



apunts

MEDICINA DE L'ESPORT

www.apunts.org



ORIGINAL

Efectos agudos de la carrera de atletas descalzos y sus requisitos en la cinemática de las extremidades inferiores en corredores resistentes habitualmente calzados

Marcos Muñoz-Jiménez^{a,*}, Felipe García-Pinillos^a, Víctor M. Soto-Hermoso^b, Pedro A. Latorre-Román^a

^aDepartamento de Didáctica de la Expresión Corporal, Universidad de Jaén, Jaén, España

^bDepartamento de Ciencias del Deporte, Universidad de Granada, Granada, España

Recibido el 18 de abril de 2016; aceptado el 11 de julio de 2016

PALABRAS CLAVE

Corredores de larga distancia;
Ángulos de articulación de las extremidades inferiores;
Velocidad de carrera;
Parámetros espaciotemporales;
Descalzo

Resumen

El objetivo de este estudio fue analizar las variables cinemáticas en la carrera de atletas descalzos y utilizando zapatillas convencionales específicas para carrera, a nivel de velocidad confortable y exigente. Los participantes fueron 60 corredores recreativos sanos (edad $35,6 \pm 11,7$ años, índice de masa corporal $22,9 \pm 2,4$ kg/m²), quienes realizaron las pruebas descalzos sobre una cinta a velocidades confortable y exigente, seleccionadas por ellos mismos. Se utilizaron técnicas fotogramétricas (2D). En la carrera descalza, el tiempo de contacto fue menor ($p < 0,001$) a velocidad exigente, el tiempo de vuelo fue más corto a velocidad confortable ($p < 0,05$) y exigente ($p < 0,05$), y la frecuencia de la zancada fue superior en ambas velocidades ($p < 0,001$). Además, en la carrera descalza los corredores aterrizaron con una flexión de rodillas considerablemente superior ($p < 0,005$), menor dorsiflexión de tobillos ($p < 0,001$) y menor flexión de rodillas en el despegue, a velocidad exigente ($p = 0,002$) en la carrera con zapatillas. En conclusión, el presente estudio ha aportado una evidencia que sugiere que se producen cambios agudos en las variables temporales y cinemáticas en la carrera con/sin zapatillas a baja y alta velocidad, en los corredores que las utilizan normalmente. Se hallaron diferencias significativas en cuanto a sucesos espaciotemporales en carrera descalza, con una mayor flexión de rodillas y dorsiflexión de tobillos. Al aumentar la velocidad al correr descalzos, la duración de las variables de tiempo disminuyó considerablemente tanto en velocidad confortable como en exigente ($p < 0,001$). Debido a ello, el ciclo de zancada y de marcha fue considerablemente más rápido y, por tanto, se produjo una mayor frecuencia de zancada.

© 2016 FC Barcelona. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

* Autor para correspondencia

Correo electrónico: mmj00006@red.ujaen.es (M. Muñoz Jiménez).

KEYWORDS

Long-distance runners;
Lower-limb joint
angles;
Running speed;
Spatial-temporal
parameters;
Unshod

Acute effects of barefoot running and running requirement on lower-limb kinematics in habitually shod endurance runners

Abstract

The aim of this study was to analyse kinematic variables when running barefoot and when wearing conventional running shoes at comfortable and demanding running speeds. Sixty healthy recreational male runners (age = 35.6 ± 11.7 years old, body mass index = 22.9 ± 2.4 kg/m²) performed trials in shod/barefoot running conditions on a treadmill at self-selected comfortable and demanding speeds. Photogrammetric techniques (2D) were employed. In barefoot conditions, contact time was shorter ($P < .001$) at demanding speed, flight time was shorter at comfortable ($P < .05$) and demanding ($P < .05$) speeds, and there was greater stride frequency at both speeds ($P < .001$). In addition, in barefoot conditions, runners landed with significantly greater knee flexion ($P < .05$); lower ankle dorsiflexion ($P < .001$); and lower knee flexion in take-off at demanding speed ($P = .002$) compared with shod conditions. In conclusion, the current study has provided evidence to suggest that acute changes occur in the temporal variables and kinematics between shod/barefoot conditions at low and high speeds in habitually shod runners. Significant differences were found in spatial-temporal events between shod/barefoot conditions, with shorter times in barefoot conditions with greater knee flexion and ankle dorsiflexion. When speed was increased in barefoot conditions, duration of timing variables decreased significantly both comfortable and demanding speed ($P < .001$). Because of this, stride and gait cycle was significantly faster and thus there was a higher stride frequency.

