



Laboratorio de análisis del movimiento en Pediatría

I. Martínez Caballero*, M. Galán-Olleros*, A. Pérez-Somarriba Moreno**, M.J. Figueroa Gatica***, M. Medel San Miguel**

*Servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología. Hospital Infantil Universitario Niño Jesús. Madrid. España. **Laboratorio de análisis del movimiento. Hospital Infantil Universitario Niño Jesús. Madrid. España. ***Equipo de traumatología extremidad inferior. Instituto Teletón. Equipo traumatología infantil. Hospital Clínico. Universidad Católica. Santiago. Chile

Resumen

El laboratorio de análisis del movimiento en Pediatría representa una herramienta clave para la evaluación y el tratamiento de trastornos de la marcha en niños. Utilizando tecnología avanzada para capturar y analizar el movimiento humano, estos laboratorios ofrecen una visión detallada y cuantitativa de las desviaciones de la marcha, facilitando diagnósticos más precisos y asistiendo así en la planificación del tratamiento. Este artículo explora la infraestructura necesaria, los componentes principales del protocolo de evaluación como el examen físico, la cinemática y cinética tridimensionales y la electromiografía, así como las aplicaciones clínicas de estos laboratorios. Además, la utilización del análisis de la marcha en varias etapas de la evaluación clínica, toma de decisiones basada en evidencia, así como su valor en la mejora de los resultados funcionales y en la medición cuantitativa de los resultados del tratamiento.

Abstract

The pediatric movement analysis laboratory serves as a key tool for assessing and treating gait disorders in children. Utilizing advanced technology to capture and analyze human movement, these laboratories provide a detailed and quantitative view of gait deviations, facilitating more accurate diagnoses and aiding in treatment planning. This article explores the necessary infrastructure, main components of the evaluation protocol such as physical examination, three-dimensional kinematics and kinetics, and electromyography, and the clinical applications of these laboratories. Additionally, the use of gait analysis for clinical evaluation and evidence-based decision-making, as well as its value in improving functional outcomes and quantitatively measuring treatment results, are discussed.

Palabras clave: Análisis de la marcha; Ortopedia Infantil; Evaluación del movimiento; Desviaciones de la marcha en niños; Planificación terapéutica.

Key words: Gait analysis; Pediatric Orthopedics; Movement Evaluation; Gait Deviations in Children; Therapeutic Planning.

Introducción

El movimiento en los seres vivos ha sido objeto de estudio mediante el registro de imágenes desde hace más de 150 años, comenzando con los pioneros estudios de Muybridge en 1872, que visualizaron las fases del movimiento de los caballos durante una carrera no perceptibles al ojo humano⁽¹⁾. Esta curiosidad por capturar y entender la dinámica del movimiento ha evolu-

cionado significativamente, llevando a la creación de laboratorios de análisis del movimiento con uso clínico.

A principios de los 90, fruto de la colaboración interdisciplinaria entre bioingenieros y ortopedas infantiles, se desarrolló el estudio computarizado tridimensional de la marcha, siendo los sujetos más evaluados pacientes deambulantes con parálisis cerebral. Este enfoque ha permitido describir

detalladamente las desviaciones del movimiento normal, a través de análisis cinemáticos (movimiento de las articulaciones), cinéticos (fuerza articular) y electromiográficos (actividad muscular), enriqueciendo la comprensión clínica y diagnóstica, matizando las decisiones quirúrgicas, comparando la eficacia entre tratamientos e incluso prediciendo los resultados de las terapias⁽²⁾. Además de la deambulación, gestos comunes



Figura 1. Laboratorio de análisis del movimiento del Hospital Niño Jesús, Madrid.

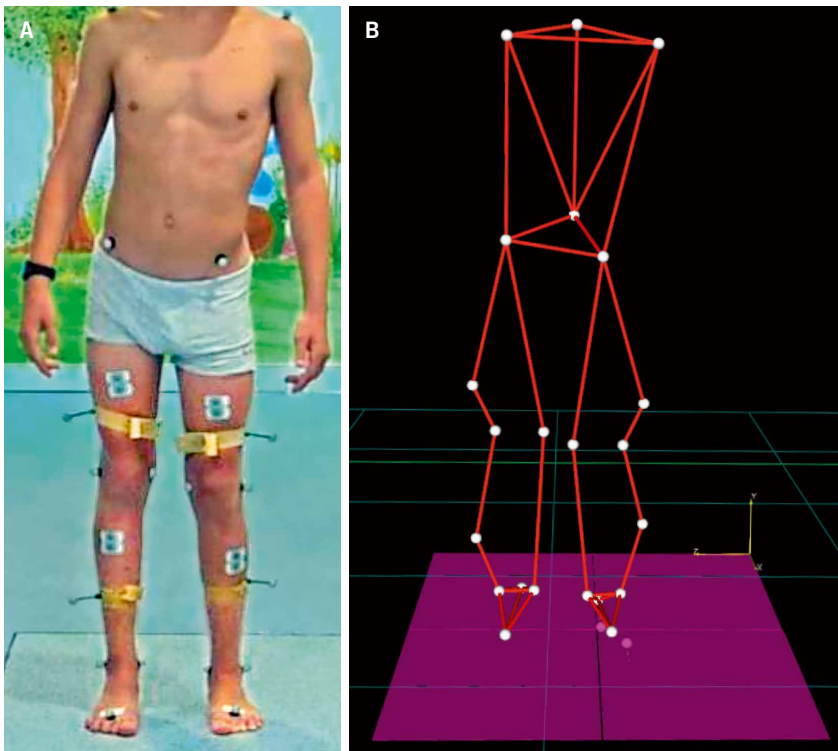


Figura 2. A. Paciente con marcadores según modelo Helen Hayes MM. **B.** Modelo virtual que se obtiene tras el procesamiento de la imagen de la izquierda.

