

Análisis biomecánico de la carrera tras 40km de bici en competición

A. CALAMEJÍAS, SV. VEIGA FERNÁNDEZ, E. NAVARRO CABELLO.
Laboratorio de Biomecánica, INEF-UPM. Madrid

Resumen

En triatlón, una de las partes más duras y estratégicas del deporte es la transición del ciclismo a la carrera a pie. El principal problema de los estudios analizados es que han sido llevados a cabo en laboratorios, donde la poca especificidad de los tests utilizados representan un handicap. Tanto las variables fisiológicas (lactato y frecuencia cardiaca) como la velocidad muestran diferencias considerables entre los valores obtenidos en estudios de laboratorio y los obtenidos en competición. Por otro lado ya hay quien reclama la necesidad de realizar este tipo de estudios en situación real de competición, donde los triatletas se encuentran motivados plenamente y el esfuerzo es totalmente específico y máximo [1].

Por tanto, los objetivos del presente estudio fueron: a) analizar si existen diferencias en la biomecánica de carrera en comparando los valores obtenidos en competición con los de los estudios realizados en laboratorios; b) analizar si la eficiencia de carrera desciende en las primeras vueltas debido al ciclismo previo; y c) examinar las posibles diferencias que pudieran existir entre hombres y mujeres.

Los resultados muestran diferencias significativas ($p < 0,05$) entre géneros para la mayoría de las variables estudiadas. Asimismo, existen diferencias significativas ($p < 0,05$) para la longitud de ciclo y la velocidad de los chicos entre vueltas.

Palabras clave: Triatlón, transición bici-carrera, análisis cinemático 2D, DLT.

Abstract

The most strategic part of a triathlon is the cycle-run transition. According to the references found in the bibliography it is important to remark that authors have used non-specific tests, because physiological (lactate and heart rate) and velocity variables have shown considerable differences between the values obtained from laboratory-based studies and those from real competition. However, there is a need to perform these kind of studies in competition, when the triathletes are highly motivated and the effort is maximum [1]

Therefore, the objectives of the present study were: A) to analyze the kinematic changes in running pattern comparing competition with laboratory-based studies; B) to analyse if the running efficiency drops at the first laps due to the previous cycling; C) to examine the possible differences between men and women.

The results show significant differences ($p < 0.05$) between men and women in many of the variables studied. Also, significant differences ($p < 0.05$) were found in men's stride length and velocity between laps.

Keywords: Triathlon, cycle-run transition, 2D kinematic analysis, DLT.

Correspondencia:

Dr. Antonio Cala Mejías

Laboratorio de Biomecánica Deportiva, INEF

Madrid. C/ Martín Fierro s/n (Ciudad Universitaria)

28080 Madrid

Introducción

Se ha demostrado que la carrera después del ciclismo presenta respuestas fisiológicas específicas [1][2], que inducen a una percepción de malestar durante los primeros minutos de carrera, lo cual puede disminuir el rendimiento [3]. La pérdida de economía de carrera depende directamente del nivel del triatleta [4][5]; además, dicha pérdida será mayor en los primeros metros e irá mejorándose a lo largo de la competición.

En cambio, estudios realizados al respecto no encontraron diferencias significativas en la biomecánica de carrera comparando los 10 km al final del triatlón con 10km de carrera sin fatiga previa [2] [5].

Por otro lado, los estudios que encontraron diferencias fueron sólo en ciertas variables y no de forma concluyente como los casos de: Elliot[6], en la posición del pie y de la pierna en el aterrizaje; Williams [7], en la longitud de zancada y máxima flexión de rodilla durante el vuelo; y Morgan [8], en el ángulo del tobillo en el despegue.

