

Criterios sobre la manifestación de las invariantes de la marcha en sujetos cubanos

View on the Manifestation of Gait Invariants in Cuban Subjects

Joyce Eduardo Taboada Díaz^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-0288-3663>

Tania Rodríguez Moliner¹ <https://orcid.org/0000-0001-6995-2948>

Carlos Díaz Novo² <https://orcid.org/0000-0003-1466-0969>

¹Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE.
Facultad de Ingeniería Mecánica. La Habana, Cuba.

²Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería Mecánica. Santiago de Cuba,
Cuba.

*Autor para la correspondencia: joyceetd77@gmail.com

RESUMEN

Introducción: Este artículo tiene como antecedentes los resultados de los estudios de la marcha en niños sanos y las bases para la determinación del patrón biomecánico de la marcha normal en niños cubanos.

Objetivo: Determinar la manifestación de las invariantes de la marcha en adultos cubanos que revelen tendencias que contribuyan a la caracterización del patrón biomecánico de la marcha.

Métodos: Se realizó una comparación de los datos cuantitativos que caracterizan las invariantes de la marcha, obtenidos en un laboratorio de captura de movimiento con sistema Vicon 3D. Esta comparación se realizó utilizando una muestra de tres sujetos adultos de diferentes edades, peso, estatura y sexo.

Resultados: Al elaborar el patrón de la marcha a la flexo-extensión de la rodilla y dorsiflexión y flexión plantar del tobillo se debe prestar mayor atención debido a las marcadas diferencias.

Conclusión: Los resultados obtenidos presentan similitudes en los rangos de valores con estudios realizados en poblaciones españolas y en ocasiones las diferencias en los parámetros fueron menores a 0,2⁰.

Palabras clave: marcha; parámetros de marcha; patrón de marcha; invariantes de la marcha; cinemática; cinética.

ABSTRACT

Introduction: This article is based on the results of gait studies in healthy children and the basis for determining the biomechanical pattern of normal gait in Cuban children.

Objective: To determine the manifestation of gait invariants in Cuban adults that reveal trends that contribute to the characterization of the biomechanical pattern of gait.

Methods: The quantitative data that characterize the gait invariants was compared to the data obtained in a motion capture laboratory with Vicon 3D system. To this end we used a sample of three adult subjects of different ages, weight, height, and sex.

Results: When developing the gait pattern to flexion-extension of the knee and dorsiflexion and plantar flexion of the ankle, greater attention should be paid due to the marked differences.

Conclusion: The results obtained show similarities in the ranges of values with studies carried out in Spanish populations and on occasions the differences in the parameters were less than 0.20.

Keywords: gait; gait parameters; gait pattern; gait invariants; kinematics; kinetics.

Recibido: 30/01/2021

Aceptado: 24/06/2021

Introducción

La marcha humana requiere de una relación estrecha entre las fuerzas producidas por los músculos, el rango de movimiento de las articulaciones y el sistema neuromotor.⁽¹⁾ Muchas de las variables que contribuyen a permitir la marcha han sido medidas y cuantificadas desde hace mucho tiempo. Estas incluyen la cinemática, la cinética, la actividad electromiográfica e incluso el costo de energía metabólica. Los estudios exhaustivos realizados sobre la marcha normal y patológica han permitido obtener una comprensión de los mecanismos biomecánicos utilizados para caminar y correr.⁽²⁾

Varios de estos mecanismos clave se relacionan con los métodos utilizados por el cuerpo para reducir el movimiento de arriba hacia abajo y de lado a lado tomando como referencia el centro de gravedad (CG) del cuerpo humano.^(3,4) Debido a su importancia fundamental para la biomecánica de la marcha, a estos mecanismos se les ha llamado las invariantes o determinantes de la marcha. Estos presentan dos objetivos principales: reducir el desplazamiento horizontal y el desplazamiento vertical del centro de gravedad, lo cual tributa a un menor gasto de energía en el proceso de la marcha.