© 2016 FC Barcelona. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Introducción

La carrera descalza se ha vuelto muy popular en los últimos años y sigue siendo un tema muy debatido por corredores, entrenadores e investigadores. El efecto del impacto del pie descalzo y su relación con el calzado en la economía, índice de rendimiento y lesiones en los corredores de resistencia ha sido discutido en la literatura¹⁻³. Se ha sugerido que el modelo de zapatilla de deporte podría ser un factor de riesgo clave que podría conducir a la lesión⁴. Posibles causas de lesión pueden incluir la fuerza de impacto abrupta^{5,6}, propiocepción limitada⁷ y excesiva pronación del pie durante el impacto del talón^{8,9}. Algunos autores sugieren que la carrera descalza habitual puede prevenir lesiones relacionadas con el impacto⁶⁻¹⁰.

Varios estudios se han centrado en el patrón de pisada y en cómo la velocidad de carrera y el rendimiento pueden cambiar la forma en que los atletas impactan en el suelo cuando corren^{2,11}. Larson et al.² concluyeron que entre el 87,8 y el 93,0% de corredores de maratón impactaban con el retropié, incluso entre los corredores más rápidos, siendo el apoyo del mediopié el modelo más común de impacto. Hasegawa et al.¹¹ reportaron que el porcentaje del impacto del retropié aumenta a medida que disminuye la velocidad y el impacto del mediopié se incrementa a medida que aumenta la velocidad. Por lo tanto, parece que la velocidad de la carrera está relacionada con el modelo de impacto.

Para reducir el riesgo de lesiones, el cuerpo del corredor produce cambios en la cinemática de la extremidad inferior. La reducción de la longitud de zancada es un ejemplo de una alteración en la carrera para reducir la fractura por estrés de la tibia o deformación de los huesos¹². Otros estu-

dios anteriores sobre carrera descalza^{1,3,13,14} obtuvieron datos cinemáticos como la longitud de la zancada corta o aumento de la frecuencia de zancada. Además, la carrera descalza reduce el tiempo de vuelo y produce una fuerza máxima más baja y más alta preactivación del tríceps sural, que la carrera calzada¹⁵. Squadrone y Gallozzi³ también hallaron diferencias en el tiempo de contacto entre la situación calzada y la descalza.

Bosco y Rusko¹⁶ observaron un cambio significativo en los parámetros de tiempo al usar calzado flexible en comparación con el calzado normal de carrera. Estudios previos sobre la carrera descalza^{1,3,13,14} obtuvieron los datos cinemáticos de la longitud de la zancada corta frente a la frecuencia de la zancada.

Algunos autores, como Lohman et al.¹⁷, han descrito los cambios cinemáticos que se producen en las extremidades inferiores en condición de descalzo. La relación de las variables cinemáticas también se estudió en una cinta de correr a 8,0 mph en condición descalza¹³, pero no ofrece el nivel de exigencia que supone para los participantes, ya que el nivel competitivo exigido a cada uno de los participantes era muy diferente. Otros autores, como Youngren¹⁸, han examinado las diferencias cinemáticas en la velocidad autoseleccionada de corredores calzados. Sin embargo, no se ha realizado un estudio detallado que combine todas las condiciones de las articulaciones de los estudios descritos anteriormente, con la comparación de las variables espaciotemporales en condiciones de calzado/descalzo estudiada a diferentes ritmos de velocidad confortable o exigente seleccionada por ellos mismos.

Algunos estudios sobre la carrera descalza muestran sistemáticamente un aumento de la flexión de la rodilla en el

contacto inicial con el suelo^{1,3,19} y la extensión de la rodilla comienza relativamente pronto^{20,21}. Edwards et al.¹² usaron un programa informático para indicar que el riesgo de fractura por estrés podría disminuir al disminuir la longitud de la zancada y de este modo se podría reducir el riesgo de fractura por estrés de la tibia o deformación de los huesos. Otras alteraciones, como una mayor flexión de la rodilla, podrían ser adaptaciones biomecánicas a la autoprotección y disminución de las fuerzas de impacto excesivo; el aterrizaje con una mayor flexión plantar del pie y la flexión de la rodilla podría reducir los picos de impacto vertical y los índices de carga en corredores descalzos habituales^{3,6}.

Teniendo en cuenta la información anterior, se precisan más investigaciones para determinar los cambios cinemáticos en los corredores de resistencia habitualmente calzados, y cómo las diferentes velocidades de carrera —es decir, cuando los atletas corren a una velocidad confortable (VC) o a una velocidad exigente (VE)— pueden afectar a esas variables.

Material y métodos

Sujetos

Este estudio observacional se realizó en colaboración con sesenta corredores sanos, voluntarios, habitualmente calzados, de tres clubes de atletismo de España (edad = 35,6 ± 11,7 años; altura = 168,7 ± 25,9 cm; peso = 66,3 ± 10,5 kg).

Cada participante firmó un consentimiento informado para participar en este estudio. El estudio fue realizado de acuerdo con los estándares de la Declaración de Helsinki (versión 2008) y siguió las directrices de Buena Práctica Clínica de la Comunidad Europea (111/3976/88 de julio de 1990), así como el marco legal español para la investigación clínica en seres humanos (Real Decreto 561/1993 sobre ensayos clínicos). El comité de bioética de la Universidad de Jaén (España) aprobó el consentimiento informado y el estudio.