A la vista de la situación actual, se oyen voces que reclaman la necesidad de realizar este tipo de estudios en competición, donde los triatletas se

encuentran motivados plenamente y el esfuerzo es totalmente específico y máximo [1]. El principal problema de los estudios analizados es la poca especificidad de los test que utilizan, ya que si observamos tanto los valores de lactato como de frecuencia cardiaca y velocidad, están muy por debajo de la realidad competitiva de un triatlón de alto nivel (*tabla 1 y 2*).

Por lo tanto, los objetivos del presente estudios son:

1. Analizar si existen diferencias en la biomecánica de carrera en comparando los valores obtenidos en competición con los de los estudios realizados en laboratorios

2. Analizar si la eficiencia de carrera desciende en las primeras vueltas debido al ciclismo previo

3. Examinar las posibles diferencias que pudieran existir entre hombres y mujeres.

Materiales y métodos

La muestra la formaron 10 hombres y 9 mujeres, participantes en la Copa del Mundo de Triatlón: Madrid 2006 en la categoría élite. Se seleccionaron aquellos participantes que completaron entre los 10 primeros clasificados el segmento de ciclismo.

VARIABLES	Millet et al. (2000)	Hue et al. (1998)	Hauswirth et al. (1996)
Lactato (mmol/L)	5.18 (SD = 2.61)	No lo midieron	5.2 (SD = 0.41)
Frecuencia Cardiaca (lat/m)	175 (SD = 5.2)	177 (SD = 7)	172 (SD = 4.8)

Tabla 1. Se expresan los valores de concentración de lactato en sangre (mmol/L) y de frecuencia cardiaca (lat/min) referentes al segmento de carrera posterior al ciclismo de los diferentes estudios

VELOCIDAD tiempo por km	2006: MADRID BG: TRIATHLON WORLD CUP	Palazzetti et al. (2004)	Millet et al (2001)	Hauswirth et al. (1996)	Quigley & Richards (1996)
Hombres	3min 6seg.	5min	3min 15seg	4min 30seg	3min 43seg
Mujeres	3min 35seg	Mujeres no estudiadas	4min	Mujeres no estudiadas	Mujeres no estudiadas

Tabla 2. Muestra las velocidades registradas en los diferentes estudios. Existe una diferencia evidente entre la Copa del Mundo de Madrid 2006 y el resto de estudios realizados en laboratorios

Para la filmación de los triatletas se empleó una cámara de vídeo JVC GY-DV500E, la cual fue colocada de forma perpendicular a la dirección de la carrera de los deportistas, y a unos 200 metros de la zona de transición, en una zona donde la carretera formaba una línea recta. El recorrido de los 10 kilómetros se realizaba en 4 vueltas de 2,5km, con lo que los triatletas pasaban en cuatro ocasiones por el lugar de filmación. La frecuencia de muestreo elegida fue de 50 herzios, valor consecuente con la bibliografía consultada [9] [10]

El análisis de la cinemática de los deportistas consistía en un análisis en el plano de movimiento utilizando la técnica experimental de la fotogrametría 2D. Se ha demostrado que no existen diferencias significativas entre analizar las variables cinemáticas de un hemicuerpo y de otro [1], por lo que se eligió situar la cámara a la derecha de los participantes debido a las facilidades del entorno en cuanto a espacio y luminosidad.

Como el ancho de la calzada era de unos 5 metros, y todos los participantes no corrían por la misma línea, se utilizaron 5 sistemas de calibración distintos y, en función de la trayectoria del triatleta, se elegía el idóneo para cada caso. El citado sistema de calibración, constaba de 7 metros de ancho (medidos sobre la calzada mediante una cinta métrica) y 2 metros de alto. Sobre la cinta métrica, se colocaba cada 1 metro de distancia una barra de 2 metros (perteneciente a un sistema de calibración en forma de cubo, fabricado por el instituto de biomecánica de Valencia) unida a un calibre, de forma que nos aseguraba su perpendicularidad en todo momento. Por lo tanto, obteníamos 5 sistemas de calibración distintos con 14 puntos conocidos en el plano (Figura 1).