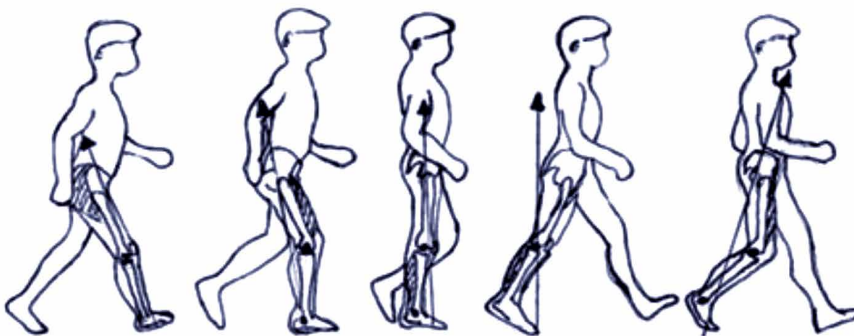


Figura 3. Fase de apoyo del ciclo de marcha y etapas que la forman. La colocación en torno a las articulaciones del vector generado desde el suelo por el peso del cuerpo justifica actividad muscular.

realizados en las extremidades superiores o en el tronco, pueden ser objeto de este análisis instrumentado⁽³⁾.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer:

- El ciclo de la marcha normal.
- Qué es un laboratorio de análisis del movimiento y cuáles con los sistemas de información que lo integran.
- Claves para la interpretación clínica de las gráficas obtenidas y cómo integrarlo con otros métodos diagnósticos para guiar las intervenciones terapéuticas.
- Uso en la toma de decisiones y ejemplos clínicos que justifican su uso.
- Listado de aplicaciones comunes.

Ciclo de la marcha normal

La marcha humana, independientemente del género o raza, sigue un patrón reproducible que puede ser estudiado. El desplazamiento en el plano sagital, al ser donde más movimiento existe, es elegido comúnmente para estudiar la marcha. Los eventos que comprenden desde que la extremidad inferior contacta por vez primera con el suelo, hasta que lo hace de nuevo, forman el ciclo de marcha⁽²⁾. Dentro de él existe una fase de apoyo que ocupa el 60 % del mismo, seguida de una fase oscilante o de no apoyo que abarca el 40 % restante y posibilita el avance de la extremidad. El análisis del movimiento del tobillo, rodilla, cadera y pelvis en cada uno de los tres planos del espacio y en cada uno de los periodos del ciclo de marcha, el de apoyo y el oscilante, es la metodología compartida por los estudios de la deambulación observacionales e instrumentales.

Definición del laboratorio de análisis del movimiento (LAM) y componentes

Es una instalación especializada equipada con tecnología avanzada para medir la trayectoria, la actividad muscular y las fuerzas ejercidas por los segmentos anatómicos durante la marcha o cualquier actividad solicitada (Fig. 1). Diseñado para analizar los tres planos del espacio (sagital, frontal y transversal), permite una evaluación sincronizada y detallada del movimiento, captu-

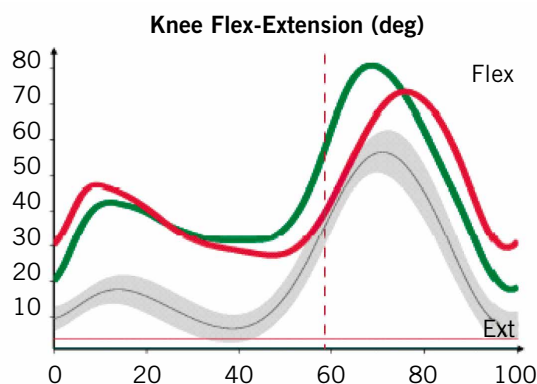


Figura 4. Estudio cinemático sagital de rodilla de un paciente con porcentaje de ciclo de marcha en eje de abscisas y movimiento en grados en eje de ordenadas. El color gris recoge el movimiento normal, mientras que los colores verde (lado derecho) y rojo (lado izquierdo) reflejan flexos de rodilla permanentes y no rígidos. En el movimiento normal existe una onda sinusoidal con dos picos de flexión de distinta altura. En la fase de apoyo hay una flexión de 15° como adaptación de la rodilla a la carga. Este valor precede a la extensión completa en la mitad de la fase de apoyo, lo que permite el acople tobillo rodilla, para alcanzar la verticalidad del sujeto. En la fase oscilante, la flexión de rodilla tiene un valor máximo de 60°, lo que facilita al pie alcanzar una altura adecuada con respecto al suelo.

rando la esencia de la dinámica humana con precisión.

Sus dimensiones deben tener en cuenta el espacio requerido para albergar los sistemas empleados, y contar con la amplitud necesaria para que el sujeto realice sin restricciones el movimiento objeto de estudio.