Los criterios de inclusión fueron: a) todos los participantes eran habitualmente corredores calzados sin experiencia en correr descalzos; b) ninguno de ellos había sufrido lesión alguna o dolor significativo en los 3 meses anteriores al estudio; c) todos ellos poseían un nivel mínimo de rendimiento verificable (p.ej., todos ellos habían participado en campeonatos regionales o nacionales de atletismo), y d) habían estado entrenando durante al menos 4 años cinco o seis

veces por semana, con al menos 40 km completados cada semana. Además, los participantes fueron excluidos del estudio si tenían algún caso de órtesis de pies. En la tabla 1 se presenta más información sobre las características de los participantes y sus antecedentes de entrenamiento.

Procedimiento

Los vídeos fueron registrados desde una vista lateral utilizando dos cámaras a una velocidad de 240 Hz (Casio Exilim EXZR-10, Dover, NJ, EE. UU.). Se colocaron dos cámaras a 2 m de distancia del corredor, perpendiculares y a cada lado de la cinta de correr a nivel del suelo, sin ningún grado de inclinación. Se marcó exactamente donde se colocaron las cámaras.

En este experimento se pidió a los participantes que corrieran con sus propias zapatillas a una velocidad confortable y una velocidad exigente elegida por ellos mismos, lo cual se ha demostrado que mejora la capacidad de repetición en las variables cinemáticas²². Antes de la grabación fueron colocados marcadores en la cabeza del primer metatarsiano, el punto del trocánter medial, el punto medial de la rótula y el maléolo externo del tobillo. Luego, los sujetos tenían 8 min para el calentamiento y habituarse a la cinta de correr (Salter E-Line PT-320, Salter International, Barcelona, España) y posteriormente, aumentando progresivamente la velocidad de la cinta, alcanzaron su velocidad de paso autoseleccionada VC o VE. Se escogió un período de 8 min porque estudios previos sobre la locomoción humana han demostrado que los mayores cambios para la adaptación a un nuevo estado ocurren dentro de este período de tiempo^{15,23}. Después de 8 min de calentamiento hubo 1 min de grabación para la recogida de datos. Se analizaron cuatro zancadas de cada corredor en todas las situaciones (calzado/descalzo; VC/VE). Se indicó a los participantes que tenían que correr (sin parar) a una velocidad estable en cada situación. Una vez que los participantes habían confirmado su velocidad de carrera, el investigador registraba la velocidad de la cinta visualizada en la pantalla. Una vez registrada la carrera, la cinta se detuvo y el participante cambió a una situación de calzado o descalzo, dependiendo de lo que el corredor ya había hecho. A continuación el protocolo comenzó de nuevo, esta vez con la otra situación. El orden de las situaciones era aleatorio, de modo que a veces los atletas comenzaban con la prueba de calzados y otras veces con la prueba de descalzos, resultando el mismo número de calzado y descalzo.

Se visualizaron los datos del vídeo utilizando un editor de vídeo (VideoSpeed v. 1.38, ErgoSport, Granada, España). Se emplearon técnicas de fotogrametría (2D). Los puntos anatómicos seleccionados con los marcadores para el estudio fueron seguidos de forma manual en el programa 2D.

En base a estudios previos^{1,3} las variables contrastadas fueron: 1) flexión plantar del pie, el ángulo formado por la planta del pie (la cabeza del quinto metatarsiano y el punto de apoyo del talón) y el plano horizontal; 2) flexión de la rodilla (el ángulo formado por el punto medial del trocánter, el punto medial de la rótula y el maléolo externo del tobillo) en el primer contacto del pie con el suelo en la fase de aterrizaje y en el último contacto del pie con el suelo en la fase de despegue (fig. 1); 3) tiempo total de contacto

Tabla 1. Características demográficas e historial de entrenamiento de los participantes

	Media (DE); n = 60
Edad (años)	35,64 ± 11,67
Altura	168,7 ± 25,9
Peso	66,3 ± 10,5
IMC (kg/m ²)	22,93 ± 2,43
Kilómetros por semana	60,18 ± 20,41
Sesiones por semana	5,47 ± 1,29
Competiciones por año	13,08 ± 10,50

DE: desviación estándar; IMC: índice de masa corporal.



Figura 1. Variables cinemáticas.

(tiempo en que el pie está en contacto con el suelo), dividido en tres momentos diferentes (fase de aterrizaje, fase de apoyo y fase de despegue); 4) tiempo de vuelo (tiempo en que no hay contacto con el suelo); 5) duración de la zancada (tiempo total del movimiento de los miembros inferiores incluyendo las fases de vuelo y de contacto); 6) tiempo de paso (tiempo total de solo un miembro inferior, incluida la fase de vuelo y la fase de contacto), y 7) cadencia (número de zancadas en un minuto).

