

## ESTUDIO DE MÉTODOS FUNCIONALES PARA LA ESTIMACIÓN DEL CENTRO ARTICULAR DE LA CADERA EN EL ANÁLISIS CLÍNICO DE LA MARCHA

### STUDY OF FUNCTIONAL METHODS TO HIP JOINT CENTER ESTIMATION IN CLINICAL GAIT ANALYSIS

Paula Saavedra<sup>a</sup>, Paola Catalfamo Formento<sup>a,b</sup>, Marcos Crespo<sup>c</sup> y Emiliano Ravera<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Laboratorio de Investigación en Movimiento Humano, LIMH, FI-UNER.

<sup>b</sup>Grupo de Análisis, Modelado, Procesamiento e Implementación Clínica de Señales y Sistemas Biomecánicos, IBB, CONICET-UNER.

<sup>c</sup>Laboratorio de análisis de marcha y movimiento, LAMM y Tecnología en rehabilitación, Clínica de tecnología asistiva, TA. FLENI.

**Palabras clave:** Modelos musculoesqueléticos, Centros articulares, Métodos funcionales.

**Resumen.** Los modelos musculoesqueléticos de cuerpos rígidos requieren de una adecuada estimación del centro articular de la cadera (HJC: Hip Joint Center). Para estimar el HJC existen actualmente dos enfoques: los métodos predictivos y los métodos funcionales. Entre los métodos funcionales, se destaca SCoRE por su simple implementación. SCoRE presenta dos características: i) mejora la estimación del HJC a medida que aumenta la complejidad de los movimientos entre segmentos; y ii) robustez en su estimación entre sesiones. El objetivo es estudiar las hipótesis del SCoRE para la estimación del HJC. Para esto se registraron 20 sujetos sin patologías motrices con el sistema de captura del movimiento realizándose dos sesiones separadas una semana, consistiendo en la realización de 6 repeticiones de 5 movimientos (Marcha, Arc, Cross, Star, Stararc). Se observó una buena repetitividad entre sesiones. Además, se encontró que el incremento de la complejidad del movimiento lleva que SCoRE tienda a estabilizar su estimación.

**Keywords:** Musculoskeletal models, Hip Joint Center, Functional methods.

**Abstract.** Musculoskeletal modelling requires optimal estimations of hip joint center (HJC: Hip Joint Center). At present, there are two estimation approaches for HJC: predictive and functional methods. Within the functional methods, SCoRE stands out for the simplicity of its implementation. SCoRE has two features: i) its estimations improve with more complex segment movements; and ii) it is robust between sessions. The aim of this work is the study of the SCoRE features. The study included data from 20 subjects without motor pathologies recorded with a motion capture system. Two sessions every other week were recorded. Each session consisted of 6 repetitions for 5 movements (Gait, Arc, Cross, Star, Stararc). The results concluded that that SCoRE showed a great repeatability between sessions. It was also shown that the increment of the movement complexity led SCoRE to stabilize its estimation value.

## 1. INTRODUCCIÓN

El análisis clínico de la marcha requiere de simplificaciones y estimaciones para la utilización de modelos musculoesqueléticos que representen el aparato locomotor humano (Piazza et al., 2004). Si bien los modelos musculoesqueléticos han aportado mucho para entender diferentes patologías (Peters et al., 2012), aún no son ampliamente difundidos en ambientes clínicos. Esto puede deberse a la desconfianza presente en los profesionales de la salud sobre las predicciones que estos modelos arrojan. En particular, errores de modelado en la estimación del centro articular de la cadera (HJC: Hip Joint Center) influyen tanto en la cinemática como en la cinética del movimiento, y de esta manera pueden arrojar un análisis incorrecto que puede llevar a malas interpretaciones y recomendaciones en la práctica clínica (Sangeux et al., 2011, 2014).