La configuración de nuestro LAM incluye una amplia área de 9 metros (m) de longitud, 8 m de anchura y un techo de 5 m, equipada con 8 cámaras infrarrojas fijadas desde el techo para la captación de los marcadores reflectantes colocados en diferentes segmentos anatómicos del cuerpo siguiendo protocolos estandarizados (Fig. 2), 4 plataformas dinamométricas integradas en el suelo para analizar los momentos de fuerza de tobillo, rodilla y cadera, y un puesto de control, donde se sincronizan los datos capturados durante el paseo del paciente mediante un software especializado. Este espacio también cuenta con una camilla para realizar la exploración física y con aparatos de medición antropométrica. La duración del estudio requiere aproximadamente 90 minutos, e incluye la exploración física y un número mínimo de 4-6 paseos, de los cuales se calcula un promedio para obtener las gráficas representativas. La colaboración del paciente es esencial; por lo que, en edades inferiores a 5 años o en pacientes con trastornos cognitivo-conductuales, el estudio puede ser inviable.

La dificultad en la generalización de su uso radica principalmente en el costo de las instalaciones y la necesidad de personal altamente especializado a cargo de su funcionamiento, habitualmente de 2 a 3 fisioterapeutas e, idealmente, con la colaboración de un bioingeniero encargado de optimizar el almacenamiento de datos y desarrollar investigación.



**Hospital Infantil Universitario
Niño Jesús**
Comunidad de Madrid



Kinematic Analysis

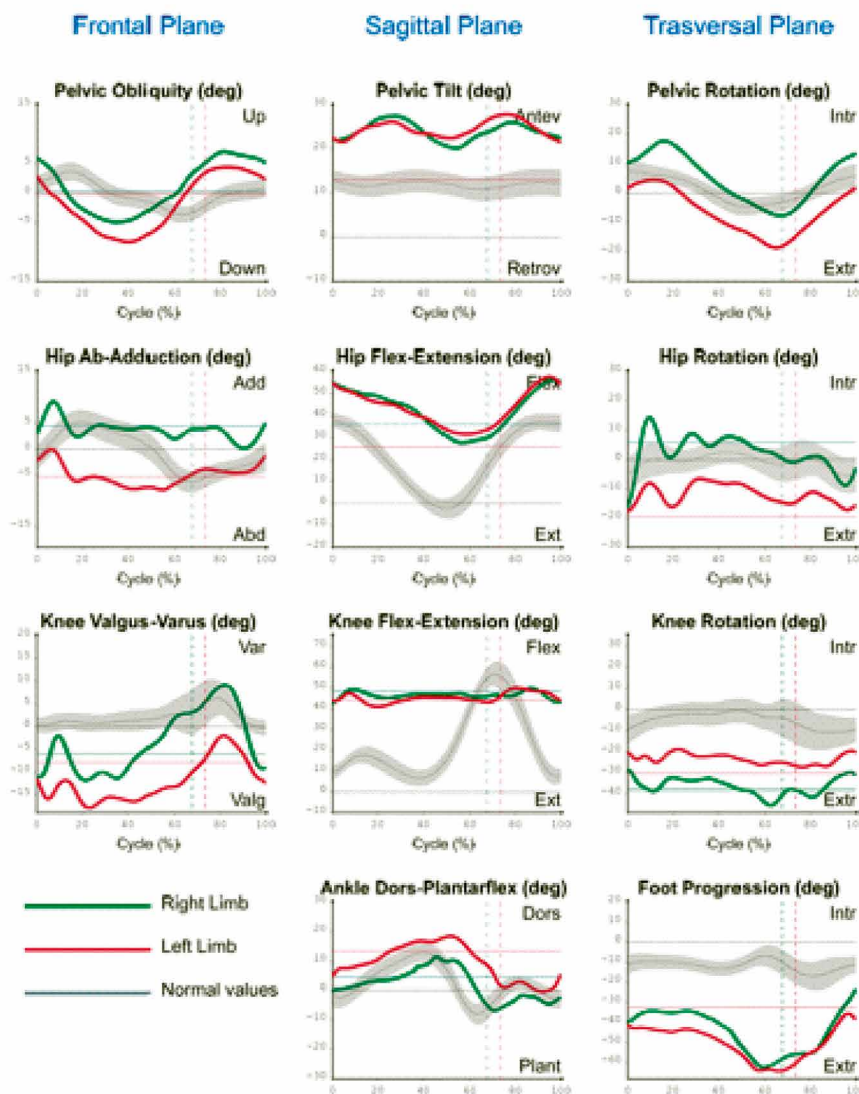


Figura 5. Ejemplo de informe cinemático del ciclo de marcha con flexión de rodilla y cadera permanente.

Kinetic Analysis (Sagittal Plane)

