5	55.9±6.2	-0.76
VO_{2max} ($ml \cdot kg^{-0.75} \cdot min^{-1}$)	197.4±13.8*†#	184.9±14.1†#	166.1±13.2	163.1±16.0	-0.67
FC_{max} (ppm)	186±6	185±7	186±9	186±11	
Velocidad pico ($km \cdot h^{-1}$)	22.1±0.8*†#	20.6±1.0†#	18.8±0.4#	17.4±0.9	-0.92
VT2 - % VO_{2max}	87.8±4.8	90.2±3.7	87.6±5.0	84.4±5.3	-0.34
VT2 - velocidad ($km \cdot h^{-1}$)	18.6±1.2*†#	17.4±1.2†#	15.5±0.8#	13.8±1.1	-0.92
VT1 - % VO_{2max}	58.9±4.5	61.1±7.1	59.7±6.4	62.7±7.4	
VT1 - velocidad ($km \cdot h^{-1}$)	12.7±1.2*†#	11.8±1.3†#	10.2±0.5	9.8±1.3	-0.76
EC ($ml \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$)	198.5±18.3#	211.3±13.0	208.4±11.0	219.8±18.7	0.35
EC ($ml \cdot kg^{-0.75} \cdot km^{-1}$)	566.5±54.0*†#	606.6±38.3	609.0±36.9#	641.5±53.0	0.45
VO_{2max} / EC ($m \cdot min^{-1}$)	351.6±45.0*†#	305.3±24.0†#	272.8±14.8	254.4±17.0	-0.82

Nota: G1, G2, G3, G4, grupos de corredores en función de su nivel de rendimiento en la media maratón (< 1:10:00, < 1:20:00, < 1:30:00 y ≥ 1:30:00 hh:mm:ss, respectivamente). VO_{2max} , consumo máximo de oxígeno. FC_{max} , frecuencia cardiaca máxima. VT2, umbral anaeróbico ventilatorio. VT1, umbral aeróbico ventilatorio. EC, economía de carrera. VO_{2max} / EC , consumo máximo de oxígeno entre economía de carrera. *: Diferencias significativas con el Grupo 2; †: Diferencias significativas con el Grupo 3; #: Diferencias significativas con el Grupo 4. r: correlación significativa ($p < 0.05$).

Tabla 2. Variables fisiológicas (media ± DS) obtenidas en los tests incremental y submáximo en los diferentes grupos de corredores. Correlaciones (r) con el rendimiento (tiempo en completar la media maratón).

