

Influencia de los parámetros biomecánicos en el rendimiento y la economía de corredores de fondo aficionados

A. OGUETA-ALDAY, J.C. MORANTE, J.A. RODRÍGUEZ-MARROYO, J.G. VILLA, 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

Los objetivos de este estudio son analizar la relación entre las variables biomecánicas, la economía de carrera y el rendimiento en corredores de fondo aficionados. Además, determinar si existe algún cambio en los parámetros biomecánicos coincidente con el umbral anaeróbico ventilatorio. Participaron 10 corredores de fondo aficionados realizando: Antropometría, batería de saltos verticales, prueba de economía de carrera y prueba de consumo máximo de oxígeno. Estas últimas realizadas en tapiz rodante, registrándose parámetros fisiológicos (ventilatorios y frecuencia cardiaca) y biomecánicos (tiempos de contacto y de vuelo, frecuencia y amplitud de zancada, "duty factor"). Por primera vez, se ha observado una relación entre parámetros biomecánicos espacio-temporales de la carrera (frecuencia y amplitud de zancada), el rendimiento y la economía de carrera. Además, se ha comprobado que la aparición del umbral anaeróbico ventilatorio se encuentra relacionada con cambios en la biomecánica de la carrera (fundamentalmente "duty factor" y amplitud de zancada). Las relaciones encontradas entre las variables antropométricas y de salto, economía de carrera y rendimiento están en consonancia con las mencionadas en estudios previos, así como que la relación entre la economía de carrera y el rendimiento. Futuros trabajos deberían realizarse en corredores de mayor nivel para contrastar estos hallazgos.

Palabras clave: Biomecánica de la carrera, VO_{2max} , economía de carrera, rendimiento.

Abstract

The aim of this study is to analyze the relationship between running biomechanics, running economy and performance in recreational long distance runners. Additionally, determine if there is any change in running biomechanical parameters that coincides with the anaerobic threshold. Ten recreational runners performed an anthropometric evaluation, a battery of vertical jumps, a running economy test and a maximal incremental test. Both running tests were performed in a treadmill, registering simultaneously physiological (ventilation and heart rate) and biomechanical (contact and flight times, stride length and rate, "duty factor") parameters. A relationship between running biomechanics (step length and rate), running economy and performance was obtained. Furthermore, the appearance of the ventilatory anaerobic threshold was related with changes in running biomechanics (mainly with "duty factor" and step length). The relationships between anthropometry and vertical jumps' parameters, running economy and performance still consistent with those identified in previous studies, as well as the relationship between running economy and performance. Future studies should be done with a higher level sample to contrast these findings.

Keywords: Running biomechanics, VO_{2max} , running economy, performance.

Correspondencia:
Ana Ogueta Alday
FCAFD. Universidad de León.
C/ Campus de Vegazana s/n. CP. 24071 - León.
E-mail: aogua@unileon.es
Teléfono: 649.355.787



en el XXXIV Congreso de la SIBB
Córdoba, 4-5 noviembre de 2011

Introducción

El rendimiento en las carreras de fondo y medio fondo depende del consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}), del umbral anaeróbico ($\%VO_{2max}$) y de la economía de carrera (EC) [3]. La EC es entendida como el gasto energético necesario para correr a una velocidad de carrera determinada [31]. La EC depende, a su vez, de otra serie de factores tales como el entrenamiento [39], la fatiga [16, 18], el ambiente [11], la psicología [6], fisiología [31] y biomecánica [23].

Varios autores han destacado la importancia que puede tener la biomecánica de la carrera en las diferencias encontradas en la EC [23, 46]. Parece clara la influencia de la rigidez/elasticidad de la pierna o “leg stiffness” [2], flexibilidad [27], características antropométricas [41], patrones de pisada [15] y uso del calzado [8] sobre la EC. Se sabe además, que un mayor tiempo de contacto a una velocidad de carrera determinada afecta negativamente a la EC [33, 35]. Sin embargo, todavía se desconoce qué sucede con la frecuencia y amplitud de zancada, que son dos variables biomecánicas básicas de la carrera [23, 41], habiéndose comentado que su comportamiento es individual para cada corredor [26].

De otra parte encontramos el umbral anaeróbico, entendido como la habilidad de mantener un alto porcentaje de consumo máximo de oxígeno ($\%VO_{2max}$) durante un tiempo prolongado, y altamente relacionado con el rendimiento en las carreras de fondo y medio fondo [3]. Se han descrito una serie de métodos invasivos (umbral láctico y de catecolaminas) y no invasivos (intercambio respiratorio, EMG de superficie, saliva, resonancia magnética nuclear y frecuencia cardiaca) para la determinación del umbral anaeróbico [24, 42]. Se conoce que a partir de un determinado nivel de esfuerzo, la frecuencia de zancada se dispara y la amplitud se aplanan [45], por lo que un estudio intentó comprobar si el cambio en el comportamiento de estas variables durante una prueba de esfuerzo máxima y progresiva podría considerarse un método no invasivo de determinación del umbral anaeróbico [42]. Estos autores concluyeron que el comportamiento de estas variables biomecánicas era individual para cada corredor, y que no se relacionaba con los umbrales láctico y de frecuencia cardiaca. Sin embargo, es posible que algunos aspectos metodológicos (precisión de la herramienta utilizada y número de pasos analizados) condicionaran los resultados obtenidos. Recientemente se ha validado un sistema que permite

registrar de manera precisa (1000 Hz) y durante un número de pasos ilimitado los tiempos de contacto y vuelo, así como la frecuencia y amplitud de zancada durante la carrera en tapiz rodante [34].

Los objetivos de este trabajo son: (a) analizar la relación entre las variables biomecánicas, la economía de carrera y el rendimiento en corredores de fondo aficionados; (b) determinar si existe algún cambio en los parámetros biomecánicos de la carrera que coincida con el umbral anaeróbico de esfuerzo durante la realización de un test progresivo.