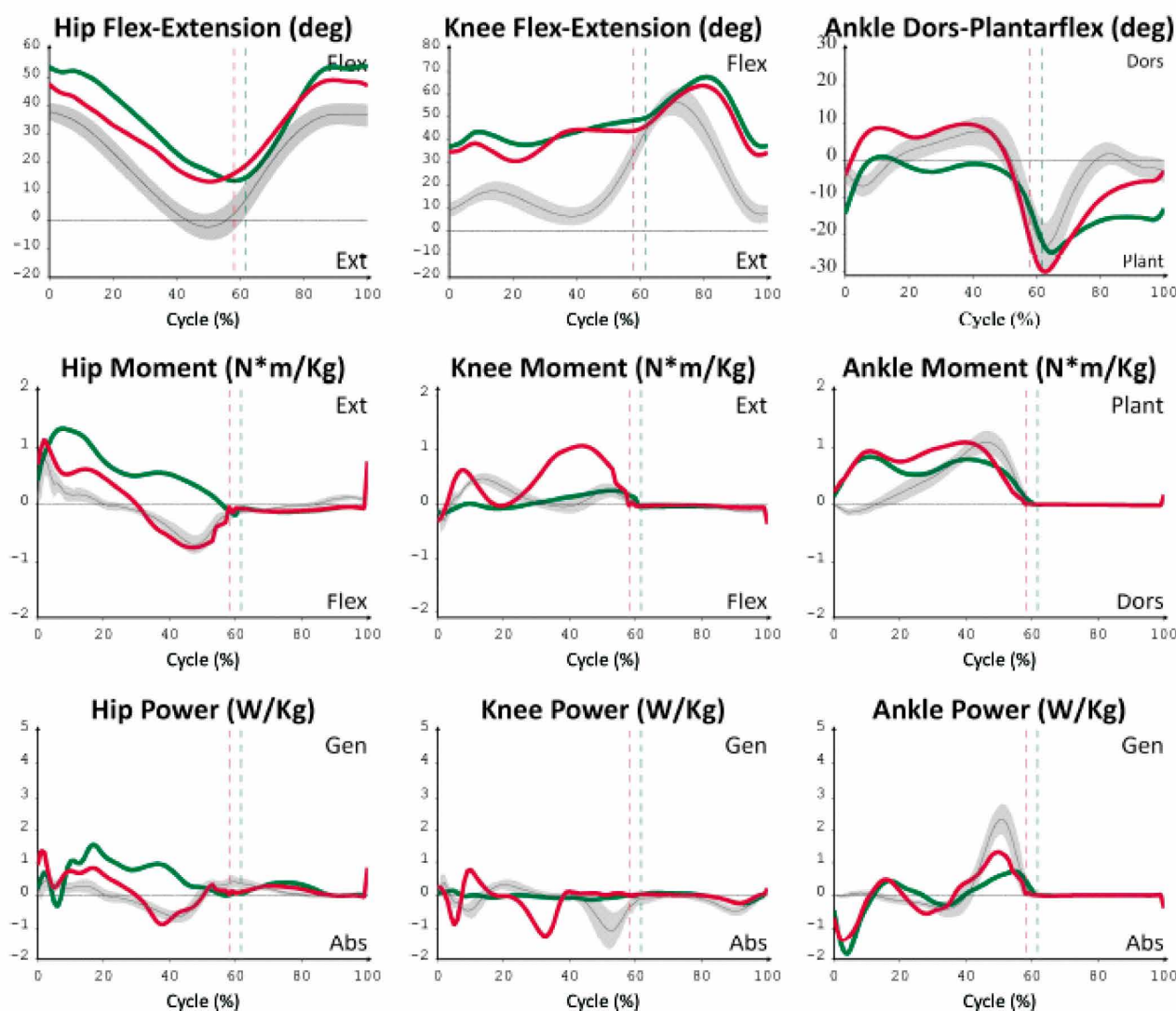


Figura 6. Gráficas de la cinética, momento y potencia, de cadera, rodilla y tobillo, correlacionadas con cinemática del plano sagital.

Las evaluaciones se realizan sobre un periodo concreto de la deambulación, conocido como ciclo de marcha. Este empieza cuando el talón contacta con el suelo, lo que inicia la fase de apoyo (60 % del ciclo) (Fig. 3).

Después del apoyo, el pie se despegas del suelo con la cadera y la rodilla en flexión y el tobillo en neutro para poder avanzar durante la fase oscilante del ciclo de marcha (40 % del total).

Los informes generados durante los estudios de marcha son: parámetros témporo-espaciales, análisis cinemáticos, cinéticos y de electromiografía⁽⁴⁾.

- **Parámetros témporo-espaciales:** incluyen la longitud de paso, cadencia o velocidad.

- **Cinemática:** realiza una descripción cuantitativa de la marcha mediante gráficas de coordenadas cartesianas, del movimiento en tobillo, rodilla, cadera, pelvis y tronco. En el eje horizontal o eje de abscisas, se representa el porcentaje del ciclo, y en el eje vertical o eje de ordenadas, los grados de movimiento de cada segmento anatómico. En color gris viene representado el rango de movimiento normal, lo que permite ser comparado con la gráfica de color verde (lado derecho del paciente) y la de color rojo (lado izquierdo). La separación con respecto a la normalidad y el porcentaje del ciclo en el que esta presenta mayor magnitud, describen la patología de la marcha (Fig. 4).

En el informe estándar aparecerán tres columnas de gráficas del ciclo de marcha, que corresponden de izquierda a derecha a los planos frontal, sagital y transversal, y 5 filas de gráficas de ciclo de marcha, que representan de arriba abajo, el movimiento del tronco, pelvis, cadera, rodilla y tobillo (Fig. 5).

- **Cinética:** utilizando unas plataformas instaladas en el suelo, se miden los momentos de fuerza (N-m/kg) y potencias (Wattios/kg) articulares en el plano sagital del tobillo, rodilla y cadera durante la marcha^(2,4) (Fig. 6).
- **Electromiografía:** registra la actividad de los músculos responsables de la deambulación mediante sensores

adhesivos inalámbricos, sincronizándose con los análisis cinemáticos y cinéticos (Fig. 7).

