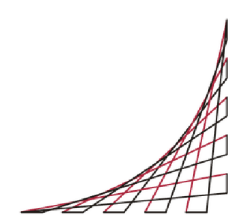


**DISEÑO DE UN MODELO PARA EVALUAR LA  
CONSISTENCIA DE LOS PATRONES DE MARCHA**

**Jean Paul Acosta Suarez**



**UNIVERSIDAD DEL ROSARIO**



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO**

Universidad del Rosario -Escuela Colombiana de ingeniería  
Escuela de medicina y ciencias de la salud  
Bogotá D.C. Colombia  
2023

**DISEÑO DE UN MODELO PARA EVALUAR LA  
CONSISTENCIA DE LOS PATRONES DE MARCHA**

**Jean Paul Acosta Suarez**

trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero biomédico**

Dirigido por:  
Ing. Wilson Alexander Sierra Arévalo  
Ing. María Fernanda Gómez Medina

Universidad del Rosario -Escuela Colombiana de ingeniería  
Escuela de medicina y ciencias de la salud  
Bogotá D.C. Colombia  
2023

## Agradecimientos

Agradezco a mi tutor, por su guía y orientación durante todo el proceso de investigación. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para la realización de este proyecto.

También quiero expresar mi gratitud a mi familia y amigos por su apoyo emocional constante, su paciencia y comprensión durante los momentos difíciles, agradezco a mis alma mater por brindarme los recursos necesarios para la realización de mi investigación, al Instituto Roosevelt por brindarme la oportunidad de trabajar junto a grandes profesionales del área de la salud. Finalmente, agradezco a todos aquellos que de una u otra manera han contribuido a este proyecto, incluyendo a otros profesionales, académicos y expertos en el campo de estudio.”

## Resumen

El estudio del movimiento corporal y de la marcha humana ha sido de gran interés desde tiempos remotos, el hombre contaba inicialmente con la capacidad de ver para predecir patrones, el análisis de características físicas y patrones de movimientos en la antigüedad era útil para estimar anomalías y diagnosticar patologías. Hoy en día la tecnología permite realizar análisis computarizados a través de algoritmos inteligentes que determinan las características físicas a través de datos y gráficos permitiendo una evaluación más precisa del movimiento. El análisis en tres dimensiones del movimiento humano es una de las formas de evaluación clínica más eficientes en biomecánica, permite cualificar características físicas del movimiento en parámetros espaciotemporales y permite a su vez hacer comparaciones entre individuos y la evolución del desarrollo de los procesos de rehabilitación.

**Palabras clave:** Datos cuantitativos de la marcha, trastornos del movimiento, Análisis clínico de la marcha, análisis de la marcha, Repetibilidad, Cinemática, Cinética, Distancia de frechet.

## Abstract

The study of body movement and human gait has been of great interest since ancient times, man initially had the ability to see to predict patterns, the analysis of physical characteristics and movement patterns in ancient times was useful to estimate anomalies and diagnosis of pathologies. Nowadays technology allows computerized analysis through intelligent algorithms that determine the physical characteristics through data and graphs allowing a more accurate evaluation of the movement. The three-dimensional analysis of human movement is one of the most efficient forms of clinical evaluation in biomechanics, it allows qualifying physical characteristics of movement in spatiotemporal parameters and, in turn, allows comparisons between individuals and the evolution of the development of rehabilitation processes.

**Key words:** Quantitative gait data, movement disorders, Clinical gait analysis, gait analysis, Repeatability, Kinematics, Kinetics, Frechet distance.