Análisis de datos

Antes del análisis estadístico se probó la normalidad de los datos (prueba de Kolmogorov-Smirnov). La estadística descriptiva se presenta como media, desviación estándar, frecuencia y porcentaje. Para analizar las diferencias entre calzados y descalzos y el efecto de la velocidad de carrera, se utilizaron la prueba t de Student y la prueba de Wilcoxon. Se realizaron correlaciones de Pearson entre las variables. Se utilizó para el análisis la media de los dos pies (pasos izquierda y derecha). Se estableció el nivel de significación en $p < 0,05$. El análisis de datos se realizó con SPSS (versión 21, SPSS Inc., Chicago, IL, EE. UU.).

Resultados

Variables temporales

Los resultados se muestran en la tabla 2. En VC/VE, en condiciones de calzados los corredores precisaron más tiempo en la fase de aterrizaje ($p < 0,001$). En la fase de apoyo se encontraron diferencias significativas entre calzados y descalzos en VE ($p < 0,01$), que fueron mayores en la condición de calzados. En referencia a los valores del tiempo total de contacto, se hallaron más elevados en condiciones de calzado en carrera VE ($p < 0,001$). En condiciones de descalzo, los atletas tienen un tiempo de vuelo menor que en condición de calzados ($p < 0,05$) en VC y VE; por lo tanto, la duración y el tiempo de la zancada fueron menores ($p < 0,001$). Finalmente, la frecuencia de la zancada también se vio afectada, con más pasos en condición de descalzos ($p < 0,001$) durante am-

bas VC i VE. Se hallaron diferencias significativas para el resto de variables estudiadas (tiempo de contacto, $p < 0,001$; fase de vuelo, $p < 0,001$; duración de la zancada, $p < 0,001$) al comparar VC y VE en ambas condiciones, calzado y descalzo ($p < 0,001$). Además, las tres fases de tiempo total de la prueba de contacto (fase de aterrizaje descalzo, $p = 0,021$; fase de aterrizaje calzada, $p = 0,006$; fase de apoyo, $p < 0,001$, y fase de despegue, $p < 0,001$) fueron significativas en ambas zancadas y condiciones.

Variables cinemáticas

La tabla 3 muestra los resultados de las variables cinemáticas. La flexión dorsal del tobillo en ambas zancadas en la fase de aterrizaje fue significativamente menor en condición de descalzos (VC, $p < 0,05$; VE, $p < 0,001$), y solo en condición de descalzos la flexión dorsal del tobillo fue mayor en VC en comparación con VE ($p < 0,001$). Además, hubo diferencias significativas en la flexión de la rodilla en el pie de contacto inicial entre las condiciones de calzados y descalzos en VE ($p = 0,036$), siendo mayor en condición de descalzo. Por otra parte, la flexión de la rodilla se incrementó a VC y VE en ambas condiciones ($p < 0,001$). En la fase de despegue, la flexión de la rodilla fue menor en condición de descalzo que en condición de calzado ($p = 0,002$) en VE. Además, se encontró disminución de la flexión de la rodilla ($p < 0,001$) en VC en comparación con VE en condición de calzado.

La dorsiflexión del tobillo se relaciona positivamente con la flexión de la rodilla en la fase de despegue en VC en condición de descalzo ($r = 0,254$, $p < 0,05$) y de calzado ($r = 0,267$, $p < 0,05$), y VE en condición de descalzo ($r = 0,430$, $p < 0,01$) y en condición de calzado ($r = 0,355$, $p < 0,01$). Por otra parte, la dorsiflexión del tobillo se relaciona positivamente con el tiempo de contacto en VE ($r = 0,265$, $p < 0,05$) en condición de calzados/descalzos.

Discusión

Con el fin de conocer mejor los cambios en los miembros inferiores entre carrera calzada y descalza se estudiaron las variables temporales y la cinemática de VC o VE. Como se ha

Tabla 2. Resultado de las variables temporales a distintos ritmos en ambas condiciones descalzo y calzado

	VC, media (DE)	VE, media (DE)	p
<i>Fase de aterrizaje (s)</i>			
Descalzo	0,035 (0,011)	0,032 (0,009)	0,021
Calzado	0,044 (0,011)	0,040 (0,009)	0,006
p	<0,001	<0,001	
<i>Fase de apoyo (s)</i>			
Descalzo	0,105 (0,018)	0,080 (0,014)	<0,001
Calzado	0,104 (0,021)	0,085 (0,015)	<0,001
p	0,891	0,010	
<i>Fase de despegue (s)</i>			
Descalzo	0,132 (0,019)	0,106 (0,013)	<0,001
Calzado	0,127 (0,016)	0,105 (0,012)	<0,001
p	0,063	0,612	
<i>Tiempo de contacto (s)</i>			
Descalzo	0,271 (0,028)	0,218 (0,019)	<0,001
Calzado	0,275 (0,027)	0,230 (0,022)	<0,001
p	0,253	<0,001	
<i>Tiempo de vuelo (s)</i>			
Descalzo	0,078 (0,031)	0,100 (0,026)	<0,001
Calzado	0,083 (0,028)	0,106 (0,026)	<0,001
p	0,042	0,022	
<i>Duración de la zancada (s)</i>			
Descalzo	0,696 (0,037)	0,640 (0,043)	<0,001
Calzado	0,717 (0,043)	0,674 (0,037)	<0,001
p	<0,001	<0,001	
<i>Tiempo de paso (s)</i>			
Descalzo	0,348 (0,018)	0,320 (0,021)	<0,001
Calzado	0,359 (0,021)	0,337 (0,018)	<0,001
p	<0,001	<0,001	
<i>Frecuencia de la zancada (zancadas min⁻¹)</i>			
Descalzo	86,46 (4,89)	94,14 (6,27)	<0,001
Calzado	84,93(5,30)	89,33 (5,10)	<0,001
p	<0,001	<0,001	