Gracias a la cinemática, se han elaborado índices de evaluación global de la marcha que permiten cuanti-

ficar su desviación con respecto a la normalidad. El más utilizado es el “*Gait Deviation Index*” (GDI), que usa 9 valores cinemáticos críticos para su elaboración, como la máxima extensión de rodilla en fase de apoyo

o su máxima flexión en oscilante⁽⁵⁾. El valor normal es por encima de 100; mientras que, en pacientes con parálisis cerebral más afectados, se ven descensos en el GDI de hasta 40 puntos.

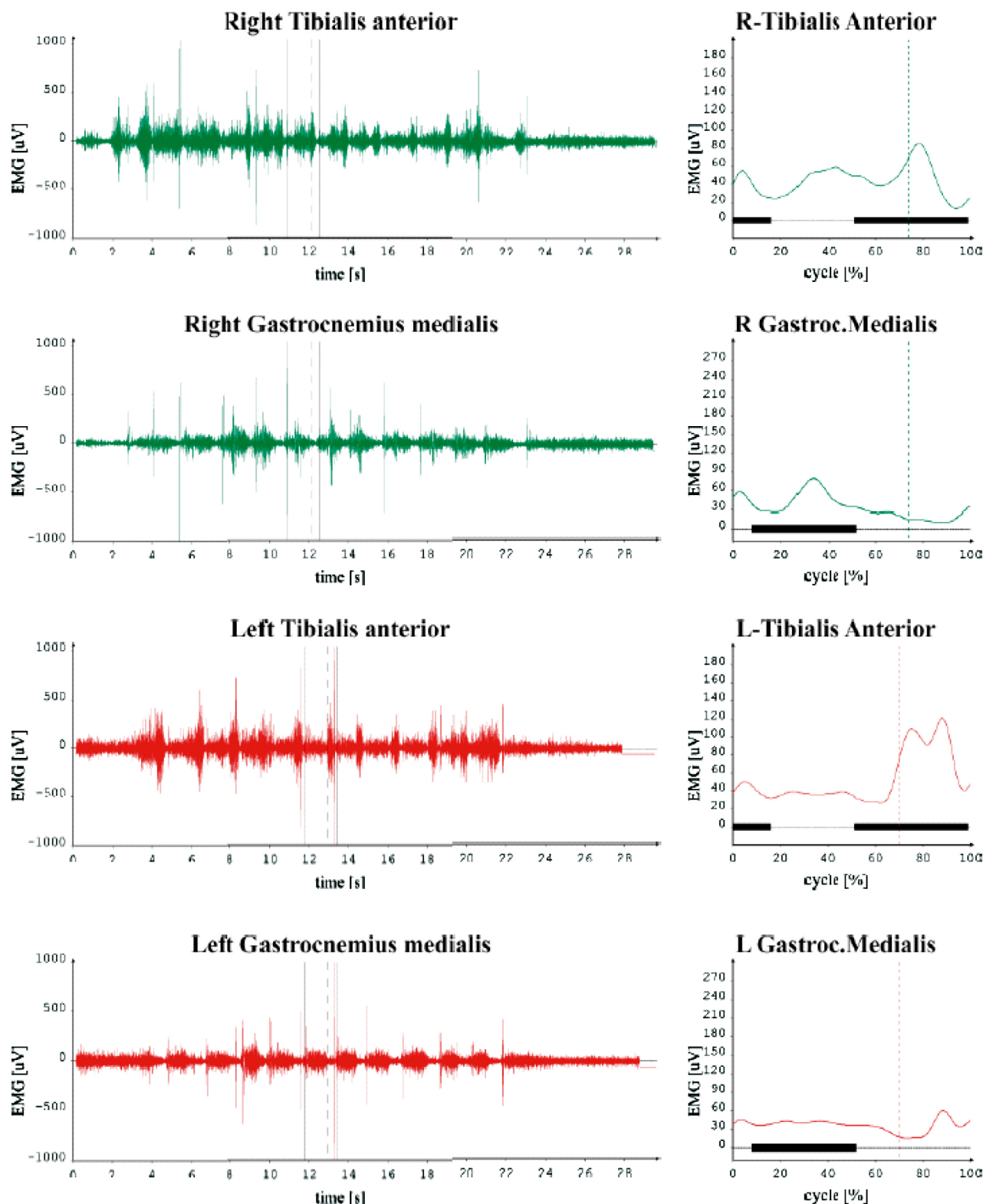


Figura 7. Registros de electromiograma (EMG) sobre la actividad muscular del gastrocnemio, y tibial anterior.

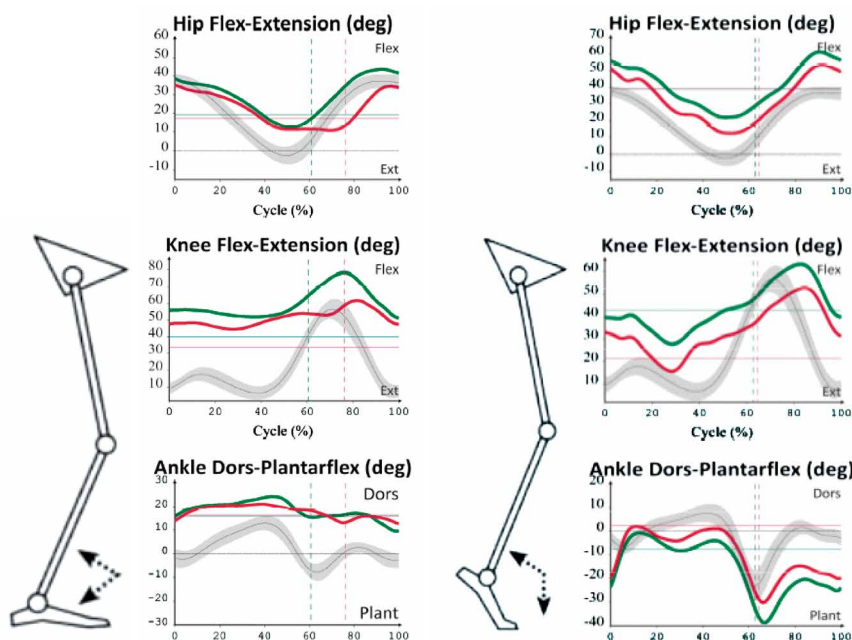


Figura 8. Patrón de marcha agachada/gráficas y patrón de marcha en salto/gráficas.