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>3</b>
<b>Resumen</b>	<b>4</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>7</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>8</b>
1.1. Evaluación los patrones de marcha . . . . .	10
1.1.1. Cinemática . . . . .	11
1.2. Declaración de la necesidad . . . . .	12
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>14</b>
2.1. Objetivo general: . . . . .	14
2.2. Objetivos específicos: . . . . .	14
<b>3. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>15</b>
3.1. Bases de datos . . . . .	15
3.2. Métodos para determinar la consistencia en la marcha . . . . .	15
3.3. Estudios relacionados . . . . .	16
3.4. Algoritmos de relación . . . . .	16
3.4.1. Algoritmos de regresión. . . . .	16
3.4.2. Algoritmos de agrupamiento . . . . .	17
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>18</b>
4.1. Adquisición de los datos . . . . .	18
4.2. Procesamiento . . . . .	18
4.3. Diseño de un algoritmo para el arreglo de los datos . . . . .	19
4.4. Diseño del algoritmo para el análisis . . . . .	19
4.4.1. Cálculo del espacio de agrupamiento . . . . .	20
4.4.2. Visualización de los datos . . . . .	20
4.5. Evaluación del sistema . . . . .	21
<b>5. Resultados</b>	<b>22</b>
5.1. Resultados al evaluar el sistema diseñado . . . . .	22

<b>6. Discusión</b>	<b>24</b>
<b>7. Conclusión</b>	<b>25</b>
<b>8. Recomendaciones para futuros trabajos</b>	<b>26</b>

# Lista de Figuras

1.1. Procesos realizados en el laboratorio . . . . .	10
1.2. Ángulos articulares de la articulación de la cadera. . . . .	11
1.3. Test de consistencia con tres ciclos de marcha . . . . .	13
4.1. Distribución de los datos de la flexión-extensión de la cadera del ciclo 1 vs el ciclo 2. . . . .	20
4.2. Interfaz gráfica diseñada . . . . .	21
8.1. Diagrama de flujo de la interfaz . . . . .	29

# Capítulo 1

## Introducción

El interés por el análisis corporal nace en Grecia en el período helenístico, son los griegos los que ofrecen los orígenes de las leyes de funcionamiento que rigen el ejercicio físico. Los filósofos de su era comenzaron a describir las bases de los estudios de movimiento[10]. Aristóteles describió la interacción de los músculos y el proceso que se conoce como marcha: “El animal que se mueve hace su cambio de posición presionando lo que está por debajo de él” [5]. Describiendo así la relación con el centro de gravedad, las leyes del movimiento y de las palancas. Hipócrates, recomendó el análisis del movimiento en el diagnóstico de enfermedades, afirmaba que se podía evitar la atrofia y combatir la obesidad[7]. Galeno, que trabajó como médico de gladiadores, en su ensayo “De Motu Musculorum” describió la diferencia entre músculos agonistas y antagonistas[7]. Con la caída del imperio romano, el estudio de los cuerpos y el movimiento quedó estancado hasta la llegada de la edad media, con Leonardo Da Vinci, un artista polifacético interesado en la composición corporal y anatomía humana, el artista florentino escribió: “La Ciencia de la Mecánica es la más útil y generosa de todas las ciencias, pues todos los cuerpos vivos que tienen movimiento actúan bajo sus leyes” [18]. A través de grabados analizó la estructura fisiología y características antropométricas del ser humano, describió la capacidad del hombre de analizar movimiento, la relación muscular y articular, la relación del equilibrio con el centro de gravedad y el salto[10]. Ya a partir del siglo XVII Giovanni Alfonso Borelli en su obra “De Motu animalium” comprende los conceptos de palanca y los aplica a un modelo mecanicista para el estudio del movimiento humano[10].

Con la llegada de la revolución industrial y los avances tecnológicos, las nuevas técnicas de evaluación y parámetros de análisis se establecieron, en 1836 los hermanos Weber llevaron a cabo el primer análisis mecánico del paso en su obra “Mechanik der Menschlichen Gehwerkzeuge Gottingen”, describen las fases de la marcha humana. Con ello, la interpretación de los patrones de marcha empezó a ser aplicado en la evaluación física de las personas, permitiendo un análisis más estructurado y dando la oportunidad a su vez de predecir la evolución de tratamientos o patologías[10].



Hoy en día la marcha se puede describir a través de patrones con parámetros espaciales y parámetros temporales, entre los parámetros espaciales encontramos la longitud del paso (distancia recorrida por un pie por delante de la misma parte del otro pie), la longitud de la zancada (distancia entre dos ciclos de marcha consecutivos), el ancho de paso (separación medio lateral entre los pies)[2]. Características temporales como el tiempo que hay entre cada una de las zancadas, la cadencia (duración de los ciclos) y su velocidad. Características con las que se puede modelar el patrón de marcha de cada individuo.