DE: desviación estándar; VC: velocidad confortable; VE: velocidad exigente.

planteado en la hipótesis, se hallaron diferencias significativas entre condiciones de calzado y descalzo en VC y VE en el plano sagital, que muestran qué cambios agudos pueden ser observados en la cinemática de las extremidades inferiores en corredores habitualmente calzados no acostumbrados a la carrera descalza. En la carrera descalza, la duración de la zancada, tiempo de vuelo, tiempo de contacto (en VE) y tiempo de zancada fueron significativamente menores, y la frecuencia de la zancada fue significativamente mayor que en la condición de calzado. Además, la flexión de la rodilla durante el contacto inicial y la fase de despegue fue significativamente menor que en condición calzada en VE, así como la flexión dorsal del tobillo en VC y VE.

El tiempo de vuelo fue más breve en condición descalza, tanto en VC como VE. Un aumento del tiempo de vuelo en la condición calzada podría ser atribuible a la suela del calzado, que proporciona alta propulsión en el despegue, aumentando la fase de vuelo de la zancada³. Por otra parte, el tiempo de contacto fue más corto en la condición descalza

Tabla 3. Resultado de las variables cinemáticas a distintos ritmos en ambas condiciones descalzo y calzado

	VC, media (DE)	VE, media (DE)	p
<i>Dorsiflexión del tobillo (grados)</i>			
Descalzo	10,51 (10,45)	5,56 (9,05)	<0,001
Calzado	13,40 (11,13)	14,00 (8,66)	0,458
p	0,007	<0,001	
<i>Flexión de la rodilla, primera zancada (grados)</i>			
Descalzo	167,40 (3,71)	162,84(4,02)	<0,001
Calzado	166,53 (4,37)	164,18 (4,75)	<0,001
p	0,101	0,036	
<i>Flexión de la rodilla, aterrizaje (grados)</i>			
Descalzo	164,41 (8,12)	165,17 (5,99)	0,465
Calzado	163,57 (7,55)	166,77 (5,09)	<0,001
p	0,278	0,002	

DE: desviación estándar; VC: velocidad confortable; VE, velocidad exigente.

en VE. Además, McCallion et al.²⁴ mostraron tiempos de contacto inferiores en condición descalza en comparación con la calzada y en condiciones minimalistas, tanto en VC como en VE. Schutte et al.²⁵ mostraron resultados similares. Los resultados globales, tanto en VC como en VE, en el tiempo de contacto fueron similares a los resultados de Squadrone y Gallozzi³ en condición calzada/descalza. Se detectó un efecto significativo de la velocidad de carrera en el tiempo de contacto, con tiempos de contacto significativamente más largos en VC con respecto a VE en condición calzada/descalza. Estos resultados concuerdan con los del estudio de McCallion et al.²⁴.

La duración de la zancada en condición de calzado fue significativamente mayor que en la condición de descalzo en VC y VE, lo cual es similar a los resultados obtenidos por McCallion et al.²⁴. Además, hubo un efecto significativo de la velocidad de carrera en la duración de la zancada en VC, que fue significativamente mayor que VE en ambas condiciones, calzados/descalzos. La frecuencia de la zancada fue mayor en la condición de descalzo en VC y VE, de conformidad con los resultados de De Wit et al.¹. Igualmente, McCallion et al.²⁴ encontraron una mayor frecuencia de zancada en condición descalza en comparación con las condiciones minimalista y calzada en VC y VE; los resultados obtenidos en la frecuencia de zancada en condición descalza fueron similares a los de este estudio en VC. Thompson et al.²⁶ hallaron que la carrera descalza produce una disminución de la longitud de la zancada, lo que podría causar fuerzas de reacción al suelo inferiores y, en el plano sagital, momentos de fuerza de la articulación. Además, la longitud de la zancada se asoció con la carrera descalza y se considera como una herramienta para reducir el riesgo de lesión.