Claves para la interpretación de las gráficas e integración con otros métodos diagnósticos

Claves para la interpretación clínica de las gráficas

1. **Rango de movimiento:** una variabilidad limitada entre los valores máximos y mínimos sugiere rigidez o debilidad muscular; mientras que un rango aumentado puede indicar un mecanismo de compensación por déficit de movilidad a nivel distal, como la hiperflexión de cadera para compensar el pie caído, o un incremento de movilidad en el lado contralateral en los hemipléjicos.
2. **Alteración en valores cinemáticos críticos y correlación con patrones patológicos de marcha:** una flexión excesiva de rodilla en la fase de apoyo asociada a dorsiflexión de tobillo refleja un patrón de marcha agachada, mientras que si la gráfica muestra flexión plantar de tobillo, encajaría en un patrón de salto (Fig. 8). En la fase oscilante, un incremento en la flexión de la cadera se relaciona con marcha en estepaje si el tobillo está en equino, y un pico de flexión de rodilla disminuido o retrasado se asocia a patrón de rodilla rígida. La correlación de las gráficas con los patrones de Rodda o de Winters,

descritos respectivamente en dipléjicos y hemipléjicos, es mayor que la información aportada por evaluaciones observacionales de la marcha⁽⁶⁾.

3. **Formas de las gráficas:** en pacientes con espasticidad, las gráficas pueden mostrar una forma característica de “doble joroba”, lo cual refleja una respuesta rápida de contracción muscular ante su estiramiento, como ocurre en el clonus de tobillo (Fig. 9). Este trazado se puede ver también en la rodilla durante la fase oscilante

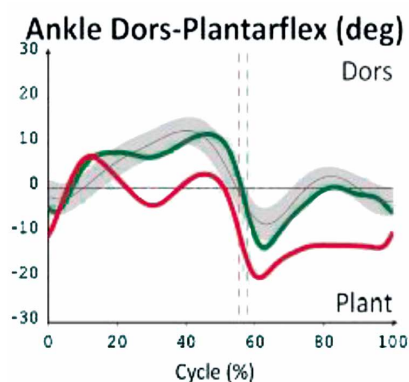


Figura 9. Gráfica de tobillo con forma de doble joroba, lado izquierdo en paciente hemipléjico con clonus. La súbita flexión plantar tras la dorsiflexión inicial refleja espasticidad en gastrocnemios. La falta de dorsiflexión en fase oscilante encaja con insuficiencia de dorsiflexores y actividad fuera de fase del gastrocnemio.

por espasticidad del recto anterior, y en la pelvis por espasticidad del psoas. Estas gráficas son indicativas de músculos espásticos, buenos respondedores a tratamientos con toxina botulínica.

4. **Pendiente de las gráficas:** una pendiente reducida generalmente señala una disminución del rango de movimiento, debido a debilidad, rigidez articular o espasticidad severa. Como ejemplo clínico, tenemos la pendiente más horizontal presente en casos de debilidad en la flexión de cadera, lo que aconseja evitar tratamientos que disminuyan aún más esta acción. Por otro lado, una pendiente más pronunciada puede sugerir una contracción muscular aumentada, ya sea como respuesta al estiramiento por espasticidad o como gesto de compensación de la cadera en fase oscilante, para despegar el pie del suelo cuando este se encuentra caído⁽⁷⁾.

Integración con otros métodos diagnósticos

La eficacia del análisis de la marcha se potencia al integrarlo con otras herramientas diagnósticas. La historia clínica, la exploración física, el diagnóstico por imagen y la evaluación del nivel de habilidad funcional son fundamentales para una comprensión holística del paciente. Cada método aporta una pieza clave al rompecabezas clínico, permitiendo una aproximación diagnóstica y terapéutica más precisa y personalizada.

- **Historia clínica.** Patologías, como la ictericia neonatal, predisponen a las discinesias, lo que se reflejaría en la irregularidad entre gráficas obtenidas en cada paseo.
- **Exploración física.** Por ejemplo, la limitación en el rango de movimiento articular se visualiza en las gráficas al no alcanzar el valor normal máximo, la espasticidad puede dar curvas con dobles jorobas, y el acortamiento de los isquiotibiales se muestra en el plano sagital de la pelvis por hallarse en retropulsión al final de la fase oscilante o durante todo el ciclo.
- **Diagnóstico de imagen.** La oblicuidad pélvica observada en las radiografías de pelvis se correlaciona con patrones específicos en la marcha, como el flexo de rodilla del lado descendido en la marcha agachada.