Las invariantes de la marcha⁽⁵⁾ proponen un grupo de variables cinemáticas que ayudan a reducir el desplazamiento del (CG) del cuerpo, basado en la premisa de que los desplazamientos verticales y horizontales son enérgicamente costosos. Se pueden utilizar entonces los resultados de la captura de movimiento en un laboratorio, aprovechando los datos de la plataforma de fuerza y de las distintas cámaras para identificar con mayor exactitud las manifestaciones de las invariantes descritas por Inman.⁽⁵⁾

Para el análisis de marcha es necesario contar con un protocolo estandarizado que permita obtener los parámetros de interés de forma confiable y eficaz. Cada protocolo depende del tipo de paciente a evaluar, la configuración del laboratorio, los parámetros que se deseen obtener y la forma en que estos son presentados.⁽⁶⁾

El objetivo de este trabajo es determinar la manifestación de las invariantes de la marcha en adultos cubanos que revelen tendencias, las cuales contribuyan a la caracterización del patrón biomecánico de la marcha. De esta manera puede

servir como punto de partida para el análisis y diagnóstico de anomalías, tanto en la marcha normal como en la patológica.

Métodos

Se utilizó una muestra de tres sujetos, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1- Medidas antropométricas de los sujetos

Sujetos	Peso (Kg)	Talla (m)	Edad	Sexo
1	55	1.56	50	Femenino
2	70	1.7	60	Masculino
3	75	1.73	42	Masculino

Se realizó un estudio descriptivo a partir de tres capturas de movimiento en cada sujeto, utilizando un laboratorio 3D Vicon con 24 cámaras infrarrojas, cuatro cámaras digitales y sincronizado a cinco plataformas de fuerza Kistler y un equipo de electromiografía (EMG).

La selección de la muestra fue aleatoria, utilizándose 10 capturas validadas en cada una de las tres sesiones realizadas; a partir de ellas se determinó el patrón de marcha específico de cada sujeto. Se identificaron las invariantes de la marcha a partir del patrón definido.

Para la captura se utilizó el software Vicon nexus 2.9.0 y para el procesamiento de los resultados el *software* Vicon polygon 4.4.4. Se utilizó el método Helen Hyde con 18 marcadores, incluidos los marcadores medios para la determinación de los ejes de rotación de las articulaciones.

Análisis de datos

El desplazamiento del centro de gravedad, tanto en sentido vertical como horizontal, se efectúa gracias a los movimientos coordinados de los segmentos que conforman las extremidades inferiores, los determinantes de la marcha; estas

actúan para que la trayectoria que describe el CG se mantengan sin alteraciones abruptas,⁽⁵⁾ las cuales se describen a continuación:

- Rotación pélvica en el plano superior. Durante la marcha normal la pelvis gira unos 10° hacia derecha e izquierda. Esta rotación ocurre alternativamente en cada cadera, la cual pasa de una relativa rotación externa a una interna en la fase de apoyo.⁽⁷⁾
- Inclínación pélvica en el plano frontal: Durante la marcha en el plano frontal la cadera tiende a bascular ligeramente de un lado a otro tratando de mantener el CG sobre el pie que apoya. Fisiológicamente no debe ser mayor de 4-5°.⁽⁸⁾
- Flexión de rodilla: La rodilla se ubica en una discreta flexión en el momento en que el cuerpo pasa por encima de la pierna que apoya. Desde el momento que el fémur pasa de la fase de extensión durante el contacto del talón a la flexión, la rodilla que también se encontraba en extensión pasa a una flexión de 15-20° durante el apoyo plantar en el suelo; de no ser así, la cadera se elevaría exageradamente y con ello el CG con el consiguiente gasto energético.⁽⁹⁾
- Mecanismo de tobillo: Durante el momento de choque del talón la rodilla se flexiona contra una creciente contracción del cuádriceps y el pie realiza una flexión plantar contra la acción del tibial anterior ambos movimientos acortan la pierna y absorben el impacto producido por el choque del talón con el suelo.⁽¹⁰⁾
- Mecanismo del pie: De la misma manera que el mecanismo del tobillo acorta la pierna al inicio de la fase de apoyo, el antepié la alarga al final de la misma y a partir del despegue del talón la longitud útil de la pierna va aumentando a medida que el tobillo se mueve desde la dorsiflexión (extensión) a la flexión plantar (flexión).⁽¹¹⁾
- Desplazamiento lateral de la pelvis: Ello hace que las tibias se coloquen verticalmente, una cerca de la otra, disminuyendo la base de sustentación de 5-10 cm entre el centro de un talón al otro. De no existir esto, se produciría un gran desplazamiento lateral del cuerpo, pero gracias a lo comentado se suaviza dicho desplazamiento.⁽¹²⁾

Contando con las invariantes se determinaron los instantes a analizar durante el ciclo de la marcha, los cuales representan momentos decisivos en el complejo

proceso de marcha del ser humano. Estos puntos emanan de las fases y subfases del ciclo de marcha y se decidió comenzar en el contacto del talón y culminar en el nuevo contacto del talón.⁽¹¹⁾ Se realiza una representación de los puntos seleccionados en la trayectoria que describe una de estas invariantes (flexo-extensión de rodilla) como se aprecia en la figura 1.