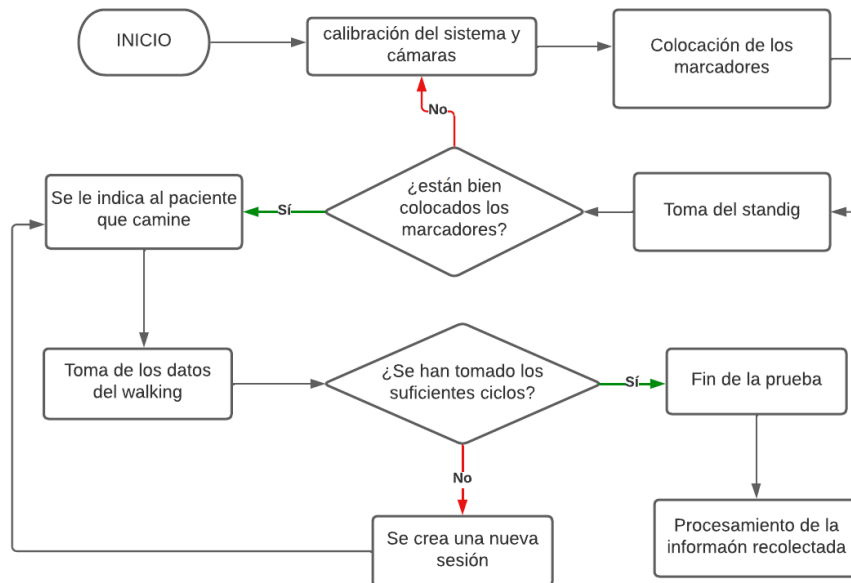
El proyecto tuvo desarrollo en el Instituto Roosevelt, un hospital universitario sin fines de lucro. Es reconocido como un importante centro de atención pediátrica especializada, ortopedia y rehabilitación infantil en Colombia[8]. En el laboratorio de marcha del Instituto Roosevelt, se llevan a cabo diversas pruebas de evaluación clínica, entre las cuales se incluyen:

- **Estabilometría:** Se realizan pruebas para medir y analizar la estabilidad del individuo durante la marcha, se coloca al paciente en una plataforma de fuerza, preferiblemente en posición bi podal, con los pies separados al ancho de los hombros, el sistema comienza a registrar los datos de fuerza y presión plantar durante un período determinado de tiempo, en el laboratorio este periodo es de 30 segundos, después de ello el sistema analiza los parámetros estabilométricos, como el desplazamiento del centro de presión, la velocidad media y la amplitud de oscilación.
- **Pruebas de 6 minutos:** Es una prueba donde se llevan a cabo actividades en las que se evalúa la capacidad de resistencia y la calidad de la marcha durante un período de 6 minutos, se marca un circuito de 20 metros y se explica al paciente el objetivo y la duración de la prueba, después de ello se le indica al paciente que camine a un ritmo cómodo durante 6 minutos, tratando de cubrir la mayor distancia posible, el fisioterapeuta o el médico encargado se encarga de registrar la distancia recorrida por el paciente durante el tiempo especificado, de igual forma el personal coloca un sensor que registra los datos del paciente durante la prueba, calculando características espaciales como longitud de zancada, cadencia, velocidad, entre otras.
- **Trayectoria del Centro de Presión (COP):** Se analiza y registra la trayectoria del Centro de Presión durante la marcha, en donde prácticamente se ve el centro de presión conforme el paciente va caminando
- **Análisis cinemático y cinético de la marcha:** Se utilizan técnicas y herramientas especializadas para analizar tanto los aspectos cinemáticos (movimiento) como los cinéticos (fuerzas) involucrados en el proceso de la marcha.

## 1.1. Evaluación los patrones de marcha

La evaluación del análisis de la marcha comprende una serie de procesos que involucran la adquisición, procesamiento y discusión de datos. En primer lugar, se utilizan cámaras optoelectrónicas para captar la información de los marcadores que se adhieren a la piel de los pacientes. Estos marcadores se colocan estratégicamente en áreas anatómicas siguiendo los protocolos de ubicación del Conventional Gait Model (CGM)[4]. Los marcadores pueden ser retroreflectores o emisores de luz, denominados marcadores pasivos y activos respectivamente. Posteriormente a la colocación de los marcadores, se lleva a cabo el estudio siguiendo los pasos ilustrados en la Figura 1.1.