Actualmente para estimar el HJC se utilizan dos enfoques: el predictivo y el funcional. Los métodos predictivos, recomendados en pacientes con un rango de movilidad reducida, utilizan ecuaciones de regresión lineal a partir de parámetros antropométricos, por lo cual para obtener buenos resultados se requiere de buenas mediciones de los mismos. Por otro lado, los métodos funcionales estiman la posición del HJC a partir del movimiento del segmento muslo con respecto al segmento pelvis durante ensayos de calibración. Pueden dividirse en técnicas de transformación y técnicas de ajuste de esfera, destacándose entre las distintas variantes el método GSF (Geometric Sphere Fitmethod) y SCoRE (Symmetrical Centre of Rotation Estimation). Estos métodos funcionales han demostrado arrojar mejores resultados que los métodos predictivos (Kainz et al., 2015). En particular, SCoRE se destaca entre los métodos funcionales por su simpleza en la implementación, y su rapidez, resultando ser el más utilizado entre los métodos funcionales. Además, SCoRE presentaría dos características sobresalientes frente a los otros métodos funcionales: i) muestra mejoras en la estimación del HJC con el aumento de la complejidad de los movimientos entre el segmento de la pelvis y el fémur; y ii) muestra más robustez en su estimación entre sesiones. Estas características le brindarían a SCoRE ventajas y desventajas a la hora de utilizarlo para estimar el HJC en el análisis clínico de la marcha. Como ventaja aparece la característica de robustez del método entre sesiones; sin embargo, el requerimiento de movimientos complejos para lograr mejores resultados aparece como una gran desventaja para lograr su aplicación en ambientes clínicos.

En este contexto, Camomilla et al. (2006) describió un protocolo con cuatro movimientos (Arc, Cross, Star y Stararc) para estudiar el comportamiento de los métodos funcionales en la estimación del HJC encontrando que las características de los movimientos funcionales afectan las estimaciones del HJC. A partir de lo descrito anteriormente, el objetivo de este trabajo es estudiar las hipótesis del método funcional SCoRE para la estimación del HJC a partir de los distintos movimientos propuestos por Camomilla et al. (2006).

## 2. MÉTODO

### 2.1. Participantes

En este trabajo se incluyeron los datos del registro biomecánico de 20 sujetos. Este registro fue realizado bajo el protocolo presentado y evaluado por el Comité de Ética y Seguridad en el Trabajo Experimental (CEySTE) de CONICET CCT-Santa Fe, el cuál dio su aprobación. El protocolo consistió en el registro de 10 hombres y 10 mujeres, entre 18 y 40 años, sin patologías de la marcha y capaces de entender instrucciones. Estos sujetos fueron evaluados en dos sesiones separadas una semana entre ellas, donde en primer lugar se tomaban las medidas antropométricas que se observan en la 1, donde para cada sujeto se reporta el promedio de las dos sesiones. Luego se registró en posición estática (denominado Standing), seguido de 6 repeti-

ciones para cada uno de los movimientos propuestos por Camomilla et al. (2006), y 6 registros de marcha a velocidad auto seleccionada. La realización de los movimientos era previamente practicada y cada sujeto la realizaba a la velocidad y con la amplitud que le resultaba cómoda.

Sujetos	Género	Edad [años]	Altura [cm]	Masa [Kg]	Ancho de pelvis [cm]	Profundidad de pelvis [cm]	Longitud de pierna [cm]	Dominancia
1	M	20	178	80	26	8	96.5	D
2	F	24	165	62	25.5	9.5	90	D
3	F	30	162	60	26	7.75	84.5	D
4	M	26	182	76	26	9.25	92.5	D
5	M	21	183	82	26.25	8.75	94.75	D
6	M	31	166	60	24.75	6.5	86.75	D
7	M	21	180	78	26	7.25	97	D
8	M	22	181	75	26.75	7.25	97.5	D
9	M	27	183	90	30.75	8.75	98.75	D
10	M	28	173	94	29.25	7.75	92	D
11	F	29	165	56	23.5	7	90.5	D
12	F	28	152	53	25.75	7	80	D
13	F	33	162	54	24	6.5	81.5	D
14	F	30	167	78	27.5	9.25	86.5	D
15	F	23	157	55	24.75	8.75	80	D
16	M	32	180	97	27	9.25	89.5	D
17	F	24	174	78	29.5	8.25	93	D
18	F	24	166	76	29.5	9	89.75	I
19	M	23	175	56	26.25	7.5	98.75	D
20	F	28	167	93	33.5	9	91	D
Media	-	26.2	170.9	72.65	26.93	8.11	90.5	-
Desvío estándar	-	3.94	9.24	14.6	2.45	0.98	5.91	-

Tabla 1: Características y medidas antropométricas de los sujetos.