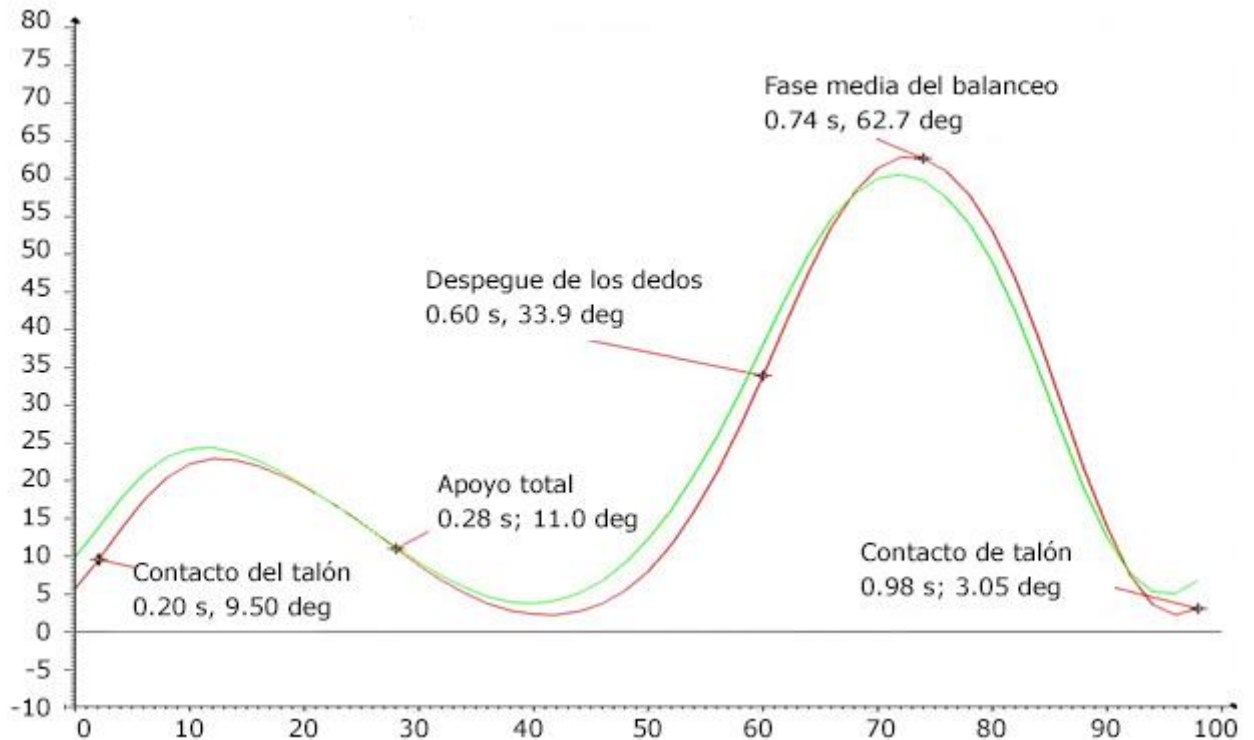


Fig. 1- Representación de los puntos seleccionados en la trayectoria que describe la flexo-extensión de rodilla. Ángulos (grados) vs. ciclo normalizado (porcentaje).

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Se llevó a cabo el procesamiento de las invariantes rotación pélvica en el plano superior (RP), inclinación pélvica en el plano frontal (IP), flexo-extensión de rodilla (FER), mecanismo de tobillo (MT) y desplazamiento lateral de la pelvis (DLP) a partir de las mediciones cuantitativas que se obtuvieron en el laboratorio empleado, así como en los puntos seleccionados del ciclo de la marcha.