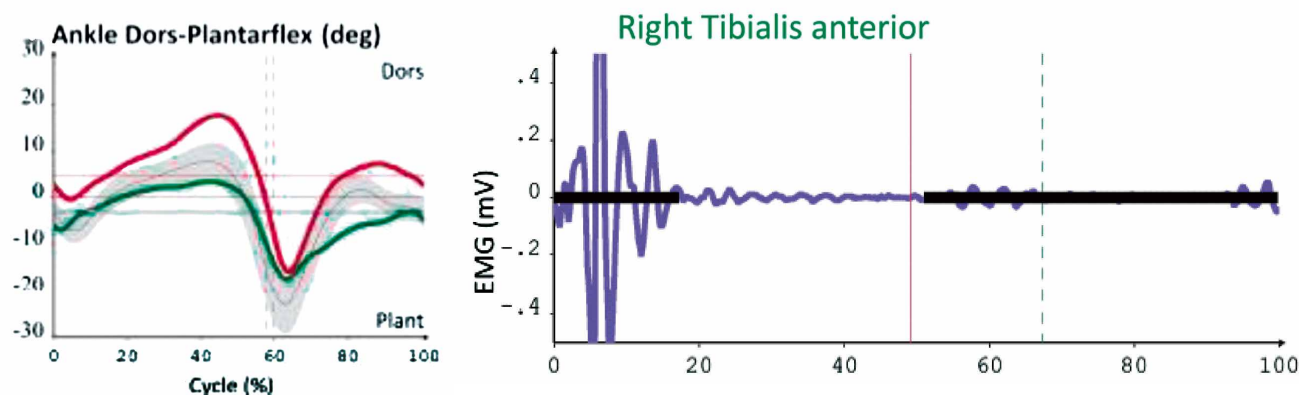


Figura 10. Caso de un paciente con tropiezos o dificultad para subir un bordillo. Gráfica de cinemática de pie caído derecho acompañada de electromiografía (EMG) dinámica de superficie del tibial anterior derecho, que refleja una ausencia de actividad contráctil durante la fase oscilante en el lado derecho.

- **Nivel de habilidad funcional.** Existe una relación directa entre la autonomía en la marcha y los índices de evaluación global, con menores niveles de autonomía asociados a peores índices.

Uso en la toma de decisiones y ejemplos clínicos que justifican uso del LAM

El laboratorio de análisis de movimiento desempeña un papel crucial en la toma de decisiones, proporcionando evaluaciones detalladas, que combinadas con la exploración física, facilitan la identificación de problemas primarios, secundarios y terciarios (o compensatorios) en la marcha del paciente.

El análisis observacional del movimiento, especialmente el de la deambulación, está condicionado por las limitaciones que la percepción visual tiene para evaluar, de manera simultánea, los tres planos del espacio. Especialmente inexactas son las estimaciones de los problemas del plano transversal en

segmentos proximales, como la cadera o la pelvis. Por otro lado, los estudios cinéticos y de detección de contracción muscular aportan información diagnóstica y pronóstica imposible de obtener de otro modo. Algunos ejemplos que justifican su uso son:

- **Equinismo “idiopático”:** teniendo como motivo de consulta el caminar de puntillas, puede llegar a encontrarse co-contracción entre agonista (tríceps sural) y antagonista (tibial anterior) en la EMG dinámica de superficie, señalando de esta manera un origen neurológico⁽⁸⁾.
- **Seudo-equino:** la apariencia de caminar de puntillas o en equino puede no deberse a una flexión plantar aumentada de tobillo, sino a un déficit en la extensión de rodilla al final de la fase oscilante, llevando a intervenciones erróneas como el alargamiento del tendón de Aquiles sin justificación. La inclinación del tronco hacia delante, el flexo de cadera o el pie caído por insuficiencia de los dorsiflexores de tobillo

(Fig. 10), pueden ser otros motivos de pseudo-equino.

- **Seudo-intratorsión:** en pacientes con hemiplejía o diplejía asimétrica, el lado que camina con el tobillo en equino condiciona un retraso o rotación externa en la hemipelvis de ese lado, lo que puede crear una aparente intratorsión en el lado opuesto, que se corrige tratando el equino.
- **Seudo-valgo:** las gráficas en plano frontal transversal ayudan a diferenciar el valgo real del aparente, causados por excesiva anteversión femoral o torsión tibial externa^(4,9).
- **Causas de rodilla rígida en fase oscilante:** la falta de flexión de la rodilla en la fase oscilante dificulta que el pie alcance una altura adecuada con respecto al suelo, y puede deberse a la debilidad en los flexores plantares de tobillo o cadera, la anteversión femoral, el genu valgo de gran magnitud, o la actividad muscular del recto anterior presente en la fase oscilante⁽⁹⁾ (Fig. 11). Solo este tipo de análisis del movimiento combinando

