

¿Es relevante la energía elástica acumulada en la performance de un CMJ?

Gabriel Fábrica

Unidad de Investigación en Biomecánica de la Locomoción Humana, Departamento de Biofísica, Facultad de Medicina Universidad de la República, Uruguay.

cgfabrica@gmail.com

Andrés González

Instituto Superior de Educación Física, Universidad de la República Uruguay. Instituto Universitario Asociación Cristiana de Jóvenes, Uruguay.

andresbalonmano@gmail.com

Gustavo Bermúdez

Instituto Universitario Asociación Cristiana de Jóvenes, Uruguay.

gbermudez.neuro@gmail.com

RESUMEN

Se discute sobre la importancia de energía elástica acumulada en miembros inferiores en la performance de saltos verticales. A tales efectos, se presenta un análisis de la rigidez durante las fases de contrabalanceo y de impulso en saltos de tipo *counter movement jump* (CMJ). Se realizó una reconstrucción 3D de noventa CMJ de esfuerzo máximo en base a la ubicación de 49 marcadores corporales. Los datos se agruparon en resultados buenos, medios y pobres según la altura máxima del salto. Se calculó la rigidez vertical del sistema durante las fases de contrabalanceo e impulso, la fuerza vertical máxima y los tiempos de cada fase. Se realizó un ANOVA de una vía considerando la altura del salto como factor. Los valores de rigidez mostraron que el cuerpo se comporta como un sistema masa-resorte lineal durante el impulso, pero el movimiento no se corresponde tan bien con ese modelo durante el contramovimiento de los buenos CMJ, que tienen un tiempo de empuje corto y una mayor fuerza vertical. Concluimos que el aumento de la rigidez del

conjunto de estructuras de miembros inferiores importa pero no es un fenómeno pasivo y que la importancia de la energía elástica es cuestionable.

Palabras clave: Biomecánica, rigidez, potencia, evaluación.

INTRODUCCIÓN

El salto con contramovimiento (CMJ) se usa comúnmente en evaluaciones deportivas (Bosco, 2007; Dal pupo, Detanico, & Dos Santos, 2012; Komi & Bosco, 1978). Este salto tiene una fase de descenso del centro de masa corporal (COM), llamada fase de contramovimiento, seguida de una breve transición y una fase de ascenso del COM (fase de impulso). Las acciones anteriores al impulso durante un CMJ determinan las variaciones al comparar el impulso de CMJs con saltos sin contramovimiento (Aboodarda, Yusof, Abu Osman, Thompson, & Mokhtar, 2013; Anderson & Pandy, 1993). Estas diferencias son determinantes de la altura alcanzada durante un CMJ, que tradicionalmente se ha asociado con la manifestación de fuerza reactiva elástico-explosiva, en la que intervienen capacidades contráctiles, de sincronización y aprovechamiento elástico (Vittori, 1990).

Muchos estudios trataron de identificar las causas determinantes del desempeño en un CMJ y una serie de factores se han asociado con estas causas (Bosco, Komi, & Ito, 1981; Kubo et al., 2007). Entre estos factores se encuentra la capacidad de acumular energía elástica en las diferentes estructuras que forman parte de los miembros inferiores durante la fase de contramovimiento y devolverla como trabajo útil en la fase de impulso (Komi & Bosco, 1978; Struzik, Zawadzki, & Rokita, 2016). Este factor es habitualmente considerado como un mecanismo importante en la diferencia de altura que un sujeto puede alcanzar en un CMJ respecto a otros saltos (SJ por ejemplo) y de hecho, inicialmente esta diferencia porcentual relativa se definió como índice elástico (Bosco, 2007). Está claro que en alguna medida la energía elástica acumulada se suma a la energía suministrada por los músculos que se contraen en la fase de empuje (Anderson & Pandy, 1993; Bobbert, Gerritsen, Litjens, & Van Soest, 1996). No obstante, aunque el CMJ es ampliamente

utilizado en evaluaciones, no hay un consenso respecto a en qué medida ese aprovechamiento elástico resulta significativo para la performance del salto.