El proceso de detección se realiza mediante dos o más cámaras, las cuales generan una proyección similar a cómo los ojos humanos perciben la profundidad. A través de esta proyección y las coordenadas de posición relativas de un punto, es posible identificar los marcadores y asignarles coordenadas específicas con respecto a un sistema de referencia. Esto permite estimar la cinemática del cuerpo[15].

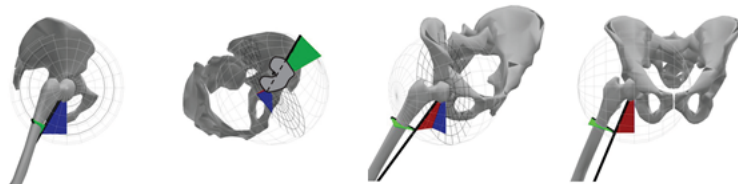


**Figura 1.1:** Procesos realizados en el laboratorio

### 1.1.1. Cinemática

La cinemática describe el movimiento de los cuerpos u objetos. A través de ella, se analizan y estudian los diferentes aspectos relacionados con el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y otras características fundamentales de los movimientos de objetos con sus entornos. La cinemática en la biomecánica proporciona una base teórica y herramientas metodológicas para comprender y cuantificar los patrones de movimiento en el contexto de la anatomía, la fisiología y la mecánica corporal. La anatomía humana es bastante compleja y no es posible ver como se mueven todas las partes del cuerpo. Así que se divide en varios segmentos que se pueden describir haciendo referencia al hueso principal entre las articulaciones. Usando los centros articulares y un plano propio para estos como marco de referencia se puede ver como varían los ángulos de los arcos que están unidos a cada uno de los nodos[1].

En la Figura 1.2 se establece el marco de referencia para los ángulos articulares de la articulación de la cadera, donde la línea negra gruesa es el eje primario y la línea más fina indica la rotación interna y externa[4]. El ángulo rojo indica abducción, que es el movimiento de separación de una pierna o un objeto de la línea media del cuerpo. El ángulo azul representa la extensión, que es el movimiento que endereza o estira una pierna, aumentando el ángulo entre el muslo y la pierna. El ángulo verde representa la rotación externa, que es el movimiento que gira una pierna hacia afuera o en dirección contraria a la línea media del cuerpo[4].



**Figura 1.2:** Ángulos articulares de la articulación de la cadera.

Dependiendo del protocolo a usar se emplean modelos que permiten encontrar los centros articulares del sistema a través de los marcadores y modelar el movimiento de estos durante las pruebas de marcha. Los patrones de marcha de un paciente se describen a través de la variación de los ángulos en un ciclo de marcha, de esta manera se puede determinar la variación angular de las articulaciones durante un solo ciclo[4].

## 1.2. Declaración de la necesidad

Una característica que no se puede determinar con facilidad en la evaluación de los patrones de marcha es la consistencia de la marcha, es decir, el poder estimar si dos ciclos de marcha son iguales en un mismo paciente. Pacientes con Parkinson o parálisis cerebral, tienden a cambiar su patrón de marcha en cada ciclo, haciendo más compleja la evaluación, ya que al no tener certeza de que la forma de onda de las características cinéticas y cinemáticas se comportan de manera semejante en cada ciclo, no se tendría certeza si los datos obtenidos serían significativos para un análisis.

La creación de un sistema que pueda medir la consistencia de la marcha es de suma importancia. Como se puede apreciar en la figura 1.3, las gráficas de cinemática de cada ciclo evaluado muestran diferencias significativas. Por lo tanto, utilizar estas gráficas como herramienta de diagnóstico o para determinar un tratamiento no resulta adecuado. La figura 1.3 muestra las gráficas de cinemática correspondientes a tres ciclos diferentes del mismo paciente, así como las curvas de normalidad representadas en color gris (que indican los rangos en los cuales las gráficas normalmente oscilan en un paciente sano). Las gráficas presentadas fueron obtenidas a través de un análisis computarizado realizado en un paciente en estudio con una alteración de la marcha. En total, se realizaron seis tomas, de las cuales únicamente tres se consideraron para el análisis de consistencia. Las tomas son procesadas utilizando la interfaz del Smart Analyzer[16], un sistema que procesa los datos y genera los informes a partir de los cuales se obtienen las gráficas.