La comparación se realizó entre las capturas de marcha realizada a los distintos sujetos. Se obtuvieron los valores de los parámetros que identificaron la marcha de cada individuo y se realizó el estudio. Se muestran los resultados obtenidos en el análisis de las invariantes de la marcha estudiadas en cada uno de los puntos del ciclo seleccionado para el estudio. Ver tablas 2 y 3, estas son las invariantes que reducen el movimiento vertical del centro de gravedad.

Tabla 2- Invariantes de la marcha en los puntos seleccionados

Contacto talón 0 %					
Invariantes de la marcha	Pierna	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Diferencia entre valor Máx. y Mín.
FER	Izquierda	7.19 ± 2.09	12.00 ± 1.13	5.98 ± 1.08	6.02
	Derecha	9.72 ± 3.48	14.70 ± 2.69	9.85 ± 0.70	4.98
MT	Izquierda	-10.36 ± 4.18	-0.57 ± 0.82	-1.04 ± 0.52	-9.79
	Derecha	-8.34 ± 1.91	-7.09 ± 3.41	1.97 ± 1.03	10.31
IP	Izquierda	-0.81 ± 1.43	3.22 ± 0.94	3.31 ± 0.40	4.12
	Derecha	1.04 ± 1.23	5.23 ± 0.08	4.28 ± 0.54	4.19
RP	Izquierda	1.32 ± 0.51	9.85 ± 0.79	5.66 ± 1.22	8.53
	Derecha	2.98 ± 0.47	6.52 ± 1.03	7.75 ± 1.47	4.77
Apoyo total 28 %					
Invariantes de la marcha	Pierna	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Diferencia entre valor Máx. y Mín.
FER	Izquierda	9.09 ± 2.43	15.25 ± 0.20	10.88 ± 1.33	5.16
	Derecha	13.67 ± 3.42	21.40 ± 1.69	11.73 ± 0.74	8.67
MT	Izquierda	2.38 ± 4.27	10.54 ± 1.64	9.50 ± 0.84	8.16
	Derecha	5.52 ± 1.60	9.82 ± 2.65	11.79 ± 0.70	5.27
IP	Izquierda	0.72 ± 1.14	-2.80 ± 0.20	-0.32 ± 0.61	3.51
	Derecha	4.03 ± 1.27	0.44 ± 0.97	0.08 ± 0.54	2.95
RP	Izquierda	1.06 ± 0.51	0.24 ± 0.45	-1.72 ± 1.33	2.77
	Derecha	2.65 ± 0.44	-3.18 ± 0.9	0.39 ± 0.90	4.83
Despegue de los dedos 60%					
Invariantes de la marcha	Pierna	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Diferencia entre valor Máx. y Mín.
FER	Izquierda	37.23 ± 3.69	40.65 ± 3.04	34.61 ± 1.87	6.04
	Derecha	37.20 ± 3.72	41.65 ± 0.91	37.85 ± 1.96	4.45

MT	Izquierda	-14.27 ± 1.19	-12.65 ± 1.48	-4.49 ± 1.48	-9.77
	Derecha	-11.03 ± 0.44	-17.85 ± 5.15	-6.37 ± 1.42	-11.47
IP	Izquierda	-6.23 ± 1.05	-8.86 ± 0.51	-6.03 ± 0.55	-2.82
	Derecha	-2.89 ± 1.15	-6.80 ± 0.94	-5.52 ± 0.38	3.9
RP	Izquierda	-2.60 ± 0.34	-3.82 ± 1.04	-6.33 ± 1.19	-3.72
	Derecha	-0.88 ± 0.12	-7.04 ± 0.31	-3.32 ± 1.03	-6.15

FER: Flexo-extensión de rodilla.
 MT: mecanismo de tobillo.
 IP: inclinación pélvica.
 RP: Rotación pélvica.
 Unidad de medida: Grados.

Tabla 2- Continuación

Fase Media Balanceo 74 %					
Invariantes de la marcha	Pierna	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Diferencia entre valor Máx. y Mín.
FER	Izquierda	68.60 ± 2.50	63.30 ± 4.38	62.88 ± 1.20	5.72
	Derecha	68.13 ± 2.77	64.10 ± 0.57	61.14 ± 1.24	6.99
MT	Izquierda	-13.57 ± 4.47	-0.52 ± 1.94	-3.42 ± 0.95	13.05
	Derecha	-12.33 ± 2.10	-6.05 ± 1.92	-1.50 ± 0.46	-10.83
IP	Izquierda	-6.04 ± 1.22	-3.51 ± 0.55	-3.06 ± 0.72	-2.98
	Derecha	-2.68 ± 1.22	-0.86 ± 0.23	-2.23 ± 0.28	-1.82
RP	Izquierda	-3.72 ± 0.56	0.97 ± 0.63	-2.64 ± 0.72	4.69
	Derecha	-1.83 ± 0.44	-2.50 ± 0.44	-0.42 ± 1.01	-2.08