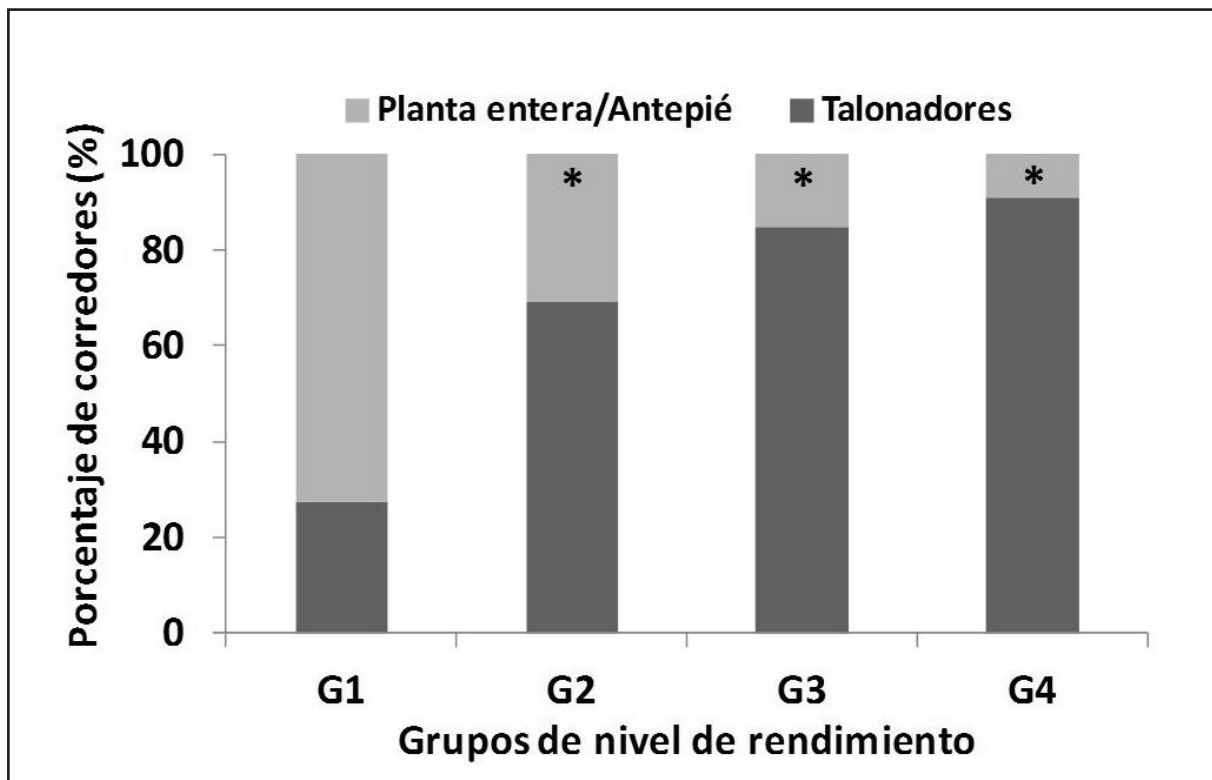


Figura 1. Porcentaje de corredores talonadores y planta entera/antepié en cada grupo de corredores. G1, G2, G3, G4, grupos de corredores en función de su nivel de rendimiento en la media maratón (< 1:10:00, < 1:20:00, < 1:30:00 y \geq 1:30:00 hh:mm:ss, respectivamente). *: Diferencias significativas con el Grupo 1.

		G1 (n= 11)	G2 (n= 13)	G3 (n= 13)	G4 (n= 11)	r
	Mínimo tiempo contacto (ms)	177 \pm 15*†#	193 \pm 17†#	215 \pm 17	222 \pm 14	0.76
	Máxima frecuencia zancada (Hz)	3.20 \pm 0.08	3.13 \pm 0.11	3.18 \pm 0.14	3.16 \pm 0.27	
	Máxima amplitud zancada (m)	1.86 \pm 0.09†#	1.80 \pm 0.12†#	1.61 \pm 0.13	1.54 \pm 0.16	-0.73
VT2	Tiempo contacto (ms)	198 \pm 23*†#	219 \pm 19†#	241 \pm 19#	260 \pm 19	0.82
	Frecuencia zancada (Hz)	3.03 \pm 0.12	2.96 \pm 0.13	2.98 \pm 0.15	2.88 \pm 0.17	-0.38
	Amplitud zancada (m)	1.66 \pm 0.09*†#	1.58 \pm 0.11†#	1.42 \pm 0.09#	1.29 \pm 0.10	-0.87
VT1	Tiempo contacto (ms)	246 \pm 22*†#	282 \pm 34†#	304 \pm 21	313 \pm 33	0.66
	Frecuencia zancada (Hz)	2.79 \pm 0.08	2.77 \pm 0.14	2.71 \pm 0.11	2.66 \pm 0.11	-0.43
	Amplitud zancada (m)	1.22 \pm 0.09*†#	1.13 \pm 0.12†#	1.03 \pm 0.06	1.05 \pm 0.08	-0.62
11 km·h⁻¹	Tiempo contacto (ms)	258 \pm 19*†#	279 \pm 19	290 \pm 20	295 \pm 26	0.53
13 km·h⁻¹	Tiempo contacto (ms)	236 \pm 16*†#	253 \pm 19	264 \pm 16	263 \pm 11	0.51
15 km·h⁻¹	Tiempo contacto (ms)	219 \pm 16*†#	233 \pm 16	242 \pm 15	242 \pm 11	0.50

Nota: G1, G2, G3, G4, grupos de corredores en función de su nivel de rendimiento en la media maratón (< 1:10:00, < 1:20:00, < 1:30:00 y \geq 1:30:00 hh:mm:ss, respectivamente). *: Diferencias significativas con el Grupo 2; †: Diferencias significativas con el Grupo 3; #: Diferencias significativas con el Grupo 4. r: correlación significativa (p<0.05).