Los registros se realizaron en el Laboratorio de Biomecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNER con un sistema de captura conformado por 6 cámaras Optitrack Flex 13 (120 FPS), y luego exportado mediante el software Motive. Los marcadores se colocaron siguiendo el protocolo propuesto por Davis et al. (1991). Vale destacar que, en cada sujeto, solo se registraron los movimientos del lado correspondiente a la pierna dominante. A partir de esto se decidió descartar al sujeto 18 de dominancia izquierda y a los sujetos 6, 10 y 19 por problemas en los registros.

## 2.2. Estimación del HJC: SCoRE

El método propuesto por Ehrig et al. (2007) SCoRE (Symmetrical Center of Rotation Estimation), clasificado dentro de los enfoques funcionales como un método en el que se aplican técnicas de transformación, es un algoritmo que permite determinar el centro de rotación en articulaciones esféricas. Una de las ventajas de los métodos basados en técnicas de transformación es que no requieren un centro de rotación estacionario, pero es necesario definir sistemas de coordenadas locales en cada segmento. SCoRE requiere que las coordenadas del centro de rotación deben permanecer constantes en relación con los segmentos en cuestión, que en este caso serían la pelvis y el muslo. Matemáticamente, esto conduce a un problema de minimización de la función 1. En esta función  $c_1, c_2$  son los centros de rotación en los sistemas de coordenadas locales y  $(R_i, t_i), (S_i, d_i)$  las transformaciones de las coordenadas del segmento local en una sistema global.

$$f_{SCoRE}(c_1, c_2) = \sum_{i=1}^n \|R_i c_1 + t_i - (S_i c_2 + d_i)\|^2 \quad (1)$$

Esto se puede escribir como un problema lineal de mínimos cuadrados como se observa en la ecuación 2 que tiene una solución cerrada, pero se resuelve mejor con métodos numéricamente

más robustos.

$$\begin{pmatrix} R_1 & -S_1 \\ \vdots & \vdots \\ R_n & -S_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 - t_1 \\ \vdots \\ D_n - t_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

En el sistema de coordenadas global, este enfoque produce una posición conjunta para cada segmento y cada instante de tiempo,  $R_i c_1 + t_i$  y  $S_i c_2 + d_i$ , que no son necesariamente una coincidencia exacta. La estimación para el centro de rotación global es el punto medio entre las dos posiciones.

### 2.3. Análisis

Los registros se procesaron mediante el uso de Matlab. Para el análisis de la información recopilada se realizaron en primer lugar 5376 simulaciones que consistían en estimar el HJC para cada una de las 6 repeticiones de marcha, de cada una de las dos sesiones de los 16 sujetos analizados mediante las 6 repeticiones de los 4 movimientos funcionales propuestos por Camomilla et al. (2006).

Se realizó un promedio de las 6 repeticiones de cada movimiento, en cada sesión, para así obtener de cada sujeto en cada sesión una sola estimación mediante el uso de SCoRE para el movimiento Arc, una sola estimación mediante el uso de SCoRE para el movimiento Star y así sucesivamente. Se realizó para cada marcha un promedio de las mismas, obteniéndose ahora, para cada sujeto para cada sesión, un registro de marcha promediado y 4 estimaciones del HJC, una por cada movimiento. Con estas simulaciones se busca estudiar la precisión en la estimación del HJC a partir del método funcional SCoRE al aumentar la complejidad de los movimientos realizados (Marcha, Arc, Cross, Star y Stararc). Se analizaron las estimaciones del método SCoRE para estimar el HJC entre sesiones para estudiar la robustez. En la Figura