Contacto del talón 100 %					
Invariantes de la marcha	Pierna	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Diferencia entre valor Máx. y Mín.
FER	Izquierda	7.12 ± 2.31	12.20 ± 1.27	5.88 ± 1.17	6.32
	Derecha	9.70 ± 3.70	14.50 ± 2.83	10.03 ± 0.71	4.8
MT	Izquierda	-10.49 ± 4.10	-0.51 ± 0.79	-1.20 ± 0.91	-9.98
	Derecha	-8.26 ± 2.04	-6.93 ± 3.93	2.39 ± 0.34	10.65
IP	Izquierda	-0.95 ± 1.09	3.08 ± 1.06	3.22 ± 0.52	4.17
	Derecha	1.02 ± 1.25	5.07 ± 0.33	3.24 ± 0.48	4.05
RP	Izquierda	1.33 ± 0.09	9.60 ± 0.87	5.55 ± 1.20	8.27
	Derecha	3.17 ± 0.29	6.46 ± 1.37	6.85 ± 1.17	3.68

FER: Flexo-extensión de rodilla.
 MT: Mecanismo de tobillo.
 IP: Inclinación pélvica.
 RP: Rotación pélvica.
 Unidad de medida: Grados.
 Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3 se muestran los resultados del desplazamiento lateral de la pelvis encargada de minimizar el movimiento horizontal del centro de gravedad.

Tabla 3- Desplazamiento lateral de la pelvis (DPL). Ciclo completo

Invariantes de la marcha	Pierna	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Diferencia entre valor Máx. y Mín.
DLP	Izquierda	46,71 ± 12,33	74,97 ± 12,14	48,80 ± 8,31	28,26
	Derecha	46,67 ± 12,12	78,47 ± 10,33	50,76 ± 9,16	32,17

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

Como se muestra en los datos se aprecian los valores del parámetro analizado de cada una de las articulaciones, tanto de la pierna derecha como de la pierna izquierda, proporcionado por el *software*.

En el apoyo del talón al inicio del ciclo la mayor diferencia en todas las mediciones realizadas se observa en la dorsiflexión-plantiflexión del tobillo, es en la pierna derecha donde se concentra la mayor diferencia, alrededor de 11°.

Durante el apoyo total, la invariante que manifestó mayor dispersión entre los sujetos fue la flexoextensión de la rodilla. La rodilla derecha fue la que presentó la diferencia más marcada: alrededor de 11°.

En la fase media del balanceo, donde ocurre la mayor flexión de la rodilla y se necesita una gran flexión extensión de tobillo para poder adelantar la pierna sin arrastrar el pie, fue el mecanismo del tobillo el que registró una diferencia mayor. La pierna izquierda fue la que registró mayor variación: alrededor de 13°.

En el nuevo apoyo del talón que describe el final del ciclo de la marcha las mayores diferencias vuelven a estar en el flexoextensión del tobillo. Nuevamente fue la pierna derecha donde se encontró la mayor diferencia: alrededor de 11°.

El desplazamiento lateral de pelvis, que se analizó durante el 100 % del ciclo de la marcha, presenta una marcada diferencia entre los sujetos, siendo esta de aproximadamente 32 mm.

Los parámetros de inclinación y rotación pélvica permanecieron con diferencias muy pequeñas durante los puntos analizados en el ciclo de la marcha, estando en el orden de los 3^o.

Las diferencias entre las piernas izquierda y derecha en cada invariante de la marcha permanecieron muy pequeñas, siendo estas de aproximadamente 2^o.

El estudio presentó similitudes en la flexoextensión de rodilla con los resultados expuestos por Novo (2007) en adultos cubanos sanos y se difiere alrededor de 6^o de extensión de rodilla con los estudios realizado en adultos coreanos por *Taebeum* y otros (2005).