La energía potencial elástica acumulada en un sistema depende directamente de la rigidez de dicho sistema. Dos variables que cuantifican la rigidez del cuerpo como un sistema completo, la rigidez vertical (K_{vert}) y la rigidez de la pierna (K_{leg}) (Brughelli & Cronin, 2008), han ganado una popularidad sin precedentes en las áreas deportiva y del entrenamiento en los últimos años (Serpell, Ball, Scarvell, & Smith, 2012). Sus valores pueden considerarse entonces para evaluar el comportamiento mecánico del cuerpo durante las fases del salto. Teóricamente, para la misma deformación de los miembros inferiores, un aumento en la rigidez permitiría una mayor cantidad de energía elástica acumulada durante la acción descendente en un CMJ. Por lo tanto, se puede hipotetizar que un valor más alto de K_{vert} o K_{leg} debería afectar positivamente la eficiencia de empuje total y la altura alcanzada en el CMJ en el caso de que este factor sea realmente relevante en la performance. No obstante, puede haber algunos problemas al considerar estas variables en un movimiento con las características de un CMJ. Por ejemplo, el fenómeno de histéresis elástica puede provocar una disminución del valor de rigidez durante la fase de empuje cuando se compara con la fase de contramovimiento.

Un estudio en el que se compararon los valores de rigidez en las dos fases (Struzik & Zawadzki, 2013), concluyó que no existen diferencias. Sin embargo, Struzik & Zawadzki (2013) en sus estimaciones consideraron sólo la sección donde existe una relación lineal entre la fuerza y el desplazamiento de COM, de modo que no se analizó el comportamiento mecánico real durante las fases sino que se asumió el mismo como lineal. Estudios previos han sugerido que las acciones musculares activas pueden determinar que los valores de rigidez calculados asumiendo un comportamiento lineal constituyen una simplificación excesiva (Bobbert & Casius, 2011; Brughelli & Cronin, 2008) de lo que ocurre en una o ambas fases. Para que el aprovechamiento de energía elástica tenga una importancia relevante en la performance del CMJ un primer aspecto que se debe cumplir es que el comportamiento de los miembros inferiores en su

conjunto se acerque al observado en un modelo de masa-resorte lineal. Luego, cambios en los valores de K_{vert} o K_{leg} deberían ser percibidos al comparar saltos en los que se logren alturas significativamente diferentes, para poder decir que el aprovechamiento elástico es un factor de importancia en el resultado de una evaluación con CMJ.

Aquí presentamos un estudio en el que hemos analizado la mecánica global del cuerpo en las diferentes fases a través K_{vert} , conjuntamente con variables espacio-temporales que se han considerado como importantes en la acción de un CMJ como la máxima fuerza vertical en el tiempo de impulso y la duración de las fases. A los efectos de realizar una interpretación que pueda tener utilidad práctica comparamos los resultados en saltos donde se alcanzan alturas buenas, medianas y malas. En base a lo discutido en trabajos previos nuestra hipótesis fue que el comportamiento mecánico (K_{vert}) del cuerpo durante las fases del CMJ es diferente en saltos en los que se logran diferentes alturas.

Creemos que el estudio de estas relaciones puede proporcionar información que contribuya a comprender mejor que aspectos se están evaluando a través de las alturas alcanzadas en movimientos explosivos de múltiples segmentos como el CMJ.

MÉTODO

Sujetos y captura de datos

Treinta jugadores de voleibol de sexo masculino (edad $24,5 \pm 2,7$ años, altura $1,85 \pm 0,6$ m, masa corporal $80,3 \pm 5,2$ kg), participaron en este estudio. Los sujetos seleccionados entrenaban más de 4 veces a la semana, tenían al menos 5 años de experiencia en competición y no sufrieron lesiones en los 6 meses previos al experimento. Todos los participantes fueron previamente informados sobre los objetivos y las características del estudio y se obtuvo su consentimiento. El estudio se realizó conforme a los requisitos estipulados en la Declaración de Helsinki, el protocolo y el consentimiento informado recibió la aprobación del comité de ética del Hospital de Clínicas, lugar donde se

encuentra el laboratorio en el cual fueron realizadas las capturas de datos (número de aprobación 07114000176409).