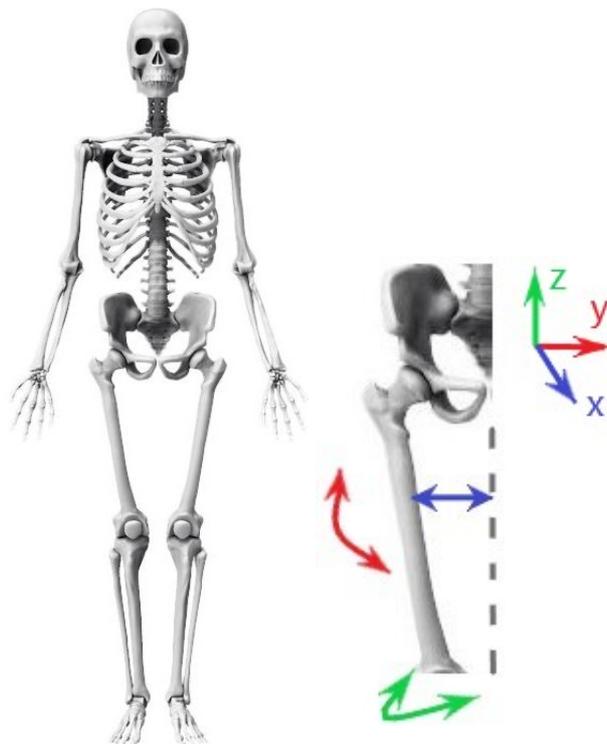


Figura 1: Esquema de los movimientos articulares de la cadera.

1 se representan los grados de libertad articulares de la cadera involucrados en este estudio. En color rojo se esquematiza el movimiento de Flexión - Extensión, en color azul el movimiento de Abducción - Aducción y en verde el movimiento de rotación Interno - Externo.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Métodos funcionales: sesión 1 vs. sesión 2

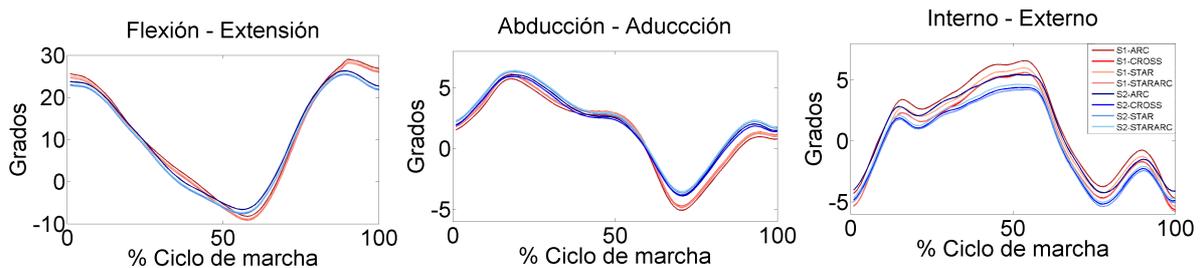


Figura 2: Centros articulares de la cadera mediante métodos funcionales, comparando la sesión 1 y la sesión 2.

En la figura 2 se representan los ángulos del centro articular de la cadera a lo largo del ciclo de marcha, obtenidos mediante el método funcional SCoRE, siguiendo el protocolo propuesto por Camomilla et al. (2006). Se puede observar en tonos de rojo, los datos promediados de todos los sujetos para la sesión 1 y en tonos de azul los datos promediados de todos los sujetos para la sesión 2. Para Flexión - Extensión se observa que durante todo el ciclo de la marcha no se presentan marcadas variaciones entre ambas sesiones. Para Abducción - Aducción se observa una gran repetitividad durante la fase de apoyo y mayor discrepancia durante la fase de balanceo. Por último, para rotación Interna - Externa es donde se observa menor repetibilidad, sobretodo en la fase de apoyo.

