

Monograph

Importancia Fisiológica de la Frecuencia de Zancada Preferida Durante la Carrera a Diferentes Velocidades

John Mercer, Jeff Dolgan, Janet Griffin y Angie Bestwick

Department of Kinesiology, University of Nevada, Las Vegas, Estados Unidos.

RESUMEN

El objetivo de este estudio consistió en determinar si la tasa de consumo de oxígeno (VO_2) durante la carrera es influenciada por la interacción entre la frecuencia de zancada (SF) y la velocidad en la carrera. Diez corredores bien entrenados ($66,3 \pm 8,8$ kg; 23 ± 5 años; $1,75 \pm 0,1$ m) corrieron 3 carreras de 15 minutos. Durante cada carrera, los sujetos corrieron durante 5 minutos a diferentes velocidades; 3,13; 3,58 y 4,02 $m \cdot s^{-1}$. Durante la primera carrera de 15 minutos se permitió a los sujetos elegir libremente la frecuencia de zancada preferida (PSF). Las dos carreras restantes fueron realizadas con una frecuencia de zancada (SF) que fuera equivalente a $\pm 15\%$ de la PSF en cada una de las velocidades. Mediante un análisis de la varianza de mediciones repetidas ANOVA, se determinó que el VO_2 era diferente en las diferentes velocidades ($p < 0,05$), mientras que la frecuencia de zancada (SF) tendió a ser diferente ($p = 0,059$), pero no se observó interacción entre la velocidad y la SF ($p > 0,05$). El VO_2 fue menor durante cuando la carrera realizada con la frecuencia de zancada preferida (PSF) que cuando se utilizó la SF 15% inferior a las velocidades de 3,13 m/s y 3,58 m/s ($p < 0,05$). El VO_2 no presentó diferencias entre las otras comparaciones de SF. La PSF presentó variaciones entre las velocidades, pero el cambio fue sutil (cerca del 4% por $m \cdot s^{-1}$ de aumento en la velocidad). Parecería que hay un intervalo de frecuencias de zancada óptimas a lo largo de las velocidades en vez de una única frecuencia de zancada óptima a cada velocidad que es importante mantener durante las carreras de fondo.

Palabras Clave: economía, optimización, locomoción, costo energético

INTRODUCCION

Una de las teorías que explican la coordinación de la locomoción bípeda es que la locomoción se lleva a cabo de manera tal de minimizar el gasto de energía (1). Aplicando esta teoría a las carreras, se ha observado que los corredores adoptan naturalmente un estilo de carrera que da como resultado una minimización de la tasa de consumo de oxígeno (VO_2) en la carrera a una velocidad dada (2, 3, 4).

Hay muchas maneras de describir los estilos de carrera, pero los factores de descripción cinemáticos básicos son la frecuencia de zancada (tasa de pasos con el pie derecho o izquierdo) y longitud de la zancada (distancia recorrida entre los pasos consecutivos del pie derecho o izquierdo).

En general, se ha establecido que los corredores seleccionarán naturalmente una combinación entre frecuencia de zancada- longitud de la zancada que provocará el menor VO_2 (2, 4). Observaciones como ésta parecerían aportar evidencia que indica que los corredores optimizan los estilos siguiendo criterios fisiológicos. La combinación frecuencia de zancada- longitud de zancada seleccionada por los mismos corredores generalmente se refiere a la frecuencia de zancada preferida (PSF) y a la longitud de zancada preferida (PSL). Un enfoque metodológico general que se utiliza para comparar el VO_2 en las diferentes frecuencias es fijar la velocidad en una cinta rodante y dejar que los corredores seleccionen naturalmente la PSF que ellos mismos prefieran para esa velocidad dada.

Entonces otra condición experimental adicional para evaluar, podría ser utilizar diferentes frecuencias de zancadas mientras se corre a la misma velocidad (y por lo tanto también cambia la longitud de la zancada). Este modelo experimental ha sido útil para poder comprender la relación que existe entre el consumo de oxígeno y la frecuencia de zancada. Sin embargo, es muy poco lo que se conoce acerca de cómo afectan esta relación a los cambios en la velocidad de la carrera.