Para el análisis de la biomecánica de carrera se empleó un modelo basado en el modelo de Klausser. 10 puntos articulares fueron seleccionados para el análisis: Cadera, rodilla, tobillo, talón y puntera (pierna derecha e izquierda).

El análisis de los fotogramas (digitalización) fue llevado a cabo con el software «Photo23D» El sistema de calibración también se digitalizó y algoritmos basados en la DLT-2D [11] fueron usados para convertir las coordenadas de la pantalla (en píxeles) en coordenadas reales (en metros).

Esas coordenadas fueron filtradas usando funciones spline de quinto orden con el fin de suavizar dichas coordenadas. Además, el cálculo del error sobre distancias en el plano de movimiento, realizado a través de un objeto de dimensiones conocidas, arroja un error por RMS de 3%.

Una vez halladas las coordenadas de los puntos anatómicos, se calcularon todas las variables cinemáticas que se resumen en la *tabla 3*.

En cuanto al tratamiento estadístico de los datos, se utilizó el software SPSS versión 11.5 y se realizó una ANOVA de dos factores con medidas repetidas donde el factor intra-sujeto fue «vuelta»(vuelta 1, vuelta 2, vuelta 3 y vuelta 4), mientras que el factor inter-sujeto fue «género»(chico-chica) con ajustes para comparaciones múltiple de Bonferroni.

Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos de cada una de las variables para los chicos y las chicas en cada una de las vueltas (*tabla 4 y 5*).

En muchas de las variables analizadas existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre chicos y

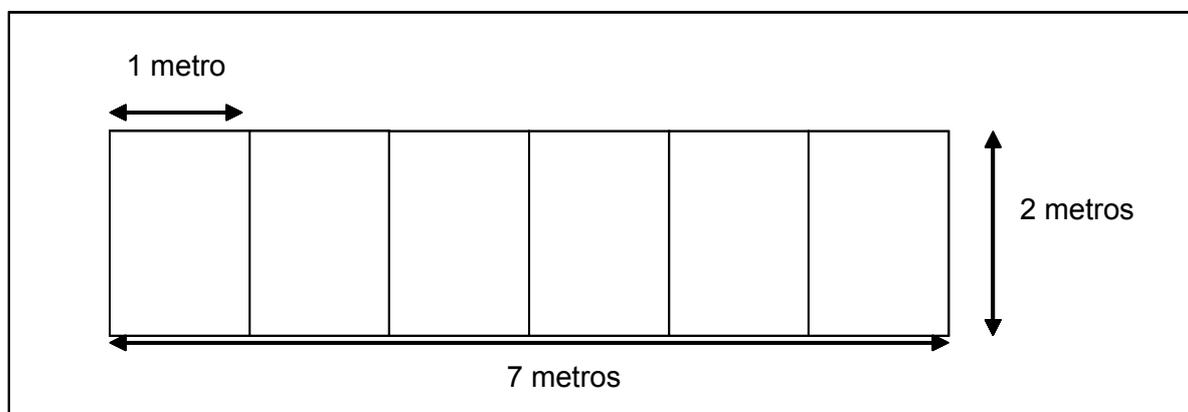


Figura 1. Vista sagital de cada sistema de calibración usado

chicas, como son el caso de la longitud de zancada, frecuencia de zancada, altura de la cadera, distancia de la cadera al apoyo, ángulo del tobillo apoyado y del tobillo libre en el despegue y ángulos entre muslos en el apoyo.

En el caso de la longitud de zancada se observa una tendencia a disminuir con el paso de las vueltas, siendo más acentuado el descenso en chicos (diferencias significativas entre la vuelta 1 y la vuelta 4, $p < 0,05$) que en chicas (no significativo).

De igual manera, en el caso de la distancia de la cadera al apoyo se observa una ligera tendencia a disminuir, pero no de forma significativa. Por el contrario, la frecuencia de zancada parece decrecer con el paso de las vueltas y aumentar en la última tanto en chicos como en chicas, pero no de forma significativa.