#### 3.2. Métodos predictivos: sesión 1 vs. sesión 2

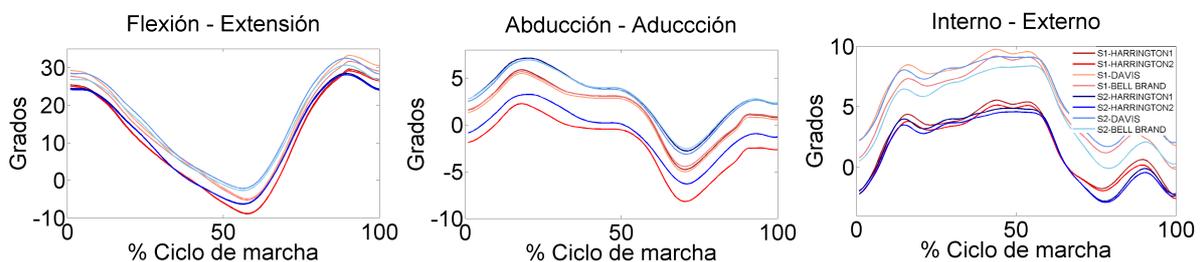


Figura 3: Centros articulares de la cadera mediante métodos predictivos, comparando la sesión 1 y la sesión 2.

En la figura 3 se pueden observar los ángulos del centro articular de la cadera a lo largo del ciclo de la marcha, obtenidos mediante los cuatro métodos predictivos propuestos (Harrington1, Harrington2, Davis y Bell and Brand) estudiados en (Saavedra et al., 2018). Se observan en tonos de rojo los resultados obtenidos de los promedios de todos los sujetos para la sesión 1 y en tonos de azul los datos obtenidos para todos los sujetos en la sesión 2. Para Flexión -

Extensión se observa a lo largo del ciclo de la marcha la misma repetitividad. Para Abducción - Aducción se observa mayor discrepancia entre sesiones para Davis y Bell and Brand que para Harrington1 y Harrington2. Por último, para rotación Interna - Externa se observa una buena repetitividad para los métodos de Harrington1 y Harrington2, pero mala repetitividad para los otros métodos predictivos estudiados.

### 3.3. Métodos funcionales vs. métodos predictivos

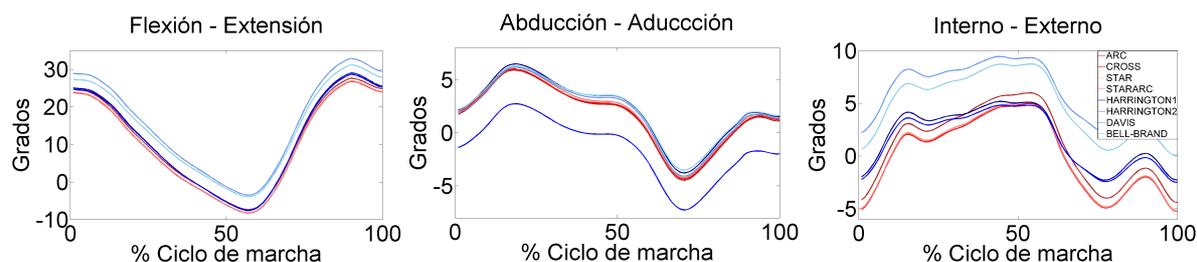


Figura 4: Comparación de la estimación de los centros articulares de la cadera mediante métodos predictivos y métodos funcionales.

En la figura 4 se pueden observar los ángulos articulares de la cadera obtenidos mediante métodos funcionales en tonos rojos y para métodos predictivos en tonos de azul. Para Flexión - Extensión se observa una marcada repetitividad entre los métodos funcionales y los métodos predictivos Harrington1 y Harrington2. Para Abducción - Aducción, a lo largo del ciclo de marcha se observa una gran repetitividad entre todos los métodos, excepto para el método predictivo de Harrington2. Por último, para rotación Interna - Externa se observa más discrepancia que en los otros ángulos articulares, sobre todo entre los métodos predictivos de Davis y Bell and Brand contra el resto de los métodos, tanto predictivos como funcionales.

### 3.4. SCoRE vs. complejidad del movimiento

En la figura 5 se presentan los datos obtenidos para las tres coordenadas del centro articular de la cadera mediante el método SCoRE para la marcha y para los cuatro movimientos propuestos por Camomilla et al. (2006) (Arc, Cross, Star y Stararc). En la primera gráfica se describe la dirección de avance, donde se puede observar que existe una mayor dispersión para la marcha y menos dispersión para los cuatro movimientos descriptos. En el segundo caso, en la dirección sagital se evidencia aún más la dispersión para la marcha frente a los cuatro movimientos presentados, siendo esta dirección frente a las otras dos, la que menor dispersión presenta en su conjunto. Por último, en la dirección transversal, nuevamente se repite una mayor dispersión para la marcha, disminuyendo en los cuatro movimientos.