La recolección de datos se realizó durante el período de entrenamiento previo a la competición, el procedimiento de prueba se llevó a cabo durante el mismo día para cada uno de los sujetos utilizando el calzado habitual de entrenamiento. Cada participante realizó un calentamiento de 10 minutos, trotando en velocidad moderada y realizó tres CMJ submáximos. Cuarenta y nueve marcadores se colocaron en referencias anatómicas para obtener a partir de su posición una reconstrucción 3D del cuerpo. Cada sujeto, realizó diez CMJs (buscando en cada caso alcanzar la altura máxima). Se utilizaron ocho cámaras sincronizadas Bonita (cámara óptica de 1 MPx, 250 fps con lente varifocal (4 a 12 mm) y estroboscópico NIR) conectadas a VICON MOTION SYSTEMS (Nexus 2.5) (Oxford Metrics Ltd) para obtener los datos cinemáticos. Durante cada salto, los participantes partieron desde una posición erguida y luego realizaron un contramovimiento hasta alcanzar un ángulo de flexión de la rodilla de 90°. Aquellos saltos en los cuales las flexiones de rodilla variaron más de 5° con respecto al ángulo de flexión máximo preestablecido (90°) fueron descartados para los análisis posteriores. De los saltos no descartados, los mejores tres de cada sujeto fueron seleccionados. Las trayectorias de los marcadores se suavizaron usando un filtro Butterworth pasa-bajo bidireccional con una frecuencia de corte de 8 Hz y se exportaron a Matlab 12.0® (Mathworks, Inc.) para realizar el cálculo de variables.

Definición y cálculo de variables.

Las variables consideradas en este estudio fueron:

- La altura máxima alcanzada en el salto (H), determinada a partir de la diferencia entre el valor máximo de la componente de posición vertical del COM y el valor en el momento del despegue.
- Los tiempos de duración de las fases de contramovimiento, transición y fase de empuje (T_c , T_t y T_{p-off}).
- El valor máximo de la fuerza de reacción vertical del suelo (F_{max}), estimado a partir del desplazamiento del COM por doble integración

considerando la masa de los individuos. Se optó por llevar a cabo este enfoque, ya que facilitó la logística después de verificar en un trabajo previo que el error es bajo ($5,0 \pm 2,3$ mm) y el coeficiente de correlación alto ($r^2 = 0,985$) al comparar los resultados de CMJ ($n=20$) recogidos simultáneamente usando una plataforma de fuerza (AMTI OR6-5) Mechanical Technology Inc., Watertown, Massachusetts) en una frecuencia de 1000 Hz con el sistema utilizado en este trabajo.

- Kvert durante las fases de contramovimiento (K_c) y de empuje (K_p -off). Como en un salto vertical Kvert y Kleg tienen el mismo valor (Brughelli & Cronin, 2008; McMahon & Cheng, 1990), en el presente estudio elegimos estimar Kvert porque su cálculo se basa directamente el movimiento del COM. Kvert se determinó como la pendiente de una línea ajustada a partir de la relación de la fuerza de reacción vertical del suelo (F_z) y posición vertical del COM como se indica en (Granata, Padua, & Wilson, 2002).

Análisis de los datos

Los valores registrados se agruparon en tres categorías (bueno, medio y pobre). según la altura alcanzada en el salto Para el armado de las categorías, se consideró que una diferencia del 30% en la altura permite dividir saltos en diferentes grupos (Rodacki, Fowler, & Bennett, 2001). Se calculó la diferencia entre los valores extremos de alturas y el valor medio de todos los registros y considerando esa diferencia como 100% se determinó el 30% hacia cada lado para definir el intervalo medio. Así, las tres categorías se establecieron entre 0,28-0,40 m como un mal rendimiento, 0,41-0,49 m como rendimiento medio y 0,50-0,58 como un buen desempeño. En las interfaces, se consideró el tercer dígito significativo para otorgar la categoría al salto. Para cada categoría se calcularon la media y la SD de todas las variables. Se evaluó la normalidad y homogeneidad de la varianza a través de las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Se realizó un ANOVA de una vía para todas las variables considerando la categoría (altura de salto) como factor. Cuando se

rechazó la hipótesis de que todas las medias son iguales, se realizó un test post hoc de Tukey (en caso de varianzas iguales) o Games-Howell (cuando las varianzas resultaron diferentes) a los efectos de establecer entre que categorías estaban las diferencias. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software SPSS (ver.17.0, IBM, Somers, NY, EE.UU.) y la significación de nivel se estableció en 0,05.