En relación con la dorsiflexión del tobillo en la fase de aterrizaje, se encontraron diferencias significativas entre calzados/descalzos en VC y VE. Sin embargo, se produce una significativa dorsiflexión del tobillo en condición de descalzo (2,89-8,77° menos que de calzado). Resultados similares fueron presentados por Lieberman et al.⁶, quienes mostraron reducciones de dorsiflexión aproximadamente de 7-10° en corredores habitualmente calzados, cuando pasaban de la

condición de calzado a la de descalzo. Resultados similares fueron expuestos por Schutte et al.²⁵. Aumentando la velocidad (VC a VE), se da una reducción significativa de la dorsiflexión del tobillo en condición de descalzo, próxima al impacto del mediopié. Esta tendencia hacia el impacto del mediopié en la carrera descalza reduce el tiempo de vuelo y provoca un pico de fuerza inferior y mayor preactivación del tríceps sural que corriendo calzado¹⁵. Se cree que el impacto del mediopié es una forma potencial de disminuir dicho impacto²⁷. De manera similar a los hallazgos de este estudio, Squadrone y Gallozzi³ subrayaron que causa una reducción de las fuerzas de impacto, menor tiempo de contacto y aumenta la frecuencia de zancada. En una revisión reciente, Hall et al.²⁸ presentaron evidencias moderadas que la carrera descalza está asociada al pico de fuerza de reacción del suelo, aumento de la flexión plantar del tobillo y aumento de la flexión de la rodilla en contacto con el suelo en comparación con la carrera con calzado neutro.

La mayoría de análisis de carreras descalzas y calzadas han reportado un aumento de la flexión plantar del tobillo en el contacto inicial descalzo, lo que puede ser debido a los cambios en los tipos de pisada^{1,3,19,29}. Lieberman et al.⁶ investigaron a atletas habitualmente calzados y habitualmente descalzos y sugirieron que los corredores descalzos adoptaron una colocación del pie más plano en el contacto inicial. De Wit et al.¹ reportaron que esta colocación del pie más plano era ocasionada por una flexión plantar significativamente mayor y una posición significativamente más vertical de la pierna en el contacto inicial, siendo este último efecto causado por un aumento de flexión de la rodilla. Algunos investigadores sugieren que los cambios en la dorsiflexión del tobillo están en función de la altura del tacón de la zapatilla amortiguada moderna²⁵; sin embargo, Hamill et al.³⁰ compararon las características de impacto de la carrera calzada con plantilla de diferentes espesores con una carrera descalza y llegaron a la conclusión de que el cambio en las características del impacto es consecuencia del cambio de patrón de pisada más que del grosor de la entresuela (amortiguación).

La flexión de la rodilla en el aterrizaje en VC en condición calzada mostró una flexión significativamente mayor, que fue revertida en condiciones de pies descalzos en VE. De forma semejante al presente estudio, De Wit et al.¹ observaron una extensión de la rodilla menor en condición descalzo a tres velocidades diferentes, mostrando el efecto de la velocidad en la reducción de la extensión de la rodilla en el aterrizaje en condición calzado/descalzo. Igualmente, Schutte et al.²⁵ mostraron una mayor flexión de la rodilla en el aterrizaje en condición descalza. Squadrone y Gallozzi³ destacan una disminución de la extensión de la rodilla en el aterrizaje en condición descalza en comparación con el calzado minimalista y en condición calzado, aunque esta no fue estadísticamente significativa ($p \geq 0,05$). En consecuencia, el aterrizaje con menor dorsiflexión del tobillo y mayor flexión de rodilla provoca una disminución de los picos de impacto vertical e índices de carga en corredores descalzos^{3,6}. Como se ha dicho anteriormente, Squadrone y Gallozzi³ mostraron un aumento en la frecuencia de la zancada, tiempo de contacto menor, tiempo de vuelo inferior, mayor flexión de la rodilla y menor dorsiflexión del tobillo en el aterrizaje en condición descalza. Este estado cinemático fue relacionado con un pico

de fuerza vertical menor en el aterrizaje. El aumento de las características de impacto se cita a menudo como causa de lesiones de la carrera^{27,30,31} y los resultados cinemáticos de este estudio podrían ser de interés en el análisis de la prevención de lesiones. Sinclair³² mostró que descalzo y descalzo inspirado en calzado (calzado minimalista) fue asociado a reducciones significativas en los parámetros cinéticos de la rótula femoral. Sin embargo, la cinética de tobillo indica que descalzo y calzado inspirado en descalzo estuvo asociado a un aumento significativo de la fuerza del tendón de Aquiles en comparación con el calzado convencional. Por lo tanto, descalzo y calzado inspirado en descalzo puede servir para reducir la incidencia de lesiones de rodilla en los corredores, aunque los correspondientes incrementos de la carga del tendón de Aquiles pueden provocar riesgo de lesión en este tendón.