Tabla 3. Variables biomecánicas (media \pm DS) obtenidas en los tests incremental y submáximo en los diferentes grupos de corredores. Correlaciones (r) con el rendimiento (tiempo en completar la media maratón).

La Tabla 3 muestra las principales variables biomecánicas de los tests incremental y submáximo en los diferentes grupos de corredores. El nivel afectó significativamente al tiempo de contacto y a la amplitud de zancada obtenidos en el umbral aeróbico ($F = 10.6$ y $p < 0.001$; y $F = 8.4$ y $p < 0.01$, respectivamente), anaeróbico ($F = 20.2$ y $p < 0.001$; $F = 31.2$ y $p < 0.001$, respectivamente) y en la velocidad pico ($F = 17.7$ y $p < 0.001$; $F = 16.2$ y $p < 0.001$, respectivamente), sin diferencias significativas en la frecuencia de zancada. Además, el tiempo de contacto y la amplitud de zancada se relacionaron con el rendimiento en el test incremental ($r > 0.62$ y $p < 0.001$). En el test submáximo no se encontraron diferencias significativas en la frecuencia y amplitud de zancada a las 3 velocidades de carrera analizadas (11, 13 y 15 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$). Sin embargo, el tiempo de contacto fue menor ($F > 6.3$ y $p < 0.01$) en los corredores de mayor nivel en todas las velocidades. El tiempo de contacto se relacionó con el rendimiento en media maratón ($r > 0.50$ y $p < 0.05$).

Discusión

Los principales hallazgos del presente estudio han sido: 1) Confirmar la relación entre el rendimiento en carreras de larga distancia y las variables ligadas al entrenamiento, al sobrepeso o a la fisiología; 2) Observar una mayor distribución de corredores de planta entera/antepié en los sujetos de mayor nivel; 3) No encontrar diferencias significativas a la misma velocidad de carrera entre los grupos de nivel en las variables biomecánicas analizadas (frecuencia y amplitud de zancada, tiempo de contacto); 4) Identificar el patrón de pisada y la amplitud de zancada como las variables biomecánicas más relacionadas con el rendimiento.

En el presente trabajo se ha observado una alta relación entre el rendimiento y factores asociados al entrenamiento como los años de práctica y el volumen de entrenamiento semanal (Tabla 1). Estos resultados estarían en consonancia con recientes hallazgos que corroboran la influencia de los factores ambientales (sociodemográficos) y ligados a la práctica (teoría de la práctica deliberada) en el rendimiento de las carreras de larga distancia, sobre una buena base genética [41]. También se ha observado que los corredores de mayor nivel presentaron menores valores de las variables ligadas al sobrepeso (masa, índice de masa corporal y sumatorio de pliegues cutáneos). Esto coincide con lo descrito en estudios anteriores, que han relacionado estas mismas variables con el rendimiento en

carreras de larga distancia [2, 13, 21, 24, 28, 43]. No obstante, en el presente estudio no se han encontrado diferencias entre grupos ni correlaciones con el rendimiento en ninguna de las variables lineales analizadas (talla, longitud de extremidades inferiores, perímetros de piernas, etc.). Esto coincide con los estudios que no han visto influencia de la talla [13, 24, 25], longitud de las extremidades inferiores [43] o perímetros [24, 25] en el rendimiento. Es posible que en los estudios que han obtenido diferencias [26, 31], se deban más al efecto de la comparación de diferentes razas (caucasianos vs eritreos/keniatas) que al efecto del rendimiento. Los corredores del presente estudio fueron todos de origen caucásico, por lo que se ha podido discriminar el efecto de la variable rendimiento.