Discusión

Los resultados obtenidos en el presente estudio llevado a cabo en una competición de máximo nivel internacional, difieren mucho de los resultados obtenidos por otros estudios realizados en laboratorios. El principal problema radica, en la poca especificidad de los test que han sido utilizados en esos estudios. Tanto las variables fisiológicas (lactato y frecuencia cardiaca) como la velocidad están muy lejos de simular un triatlón de competición (Tabla 1 y 2).

Hausswirth [12] describió una pérdida en la economía de carrera al final de un triatlón simulado en laboratorio, solo que las velocidades alcanzadas por los sujetos distan enormemente de la realidad de un triatlón de competición. En su estudio, los

<i>Frecuencia de zancada</i>	Se mide el tiempo desde el primer contacto del pie con el suelo hasta que vuelve a contactar el mismo pie.
<i>Longitud de zancada</i>	Se mide la distancia desde el primer contacto del pie con el suelo hasta que vuelve a contactar el mismo pie.
<i>Altura de la cadera</i>	Representa la media de la altura de la cadera durante un ciclo completo (2 zancadas).
<i>Oscilación vertical del vértex</i>	Representa la media de la oscilación vertical del vértex durante un ciclo completo (2 zancadas).
<i>Distancia de la cadera al apoyo</i>	Se mide la distancia horizontal desde la cadera al apoyo en el aterrizaje de la pierna.
<i>Ángulo tobillo apoyado en el despegue</i>	Se mide el ángulo del tobillo que está apoyado en el suelo en el último instante del despegue.
<i>Ángulo tobillo libre en el despegue</i>	Se mide el ángulo del tobillo que está en el vuelo en el último instante del despegue.
<i>Ángulo rodilla apoyada en el despegue</i>	Se mide el ángulo de la rodilla de la pierna apoyada en el suelo en el último instante del despegue.
<i>Ángulo rodilla libre en el despegue</i>	Se mide el ángulo de la rodilla de la pierna libre en el último instante del despegue.
<i>Ángulo muslos en el apoyo</i>	Se mide el ángulo entre muslos en el aterrizaje de la pierna.

Tabla 3. Variables cinemáticas medidas en el estudio

sujetos experimentales realizaban el segmento de carrera a pie a una media de 4min 30 seg./kilómetro, cuando en la competición analizada, los 10 chicos analizados presentaron una media de 3min 6seg/kilómetro y las 9 chicas una de 3min 35seg/kilómetro.

En un caso parecido, Quigley [1] demostró que la percepción de malestar asociada con la transición del ciclismo a la carrera no estaba relacionada con modificaciones en la biomecánica de carrera, pero el escaso nivel deportivo de los sujetos hace que los resultados no sean concluyentes [5].

Por otro lado, Brick [13], recomienda terminar el segmento de ciclismo con un desarrollo corto, una cadencia alta y empezar a correr con una

frecuencia de zancada baja y buena amplitud de paso, lo que estará determinado por las características de cada triatlón. En otro estudio muy interesante, Gottschall [14], comprobó como una alta cadencia al terminar el segmento de ciclismo desembocaba en una frecuencia de zancada elevada en los primeros metros de la carrera a pie, debido al fenómeno conocido como «perseveración»; es decir, que al finalizar actividades rítmicas realizadas durante un periodo largo de tiempo se tiende a continuar de forma involuntaria con el mismo patrón de frecuencia [15]. Este fenómeno podría explicar los valores bajos de frecuencia de ciclo y su tendencia a disminuir en las primeras vueltas obtenidos en el presente