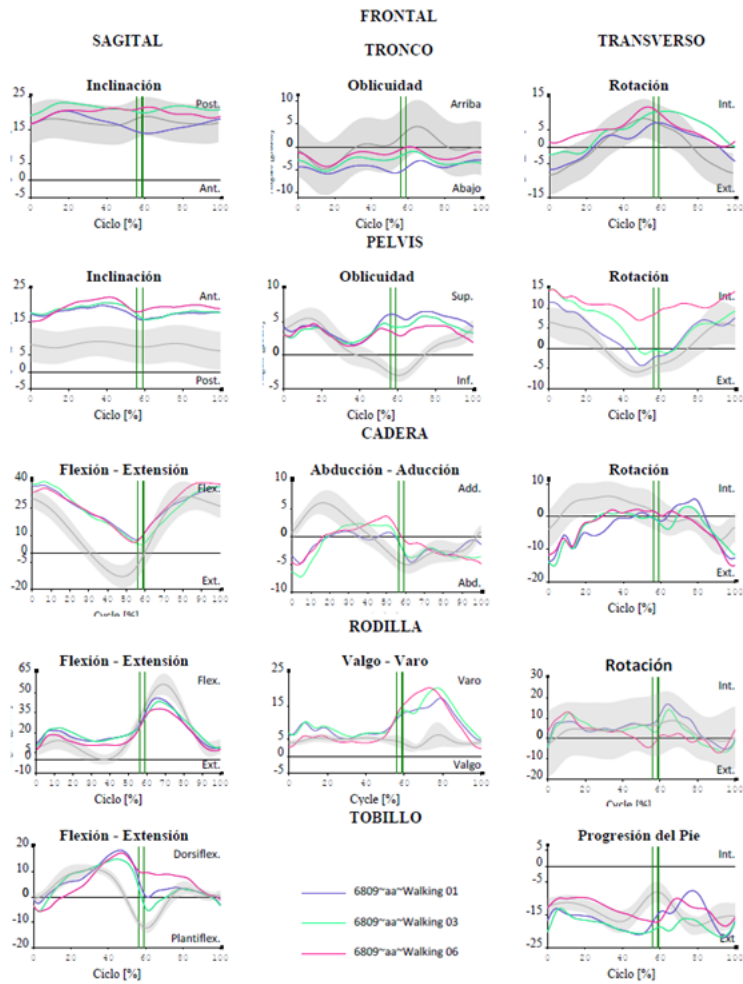


Figura 1.3: Test de consistencia con tres ciclos de marcha

## Capítulo 2

# OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general:

Diseñar un modelo que proporcione la consistencia en los patrones de marcha de un paciente.

### 2.2. Objetivos específicos:

- Emplear el modelo en el estudio de diferentes patologías para determinar cómo se relacionan las patologías y los patrones de marcha.
- Definir una normatividad que permita evaluar los márgenes de error entre las comparaciones de los ciclos de marcha de un mismo paciente
- Determinar la confiabilidad del sistema de evaluación comparativa a diseñar.

## Capítulo 3

# ESTADO DEL ARTE

En este espacio se exponen conceptos básicos del análisis de Patrones para la clasificación no supervisada, así como algoritmos de agrupamiento para datos mezclados y funciones de comparación de objetos mezclados. La información que se empleó en el desarrollo del diseño y estudios previos relacionados con la investigación

### 3.1. Bases de datos

Para el estudio del estado del arte se introdujo la consulta en meta buscadores. Se encontraron 57 artículos, de los cuales únicamente se conservaron aquellos que tenían relevancia y estaban encaminados a la investigación de patrones de marcha y análisis comparativo de gráficas según un modelo matemático. Se buscó documentación de algoritmos de regresión, agrupamiento y repetitividad de los datos. Estos modelos se utilizan debido a que fueron los implementados en la documentación recopilada sobre la repetitividad de los datos[3].