Materiales y métodos

Sujetos

Participaron 10 corredores de fondo (33.8 ± 6.8 años, 75.5 ± 8.2 kg, 1.78 ± 0.08 m) de nivel aficionado (tiempo medio en media maratón de $1:35:54 \pm 0:09:49$ hh:mm:ss, con un rango entre $1:19:13$ y $1:57:00$ hh:mm:ss). Como criterio de inclusión se acordó que los corredores hubiesen participado en al menos una media maratón en el mes y medio anterior a la realización del estudio, tomando como marca de rendimiento la obtenida en completar dicha prueba (tiempo real de “chip”, desde la salida a la llegada de los 21.097 m). 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

Las valoraciones se llevaron a cabo durante los meses de mayo a junio de 2011, en el laboratorio de fisiología de la Universidad de León (800 m de altitud), en condiciones medio ambientales similares ($22-23$ °C, 33-38 % de humedad relativa) y a la misma hora del día para cada uno de los sujetos. Los corredores acudieron dos días diferentes al laboratorio para la realización de las valoraciones. Para ambos días se les pidió que 24h antes no realizaran ejercicio físico extenuante. El primer día se llevó a cabo una valoración antropométrica, una batería de saltos verticales y el protocolo de medición de la EC. El segundo día, una prueba de consumo máximo de oxígeno. En ambos días se realizó un calentamiento estandarizado de 10 minutos de carrera continua a $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ en tapiz rodante, seguido de 5 minutos de estiramientos y movilidad articular. En las pruebas de carrera, la inclinación

del tapiz rodante fue del 1%, para simular así el gasto energético debido a la resistencia del viento [20]. 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 [25]. En ambas pruebas de carrera, además, el intercambio de gases fue registrado continuamente con un analizador de gases (Medical Graphics System CPX-Plus, Medical Graphics Corporation, St. Paul, MN, USA) que fue calibrado siguiendo las indicaciones del fabricante. La frecuencia cardiaca fue registrada continuamente, cada 5 s, mediante un pulsómetro (Polar Team, Polar Electro Oy, Kempele, Finland). También se registraron los parámetros espacio-temporales de la carrera (tiempo de contacto, tiempo de vuelo, frecuencia y amplitud de zancada) mediante una plataforma láser (SportJUMP System PRO, DSD Inc., Spain) conectada a un software específico (Sport-Bio-Running®, DSD Inc., Spain). La plataforma se instaló en un tapiz rodante (HP Cosmos Pulsar; Nussdorf, Germany), y ha sido validada en estudios previos [34]. El tiempo de registro de los parámetros espacio-temporales de la carrera fue el suficiente (entre 20 y 30 s) para registrar al menos 32-64 pasos consecutivos, necesarios para reducir el efecto de la variabilidad intraindividual [5]. A partir de los tiempos de contacto y de vuelo registrados se obtuvo la variable “duty factor”, que es el cociente entre el tiempo de contacto y el tiempo total de zancada [29].

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 un lipómetro Harpenden (John Bull, British Indicators LTD, Inglaterra). También se obtuvieron los perímetros máximos del muslo y de la pierna y mínimo de tobillo con una cinta métrica inextensible Holtain (British Indicators LTD, Inglaterra), de 2 m de longitud y 1 mm de precisión. La altura trocánterea y la longitud de la pierna (desde la cabeza del peroné hasta el suelo) fueron tomadas mediante un antropómetro Holtain (British Indicators LTD, Inglaterra). Todas las medidas antropométricas se realizaron siguiendo las consideraciones del Grupo Español de Cinenantropometría [1, 10], y son similares a las registradas en estudios previos sobre corredores de fondo [25].

Batería de saltos verticales: Para la medición de la fuerza explosiva del tren inferior y del leg stiffness (rigidez muscular de las piernas) se realizaron 3 modalidades de salto. Salto con brazos

libres (ABK), salto con manos en la cintura y contramovimiento (CMJ) y 15 s de saltos repetidos de gemelo (RJ15). Para el registro se utilizó la plataforma láser SportJump System Pro® y el software SportJump-v2.0 [12]. Los sujetos realizaron unos saltos de familiarización antes de comenzar. Los saltos ABK y CMJ fueron ejecutados como se explica en el estudio de Villa y García-López [43]. El RJ15 se realizó con las rodillas lo más estiradas posible, intentando tener el menor tiempo de contacto y la máxima altura posible [14], permitiendo el uso de los brazos para una mejor coordinación y ejecución del movimiento por parte de los participantes. Los saltos ABK y CMJ se realizaron 3 veces, con un descanso mínimo de 30 s entre cada salto, tomando como valor representativo la altura media de los saltos. El RJ15 sólo se realizó una vez, para evitar la influencia de la fatiga, tomando como valor representativo la altura media de todos los saltos y el leg stiffness obtenido a partir de los tiempos de contacto y de vuelo [7].

Prueba de economía de carrera (test estable): La prueba de EC consistió en correr 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 [25]. Como valor de EC se tomaron dos medidas, el clásico valor de coste energético de la carrera en ml·kg⁻¹·km⁻¹ [25] y el coeficiente recientemente propuesto por Storen et al. [41], que establece una relación o ratio entre la máxima energía disponible y la energía gastada para desplazar la masa corporal (VO_{2max}·EC⁻¹ 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 indicado con anterioridad. Para comparar sujetos de diferente estatura, la amplitud de zancada se normalizó, dividiéndola por la altura trocánterea.