A medida que cambia la velocidad de carrera, los corredores cambian naturalmente la PSF y PSL (5, 6, 7, 8, 9). En dos estudios previos (10, 11), se comparó el VO_2 mientras los sujetos corrían con diferentes frecuencias y longitudes de zancada en diferentes velocidades. Sin embargo el número de sujetos en dichos estudios era bajo (Hogberg, 1952; (10) $n=1$; Kaneko et al., 1987 (11) $n=4$) y ningún trabajo presentó comparaciones estadísticas del VO_2 en las diferentes frecuencias de zancada ni en las diferentes condiciones de velocidad. Por lo tanto, el propósito de este estudio consistió básicamente en reproducir estos estudios y determinar si el VO_2 durante la carrera es influenciado por una interacción entre la frecuencia de la zancada y la velocidad de la carrera.

Un segundo objetivo del estudio, fue determinar si el VO_2 es diferente entre el estilo de carrera preferido y un estilo de carrera ligeramente diferente a través de cambios en la frecuencia de zancada.

METODOS

Sujetos

Diez corredores bien entrenados (4 mujeres, 6 varones; $66,3 \pm 8,8$ kg; 23 ± 5 años; $1,75 \pm 0,1$ m) participaron en el estudio. Previamente dieron su consentimiento informado por escrito de acuerdo al protocolo aprobado por el Comité de Revisión Institucional de la Universidad de Nevada, Las Vegas.

Equipamiento

La tasa de consumo de oxígeno fue determinada utilizando ya sea un sistema de análisis metabólico *Vista mini- CPX* o uno *Orca Diagnostic*. Durante la realización del estudio, en el laboratorio se realizó un cambio de equipamiento por lo que en los primeros seis sujetos, el VO_2 fue determinado mediante el sistema *Vista mini-CPX* (modelo 117670), mientras que para los últimos cuatro sujetos, el VO_2 fue medido con el sistema *Orca Diagnostics*. En ambos sistemas los sujetos debían respirar a través de una máscara que era conectada a un dispositivo de tipo *metabolic cart* de manera que pudieran ser analizados los gases espirados. Antes de comenzar con las evaluaciones, los sistemas utilizados fueron calibrados siguiendo las recomendaciones de los fabricantes. Durante la evaluación, los valores de VO_2 fueron grabados cada 15 segundos. Todas las carreras en las diferentes condiciones fueron realizadas en una cinta rodante (*Quinton Instruments, Seattle, WA*).

Procedimientos

Antes de las evaluaciones, se permitió a los participantes realizar una entrada en calor corriendo en la cinta rodante. Luego de la entrada en calor, se solicitó a los sujetos que realizaran un total de 3 carreras de 15 minutos. Durante cada carrera de 15 minutos, los sujetos corrieron durante 5 minutos a diferentes velocidades de 3,13; 3,58 y 4,02 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Estas velocidades fueron seleccionadas para representar un ritmo típico de entrenamiento y se consideró que los sujetos serían capaces de realizar todas las condiciones de frecuencias de zancada en esas velocidades. La velocidad siempre se incrementó desde los valores lentos hacia los rápidos y las carreras de 15 minutos fueron siempre continuas.

Durante la primer carrera de 15 minutos, se permitió que los sujetos eligieran libremente una combinación entre frecuencia de zancada - longitud de zancada, sin darles ninguna instrucción con respecto a la frecuencia o longitud de las mismas. Por lo tanto, la primera condición fue denominada condición de frecuencia de zancada preferida (PSF).

Debido a que la frecuencia de las zancadas puede cambiar a medida que se incrementa la velocidad (5, 9), la PSF fue determinada a cada una de las velocidades (o sea: $PSF_{3,13}$; $PSF_{3,58}$; $PSF_{4,02}$) registrando el tiempo necesario para realizar 20 zancadas (i.e, desde el apoyo del pie derecho hasta el apoyo con el pie derecho nuevamente). Esta medición fue realizada en el segundo y el cuarto minuto de cada etapa de 5 minutos. El promedio de estos dos valores fue utilizado para determinar la frecuencia de zancada para las restantes dos condiciones de 15 minutos. En estas condiciones, los corredores corrieron a frecuencias de zancada específicas fijadas en un porcentaje de PSF en cada velocidad. En una carrera de 15 minutos los sujetos debían utilizar una frecuencia de zancada que fuera 15 % superior a la PSF en cada velocidad ($PSF_{+15\%}$).

En la otra carrera de 15 minutos los sujetos debían utilizar una frecuencia de zancada que fuera 15 % inferior a la PSF en cada velocidad ($PSF_{-15\%}$).