Debido a que los seres humanos evolucionaron para correr descalzos, un estilo de carrera descalzo que minimiza los picos de impacto y proporciona un aumento de la propiocepción y la fuerza del pie, se supone que ayuda a evitar lesiones, independientemente de si las zapatillas están desgastadas o no³¹. Sin embargo, en una revisión reciente Tam et al.³³ indicaron que un área inexplorada de la teoría de correr descalzo es el proceso en el cual se producen adaptaciones biomecánicas, y si estas son universalmente aprendidas.

Los cambios agudos producidos en la carrera pueden entrenarse y requieren una adaptación a los cambios de activación neuromuscular de la pierna inferior, con el fin de facilitar la flexión plantar antes del impacto. Por ejemplo, se produce mayor activación del tríceps sural, y esto puede contribuir a una reducción de las fuerzas de impacto y la reducción posterior en la tensión mecánica durante la marcha¹⁵. Las adaptaciones mecánicas también pueden contribuir a mejorar el almacenamiento y la recuperación de la energía elástica del tobillo en la carrera descalza. Los músculos flexores sostienen la tensión más tiempo y son menos eficientes, aumentando así la posibilidad de fatiga. Además, correr descalzo produce una mayor flexión de la rodilla al impactar el pie, y la actividad muscular puede ser también mayor.

Por lo tanto, durante la transición a la carrera descalza los atletas pueden tener un mayor riesgo a sufrir lesiones musculares a causa del estrés o la fatiga. Ello es útil para estabilizar de manera dinámica las articulaciones de las extremidades inferiores. Por esta razón, para evitar posibles efectos adversos en la transición de la carrera calzada a descalza, como fracturas por estrés de los metatarsianos³⁴, se recomienda un período gradual de transición. Robbins y Hanna³⁵ sugirieron que la adaptación a correr descalzo requiere un tiempo razonable de varias semanas para mejorar la propia musculatura necesaria para minimizar los riesgos de lesión, para modificar la activación de la musculatura específica y los nuevos modelos cinemáticos.

Una limitación de este estudio fue el tema de la precisión en el uso de análisis de vídeo 2D para determinar las variables analizadas, mientras que su fortaleza se basa en el gran número de sujetos participantes y el análisis de las variables espaciotemporales a dos velocidades de carrera diferentes en condiciones de calzados/descalzos. Por lo tanto, este estudio proporciona nuevos puntos de vista sobre el debate ya abierto entre partidarios y detractores de la carrera descal-

za. Por lo tanto, este estudio ayudará a tener un mejor conocimiento sobre esta tendencia creciente.

Conclusiones

Con el fin de obtener un mejor conocimiento de los cambios en la cinemática de las extremidades inferiores entre la condición calzada y la descalza, el presente estudio refuerza la declaración de que se producen cambios agudos en las variables temporales y cinemáticas entre condiciones calzada y descalza en corredores habitualmente calzados. En la carrera calzada, la duración de la zancada, el tiempo de vuelo, el tiempo de contacto y el tiempo de paso fueron significativamente más bajos y más cortos, y la frecuencia de zancada significativamente mayor, que en condición de calzado. Cuando la velocidad se incrementó en condición descalza, disminuyeron significativamente las variables de tiempo en ambas velocidades, confortable y exigente. Debido a ello, la zancada y el ciclo de la marcha fueron significativamente más rápidos y por lo tanto conducen a una mayor frecuencia de zancada. Se precisan más estudios para reconocer la eficacia de los programas de entrenamiento descalzo sobre las variables temporales y la cinemática de las extremidades inferiores en corredores de resistencia.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