Prueba de consumo máximo de oxígeno (test incremental): 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. El intercambio de gases fue registrado continuamente y fue aceptado como VO_{2max} el valor de VO₂ más alto obtenido durante 30 s del test [38]. El umbral anaeróbico fue determinado combinando los métodos de punto de ruptura del equivalente ventilatorio del CO₂, y presiones end-tidales de CO₂ y VO₂ [38]. Además, en los últimos 20 s de cada velocidad (aproximadamente a partir de

9 km·h⁻¹, cuando empezaba a haber una fase de vuelo en la carrera), se registraron los parámetros espacio-temporales de la carrera. A partir de estos parámetros se determinó un punto de inflexión o “umbral” para la relación entre los principales parámetros espacio-temporales (frecuencia, amplitud, tiempo de contacto y “duty factor”) y la velocidad de carrera. Este umbral fue calculado de manera matemática, manual y mediante la combinación de ambas, tal y como describen estudios previos [13]. El umbral matemático fue determinado atendiendo a la metodología de Tokmakidis y Lèger [42], calculando una función polinómica de segundo grado con los valores de las variables

en cada escalón y la velocidad de desplazamiento, trazando dos rectas tangentes a la función que pasaban por los puntos máximos y mínimos de las variables del test. A su vez, el umbral manual se determinó trazando dos rectas de manera que cada una de ellas pasara por el mayor número de puntos posible. En ambas metodologías, las dos rectas se cortaban en un punto cuya coordenada en ordenadas era la variable analizada en el umbral y la coordenada en abscisas era la velocidad en el umbral [13]. La combinación de ambas metodologías era la media aritmética de la velocidad a la que se obtenía el umbral matemático y manual.

		Media	DS	Min	Max
Valoración antropométrica	IMC	23.9	1.7	21.2	26.2
	Sumatorio de 6 pliegues (mm)	74.4	14.76	45.8	102
	Perímetro pierna (cm)	36.8	2.1	33.0	39.8
	Perímetro muslo (cm)	50.4	2.2	45.2	53.5
Batería Saltos Verticales	CMJ (cm)	35.7	6.2	28.9	46.6
	ABK (cm)	41.0	6.3	33.1	53.5
	RJ15 (cm)	27.1	5.5	21.0	35.0
	RJ15 (kJ·m ⁻¹)	20.0	2.6	15.7	23.9
Prueba de economía de carrera	EC (ml·kg ⁻¹ ·km ⁻¹)	220.8	13.5	200.8	246.3
	VO _{2max} /EC (min·m ⁻¹)	250.6	24.2	192.6	281.8
	Amplitud normalizada – 11 km·h ⁻¹	1.25	0.07	1.09	1.34
	Amplitud normalizada – 13 km·h ⁻¹	1.41	0.07	1.24	1.48
	Amplitud normalizada – 15 km·h ⁻¹	1.55	0.09	1.38	1.68
Prueba de esfuerzo	VO _{2max} (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	55.2	5.1	43.8	65.0
	Velocidad – VO _{2max} (km·h ⁻¹)	16.7	1.4	13.9	18.1
	VO ₂ – VT2 (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	46.0	5.3	38.2	55.1
	FC máxima (ppm)	186	4	178	194
	Velocidad – VT2 (km·h ⁻¹)	13.3	1.3	11.0	14.7
	Frecuencia zancada – VT2 (Hz)	2.76	0.17	2.39	2.96

Nota: IMC= índice de masa corporal; CMJ= countermovement jump; ABK= abalakov jump; RJ15= repeat jump durante 15 s; VO_{2max} = consumo máximo de oxígeno; EC= economía de carrera; VO_{2max}·EC⁻¹= Cociente entre VO_{2max} y EC; VT2 = umbral anaeróbico ventilatorio; VO₂ = consumo de oxígeno; FC= frecuencia cardíaca; Amplitud normalizada= amplitud de zancada relativa a la altura trocánterea.

Tabla 1. Tabla descriptiva de los parámetros obtenidos de los datos y pruebas generales.

Análisis gráfico y estadístico

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 vs 17 (Chicago, Illinois, USA). Los datos se presentan como valores medios y desviaciones estándar de la media (Media \pm DS), valor mínimo y máximo. El test de Pearson fue utilizado para el cálculo de las correlaciones entre variables. Se utilizó un análisis de la varianza (ANOVA) para medidas repetidas para valorar las diferencias entre los distintos métodos de estimación del umbral anaeróbico, utilizando la prueba post-hoc de Newman-Keuls. Los niveles de significación estadística utilizados fueron * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$ y *** = $p < 0.001$.

Resultados

La Tabla 1 muestra los valores medios, desviación estándar, mínimos y máximos de las varia-

bles obtenidas en las diferentes pruebas realizadas por los corredores de este estudio.

En la Tabla 2 se presentan las relaciones entre el rendimiento en la media maratón, la EC y las variables fisiológicas y biomecánicas estudiadas. Se observa una relación negativa entre el índice de masa corporal y el porcentaje de grasa corporal con el rendimiento y la EC. El test de saltos repetidos con las piernas estiradas fue el único protocolo de fuerza explosiva que se relacionó tanto con el rendimiento en media maratón como con la EC. La EC, el umbral anaeróbico y el consumo máximo de oxígeno están interrelacionados entre sí, y presentan correlaciones muy significativas con el rendimiento. Una mayor frecuencia de zancada en el umbral anaeróbico se relacionó de forma positiva tanto con el rendimiento como con la EC (Figura 1), y de forma contraria, una mayor amplitud de zancada normalizada se relacionó de forma negativa con el rendimiento (Tabla 2).

Analizando los resultados del test incremental, en términos generales no se encontraron diferen-

	Rendimiento en media maratón (segundos)	Economía de carrera ($VO_{2max} \cdot EC^{-1}$)
IMC ($kg \cdot m^{-2}$)	0.58 ($p=0.08$)	-0.64 *
Sumatorio 6 pliegues (mm)	0.61 ($p=0.06$)	-0.64 *
RJ15 (cm)	-0.79 **	0.67 *
Economía de carrera ($VO_{2max} \cdot EC^{-1}$)	-0.87 ***	-
Amplitud normalizada – 11 $km \cdot h^{-1}$	0.78 **	-
Amplitud normalizada – 13 $km \cdot h^{-1}$	0.85 **	-
Amplitud normalizada – 15 $km \cdot h^{-1}$	0.68 *	-
Frecuencia zancada – VT2 (Hz)	-0.78 **	0.74 *
VO_{2max} ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)	-0.61 ($p=0.06$)	0.79 **
Velocidad – VO_{2max} ($km \cdot h^{-1}$)	-0.91 ***	0.80** ($p=0,05$)
VO_2 – VT2 ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)	-0.57 ($p=0.08$)	0.71 *
Velocidad – VT2 ($km \cdot h^{-1}$)	-0.86 ***	0.82 **

Nota: IMC= índice de masa corporal; RJ15= repeat jump durante 15 s; $VO_{2max} \cdot EC^{-1}$ = consumo máximo de oxígeno ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) relativo a la EC ($ml \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$); Amplitud normalizada= amplitud de zancada relativa a la altura trocánterea; VT2= umbral anaeróbico ventilatorio; VO_{2max} = consumo máximo de oxígeno; VO_2 = consumo de oxígeno. * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$.