RESULTADOS

Tabla 1. Características de los tres grupos de saltos analizados. Todos los valores están en metros.

| | Bueno (n=30) | Medio (n=30) | Pobre (n=30) |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Altura | 0.541±0.002 | 0.434±0.003 | 0.369±0.006 |
| Rango | 0.046 | 0.055 | 0.116 |
| Máximo | 0.577 | 0.461 | 0.404 |
| Minimo | 0.531 | 0.407 | 0.288 |

Tabla 2. Valores (media ± SD) de las variables dependientes asociadas al comportamiento mecánico general del cuerpo analizado en este trabajo. La última columna muestra las diferencias encontradas entre los grupos que surgen de post hoc, ver explicación en el texto.

| Variable | Bueno (n=30) | Medio (n=30) | Pobre (n=30) | ANOV A |
|-----------------------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------|
| Tp-off (s) | 0.230±0.045 | 0.282±0.027 | 0.261±0.021 | a |
| Tc (s) | 0.440±0.077 | 0.453±0.031 | 0.461±0.047 | no diff |
| Tt (s) | 0.0270±0.002 | 0.026±0.005 | 0.033±0.005 | d e |
| Fmax (N) | 2697±900 | 1349±539 | 1471±225 | b |
| Kp-off (N.m ⁻¹) | 2719±253. | 1789±540 | 1862±453 | b |
| Kc (N.m ⁻¹) | 4736±589 | 3718±277 | 3708±219 | b |

En la última columna de la tabla 2, la letra "a" indica diferencias entre todos los grupos, "b" indica diferencias de los buenos desempeños con respecto al resto, "c" indica diferencias entre desempeños buenos y medios, "d" indica

diferencias entre desempeños medios y pobres y "e" marca la existencia de diferencias entre buenos y pobres resultados.

Los valores de ajuste (r^2) de las rectas utilizadas para determinar Kvert durante la fase de contramovimiento para los resultados buenos, medianos y pobres fueron 0.68 ± 0.04 , 0.75 ± 0.02 y 0.78 ± 0.04 respectivamente y resultaron significativamente diferentes. Mientras que en la fase de impulso los ajustes fueron 0.84 ± 0.06 , 0.84 ± 0.04 , 0.86 ± 0.1 y no se observaron diferencias significativas entre los tres grupos de saltos.

DISCUSIÓN

Las estimaciones de rigidez obtenidas en este trabajo mostraron valores similares a los reportados en Bobbert & Casius (2011) y fueron inferiores a los calculados en otros trabajos (Struzik & Zawadzki, 2013; Struzik et al., 2016). Esto puede deberse a que Kc y Kp-off se determinaron teniendo en cuenta todos los valores y no sólo el área en la que el comportamiento se acerca a una relación lineal como plantearon Struzik & Zawadzki (2013) y Struzik et al., (2016).

Se pudo observar que en todos los saltos el cuerpo tuvo un comportamiento más rígido durante la fase de contramovimiento que durante el impulso (tabla 2). Esto marca una diferencia respecto a Struzik & Zawadzki (2013), que no encontraron diferencias estadísticamente significativas en los valores de rigidez de esas fases.

El comportamiento durante el contramovimiento fue significativamente más rígido en aquellos saltos en los que se alcanzaron mayores alturas. Si asociamos directamente el valor de rigidez con la energía potencial elástica acumulada, este resultado se puede entender como reflejo de una mayor capacidad elástica. No obstante, suponiendo que la rigidez general del sistema depende principalmente de las acciones musculares (Dal pupo et al., 2012), podríamos suponer que los altos valores encontrados para Kc están asociados con diferencias en las acciones musculares. Aunque en este estudio no se midió directamente la participación de las acciones musculares, un detalle que

en cierto sentido apoya esta idea es que el ajuste lineal durante el contramovimiento en los buenos resultados, aunque aceptable ($r^2 = 0,68 \pm 0,04$) fue menor a los valores obtenidos para los rendimientos medianos ($r^2 = 0,75 \pm 0,02$) y pobres ($r^2 = 0,78 \pm 0,04$). Una desviación de la relación lineal implica variaciones en la relación fuerza-desplazamiento, hecho que requiere necesariamente una acción muscular activa. En definitiva a pesar de los altos valores de K_c observados en los buenos rendimientos, lo discutido hasta aquí está en la línea de lo propuesto en Dal pupo et al. (2012) y por tanto la acumulación de energía potencial elástica, que es un fenómeno pasivo, no parece ser determinante para alcanzar una buena altura en un CMJ.