Durante estas condiciones se utilizó un metrónomo unido a los micrófonos para dar una orden oral a los sujetos de que utilizaran la frecuencia de zancada que correspondía. Durante las evaluaciones, la frecuencia de zancada fue registrada en el segundo y cuarto minuto de cada etapa. El promedio de estos dos valores fue utilizado para controlar posteriormente que se habían alcanzado las frecuencias de zancada establecidas. El orden de las condiciones fue siempre primero PSF con $PSF_{+15\%}$ y $PSF_{-15\%}$ equiparadas. Se les permitió a los sujetos que descansaran entre cada carrera de 15 minutos para recuperarse antes de comenzar con la siguiente condición.

Reducción de los Datos

Inicialmente los datos correspondientes a la tasa de consumo de oxígeno fueron analizados graficándolos en función del tiempo en cada carrera de 15 minutos y calculando la recta de mejor ajuste en el gráfico.

Los valores discretos de VO_2 que correspondían al tercer minuto de cada etapa de 5 minutos fueron obtenidos a partir de la línea de mejor ajuste y fueron utilizados para el análisis. Uno de los sujetos no logró realizar una etapa (la última etapa de 5 minutos de la última carrera de 15 minutos). Otro sujeto solo logró completar dos minutos de la última etapa. En este caso, el valor discreto del VO_2 fue calculado en el comienzo del segundo minuto de la etapa (vs. tercer minuto). En ambos casos los sujetos se detuvieron voluntariamente argumentando que era muy difícil mantener la combinación entre ritmo y velocidad.

Los análisis estadísticos fueron realizados considerando los datos provenientes de estos sujetos y sin considerarlos, y debido a que no se encontraron diferencias en los resultados obtenidos con o sin estos datos, presentamos los resultados de los análisis estadísticos teniendo en cuenta los datos de los dos sujetos.

Análisis Estadísticos

La tasa de consumo de oxígeno fue comparada en las diferentes condiciones utilizando un ANOVA de mediciones repetidas (SPSS Inc versión 11,5,2,1) de 3 (velocidad: 3,13; 3,58 y 4,02 m/s) x 3 (frecuencia de zancada fijada: $PSF_{-15\%}$, PSF, $PSF_{+15\%}$). Las frecuencias de zancada reales fueron también comparadas utilizando un ANOVA de mediciones repetidas de 3 (velocidad: 3,13; 3,58 y 4,02 m/s) x 3 (frecuencia de zancada fijada: 85%; 100% y 115%) con el fin de confirmar que las condiciones de frecuencia de zancada eran diferentes unas de otras.

Se establecieron comparaciones entre PSF con las diferentes velocidades así como también entre el VO_2 y las frecuencias de zancada en las diferentes velocidades. El nivel alfa fue fijado en 0,05.

RESULTADOS

Las frecuencias de zancada alcanzadas fueron diferentes en las diferentes velocidades ($F_{2,16}=17,37$, $p<0,001$) y en las frecuencias de zancada fijadas ($F_{2,16}=76,16$, $p<0,001$), no se encontró interacción entre la velocidad y las frecuencias de zancada fijadas observadas ($F_{4,32}=0,74$, $p=0,568$).

La PSF en la velocidad de 3,13 $m \cdot s^{-1}$ no presentó diferencias con la correspondiente a la velocidad 3,58 ($F_{1,9}=4,09$, $p=0,074$), pero sí se observaron diferencias con la velocidad de 4,02 $m \cdot s^{-1}$ ($F_{1,9}=16,20$, $p=0,003$).

Se observaron diferencias en la tasa de consumo de oxígeno entre las tres velocidades ($F_{2,16}=68,47$; $p<0,001$), pero no se observaron diferencias entre las diferentes frecuencias de zancada ($F_{2,18}=3,40$, $p=0,059$; Tabla 1 y Figura 1). No se observó interacción entre la velocidad y la frecuencia de zancada ($F_{4,32}=0,87$, $p=0,495$; Tabla 1).