Tabla 2. Correlaciones y niveles de significación estadística entre el rendimiento en la prueba de media maratón y la economía de carrera, en relación con las variables antropométricas, fisiológicas y biomecánicas del presente estudio.

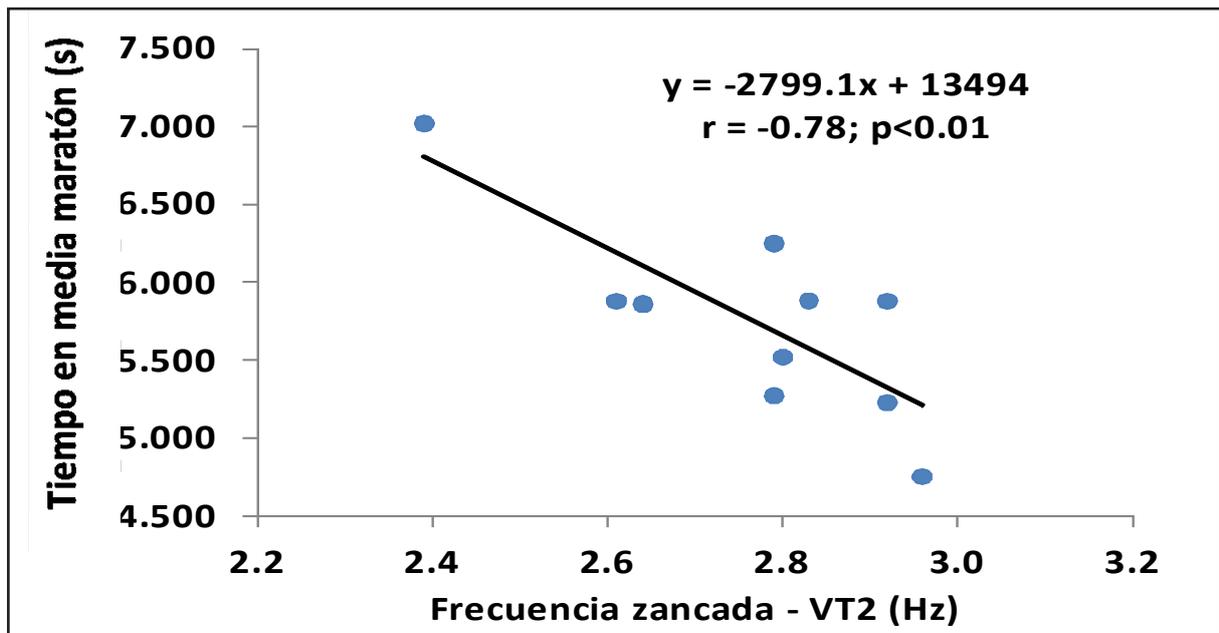


Figura 1. Correlación entre el rendimiento (tiempo en media maratón) y la frecuencia de zancada en el umbral anaeróbico ventilatorio (VT2).

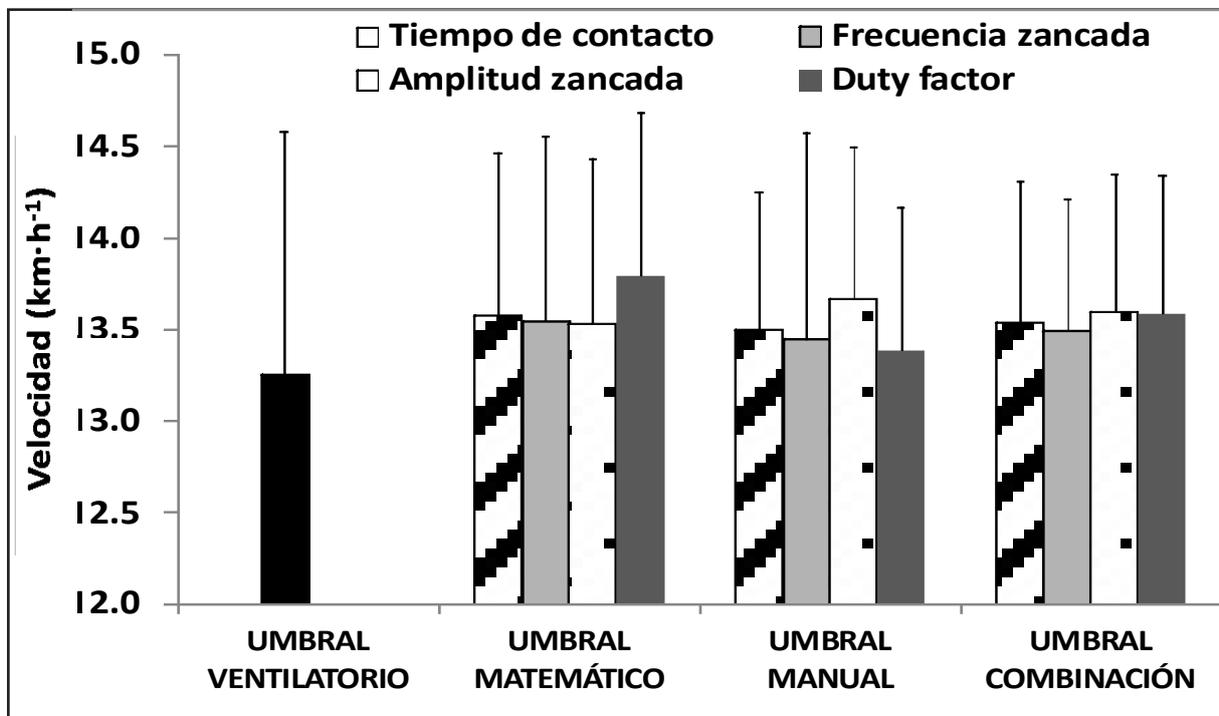


Figura 2. Velocidad a la que se obtuvo el umbral anaeróbico atendiendo a parámetros fisiológicos (umbral ventilatorio) y biomecánicos (tiempo de contacto, frecuencia y amplitud de zancada, “duty factor”), estos últimos obtenidos de manera automática (umbral matemático), manual (umbral manual) y combinación de ambas (umbral combinación).

cias significativas entre el umbral anaeróbico ventilatorio y los umbrales obtenidos a partir de los parámetros biomecánicos (Figura 2).