	GENERO	LONG. ZANCADA		FREC. ZANCADA		DIST. CADERA APOYO	
		Media	Desv. típ.	Media	Desv. típ.	Media	Desv. típ.
VUELTA 1	Chicos	3,78	0,17	92,40	3,07	0,34	0,06
	Chicas	3,11	0,13	97,20	2,99	0,19	0,04
	Total	3,46	0,37	94,67	3,84	0,27	0,09
VUELTA 2	Chicos	3,62	0,43	91,04	3,64	0,31	0,05
	Chicas	3,07	0,43	94,74	5,81	0,24	0,13
	Total	3,36	0,50	92,79	5,02	0,28	0,10
VUELTA 3	Chicos	3,61	0,29	90,21	3,38	0,30	0,04
	Chicas	3,06	0,12	94,52	3,53	0,19	0,04
	Total	3,35	0,36	92,25	4,02	0,25	0,07
VUELTA 4	Chicos	3,43	0,34	90,71	2,69	0,28	0,04
	Chicas	3,00	0,18	95,88	3,85	0,16	0,03
	Total	3,23	0,35	93,16	4,15	0,22	0,07

Tabla 4. Resultados obtenidos de las variables: longitud y frecuencia de zancada y distancia de la cadera al apoyo

estudio. Ya que gran parte del segmento de ciclismo de la competición se realizó en subida, con lo que la cadencia de pedaleo no fue demasiado elevada.

El principal hallazgo de este estudio en competición es la pérdida de eficiencia de carrera a lo largo del segmento de carrera, posiblemente debido a la fatiga. Se dieron diferencias significativas entre la vuelta 1 y la 4 para la longitud de zancada en chicos ($p < 0,05$). Por lo que el ciclismo previo parece no afectar a la posterior carrera a pie. La razón que podría explicar esta situación es la técnica, la cual está influida por muchos factores. Cada deportista tiene sus puntos fuertes y débiles, pero todos ellos pueden desembocar en una misma variable como la longitud de ciclo, que es la que nos muestra las diferencias significativas.

Se ha sugerido la posibilidad de que las respuestas específicas en la transición del ciclismo a la carrera a pie de un triatlón vengan dadas por variaciones en fluidos como respuestas al cambio de posición de un segmento a otro [16]. Los valores obtenidos en las distintas variables difieren ligeramente de los obtenidos por otros investigadores. Hausswirth [10], obtuvo ángulos de $40,4^\circ$ en la rodilla apoyada en el despegue (rodilla

totalmente extendida, 0°), mientras que en el presente estudio encontramos valores de $20,2^\circ$. Quigley [1], obtuvo unos valores de longitud de zancada de 3,06m, cuando en este caso la media de chicos y chicas fue de 3,35m. Probablemente estas diferencias se deban al nivel de los sujetos, ya que la técnica de carrera en los triatletas de alto nivel sea seguramente muy superior al resto. Vandewalle [17], sugiere que distintas partes del bíceps femoral permanecen activas tanto en la extensión como en la flexión de rodilla durante el ciclismo, con lo que una fatiga previa del músculo puede actuar en perjuicio del segmento de carrera posterior.

Por último, encontramos diferencias significativas ($p < 0,05$) entre géneros para la longitud de zancada, frecuencia de zancada, distancia de la cadera al apoyo, ángulo del tobillo apoyado y del tobillo libre en el despegue y ángulos entre muslos en el apoyo. Algunas de estas variables pueden estar influenciadas por la estatura (longitud de zancada), mientras que las diferencias en las variables angulares pueden deberse a las diferencias en fuerza de hombres y mujeres. Sin embargo, nuevas investigaciones son necesarias para aclarar estas diferencias entre géneros.