- De Wit B, de Clercq D, Aerts P. Biomechanical analysis of the stance phase during barefoot and shod running. *J Biomech.* 2000;33:269-78.
- Larson P, Higgins E, Kaminski J, Decker T, Preble J, Lyons D, et al. Foot strike patterns of recreational and sub-elite runners in a long-distance road race. *J Sports Sci.* 2011;29:1665-73.
- Squadrone R, Gallozzi C. Biomechanical and physiological comparison of barefoot and two shod conditions in experienced barefoot runners. *J Sports Med Phys Fit.* 2009;49:6-13.
- Van Gent BR, Siem DD, van Middelkoop M, van Os TA, Bierma-Zeinstra SS, Koes BB. Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: A systematic review. *Br J Sports Med.* 2007;41:469-80.
- Hart PM, Smith DR. Preventing running injuries through barefoot activity. *J Phys Educ Recreat Dance.* 2008;79:50-3.
- Lieberman DE, Venkadesan M, Werbel WA, Daoud AI, d'Andrea S, Davis IS, et al. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature.* 2010;463:531-5.
- Robbins SE, Gouw GJ. Athletic footwear: Unsafe due to perceptual illusions. *Med Sci Sports Exerc.* 1991;23:217-24.
- Clarke TE, Frederick EC, Cooper LB. Effects of shoe cushioning upon ground reaction forces in running. *Int J Sports Med.* 1983;4:247-51.
- Stacoff A, Denoth J, Kaelin X, Stuessi E. Running injuries and shoe construction: Some possible relationships. *Int J Sport Biomech.* 1988;4:342-57.
- Stacoff A, Nigg BM, Reinschmidt C, van den Bogert AJ, Lundberg A. Tibiocalcaneal kinematics of barefoot versus shod running. *J Biomech.* 2000;33:1387-95.
- Hasegawa H, Yamauchi T, Kraemer WJ. Foot strike patterns of runners at the 15-km point during an elite-level half marathon. *J Strength Cond Res.* 2007;21:888-93.
- Edwards WB, Taylor D, Rudolphi TJ, Gillette JC, Derrick TR. Effects of stride length and running mileage on a probabilistic stress fracture model. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41:2177-84.
- Divert C, Mornieux G, Freychat P, Baly L, Mayer F, Belli A. Barefoot-shod running differences: Shoe or mass effect? *Int J Sports Med.* 2008;29:512-8.
- Kerrigan DC, Franz JR, Keenan GS, Dicharry J, della Croce U, Wilder RP. The effect of running shoes on lower extremity joint torques. *Phys Med Rehabil.* 2009;1:1058-63.
- Divert C, Mornieux G, Baur H, Mayer F, Belli A. Mechanical comparison of barefoot and shod running. *Int J Sports Med.* 2005;26:593-8.
- Bosco C, Rusko H. The effect of prolonged skeletal muscle stretch-shortening cycle on recoil of elastic energy and on energy expenditure. *Acta Physiol Scand.* 1983;119:219-24.
- Lohman EB, Sackiriyas KSB, Swen RW. A comparison of the spatiotemporal parameters, kinematics, and biomechanics between shod, unshod, and minimally supported running as compared to walking. *Phys Ther Sport.* 2011;12:151-63.
- Youngren J. Improving stride mechanics. En: Beck K, editor. *Run Strong.* Campaign, IL: Human Kinetics Inc.; 2005. pp. 8-24.
- Bishop M, Fiolkowski P, Conrad B, Brunt D, Horodyski M. Athletic footwear, leg stiffness, and running kinematics. *J Athl Train.* 2006;41:387.
- De Koning JJ, Nigg BM. Kinematic factors affecting initial peak vertical ground reaction forces in running. *J Biomech.* 1994;27:673.
- De Wit B, de Clercq D. Differences in sagittal plane kinematics between barefoot and shod running. En: *Proceedings of the second annual congress of the European College of Sport Science.* 1997. pp. 790-1.
- Queen RM, Gross MT, Liu H. Repeatability of lower extremity kinetics and kinematics for standardized and self-selected running speeds. *Gait Posture.* 2006;2:282-7.
- Schieb DA. Kinematic accommodation of novice treadmill runners. *Res Q Exerc Sport.* 1986;57:1-7.
- McCallion C, Donne B, Fleming N, Blanksby B. Acute differences in foot strike and spatiotemporal variables for shod, barefoot or minimalist male runners. *J Sports Sci Med.* 2014;13:280.
- Schutte KH, Miles KC, Venter RE, van Niekerk SM. Barefoot running causes acute changes in lower limb kinematics in habitually shod male runners. *S Afr J Res Sport Phys Educ Recreat.* 2013;35:153-64.
- Thompson MA, Gutmann A, Seegmiller J, McGowan CP. The effect of stride length on the dynamics of barefoot and shod running. *J Biomech.* 2014;47:2745-50.
- Giandolini M, Horvais N, Farges Y, Samozino P, Morin JB. Impact reduction through long-term intervention in recreational runners: Midfoot strike pattern versus low-drop/low-heel height footwear. *Eur J Appl Physiol.* 2013;113:2077-90.
- Hall JP, Barton C, Jones PR, Morrissey D. The biomechanical differences between barefoot and shod distance running: A systematic review and preliminary meta-analysis. *Sports Med.* 2013;43:1335-53.
- McNair PJ, Marshall RN. Landing characteristics in subjects with normal and anterior cruciate ligament deficient knee joints. *Arch Phys Med Rehabil.* 1994;75:584-9.
- Hamill J, Russell EM, Gruber AH, Miller R. Impact characteristics in shod and barefoot running. *Footwear Sci.* 2011;3:33-40.
- Lieberman DE. What we can learn about running from barefoot running: an evolutionary medical perspective. *Exerc Sport Sci Rev.* 2012;40:63-72.
- Sinclair J. Effects of barefoot and barefoot inspired footwear on knee and ankle loading during running. *Clin Biomech.* 2014;29:395-9.
- Tam N, Wilson JLA, Noakes TD, Tucker R. Barefoot running: An evaluation of current hypothesis, future research and clinical applications. *Br J Sports Med.* 2014;48:349-55.
- Giuliani J, Masini B, Alitz C, Owens BD. Barefoot-simulating footwear associated with metatarsal stress injury in 2 runners. *Orthopedics.* 2011;34:550.
- Robbins SE, Hanna AM. Running-related injury prevention through barefoot adaptations. *Med Sci Sports Exerc.* 1987;19:148-56.