Las relaciones entre los diferentes métodos (fisiológicos vs biomecánicos) utilizados para determinar el umbral anaeróbico se muestran en la Ta-

bla 3. El umbral de “duty factor” fue el que más se relacionó con el umbral ventilatorio, seguido por el umbral de amplitud, de tiempo de contacto y de frecuencia de zancada. La combinación de las metodologías matemática y manual mostró mayores correlaciones con el umbral ventilatorio que cualquiera de ellas individualmente.

	Tiempo de contacto	Frecuencia de zancada	Amplitud de zancada	Duty factor
Umbral matemático	0.74 *	0.50	0.79 *	0.81 **
Umbral manual	0.66 *	0.50	0.62 *	0.71 *
Umbral combinación	0.75 *	0.75 *	0.82 **	0.84 **

Nota: Nivel de significación de las correlaciones. *= p<0.05; **= p<0.01.

Tabla 3. Relaciones entre el umbral anaeróbico ventilatorio y los umbrales determinados a partir de parámetros biomecánicos (tiempo de contacto, frecuencia y amplitud de zancada, y “duty factor”), de manera matemática (umbral matemático), manual (umbral manual) y combinando ambas metodologías (umbral combinación).

Discusión

Los principales hallazgos del presente estudio han sido: 1- Encontrar relaciones entre los parámetros biomecánicos espacio-temporales básicos de la carrera (frecuencia y amplitud de zancada), la EC y el rendimiento. 2- Comprobar que la aparición del umbral anaeróbico determinado por métodos fisiológicos (umbral ventilatorio) se encuentra relacionada con cambios en la biomecánica de la carrera (fundamentalmente del “duty factor” y la amplitud de zancada).

Nosotros hemos observado que los corredores con mejores marcas en la media maratón y/o mejor EC mostraron una frecuencia de zancada mayor en el umbral anaeróbico (Figura 1). Y de forma contraria, la amplitud de zancada normalizada a cualquier velocidad (11, 13 y 15 km·h⁻¹) se ha relacionado de forma negativa con rendimiento (Tabla 2). Esto discrepa con los resultados obtenidos por algunos de los estudios previos, los cuales no han encontrado relaciones entre ambas variables y la EC [23, 41]. Una posible justificación es que los corredores de nuestro estudio son aficionados, mientras que en los estudios mencionados son atletas bien entrenados de media y larga distancia. Por lo tanto, la relación de los parámetros biomecánicos, la EC y el rendimiento puede depender del nivel de práctica. Lo que se observa claramente al comparar nuestros resultados con los estudios

mencionados es que sus valores de frecuencia de zancada son bastante mayores. Kyrolainen et al. [23] obtuvieron 2.79 Hz a 11.7 km·h⁻¹, más que los 2.76 Hz obtenidos en nuestro estudio a 13.3 km·h⁻¹ (Tabla 1, frecuencia y velocidad en VT2), mientras que Storen et al. [41] obtuvieron 2.97 Hz al 70% del VO_{2max} (15 km·h⁻¹), y nosotros hemos obtenido 2.76 Hz aproximadamente al 80% del VO_{2max} (Tabla 1, 13.3±1.3 de 16.7±1.4 km·h⁻¹). Sin embargo, nuestros resultados estarían en consonancia con los obtenidos por Morgan et al. [32], quienes afirman que los corredores de menor nivel tienden a abusar de amplitud de zancada. No obstante, este trabajo sólo tuvo en cuenta un grupo de corredores aficionados, similar a lo que se ha realizado en el presente estudio, por lo que futuros trabajos deben confirmar experimentalmente si los corredores bien entrenados utilizan mayores frecuencias de zancada que los corredores aficionados.

Es necesario destacar que todos los corredores de nuestro estudio mostraron valores de frecuencia de zancada en el umbral anaeróbico por debajo de los 3 Hz, e incluso alguno de ellos más cerca de 2 Hz que de 3 Hz (Figura 1). Esto sería contrario a las teorías actuales, que explican que los ritmos naturales del cuerpo (actividad cerebral, frecuencia cardíaca...) tienden a trabajar más cerca de una frecuencia de 3 Hz que de 2 Hz [40]. Complementariamente, desde un punto de vista biomecánico, recientes trabajos han demostrado que un aumento

de la frecuencia de zancada del 10% en corredores aficionados (en la presente muestra supondría pasar de 2.76 a 3.04 Hz) reduce significativamente el estrés de las articulaciones de la rodilla y la cadera, con importantes implicaciones para la prevención de lesiones en corredores [17]. A corto plazo, modificaciones del 8-10% en la frecuencia de zancada no alterarían el coste energético [17, 19]. A largo plazo, Morgan et al. [32] demostraron una mejora en la EC en un grupo de corredores aficionados tras un programa de entrenamiento (15 días) basado en reducir la amplitud de zancada (por lo tanto, aumentando la frecuencia de zancada), y en la línea de estos resultados, Quinn et al. [36] también observaron mejoras en la EC tras un programa de entrenamiento de 12 días en mujeres atletas (entrenamiento a una frecuencia de zancada 3 Hz). Sin embargo, no encontramos estudios posteriores al de Morgan et al. [32] que repliquen sus resultados, de la misma forma que el trabajo de Quinn et al. [36] no ha sido publicado de forma extensa (se trata de un abstract). Esto pensamos que pone de manifiesto la dificultad de investigar sobre los efectos de la manipulación de la frecuencia y la amplitud de zancada en la economía y rendimiento de la carrera, por lo cual futuros trabajos deben abordar esta problemática.