	GENERO	TOBILLO AP. DESPEGUE		TOBILLO LIBRE DESPEGUE		RODILLA AP. DESPEGUE		RODILLA LIBRE DESPEGUE		MUSLOS APOYO	
		Media	Dev. típ.	Media	Dev. típ.	Media	Dev. típ.	Media	Dev. típ.	Media	Dev. típ.
VUELTA 1	Chicos	110,90	6,07	83,94	5,05	158,83	6,78	101,27	7,53	46,79	7,49
	Chicas	108,69	6,98	84,97	5,54	163,67	6,91	112,45	10,66	28,93	9,81
	Total	109,85	6,43	84,43	5,17	161,12	7,10	106,57	10,57	38,33	12,44
VUELTA 2	Chicos	112,99	9,64	79,59	8,05	155,58	7,06	111,80	7,82	49,50	6,71
	Chicas	98,07	27,34	75,61	12,93	158,02	14,73	120,64	19,22	34,46	4,79
	Total	105,92	20,91	77,71	10,53	156,74	11,09	115,99	14,67	42,38	9,61
VUELTA 3	Chicos	108,11	9,50	108,11	9,50	162,14	9,08	109,92	4,86	43,03	9,02
	Chicas	107,28	11,83	81,46	5,87	162,36	5,93	110,77	10,74	35,99	8,03
	Total	107,71	10,37	95,48	15,73	162,25	7,54	110,33	7,96	39,70	9,08
VUELTA 4	Chicos	109,03	12,10	82,79	7,71	155,56	6,33	112,69	8,04	46,08	9,37
	Chicas	101,54	8,63	79,44	7,04	160,70	6,65	107,04	9,43	35,29	7,92
	Total	105,48	11,00	81,20	7,40	157,99	6,83	110,01	8,96	40,97	10,12

Tabla 5. Resultados obtenidos de las variables: ángulo del tobillo apoyado y libre en el despegue, ángulo de la rodilla apoyada y libre en el despegue y ángulo entre muslos en el apoyo

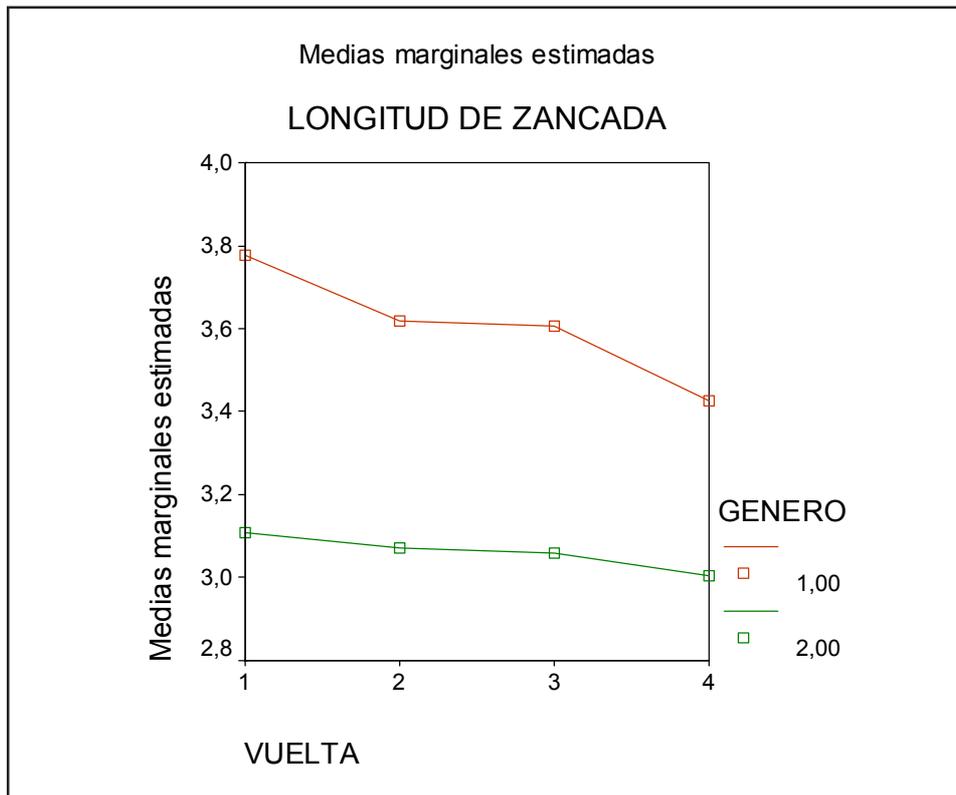


Figura 2. La diferencia entre las medias de las vueltas 1 y 4 es significativa ($p < 0,05$) para los chicos (en rojo)