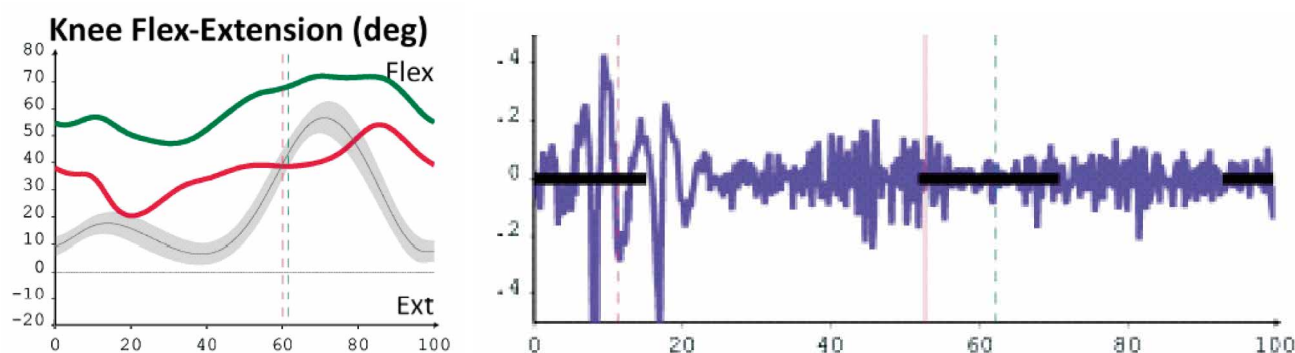


Figura 11. Gráfica del plano sagital de la rodilla con falta de flexión en fase oscilante y EMG con un registro de activación el recto anterior del cuádriceps durante la fase oscilante, es decir, fuera de fase.

Tabla I. Listado de aplicaciones comunes en paciente pediátrico

Categoría	Aplicaciones comunes
Trastornos de la marcha	<ul style="list-style-type: none"> – Equinismo – Alteraciones torsionales (intratorción, extratorción) – Marcha patológica (estepaje, <i>recurvatum</i>, marcha agachada, patrón de rodilla rígida en fase oscilante, patrón de salto) – Trendelenburg
Patología del pie	<ul style="list-style-type: none"> – Pie zambo – Pie cavo – Pie caído – Pie plano
Patología de cadera	<ul style="list-style-type: none"> – Perthes – Epifisiolisis – Displasia del desarrollo de cadera
Patología de rodilla	<ul style="list-style-type: none"> – Lesiones ligamentarias – Patología femoropatelar – Malalineación sagital, frontal y transversal
Patología del miembro superior	<ul style="list-style-type: none"> – Hemiplejía – Parálisis braquial obstétrica
Patología del tronco	<ul style="list-style-type: none"> – Escoliosis

la exploración clínica, el análisis gráfico y el EMG, permitiría diferenciar entre sí estas causas.

- **Isquiotibiales cortos:** solo un porcentaje de los pacientes que caminan agachados lo hacen porque tienen los isquiotibiales cortos, en cuyo caso veremos, como en la gráfica del plano sagital de la pelvis, esta se coloca hacia posterior durante todo el ciclo o al final de la fase oscilante.
- **Compensaciones del tronco:** la posición del tronco hacia delante puede aliviar la tendencia a flexo de rodilla durante la fase de apoyo en algunos pacientes, apareciendo en las curvas cinéticas un menor aumento del momento extensor, o lo que es lo mismo, una menor sollicitación del cuádriceps.

Listado de aplicaciones comunes en paciente pediátrico

En la tabla I se muestra el listado de aplicaciones comunes en paciente pediátrico.

Futuro de los laboratorios de análisis del movimiento

Se ha reconocido la validez del análisis instrumentado del movimiento como herramienta diagnóstica, útil en la toma de decisiones, en el control evolutivo de los trastornos del movimiento y, por último, en la medición y comparación de resultados post-terapia.

La expansión del análisis instrumentado del movimiento está ligada a la for-

mación especializada y la colaboración multidisciplinaria, con un potencial creciente para integrar tecnologías avanzadas, como el aprendizaje automático e inteligencia artificial, mejorando la precisión diagnóstica y la eficacia del tratamiento⁽¹⁰⁾.

Bibliografía

1. Wing A, Beek P. Motion analysis: a joint centenary. Hum Mov Sci. 2004; 23: Iii-Iv.
2. Gage JR. Gait analysis. An essential tool in the treatment of cerebral palsy. Clin Orthop Relat Res. 1993; 288: 126-34.
3. Valevicius AM, Jun PY, Hebert JS, Vette AH. Use of optical motion capture for the analysis of normative upper body kinematics during functional upper limb tasks: A systematic review. J Electromyogr Kinesiol. 2018; 40: 1-15.
4. Armand S, Decoulon G, Bonnefoy-Mazure A. Gait analysis in children with cerebral palsy. EFORT Open Rev. 2016; 1: 448-60.
5. Schwartz MH, Rozumalski A. The Gait Deviation Index: a new comprehensive index of gait pathology. Gait Posture. 2008; 28: 351-7.
6. Nieuwenhuys A, Papageorgiou E, Molenaers G, Monari D, de Laet T, Desloovere K. Inter- and intratester clinician agreement on joint motion patterns during gait in children with cerebral palsy. Dev Med Child Neurol. 2017; 59: 750-5.
7. Davids JR, Bagley AM. Identification of common gait disruption patterns in children with cerebral palsy. J Am Acad Orthop Surg. 2014; 22: 782-90.
8. Rose J, Martin JG, Torburn L, Rinsky LA, Gamble JG. Electromyographic differentiation of diplegic cerebral palsy from idiopathic toe walking: involuntary coactivation of the quadriceps and gastrocnemius. J Pediatr Orthop. 1999; 19: 677-82.
9. Gage JR, Novacheck TF. An update on the treatment of gait problems in cerebral palsy. J Pediatr Orthop B. 2001; 10: 265-74.
10. Ahmadi M, O'Neil M, Fragala-Pinkham M, Lennon N, Trost S. Machine learning algorithms for activity recognition in ambulant children and adolescents with cerebral palsy. J Neuroeng Rehabil. 2018; 15: 105.



sepeap

Sociedad Española de Pediatría
Extrahospitalaria y Atención Primaria