Con respecto a lo que ocurre durante la fase de impulso, los valores de K_p -off también mostraron un comportamiento más rígido del sistema en los buenos rendimientos. Contrariamente a lo que se discutió para la fase de contramovimiento, durante el impulso se obtuvieron buenos ajustes lineales en todos los grupos. Por lo tanto, se puede considerar que el sistema músculo-esquelético en su conjunto durante esta fase si se comporta de manera semejante a un modelo masa-resorte lineal (Auyang, Yen, & Chang, 2009; Biewener & Daley, 2007). Las diferencias en los valores de K_p -off obtenidos en nuestro estudio son concordantes con los resultados de Bobbert & Casius (2011), quienes utilizaron un modelo para analizar CMJ máximos y submáximos.

En base a lo anteriormente expuesto respecto a las diferencias encontradas para K_c y K_p -off y sus ajustes, considerando que la técnica de ejecución del CMJ implica una misma excursión relativa (desplazamiento del COM) en todos los saltos, podemos decir que la energía elástica acumulada tiene una importancia relativa respecto a la altura alcanzada. Nosotros observamos que contribuye a explicar en parte la diferencia de performance de los buenos saltos respecto al resto pero no la diferencia entre medianos y malos rendimientos y que además durante los buenos saltos el valor del ajuste lineal en el contramovimiento sugiere una mayor participación de factores activos.

En este trabajo además observamos que los saltos en los que se alcanza una altura mayor ($0,541 \pm 0,020$ m) tienen un tiempo de impulso corto ($0,230 \pm 0,045$ s) en el que se alcanza un valor de fuerza vertical significativamente mayor (2697 ± 900 N). Por su parte, los tiempos de la fase de contramovimiento no mostraron diferencias al comparar los buenos resultados con el resto de los saltos (tabla 2). Por lo tanto, podemos sugerir que las acciones que ocurren durante la fase de contramovimiento y que contribuyen durante el empuje no dependen del tiempo. El tiempo de la fase de transición fue significativamente mayor (0.033 ± 0.005 s) en los saltos con malos rendimientos, pero no hubieron diferencias en este valor entre buenos y medianos rendimientos. Estos resultados en su conjunto sugieren que a veces los cambios de altura de un CMJ podrían reflejar acciones diferentes. Por ejemplo, la contribución de la energía elástica puede depender de la duración del período de transición entre las fases excéntrica y concéntrica como plantean Bobbert, Huijing, & Van Ingen Schenau (1987).

Con respecto a la importancia de la máxima fuerza vertical alcanzada en el impulso. Algunos han marcado su relevancia en la altura alcanzada (Dal pupo et al., 2012; McLellan, Lovell, & Gass, 2011) y otros han relativizado su importancia (Bermúdez & Fábrica, 2014; Dowling & Vamos, 1993). En este estudio observamos que puede ser uno de los factores determinantes para que el salto sea bueno, pero que considerado de forma aislada no tiene gran importancia si consideramos las diferencias entre los saltos medianos y malos. Si analizamos conjuntamente los resultados de la fuerza con T_c y T_{p-off} , podemos inferir que el papel de la tasa de desarrollo de la fuerza y el tiempo de ocurrencia de F_{max} en relación con el despegue son importantes.

En conclusión nuestros resultados sugieren que para lograr buenos desempeños en un CMJ el cuerpo debe tener un comportamiento rígido y realizar una rápida fase de transición y empuje. No obstante, la contribución de la energía elástica no siempre tiene el mismo peso en el resultado y es posible que la manifestación de la fuerza evaluada a través de un CMJ dependa del rendimiento y esté asociada con las relaciones temporales de las fases del

salto. Por lo tanto, creemos que las capacidades evaluadas mediante la altura alcanzada en este salto y lo que sugiere el índice elástico definido por Bosco deben ser cuidadosamente considerados en futuros estudios.