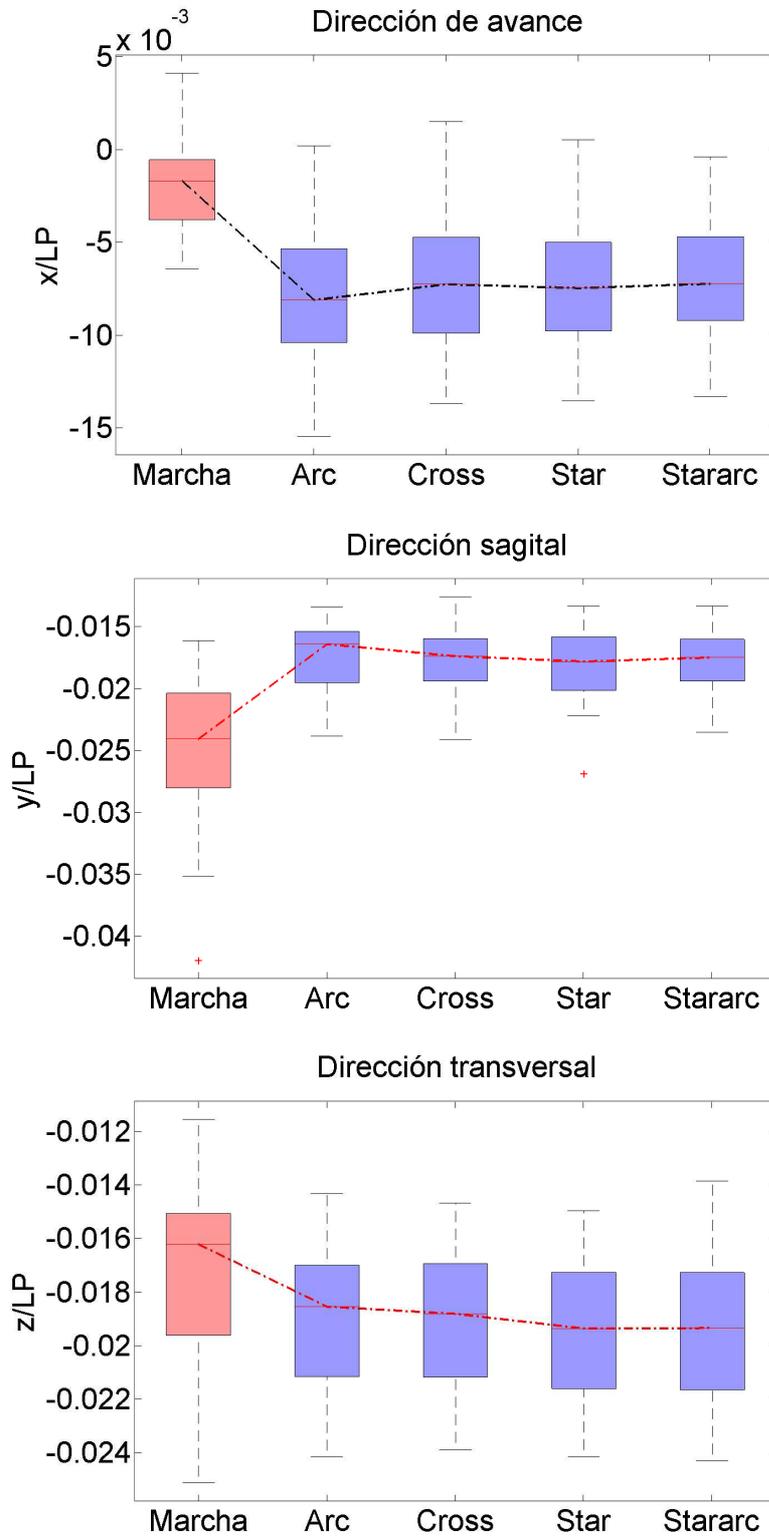


Figura 5: Coordenadas del centro articular de la cadera obtenidas mediante el método SCoRE frente al aumento en la complejidad del movimiento, donde LP es la longitud de la pierna.