Velocidad (m/s)	Frecuencia de Zancada Fijada (% de PSF)	Frecuencia de Zancada Observada (zancadas/min)	Frecuencia de Zancada Observada (% PSF)	VO ₂ (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)
3,13	85%	74,9 ±4,6	90,0 ±4,0	38,8 ±4,3*
	100%	83,2 ±3,5	100,0 ±0,0	34,7 ±4,0*
	115%	92,7 ±5,2	111,4 ±4,2	35,9 ±6,8
3,58	85%	76,4 ±3,9	90,0 ±4,4	42,8 ±6,3*
	100%	84,9 ±2,4	100,0 ±0,0	39,7 ±5,0*
	115%	94,0 ±5,4	110,8 ±5,1	40,9 ±7,5
4,02	85%	78,7 ±3,6	90,7 ±4,2	46,9 ±8,8
	100%	86,8 ±2,4	100,0 ±0,0	45,3 ±6,0
	115%	96,1 ±5,5	110,7 ±4,6	45,8 ±8,7

Tabla 1. Valores medios grupales y desviaciones estándar de las frecuencias de zancada (zancadas·min⁻¹) alcanzadas durante cada condición de frecuencia de zancada fijada y tasa de consumo de oxígeno

(ml·kg⁻¹·min⁻¹) en cada una de las condiciones estudiadas. † Se observaron diferencias en la frecuencia de zancada entre las condiciones fijadas y las velocidades ($p < 0,05$), mientras que no se observó interacción entre los factores velocidad y condición fijada. * Se observaron diferencias en la tasa de consumo de oxígeno entre PSF y PSF_{-15%} durante las carreras a velocidades de 3,13 m·s⁻¹ y 3,58 m·s⁻¹ ($p < 0,05$), pero no se observaron diferencias en la tasa entre las diferentes condiciones de frecuencia de zancada en la velocidad correspondiente a 4,02 m·s⁻¹ ($p > 0,05$). Tampoco se encontraron diferencias en la tasa de consumo de oxígeno en ninguna de las velocidades entre PSF y PSF_{+15%} ($p > 0,05$).

Mediante el análisis de las comparaciones planeadas, se determinó que el VO₂ era menor durante las carreras en la condición PSF que en la condición PSF_{-15%}, cuando se corría a velocidades de 3,13 m·s⁻¹ ($F_{1,8}=13,19$, $p=0,007$) y 3,58 m·s⁻¹ ($F_{1,9}=18,15$, $p=0,002$), pero no se observaron diferencias en el VO₂ entre PSF y PSF_{-15%} en la velocidad de 4,02 m·s⁻¹ ($F_{1,8}=1,79$, $p=0,213$). La tasa consumo de oxígeno no fue diferente entre PSF y PSF_{+15%} a ninguna velocidad (3,13 m·s⁻¹: $F_{1,8}=1,51$, $p=0,254$; 3,58 m/s: $F_{1,8}=0,98$, $p=0,349$; 4,02 m·s⁻¹: $F_{1,8}=0,14$, $p=0,716$).

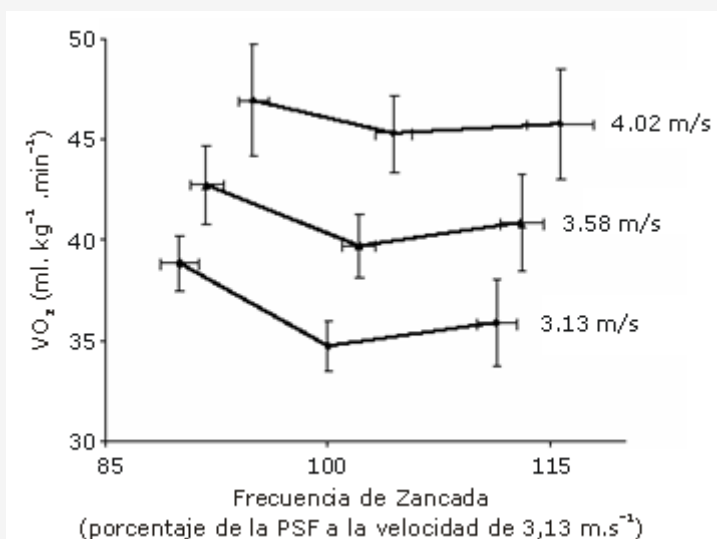


Figura 1. Valores medios grupales y error estándar de la tasa de consumo de oxígeno (VO₂ ml·kg⁻¹·min⁻¹) versus frecuencia de la zancada (zancadas·min⁻¹). Con fines ilustrativos, todas las condiciones de frecuencia de zancada fueron normalizadas a la condición de frecuencia preferida.