Las variables fisiológicas como el VO_2max , velocidad pico, velocidad en los umbrales aeróbico y anaeróbico y la economía de carrera se han relacionado con el rendimiento obtenido en media maratón (Tabla 2). Estos resultados están en consonancia con los descritos previamente en la literatura científica [3, 19, 35, 40]. Es de destacar la escasa correlación encontrada entre el rendimiento y la economía de carrera ($r < 0.50$), que coincide con la opinión de otros trabajos, que incluso han llegado a no observar influencia de esta variable [38]. Las posibles causas de estas discrepancias y de la débil correlación encontrada son dos: 1) El hecho de que la economía de carrera depende mucho del nivel de entrenamiento [3], mostrando en el presente estudio que todos los corredores estaban altamente entrenados, con similares valores de % VO_2max en los umbrales aeróbico y anaeróbico; 2) El diferente patrón de pisada de los corredores que componen los distintos grupos de nivel (Figura 1). Recientes estudios han mostrado una mayor economía de carrera en los corredores talonadores frente a los de planta entera/antepié [12, 34]. Para solventar este problema sobre la economía de carrera, estudios anteriores propusieron un coeficiente entre las variables VO_2max y economía de carrera [38], que en el presente trabajo se ha relacionado de forma muy intensa con el rendimiento. Paradójicamente este coeficiente, que en sí es un valor de velocidad ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$), se relaciona con el rendimiento con la misma intensidad que las velocidades en los umbrales aeróbico y anaeróbico, así como con la velocidad aeróbica máxima (Tabla 2). La relación de estas variables es mucho más intensa que su valor expresado en parámetros fisiológicos (ej. $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$).

En el presente estudio (Figura 1) se ha observado una mayor concentración de corredores de

planta entera/antepié en el grupo de mayor nivel (~73%) respecto al resto de grupos (~9-31%). Estos resultados estarían en consonancia con estudios previos que compararon la distribución de corredores de planta entera/antepié entre los primeros y los últimos clasificados en media maratón y maratón [16, 23]. También hay un estudio que no ha observado esta tendencia [27], lo que podría deberse a que el grupo de corredores analizado realmente no fue de alto nivel [23]. Por lo tanto, parece claro que los corredores de mayor nivel tienden a utilizar un patrón de pisada más adelantado, que les permite tener en torno a un 10% menos de tiempo de apoyo a la misma velocidad que los corredores talonadores [8, 12, 16, 17, 32, 34]. El tiempo de apoyo es importante para conseguir altas velocidades de carrera ($> 20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) en entrenamiento y competición [17, 34], siendo éste el factor limitante de la máxima velocidad que se puede conseguir en la carrera [42].

Debemos ser cautos a la hora de analizar el comportamiento de las variables frecuencia y amplitud de zancada, así como del tiempo de apoyo durante el test incremental (Tabla 3). Estas variables dependen en gran medida de la velocidad [5, 32, 34], y en el presente estudio se han obtenido diferencias significativas en la misma entre los grupos de nivel. Teniendo en cuenta que las variables biomecánicas no deberían ser comparadas si se obtienen a diferente velocidad, del test incremental podemos extraer las siguientes lecturas:

1) La frecuencia de zancada se ha mostrado poco sensible al nivel de rendimiento, aunque tendiendo a ser mayor en los corredores de más nivel para la misma intensidad de carrera relativa (fisiológica). Esto coincide con hallazgos previos que relacionaron una mayor frecuencia de zancada en el umbral anaeróbico con un mejor rendimiento [33]. También coincide con una línea de trabajo actual en biomecánica, que establece una asociación entre la baja frecuencia de zancada y un mayor índice lesional [15, 18, 20, 29], así como con una peor economía de carrera [7, 14].

2) La amplitud de zancada se ha mostrado muy sensible al nivel de rendimiento, pudiendo ser el principal factor responsable del aumento de la velocidad [5]. Esto sería coincidente con recientes estudios que han observado una pérdida de amplitud de zancada y velocidad en atletas de mayor edad, lo que podría deberse a un deterioro en la fuerza [36]. De esta forma, la mayoría de los estudios han establecido una clara relación entre el entrenamiento de la fuerza y la mejora en el rendimiento en carreras de larga distancia [39]. Sin

embargo, hasta donde conocemos, ninguno de ellos ha analizado los efectos del entrenamiento de fuerza en las variables biomecánicas, lo cual podría constituir un objetivo de futuro.