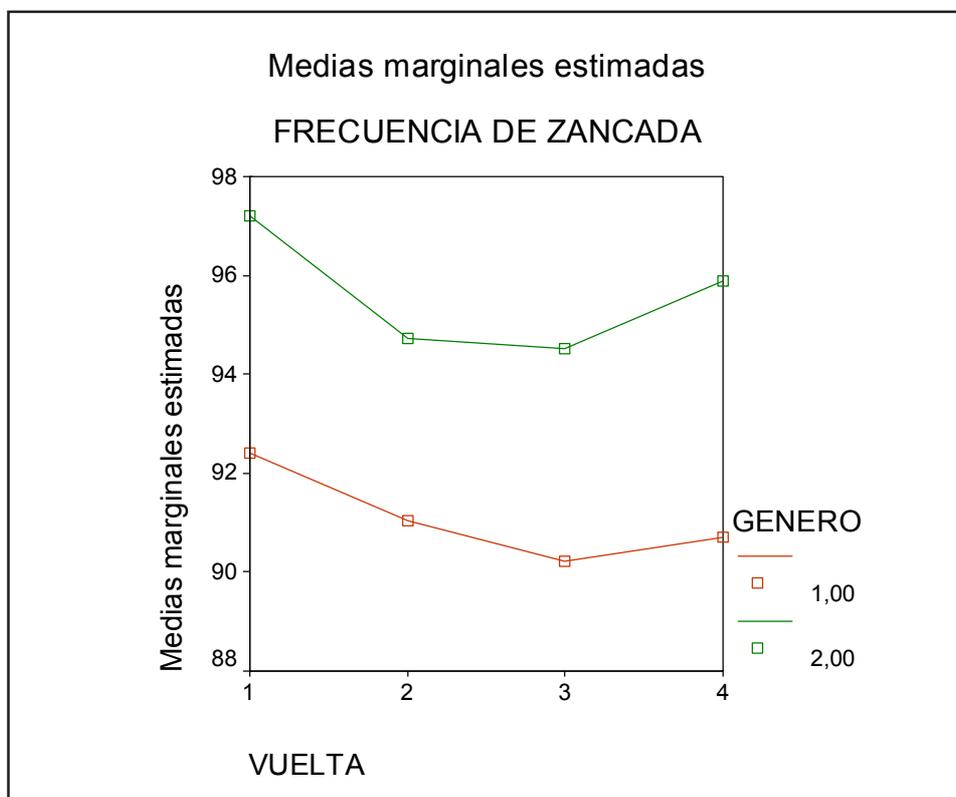


Figura 3. Las diferencias de las medias entre vueltas no es significativa tanto para los chicos como las chicas

En definitiva, podríamos concluir afirmando:

- Los resultados obtenidos en competición difieren en gran medida de los resultados de los estudios realizados en laboratorio. Los valores de frecuencia y longitud de ciclo muestran esa diferencia, probablemente debido al nivel de los triatletas y a las condiciones de una competición de alto nivel.

- La variación de la longitud de zancada a lo largo del segmento de la carrera tiende a disminuir de forma significativa ($p < 0,05$), probablemente debido a la fatiga. Por lo que el ciclismo previo parece no afectar en gran medida a la biomecánica de la carrera posterior.

- Existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre chicos y chicas en determinados parámetros cinemáticos de la carrera como son la longitud de zancada, frecuencia de zancada, altura de la cadera, distancia de la cadera al apoyo, ángulo del tobillo apoyado y del tobillo libre en el despegue y ángulos entre muslos en el apoyo.