Tokmakidis y Léger [42] realizaron el único estudio que ha intentado relacionar la aparición del umbral anaeróbico con cambios en los parámetros biomecánicos de la carrera, no encontran-

do resultados concluyentes. A diferencia de estos autores, nosotros encontramos relaciones significativas entre la aparición del umbral anaeróbico ventilatorio y la aparición de un umbral atendiendo a parámetros espacio-temporales de la carrera (“duty factor”, amplitud de zancada, de tiempo de contacto y frecuencia de zancada). Es posible que esta discrepancia se deba a ciertas limitaciones metodológicas (baja precisión de los instrumentos de medida, escaso número de pasos analizados...) en el estudio de Tokmakidis y Léger [42], que han podido ser solucionadas con el paso del tiempo (presente estudio). Las mencionadas relaciones se han obtenido tanto cuando los umbrales de las variables biomecánicas eran determinados de forma matemática, manual o combinada (Tabla 3), pero ha sido la combinación entre ambas metodologías (matemática y manual) la que mayores correlaciones ha mostrado con el umbral anaeróbico ventilatorio. Esto coincide con estudios previos basados en la determinación del umbral anaeróbico a partir de la frecuencia cardíaca [13], que abogan por la combinación de ambas metodologías para una determinación más precisa de los umbrales.

La posibilidad de medir tiempos de contacto y de vuelo de forma simultánea nos ha permitido analizar el “duty factor”, que de todos los parámetros biomecánicos es el que mayor correlación ha mostrado con el umbral anaeróbico ventilatorio (Tabla 2). El “duty factor” es el cociente entre el tiempo de contacto y el tiempo total de zancada

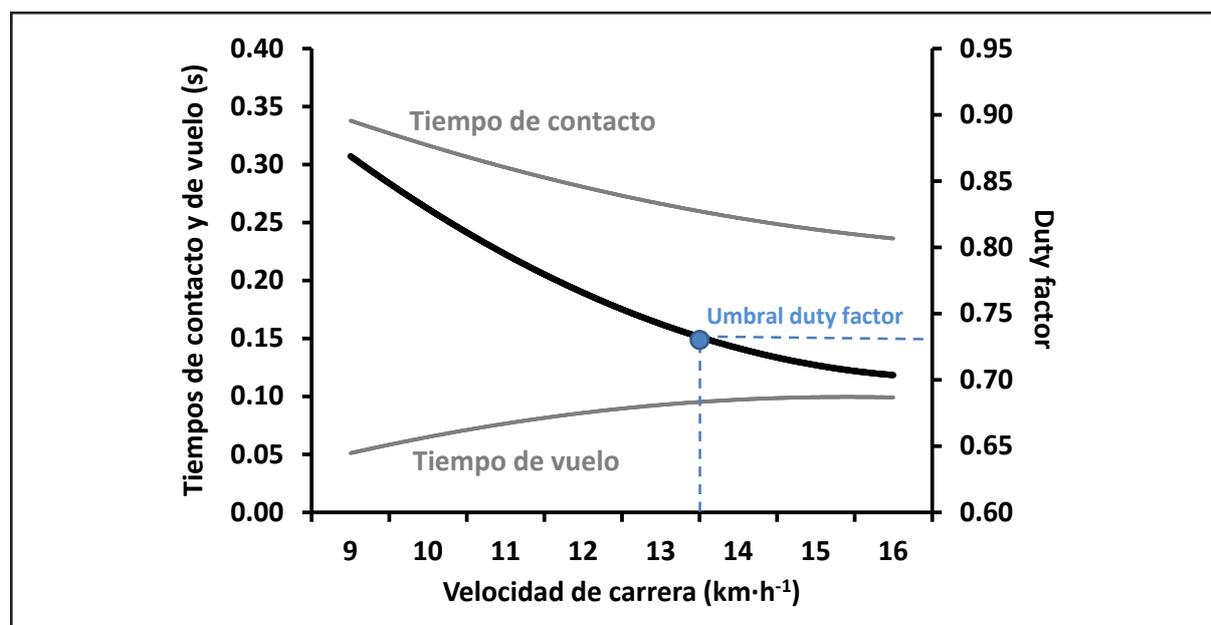


Figura 3. Evolución del tiempo de contacto, tiempo de vuelo y “duty factor” a medida que aumenta la velocidad de carrera en la muestra seleccionada (n= 10 corredores aficionados). Umbral de “duty factor” medio de la muestra seleccionada ($13.6 \pm 0.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$).

[29], y en el presente estudio observamos que va disminuyendo a medida que la velocidad de carrera aumenta, llegando un punto (coincidente con el umbral anaeróbico ventilatorio) en el que esa disminución es mucho menos pronunciada (Figura 3). Esto es producto de un aplanamiento en la disminución del tiempo de contacto y en el aumento del tiempo de vuelo, que ya ha sido descrito por estudios previos que abordaron los límites biológicos de la velocidad de carrera [44]. En la Figura 3 observamos que el comportamiento del “duty factor” (“duty factor” – velocidad) tiene un perfil muy similar al descrito para la fuerza-velocidad durante la contracción muscular, como factor limitante del rendimiento humano durante la carrera [28]. Sin embargo, estos dos trabajos [28, 44] han sido realizados para intentar justificar los límites de la velocidad humana (carrera de velocidad), no centrándose en la carrera de fondo y medio fondo. Además, ninguno de los escasos trabajos que han analizado el “duty factor” [21, 29, 30] describe su evolución a medida que la velocidad de carrera aumenta. Por lo tanto, futuros estudios deben ahondar en los mecanismos que justifican este comportamiento.