3) El tiempo de contacto también se ha mostrado muy sensible al nivel de rendimiento, pero hay que tener precaución, porque depende del patrón de pisada y de la velocidad de carrera. Tal y como se ha mencionado anteriormente, los corredores de mayor nivel tienen un patrón de pisada más adelantado (~10% menos de tiempo de apoyo), y el efecto de la velocidad se ha establecido en ~20 ms por cada aumento de velocidad de $2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, en corredores de similar patrón de pisada [32]. Por lo tanto, teniendo en cuenta estos factores, las diferencias entre grupos encontradas en este estudio desaparecerían.

Al comparar los valores durante la carrera submáxima, sólo observamos diferencias en el tiempo de contacto (en torno al 10% entre el mejor y el peor grupo), y no en frecuencia y amplitud de zancada. Estas diferencias en el tiempo de contacto podrían ser debidas más al patrón de pisada que al nivel de rendimiento. Por lo tanto, a tenor de estos resultados, no está clara la asociación entre el tiempo de apoyo y el rendimiento en carreras de larga distancia como han sugerido algunos estudios que no controlaron la velocidad de carrera y/o el patrón de pisada de los corredores [16, 35]. Igualmente, sí que se observa un papel determinante de la amplitud de zancada en el rendimiento y/o velocidad que se puede alcanzar, pero ésta es la misma cuando se fija la misma velocidad de carrera para todos. Lo mismo ocurre con la frecuencia de zancada, aunque tiende a ser mayor en atletas de más nivel para similar intensidad relativa de esfuerzo. En conclusión, a la misma velocidad, y si se tiene en cuenta el patrón de pisada, no existen diferencias en el tiempo de apoyo, frecuencia y amplitud de zancada de corredores de larga distancia de diferente nivel.

Conclusión

Las principales aportaciones del presente estudio han sido:

1) Confirmar la relación entre el rendimiento en media maratón y las variables ligadas al entrenamiento, al sobrepeso o a la fisiología. Destacar que la velocidad a la que se consiguieron estas variables fisiológicas fue más importante que su valor (por ejemplo, $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)

2) Encontrar una mayor distribución de corredores de planta entera/antepié en los sujetos de

mayor nivel. Futuros estudios deberían abordar los factores que causan el empleo de un patrón de pisada u otro, pudiendo ser la velocidad elevada utilizada en entrenamientos y competición una posible explicación.

3) No encontrar diferencias significativas a la misma velocidad de carrera entre los grupos de nivel en las variables biomecánicas analizadas (frecuencia y amplitud de zancada, tiempo de contacto). Sin embargo, la amplitud de zancada parece ser determinante del rendimiento, de ahí la importancia del trabajo de la fuerza y el bajo peso de los corredores en este tipo de pruebas.

Futuros estudios deberían analizar los efectos del entrenamiento de fuerza en las variables biomecánicas de la carrera.

Agradecimientos

Al Consejo Superior de Deportes (Gobierno de España), por haber financiado el proyecto titulado “Validación y aplicación de una innovación tecnológica para la valoración biomecánica de la carrera en atletas de fondo y medio-fondo” en el marco de las Ayudas a las Universidades Públicas y Privadas y Entidades Públicas, para la realización de proyectos de apoyo científico y tecnológico al deporte (157/UPB10/12). Al Gobierno Vasco por financiar a través de una ayuda del Programa de Formación de Personal Investigador del Departamento de Educación, Universidades e Investigación a Ana Ogueta-Alday (2011-2014). A todos los corredores que voluntariamente se prestaron desinteresadamente a formar parte de este trabajo, y sin los cuales no hubiera podido llevarse a cabo.