Bibliografía

1. **Quigley, E.J. y Richards J.G.** The effects of cycling on running mechanics. *Journal of Applied Biomechanics*, 1996; 12:470-479.
2. **Hue, O., Le Gallais, D., Chollet, D., Boussana, A y Préfaut, C.** The influence of prior cycling on biomechanical and cardiorespiratory response profiles during running in triathletes. *European Journal of Applied Physiology*, 1998; 77:98-105.
3. **Hue, O., Le Gallais, D., Boussana, A., Galy, O., Chamari, K., Mercier, B. y Préfaut, C.** Catecholamine, blood lactate and ventilatory responses to multi-cycle run blocks. *Medicine & Science in Sport & Exercise*, 2000; 32:1582-1586.
4. **Millet G.P. y Veck. V.E.** Physiological and biomechanical adaptations to the cycle to run transition in Olympic triathlon: review and practical recommendations for training. *British Journal of Sport Medicine*, 2000; 34:384-390.
5. **Millet G.P., Millet, C.Y., Hofmann, M.D. y Candau, R.B.** Alterations in running economy and mechanics after maximal cycling in triathletes: Influence of performance level. *International Journal of Sport Medicine*, 2000; 21:127-132.
6. **Elliot, B.C. y Ackland, T.** Biomechanical effects of fatigue on 10000 meter running technique. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 1981; 52(2):160-166.
7. **Williams, K.R., Snow, R. y Agruss.** Changes in running kinematics with fatigue. *Journal of Applied Biomechanics*, 1991; 7:138-162.
8. **Morgan, D.W., Martin, P.E., Baldini, F.D. y Krahenbuhl, G.S.** Effects of a prolonged maximal run on running economy and running mechanics. *Medicine & Science in Sport & Exercise*, 1990; 22(6):834-840.
9. **Palazzetti, S., Margaritis, I., Guezennec, C.Y.** Swimming and cycling overloaded training in triathlon has no effect on running kinematics and economy. *International Journal of Sport Medicine*, 2005; 26 (3):193-199.
10. **Hausswirth, C., Bigard, A.X. y Guezennec, C.Y.** Relationships between running mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *International Journal of Sport Medicine*, 1997; 18:330-339.
11. **Abdel-Aziz, Y.I. & Karara, H.M.** Direct linear transformation from comparator coordinates into space coordinates in close range photogrammetry. In the American Society of Photogrammetry (Ed.), *Proceedings of the Symposium on close range photogrammetry*, 1971. P. 1-18
12. **Hausswirth, C., Bigard, A.X., Berthelot, M., Thomaidis, M. y Guezennec, C.Y.** Variability in energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *International Journal of Sport Medicine*, 1996; 17:572-579.
13. **Brick, M.** Short course training for an athlete with a cycling background. *Inside Triathlon*, 1996; 11:76.
14. **Gottschall, J.I. y Palmer, B.M.** The acute effects of prior cycling cadence on running performance and kinematics. *Medicine & Science in Sport & Exercise*, 2002; 34:1518-1522.
15. **Gurfinkel, V.S., Levik, Y.S., Kazennikov O.V. y Selionov, V.A.** Locomotor-like movements evoked by leg muscle vibrations in humans. *European Journal of Neuroscience*, 1998; 10:1608-1612.
16. **Wells, L.C., Stern, J.R., Kohrt, W.M. y Campbell, K.D.** Fluids shifts with successive running and bicycling performance. *Medicine & Science in Sport & Exercise*, 1987; 19:137-142.
17. **Vandewalle, H., Maton, B., Le Bozec, S. and Guerenbourg, G.** An electromyographic study of an all-out exercise on a cycle ergometer. *Arch Physiol Biochem* 1991; 99: 89-93.