Los corredores analizados en este estudio obtuvieron valores más bajos de VO_{2max} (Tabla 1) que los referidos para corredores españoles de mayor nivel [25, 37], quienes presentaron valores entre 71-78 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$. Los menores volúmenes de entrenamiento y dedicación de este grupo de corredores aficionados, hacen que tanto el índice de masa corporal (23.9 ± 1.7 vs 20.5 ± 1.7 $kg \cdot m^{-2}$, respectivamente) como el sumatorio de los mismos 6 pliegues cutáneos (74.4 ± 14.76 vs 33.2 ± 3.7 mm, respectivamente) sean mucho mayores que los referidos por Lucía et al. [25]. A su vez, se han observado diferencias en el perímetro de la pierna (36.8 ± 2.1 vs 33.9 ± 2.0 cm), pero no en el perímetro del muslo, en la línea de los resultados encontrados por este mismo autor. Por su parte, los valores de EC expresados en $ml \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$ del presente estudio son tan solo un 4% peores que los de Lucía et al. [25] para corredores españoles de buen nivel (220.8 ± 14.3 vs 213 ± 8.5 $ml \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$, respectivamente). Sin embargo, al expresar la EC como $VO_{2max} \cdot EC^{-1}$, los valores del presente estudio son un 26% peores que los obtenidos por Storen et al. [41] para atletas de media distancia (250.6 ± 24.2 vs 339.6 ± 35.2 $min \cdot m^{-1}$, respectivamente). Estos resultados están en consonancia con los de Storen et al. [41], que no obtuvieron correlación entre la EC y el tiempo en 3000 m, pero sí cuando se correlacionó con el coeficien-

te $VO_{2max} \cdot EC^{-1}$, pudiendo explicar así el 86% del rendimiento obtenido en los 3000 m. Esto viene a indicar que expresar la EC como relación entre la máxima energía disponible (VO_{2max}) y la energía gastada (EC) podría ser un coeficiente más sensible y discriminativo del rendimiento que sólo esta última variable, sobre todo cuando los valores de VO_{2max} no son similares. No debemos olvidar que el coeficiente $VO_{2max} \cdot EC^{-1}$ integra dos de los tres factores (VO_{2max} , umbral anaeróbico y economía de carrera) que determinan el rendimiento en las carreras de fondo y medio fondo [3].

En el presente estudio se han observado una serie de relaciones descritas anteriormente por la literatura científica (Tabla 2). Así, encontramos una clara interrelación del rendimiento con la EC, el umbral anaeróbico y el consumo máximo de oxígeno [3, 41, 46], y entre el índice de masa corporal y/o el porcentaje de grasa corporal con el rendimiento y la EC [41]. La altura media de los saltos repetidos de gemelo (RJ15) fue la única variable relacionada tanto con el rendimiento en media maratón como con la EC (Tabla 2). Esto puede ser debido tanto a la gran implicación del tobillo durante la carrera [4, 44] como al papel de esta articulación en el leg stiffness, beneficioso para la EC y el rendimiento [2, 9]. Sin embargo, en el presente estudio no se obtuvieron relaciones entre estas dos variables y el leg stiffness, posiblemente por utilizar la ecuación propuesta por Dalleau et al. [7] sin controlar estrictamente el ritmo de ejecución de los saltos ni fijar los brazos a la cintura, en un intento de que los saltos fueran ejecutados de forma natural por un grupo de deportistas no habituados a saltar verticalmente.

Conclusión

Las principales aportaciones del presente estudio han sido: 1- Encontrar relaciones entre dos parámetros biomecánicos espacio-temporales básicos de la carrera (frecuencia y amplitud de zancada), el rendimiento y la economía de carrera. A partir de estas relaciones y de los últimos hallazgos sobre el papel de la frecuencia de zancada en la biomecánica de la carrera, futuros estudios deberían intentar manipular esta variable, fundamentalmente en corredores con frecuencias de zancada en el umbral anaeróbico lejanas a los 3 Hz. 2-Demostrar que la aparición del umbral anaeróbico determinado por métodos fisiológicos (umbral ventilatorio) se encuentra relacionada con cambios en la biomecánica de la carrera (fundamentalmente el “duty factor” y la amplitud de zan-

cada). Estos cambios parecen ser muy similares a los descritos para la relación fuerza-velocidad durante la contracción muscular, aunque futuros estudios deberían profundizar en los mecanismos que los provocan. 3-Las relaciones encontradas entre las variables VO_{2max} , umbral anaeróbico y economía de carrera, así como de éstas con otras variables antropométricas y de fuerza explosiva de la extremidad inferior están en consonancia con las mencionadas en estudios previos. Futuros trabajos deberían aplicarse en corredores de mayor nivel, con el objetivo de aceptar/rechazar parte de los resultados y conclusiones comentadas.

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 (2011). 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 (2010-2013). 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. **Arampatzis A, De Monte G, Karamanidis K, Morey-Klasping G, Stafilidis S, Brüggemann GP.** Influence of the muscle-tendon unit's mechanical and morphological properties on running economy. J Exp Biol 2006;209: 3345-3357.
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, Kyrolainen H, Komi PV.** Moment and power of lower limb joints in running. Int J Sports Med 2002;23:136-141.
5. **Belli A, Lacour JR, Komi PV, Candau R, Denis**