#### 4. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

Para estudiar el centro articular de la cadera existen dos enfoques: los métodos predictivos y los métodos funcionales. Entre los métodos funcionales, el SCoRE se destaca por su simpleza y robustez entre sesiones. Esto se evidenció en la figura 2 donde se presentan las estimaciones del HJC mediante SCoRE en dos sesiones diferentes. Además, la figura 3 muestra los resultados obtenidos mediante métodos predictivos para las dos sesiones. Se destaca que los métodos funcionales evidencian mayor repetitividad entre sesiones comparados con los métodos predictivos para los tres ángulos presentados. En particular, se destaca una mayor repetitividad para los ángulos de Flexión - Extensión en ambos enfoques, y menor repetitividad para los ángulos de rotación Externa - Interna en ambos enfoques. Se puede observar mayor repetitividad entre los métodos funcionales y los métodos predictivos Harrington1 y Harrington2, lo cual es de esperarse según resultados previos del grupo (Saavedra et al., 2018). Por último, al estudiar como se comporta la estimación del HJC a medida que se incrementa la complejidad del movimiento, se evidenció que cuando se utiliza la marcha como parámetro de entrada en SCoRE presenta mayores dispersiones, y a medida que se incrementa la complejidad del movimiento (es decir, de Arc, Cross, Star a Stararc) la mediana de la estimación tiende a un valor más estable.

**REFERENCIAS**

- Camomilla V., Cereatti A., Vannozzi G., y Cappozzo A. An optimized protocol for hip joint centre determination using the functional method. *Journal of Biomechanics*, 39(6):1096–1106, 2006. ISSN 00219290. doi:10.1016/j.jbiomech.2005.02.008.
- Davis R.B., Ounpuu S., Tyburski D., y Gage J.R. A gait analysis data collection and reduction technique. *Human Movement Science*, 10(5):575–587, 1991. ISSN 01679457. doi:10.1016/0167-9457(91)90046-Z.
- Ehrig R.M., Taylor W.R., Duda G.N., y Heller M.O. A survey of formal methods for determining functional joint axes. *Journal of Biomechanics*, 40(10):2150–2157, 2007. ISSN 00219290. doi:10.1016/j.jbiomech.2006.10.026.
- Kainz H., Carty C.P., Modenese L., Boyd R.N., y Lloyd D.G. Estimation of the hip joint centre in human motion analysis: A systematic review. *Clinical Biomechanics*, 30(4):319–329, 2015. ISSN 18791271. doi:10.1016/j.clinbiomech.2015.02.005.
- Peters A., Baker R., Morris M.E., y Sangeux M. A comparison of hip joint centre localisation techniques with 3-DUS for clinical gait analysis in children with cerebral palsy. *Gait and Posture*, 36(2):282–286, 2012. ISSN 09666362. doi:10.1016/j.gaitpost.2012.03.011.
- Piazza S.J., Erdemir A., Okita N., y Cavanagh P.R. Assessment of the functional method of hip joint center location subject to reduced range of hip motion. *Journal of Biomechanics*, 37(3):349–356, 2004. ISSN 00219290. doi:10.1016/S0021-9290(03)00288-4.
- Saavedra P., Crespo M., Catalfamo Formento P., Restrepo J.F., y Ravera E. El efecto de la estimación del centro articular de la cadera en el análisis clínico de la marcha. *MECOM*, 2018.
- Sangeux M., Peters A., y Baker R. Hip joint centre localization: Evaluation on normal subjects in the context of gait analysis. *Gait and Posture*, 34(3):324–328, 2011. ISSN 09666362. doi:10.1016/j.gaitpost.2011.05.019.
- Sangeux M., Pillet H., y Skalli W. Which method of hip joint centre localisation should be used in gait analysis? *Gait and Posture*, 40(1):20–25, 2014. ISSN 18792219. doi:10.1016/j.gaitpost.2014.01.024.