REFERENCIAS

- Aboodarda, S. J., Yusof, A., Abu Osman, N. A., Thompson, M. W., & Mokhtar, A. H. (2013). Enhanced performance with elastic resistance during the eccentric phase of a countermovement jump. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *8*(2), 181-187.
- Anderson, F. C., & Pandy, M. G. (1993). Storage and utilization of elastic strain energy during jumping. *Journal of Biomechanics*, *26*(12), 1413-1427.
- Auyang, A. G., Yen, J. T., & Chang, Y.-H. (2009). Neuromechanical stabilization of leg length and orientation through interjoint compensation during human hopping. *Experimental Brain Research*, *192*(2), 253-264. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1582-7>
- Bermúdez, G., & Fábrica, G. (2014). Factores determinantes del rendimiento cuando el Counter Movement Jump se realiza en fatiga aguda. *Revista Brasileira de Cineantropometria e Desempenho Humano*, *16*(3), 316-324. <https://doi.org/10.5007/1980-0037.2014v16n3p316>
- Biewener, A. A., & Daley, M. A. (2007). Unsteady locomotion: integrating muscle function with whole body dynamics and neuromuscular control. *The Journal of experimental biology*, *210*(Pt 17), 2949-2960. <https://doi.org/10.1242/jeb.005801>
- Bobbert, M. F., Gerritsen, K. G., Litjens, M. C., & Van Soest, A. J. (1996). Why is countermovement jump height greater than squat jump height? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *28*(11), 1402-1412.
- Bobbert, M. F., Huijing, P. A., & Van Ingen Schenau, G. J. (1987). Drop jumping. I. The influence of jumping technique on the biomechanics of jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *19*(4), 332-338.
- Bobbert, M. F., & Richard Casius, L. J. (2011). Spring-like leg behaviour, musculoskeletal mechanics and control in maximum and submaximum height human hopping. *Philosophical Transactions of the Royal Society*

- B: *Biological Sciences*, 366(1570), 1516-1529.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0348>
- Bosco, C. (2007). *A força muscular: aspectos fisiológicos e aplicações práticas*. São Paulo: Phorte.
- Bosco, C., Komi, P. V., & Ito, A. (1981). Prestretch potentiation of human skeletal muscle during ballistic movement. *Acta Physiologica Scandinavica*, 111(2), 135-140. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1981.tb06716.x>
- Brughelli, M., & Cronin, J. (2008). A review of research on the mechanical stiffness in running and jumping: methodology and implications. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 18(4), 417-426. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2008.00769.x>
- Dal pupo, J., Detanico, D., & Dos Santos, S. G. (2012). Parâmetros cinéticos determinantes do desempenho nos saltos verticais. *Revista Brasileira de Cineantropometria e Desempenho Humano*, 14(1). <https://doi.org/10.5007/1980-0037.2012v14n1p41>
- Dowling, J. J., & Vamos, L. (1993). Identification of kinetic and temporal factors related to vertical jump performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 9(2), 95-110. <https://doi.org/10.1123/jab.9.2.95>
- Granata, K. P., Padua, D. A., & Wilson, S. E. (2002). Gender differences in active musculoskeletal stiffness. Part II. Quantification of leg stiffness during functional hopping tasks. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 12(2), 127-135.
- Komi, P. V., & Bosco, C. (1978). Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Medicine and Science in Sports*, 10(4), 261-265.
- Kubo, K., Morimoto, M., Komuro, T., Tsunoda, N., Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2007). Influences of tendon stiffness, joint stiffness, and electromyographic activity on jump performances using single joint. *European Journal of Applied Physiology*, 99(3), 235-243. <https://doi.org/10.1007/s00421-006-0338-y>

- McLellan, C. P., Lovell, D. I., & Gass, G. C. (2011). The role of rate of force development on vertical jump performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(2), 379-385. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181be305c>
- McMahon, T. A., & Cheng, G. C. (1990). The mechanics of running: how does stiffness couple with speed? *Journal of Biomechanics*, 23 Suppl 1, 65-78.
- Rodacki, A. L., Fowler, N. E., & Bennett, S. J. (2001). Multi-segment coordination: fatigue effects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(7), 1157-1167.
- Serpell, B. G., Ball, N. B., Scarvell, J. M., & Smith, P. N. (2012). A review of models of vertical, leg, and knee stiffness in adults for running, jumping or hopping tasks. *Journal of Sports Sciences*, 30(13), 1347-1363. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.710755>
- Struzik, A., & Zawadzki, J. (2013). Leg stiffness during phases of countermovement and take-off in vertical jump. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 15(2), 113-118.
- Struzik, A., Zawadzki, J., & Rokita, A. (2016). Leg stiffness and potential energy in the countermovement phase and the CMJ jump height. *Biomedical Human Kinetics*, 8(1), 33-44. <https://doi.org/10.1515/bhk-2016-0006>
- Vittori, C. (1990). El entrenamiento de la fuerza para el sprint. *Red: revista de entrenamiento deportivo*, 4(3), 2-8.