Conclusiones

Utilizando la división de las etapas del ciclo de la marcha como puntos de análisis en la trayectoria de cada uno de las invariantes se obtuvo que:

No existen diferencias marcadas en los parámetros de la pelvis que tratan sobre las invariantes de la marcha que controlan los movimientos tanto verticales como horizontales. Las mayores dispersiones en los valores, y donde se debe prestar mayor atención cuando se elabore el patrón de la marcha, están en la flexoextensión de la rodilla y dorsiflexión y flexión plantar del tobillo. Los resultados obtenidos presentan similitudes en los rangos de valores con estudios realizados en poblaciones españolas, siendo en ocasiones las diferencias en los parámetros menores a 0.2^o.

Referencias bibliográficas

1. Ramírez R, Carmona M, Hernández H, Velázquez J, Morales A, Vega-González A. Cinemática de la marcha en adultos jóvenes con peso normal, sobrepeso y obesidad. Memorias del XLI congreso nacional de Ingeniería Biomédica 2018

[acceso 20/05/2019]:366-9. Disponible en:

<https://www.researchgate.net/publication/329177299>

2. Andrade J, Villarroya-Aparicio A, Morales S. Biomecánica de la marcha atlética. análisis cinemático de su desarrollo y comparación con la marcha normal. Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas. 2017 [acceso 10/04/2019];36. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/scielo.php.S0864-03002017000200005>
3. Bennett H, Fleenor K, Weinhandl J. A normative database of hip and knee joint biomechanics during dynamic tasks using anatomical regression prediction methods”. Biomechanics 2018 [acceso 02/01/2020];81:122-31. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/S0021929018307656>
4. Kuo A. The six determinants of gait and the inverted pendulum analogy: A dynamic walking perspective. Human Movement Science. 2007 [acceso 02/04/2019];26:617-56. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167945707000309>
5. Inman B, Saunders J , Eberhart V. The major determinants in normal and pathological gait. journal of Bone And Join Surgery. 1953 [acceso 08/05/2019];35:543-58. Disponible en: <https://journals.lww.com/jbjsjournal/Abstract/1953/35030>
6. Bravo D, Rengifo C, Agredo W. Comparación de dos Sistemas de Captura de Movimiento por medio de las Trayectorias Articulares de Marcha. Revista Mexicana de Investigaciones Biomédica 2016 [acceso 13/06/2019];37:149-60. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx.S0188-95322016000200149>
7. Vélez JD, Duque JR, Mora MAG, Marín NB, Jiménez IT. Descripción de los parámetros espaciotemporales y cinemáticos de referencia de la marcha en

- adultos de la población colombiana residente en Antioquia entre 18 y 25 años de edad. In: Colombia UCM, editor. 2016 [acceso 17/08/2019]. Disponible en: <http://repository.ces.edu.co/handle/10946/2745>
8. Sutherland D, Olshen R, E Biden . Clin. Develop. Med. Oxford, 105. The development of mature walking. Gait and Posture 1997 [acceso 14/03/2019];6:163-70. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0966636297000295>
9. Andrade J, Villarroya-Aparicio A, Morales S. Biomecánica de la marcha atlética. análisis cinemático de su desarrollo y comparación con la marcha normal. Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas. 2017 [acceso 25/06/2019];3. Disponible en: <http://www.revibiomedica.sld.cu/index.php/ibi/article/view/14>
10. Leboeuf F. Sangeux M. Baker R. Direct kinematics and kinematic fitting provide very similar outputs when using the conventional gait model. Gait & Posture. 2017 [acceso 06/04/2019];57:196. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/320182957>
11. Bennett H. Fleenor K. Weinhandl J. A normative database of hip and knee joint biomechanics during dynamic tasks using anatomical regression prediction methods. Journal of Biomechanics, 2018 [acceso 06/05/2019];81:122-31. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021929018307656>
12. García-Vázquez J. Skiadopoulos A. Caro-Puértolas B. Análisis cinemático tridimensional de la marcha en pacientes con diplejía espástica. Rehabilitación (Madr). 2018 [acceso 28/03/2019];52(1):10-20. Disponible en: <https://www.elsevier.es/S0048712017301007>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Joyce Eduardo Taboada Díaz: Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, supervisión, redacción del borrador original.

Tania Rodríguez Moliner: Conceptualización, análisis formal, investigación, supervisión, validación, redacción, revisión y edición.

Carlos Díaz Novo: Conceptualización, análisis formal, investigación, supervisión, validación, redacción, revisión y edición.