DISCUSION

Como era de esperar, la tasa de consumo de oxígeno aumentó con las velocidades de carrera más altas, pero no se encontró efecto de interacción entre el VO_2 y la frecuencia de zancada. Mediante el uso de las comparaciones planeadas de VO_2 entre las condiciones de frecuencia de zancada en cada velocidad, se determinó que el VO_2 era menor cuando los corredores utilizaban su PSF que cuando utilizaban la frecuencia de zancada menor en las velocidades más lentas, pero el VO_2 no fue influenciado por la frecuencia de la zancada cuando se utilizó una frecuencia de zancada más alta. Tiene sentido que los cambios en la frecuencia ejercieran menos influencia sobre el VO_2 en las velocidades de carrera mayores, debido a que hay un efecto de techo de VO_2 definido por la tasa de consumo de oxígeno máximo (VO_2 máx.). Es decir, al correr a velocidades que se acercan al VO_2 máx., los cambios en la frecuencia de la zancada no provocarán aumentos en el VO_2 superiores a la tasa máxima.

Aunque los sujetos no alcanzaron las frecuencias de zancadas fijada de $\pm 15\%$, las frecuencias que fueron alcanzadas eran significativamente diferentes a la PSF para cada una de las velocidades estudiadas. No está claro por qué los corredores no pudieron alcanzar las frecuencias de zancada fijadas. Durante la recolección de los datos, se utilizó un metrónomo para indicar la frecuencia fijada y un miembro del equipo de investigación ayudó a los sujetos a alcanzar dicha frecuencia. A pesar de ese esfuerzo, los sujetos simplemente parecían querer desviarse hacia la frecuencia preferida (PSF), especialmente a medida que la velocidad se incrementaba.

Cualitativamente, los sujetos a menudo comentaron que correr en frecuencias de zancada que no fueran la frecuencia preferida era muy difícil, sobre todo a velocidades más rápidas. Una de las limitaciones de este estudio fue que la novedad de mantener una frecuencia de zancada fijada junto con la mayor demanda fisiológica que provoca correr con una frecuencia de zancada que no sea la PSF dificultó el alcance del estado estable. En este estudio, nosotros enfocamos nuestro análisis en el VO_2 . Si se hubieran medido los marcadores de producción de energía anaeróbica, nosotros esperaríamos observar una mayor cantidad de producción de energía anaeróbica en las condiciones de frecuencia de zancada $\pm 15\%$ a la mayor velocidad de carrera y ese tipo de análisis podría enfatizar aún más la importancia de usar el estilo de carrera preferido. Sin embargo, no podemos saber si los resultados de este estudio hubieran sido diferentes si los sujetos hubieran entrenado a frecuencias distintas a la frecuencia preferida (PSF).

Si bien se acepta que los cambios en las velocidades submáximas son llevados a cabo principalmente a través de cambios en la longitud de la zancada (vs. frecuencia de la zancada), no está completamente claro por qué se produce un pequeño cambio en la frecuencia de la zancada. En nuestro estudio se observó sólo un 4% de aumento en la frecuencia de la zancada por $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ de incremento en la velocidad de carrera. Este cambio es similar a lo observado en otros estudios que han informado un cambio en la frecuencia de zancada de aproximadamente 5-10% por $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ de aumento en la velocidad (5,7-9).

Interesantemente hay otras situaciones dónde se han presentado desafíos a los corredores, y la frecuencia de zancada preferida no cambia o cambia muy poco.

Por ejemplo, la frecuencia de zancada preferida no cambia a pesar de que se produzca un cambio en las características de rigidez de la superficie del suelo (12) o cuando se corre en la arena (13). Igualmente no se observaron diferencias, en la frecuencia de zancada preferida entre los días de evaluación (14) o durante un periodo de entrenamiento de 7 semanas (15) o cuando se agregan carga de hasta 1,1 kg en la parte distal de la pierna (16). Sólo se han observado cambios sutiles en la frecuencia de la zancada cuando un corredor se fatiga, porque se le exige correr a una velocidad fija (17, 18, 19, 20) o cuando los sujetos corrieron con **springboots** (una bota de tipo *rollerblade* con un resorte incorporada en la superficie de abajo) (21, 22). Éstas observaciones indican que la PSF es bastante estable, independientemente de las condiciones (ej., velocidad, calzado, superficie, características, y estado fisiológico) que se le imponen al corredor.