Referencias

1. **Alvero JR, Cabañas MD, Herrero De Lucas A, Martínez L, Moreno C, Porta J, Sillero M, Sirvent JE.** Protocolo de valoración de la composición corporal para el reconocimiento médico-deportivo. Documento de consenso del Grupo Español de Cineantropometría de la Federación Española de Medicina del Deporte. *Archivos de Medicina del Deporte* 2009;26:166-179.
2. **Arrese AL, Ostariz ES.** Skinfold thicknesses associated with distance running performance in highly trained runners. *J Sports Sci* 2006;24:69-76.
3. **Basset DR, Howley ET.** Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:70-84.
4. **Belli A, Lacour JR, Komi PV, Candau R, Denis C.** Mechanical step variability during treadmill

- running. *Eur J Appl Physiol* 1995;70:510-517.
5. **Bramble DM, Lieberman DE.** Endurance running and the evolution of Homo. *Nature* 2004;432:345-352.
6. **Davis JA.** Anaerobic threshold: a review of the concept and directions for future research. *Med Sci Sports Exerc* 1985;17:6-21.
7. **De Ruiter CJ, Verdijk PW, Werker W, Zuidema MJ, De Haan A.** Stride frequency in relation to oxygen consumption in experienced and novice runners. *Eur J Sports Sci* 2014;14:251-258.
8. **Di Michele R, Merni F.** The concurrent effects of strike pattern and ground-contact time on running economy. *J Sci Med Sport* 2013 (in press). DOI: 10.1016/j.jsams.2013.05.012.
9. **Esparza F.** Manual de cineantropometría. Pamplona: Editorial FEMEDE, 1993.
10. **Fletcher JR, Esau SP, Macintosh BR.** Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *J Appl Physiol* 2009;107:1918-1922.
11. **Franz JR, Wierzbinski CM, Kram R.** Metabolic Cost of Running Barefoot versus Shod: Is Lighter Better? *Med Sci Sports Exerc* 2012;44:1519-1525.
12. **Gruber AH, Umberger BR, Braun B, Hamill J.** Economy and rate of carbohydrate oxidation during running with rearfoot or forefoot strike patterns. *J Appl Physiol* 2013;115:194-201.
13. **Hagan RD, Upton SJ, Duncan JJ, Gettman LR.** Marathon performance in relation to maximal aerobic power and training indices in female distance runners. *Br J Sports Med* 1987;21:3-7.
14. **Halvorsen K, Eriksson M, Gullstrand L.** Acute effects of reducing vertical displacement and step frequency on running economy. *J Strength Cond Res* 2012;26:2065-2070.
15. **Hamill J, Derrick TR, Holt KG.** Shock attenuation and stride frequency during running. *Human Movement Science* 1995;14:45-60.
16. **Hasegawa H, Yamauchi T, Kramer WJ.** Foot strike patterns of runners at the 15 km point during an elite-level half marathon. *J Strength Cond Res* 2007;21:888-893.
17. **Hayes P, Caplan N.** Foot strike patterns and ground contact times during high-calibre middle-distance races. *J Sports Sci* 2012;30:1275-1283.
18. **Heiderscheit BC, Chumanov ES, Michalski MP, Wille CM, Ryan MB.** Effects of step rate manipulation on joint mechanics during running. *Med Sci Sports Exerc* 2011;43:296-302.
19. **Helgerud J, Storen O, Hoff J.** Are there differences in running economy at different velocities for well-trained distance runners? *Eur J Appl Physiol* 2010;108:1099-1105.
20. **Hobara H, Sato T, Sakaguchi M, Sato T, Nakazawa K.** Step frequency and lower extremity loading during running. *Int J Sports Med* 2012;33:310-313.
21. **Hoffman MD.** Anthropometric characteristics of