- C.** Mechanical step variability during treadmill running. Eur J Appl Physiol 1995;70:510-517.
6. **Caird SJ, McKenzie AD, Sleivert GG.** Biofeedback and relaxation techniques improve running economy in sub-elite long distance runners. Med Sci Sports Exerc 1999;31:717-722.
7. **Dalleau G, Belli A, Viale F, Lacour JR, Bourdin M.** A simple method for field measurements of leg-stiffness in hopping. Int J Sports Med 2004;25:170-176.
8. **Divert C, Mornieux G, Freychat P, Baly L, Mayer F, Belli A.** Barefoot-shod running differences: shoe or mass effect? Int J Sports Med 2007;29:512-518.
9. **Dumke CL, Pfaffenroth CM, McBride JM, McCauley GO.** Relationship between muscle strength, power and stiffness and running economy in trained male runners. Int J Sports Physiol Perform 2010;5:249-261.
10. **Esparza F.** Manual de cineantropometría. Pamplona: Editorial FEMEDE, 1993.
11. **García-López J.** Manifestación de las fuerzas aerodinámicas en diferentes deportes: ciclismo y atletismo. In Izquierdo M, editor. Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte. Madrid: Editorial Médica Panamericana, 2008. p. 415-445.
12. **García-López J, Rodríguez-Marroyo JA, Pernía R, Ávila MC, Villa J.** El tipo de plataforma de contacto influye en el registro de la altura de salto vertical estimada a partir del tiempo de vuelo. Motricidad. European Journal of Human Movement 2008;21:1-15.
13. **García-López J, Villa JG, Rodríguez-Marroyo JA, Morate JC.** Aplicación de un test de esfuerzo interválico (Test de Probst) para valorar la cualidad física aeróbica en futbolistas de la liga española. Apunts: Educación física y deportes 2003;71:80-88.
14. **Girard O, Lattier G, Micallef JP, Millet GP.** Changes in exercise characteristics, maximal voluntary contraction, and explosive strength during prolonged tennis playing. Br J Sports Med 2006;40:521-526.
15. **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.
16. **Hauswirth C, Bigard AX, Guezennec CY.** Relationship between running mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. Int J Sports Med 1997;18:330-339.
17. **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.
18. **Hue O, Le Gallais D, Chollet D, Boussana A, Préfaut C.** The influence of prior cycling on biomechanical and cardiorespiratory response profi-

- les during running in triathletes. *Eur J Appl Physiol* 1998;77:98-105.
19. **Hunter I, Smith GA.** Preferred and optimal stride frequency, stiffness and economy: changes with fatigue during a 1-h high-intensity run. *Eur J Appl Physiol* 2007;100:653-661.
 20. **Jones AM, Doust JH.** A 1% treadmill grade most accurately reflects the energetic cost of outdoor running. *J Sports Sci* 1996;14:321-327.
 21. **Karamanidis K, Arampatzis A, Brüggeman GP.** Adaptational phenomena and mechanical responses during running: effect of surface, aging and task experience. *Eur J Appl Physiol* 2006;98:284-298.
 22. **Knapik JJ, Staab JS, Harman EA.** Validity of an anthropometric estimate of thigh muscle cross-sectional area. *Med Sci Sports Exerc* 1996;28:1523-1530.
 23. **Kyrolainen H, Belli A, Komi PV.** Biomechanical factors affecting running economy. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:1330-1337.
 24. **López Chicharro J, Fernández Vaquero, A.** *Fisiología del ejercicio.* Madrid: Editorial Médica Panamericana, 1995.
 25. **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.
 26. **McCann DJ, Higginson BK.** Training to maximize economy of motion in running gait. *Curr Sports Med Rep* 2008;7:158-162.
 27. **Midgley AW, McNaughton LR, Jones AM.** Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance. *Sports Med* 2007;37:857-880.
 28. **Miller RH, Umberger BR, Caldwell GE.** Limitations to maximum sprinting speed imposed by muscle mechanical properties. *J Biomech* 2011;27:Doi:10.1016/j.jbiomech.2011.04.040.
 29. **Millet GY, Divert C, Banizette M, Morin JB.** Changes in running pattern due to fatigue and cognitive load in orienteering. *J Sports Sci* 2010;28:153-160.
 30. **Millet GY, Morin JB, Degache F, Edouard P, Feasson L, Verney J, Oullion R.** Running from Paris to Beijing: biomechanical and physiological consequences. *Eur J Appl Physiol* 2009;107:731-738.
 31. **Morgan DW, Craib M.** Physiological aspects of running economy. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:456-461.
 32. **Morgan DW, Martin P, Craib M, Caruso C, Clifton R, Hopewell R.** Effect of step length optimization in the aerobic demand of running. *J Appl Physiol* 1994;77:245-251.
 33. **Nummela A, Keranen T, Mikkelsen LO.** Factors related to top running speed and economy. *Int J Sports Med* 2007;28:655-661.
 34. **Ogueta-Alday A, Morante JC, Lazo R, Rodriguez-Marroyo JA, Villa JG, García-López J.** The validation of a new method that measures contact and flight time during treadmill running. In Cejuela R, Migliorini S, editors. *Proceedings of I World Conference of Science and Triathlon,* Alicante, 2011.
 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. **Quinn TJ, Dempsey SL, Houriham SE, LaRoche DP, Mackenzie AM.** The effect of increasing step frequency on running economy in female runners. *Med Sci Sports Exerc* 2011;43:S73.
 37. **Rabadan M, Díaz V, Calderón FJ, Benito PJ, Peinado AB, Maffuli N.** Physiological determinants of speciality of elite middle- and long-distance runners. *J Sports Sci* 2011;29:975-982.
 38. **Rodríguez-Marroyo JA, López-Saute J, Pernía R, Carballo B, García López J, Foster C, Villa JG.** Physiological work demands of Spanish wildland firefighters during wildfire suppression. *Int Arch Occup Environ Health* 2011;106:87-94.
 39. **Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley, JA.** Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med* 2004;34:465-485.
 40. **Schneider S, Askew CD, Abel T, Strüder HK.** Exercise, music and the brain: Is there a central pattern generator? *J Sports Sci* 2010;28:1337-1343.
 41. **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.
 42. **Tokmakidis SP, Léger LA.** Noninvasive use of heart rate or stride pattern as compared to the use of blood lactate for the determination of anaerobic threshold. In Tsarouchas L, Terauds J, Gowitzke BA, Holth LE, editors. *Biomechanics in Sports V (Proceedings 5th Int. Symp. Biomech),* Athens, 1997. p. 434-449.
 43. **Villa JG, García-López J.** Tests de salto vertical (I): Aspectos funcionales. *RendimientoDeportivo.com* 2003, 6.
 44. **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.
 45. **Weyand PG, Sternlight DB, Bellizzi M, Wright S.** Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *J Appl Physiol* 2000;89:1991-1999.
 46. **Williams KR, Cavanagh PR.** Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *J Appl Physiol* 1987;63:1236-1245.