La observación que indica que la PSF es mantenida bajo una variedad de condiciones probablemente está relacionada con la economía de la locomoción. No obstante, es necesario realizar investigaciones adicionales para comprender mejor cuales son los factores que influyen la selección de la PSF. La importancia de que sólo se observen cambios leves en la PSF a diferentes velocidades (u otras situaciones) podría significar ser que hay un intervalo de frecuencias de zancada óptimas dentro del cual los corredores intentan trabajar a cualquier velocidad en vez de una única frecuencia de zancada óptima para cada situación de velocidad. Si bien la relación entre el VO_2 y la frecuencia de zancada puede describirse como una relación con forma de U, donde el VO_2 tiende a aumentar a medida que la frecuencia de zancada aumenta o disminuye en relación con la PSF, según nuestros experimentos parecería que hay una porción plana de la curva alrededor de la PSF en la cual los cambios en las frecuencias no provocan una influencia negativa sobre el VO_2 . Por lo tanto, existen probablemente otros factores, (por ejemplo, biomecánicos, antropométricos) que ejercen influencia en la selección de la PSF. Por ejemplo, los cambios en frecuencia de zancada ejercen influencia sobre las fuerzas de reacción del suelo (23) y

podrían presentarse situaciones donde la PSF es determinada por una necesidad de modificar la fuerza de impacto.

Aunque la carrera se realiza con un pensamiento conciente aparentemente pequeño, el corredor debe ser capaz de integrar la percepción de rasgos salientes del ambiente con la información fisiológica pertinente, para poder coordinar las contracciones de muchos grupos musculares diferentes y lograr una conducta de carrera apropiada. Minimizar el VO_2 es claramente un criterio importante que regula el comportamiento en la carrera y la capacidad de minimizar el VO_2 está ligada a la frecuencia de zancada que se elige. A pesar de que existe una fuerte motivación fisiológica para que los corredores seleccionen una frecuencia de zancada similar durante diferentes condiciones de carrera, parecería que también existe cierta flexibilidad en el sistema y que el corredor puede elegir a partir de un intervalo de frecuencias sin que se afecte negativamente el VO_2 .

Conclusión

En las velocidades evaluadas (3,13; 3,58 y 4,02 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), el VO_2 aumentó a medida que aumentó la velocidad y fue menor sólo cuando la carrera se realizó utilizando la PSF respecto a cuando se utilizó una frecuencia de zancada menor en las velocidades de 3,13 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ y 3,58 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Aunque el VO_2 no fue influenciado por la interacción entre la frecuencia de la zancada y la velocidad, la magnitud de la diferencia de VO_2 entre las condiciones de frecuencia de zancada se volvió más pequeña a medida que la velocidad aumentaba y no se observó diferencia en el VO_2 entre las condiciones de frecuencia de zancada en la velocidad más alta (4,02 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Finalmente, se observaron cambios sutiles en la PSF en las diferentes velocidades, aproximadamente 4% por $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ de aumento en la velocidad). Concluimos que hay un intervalo de frecuencias de zancada óptimas a lo largo de las diferentes velocidades y no una única frecuencia de zancada óptima para cada velocidad y que es importante que los corredores trabajen dentro de este intervalo durante las carreras de fondo.

REFERENCIAS

1. Vaughn C (2003). Theories of bipedal walking: an odyssey. *Journal of Biomechanics* 36: 513-523
2. Cavanagh P. and Williams K (1982). The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 1982; 14: 30-35
3. Hamill J., Derrick T. and Holt K (1995). Shock attenuation and stride frequency during running. *Human Movement Science* 14: 45-60
4. Knuttgen H (1961). Oxygen uptake and pulse rate while running with undetermined and determined stride lengths at different speeds. *Acta Physiologica Scandinavica* 52: 366-37
5. Chapman A. and Caldwell G (1983). Kinetic limitations of maximal sprinting speed. *Journal of Biomechanics* 16:79- 83
6. Dillman C (1975). Kinematic analyses of running. *Exercise and Sport Science Reviews* 3:193-218
7. Luhtanen P. and Komi P (1978). Mechanical factors influencing running speed. In: *Asmussen E., Jorgensen, K. (eds) Biomechanics VI, University Park Press, Baltimore: 23-29*
8. Mercer J., Vance J., Hreljac A. and Hamill J (2002). Relationship between shock attenuation and stride length during running at different velocities. *European Journal of Applied Physiology* 87: 403-408

Cita Original

Mercer J., Dolgan J., Griffin J., Bestwick A. The Physiological Importance of Preferred Stride Frequency during Running at Different Speeds. *JEPonline*; 11 (3): 26-32, 2008.