- ultramarathoners. *Int J Sports Med* 2008;29:808-811.
22. **Jones AM, Doust JH.** A 1% treadmill grade most accurately reflects the energetic cost of outdoor running. *J Sports Sci* 1996;14:321-327.
 23. **Kasmer ME, Liu XC, Roberts KG, Valadao JM.** Foot-strike Pattern and Performance in a Marathon. *Int J Sports Physiol Perform* 2013;8:286-292.
 24. **Knechtle B, Duff B, Welzel U, Kohler G.** Body mass and circumference of upper arm are associated with race performance in ultraendurance runners in a multistage race—the Isarrun 2006. *Res Q Exerc Sport* 2009;80:262-268.
 25. **Knechtle B, Knechtle P, Rosemann T.** Race performance in male mountain ultra-marathoners: anthropometry or training? *Percept Mot Skilss* 2010;110:721-735.
 26. **Larsen HB, Christensen DL, Nolan T, Sondergaard H.** Body dimensions, exercise capacity and physical activity level of adolescent Nandi boys in western Kenya. *Ann Hum Biol* 2004;31:159-173.
 27. **Larson P, Higgins E, Kaminski J, Decker T, Preble J, Lyons D, McIntyre K, Normile A.** Foot strike patterns of recreational and sub-elite runners in a long-distance road race. *J Sports Sci* 2011;29:1665-1673.
 28. **Legaz A, Eston R.** Changes in performance, skinfold thicknesses, and fat patterning after three years of intense athletic conditioning in high level runners. *Br J Sports Med* 2005;39:851-856.
 29. **Lenhart RL, Thelen DG, Wille CM, Chumanov ES, Heiderscheid BC.** Increasing Running Step Rate Reduces Patellofemoral Joint Forces. *Med Sci Sports Exerc* 2014; 46:557-564.
 30. **Loftin M, Sothorn M, Koss C, Tuuri G, Vanvrancken C, Kontos A, Bonis M.** Energy expenditure and influence of physiologic factors during marathon running. *J Strength Cond Res* 2007;21:1188-1191.
 31. **Lucia A, Esteve-Lanao J, Oliván J, Gómez-Gallego F, San Juan A, Santiago C, Pérez M, Chamorro-Viña C, Foster, C.** Physiological characteristics of the best Eritrean runners—exceptional running economy. *Appl Physiol Nutr Metab* 2006;31:530-540.
 32. **Ogueta-Alday A, Morante JC, Rodríguez-Marroyo JA, García-López J.** Validation of a new method to measure contact and flight times during treadmill running. *J Strength Cond Res* 2013a;27:1455-1462.
 33. **Ogueta-Alday A, Morante JC, Rodríguez-Marroyo JA, Villa JG, García-López J.** Influencia de los parámetros biomecánicos en el rendimiento y la economía de corredores de fondo aficionados. *Biomecánica* 2011;19:17-27.
 34. **Ogueta-Alday A, Rodríguez-Marroyo JA, García-López J.** Rearfoot Striking Runners Are More Economical than Midfoot Strikers. *Med Sci Sports Exerc* 2014;46:580-585.
 35. **Paavolainen LM, Nummela AT, Rusko HK.** Neuromuscular characteristics and muscle power as determinants of 5-km running performance. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:124-130.
 36. **Piacentini MF, De Loannon G, Comotto S, Spedicato A, Vernillo G, La Torre A.** Concurrent strength and endurance training effects on running economy in master endurance runners. *J Strength Cond Res* 2013;27:2295-2303.
 37. **Rothschild, C.** Running barefoot or in minimalist shoes: evidence or conjecture? *Strength & Conditioning Journal* 2012;34:8-17.
 38. **Støren O, Helgerud J, Hoff J.** Running stride peak forces inversely determines running economy in elite runners. *J Strength Cond Res* 2011;25:117-123.
 39. **Taipale RS, Mikkola J, Vesterinen V, Nummela A, Häkkinen K.** Neuromuscular adaptations during combined strength and endurance training in endurance runners: maximal versus explosive strength training or a mix of both. *Eur J Appl Physiol* 2013;113:325-335.
 40. **Tartaruga MP, Brisswalter J, Peyré-Tartaruga LA, Avila AO, Alberton CL, Coertjens M, Cadore EL, Tiggerman CL, Silva, EM, Kruel LF.** The relationship between running economy and biomechanical variables in distance runners. *Res Q Exerc Sport* 2012;83:367-375.
 41. **Tucker R, Collins M.** What makes champions? A review of the relative contribution of genes and training to sporting success. *Br J Sports Med* 2012;46:555-561.
 42. **Weyand PG, Sandell RF, Prime DNL, Bundle MW.** The biological limits to running speed are imposed from the ground up. *J Appl Physiol* 2010;108:950-961.
 43. **Zillmann T, Knechtle B, Rüst CA, Knechtle P, Rosemann T, Lepers R.** Comparison of Training and Anthropometric Characteristics between Recreational Male Half-Marathoners and Marathoners. *Chin J Physiol* 2013;56:138-146.