### 3.2. Métodos para determinar la consistencia en la marcha

Los médicos no usan un método claro, únicamente hacen una comparación visual de las gráficas de cinemática del paciente y ven cuán semejantes son. Esto lo hacen para asegurarse de que la marcha del paciente no varíe drásticamente, lo que puede ayudar a identificar posibles problemas neurológicos o músculo-esqueléticos subyacentes, el ver como los datos de las gráficas no se relacionan entre sí, también es un indicador significativo que permite determinar que tan deteriorado es el estado en que se encuentra el paciente.

### 3.3. Estudios relacionados

El propósito de varios estudios como *medición y gestión de errores en datos cuantitativos de la marcha*[13] o *Análisis cualitativo de locomoción de las extremidades traseras o en rata*[14] fue estimar los errores asociados con los datos cuantitativos de la marcha y proponer un método para incorporar el conocimiento de estos errores en el proceso de interpretación clínica. Se diseñaron múltiples protocolos experimentales que permitieron calcular los errores dentro del sujeto, dentro del observador y entre observadores en cada punto del ciclo de la marcha[9]. Las estimaciones se utilizaron para generar esquemas prácticos para detectar desviaciones significativas en los ángulos de las articulaciones. Los resultados de este estudio proporcionaron un medio para manejar el error, al mismo tiempo que mejoran el rigor y la objetividad de las interpretaciones clínicas.

Un ejemplo de ello fue un estudio realizado en la Universidad de Graz, donde se tuvo como objetivo evaluar la repetitividad intrasujeto de los datos obtenidos en el análisis de movimiento en niños normales y espásticos, donde cuarenta niños (20 normales, 20 con parálisis cerebral de tipo dipléjico) fueron sometidos a análisis de la marcha. Se estudiaron los parámetros cinemáticos, cinéticos y de tiempo-distancia para determinar la variabilidad intrasujeto dentro del día y entre días usando medidas estadísticas[18]. El estudio encontró una menor repetitividad de los datos del análisis de la marcha en niños espásticos en comparación con los niños normales, lo que podría deberse a la restricción del rango de movimiento de las articulaciones causado por la espasticidad y los errores debidos a la colocación del marcador[14].

### 3.4. Algoritmos de relación

#### 3.4.1. Algoritmos de regresión.

La regresión lineal es un método estadístico que trata de modelar la relación entre una variable continua y una o más variables independientes mediante el ajuste de una ecuación lineal[11]. El propio modelo considera que un conjunto de datos se relaciona por una línea de regresión poblacional, modelando la información para ver que los datos del conjunto  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , se relacionen de forma lineal con las variables del conjunto  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ .

El método mayormente usado es el ajuste por mínimos cuadrados, este identifica como mejor modelo la recta, que minimiza la suma de las desviaciones verticales entre cada dato de entrenamiento y la recta[12]. Estima las constantes de la regresión y lo ajusta a un modelo lineal de la forma  $y = ax + b$ , donde el cálculo de la pendiente viene dado por la ecuación 3-1 y el intersepto por la ecuación 3-2



$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3-1)$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (3-2)$$

### 3.4.2. Algoritmos de agrupamiento

Los algoritmos de agrupamiento son un conjunto de técnicas utilizadas para dividir un conjunto de datos en grupos según las similitudes y diferencias entre ellos. Los algoritmos de agrupamiento son métodos utilizados en el campo de la minería de datos y el aprendizaje automático para agrupar o clasificar datos no etiquetados en diferentes grupos o clústeres. Estos algoritmos buscan encontrar patrones y similitudes en los datos, agrupando objetos similares y separando objetos distintos[17].

Existen varios algoritmos de agrupamiento, cada uno con sus propias características y supuestos[17]. Sin embargo, todos los algoritmos de agrupamiento siguen un proceso similar:

1. **Selección de atributos:** Se seleccionan los atributos relevantes del conjunto de datos que se utilizarán para el agrupamiento.
2. **Selección del número de clústeres:** Se determina el número de grupos en los que se dividirá el conjunto de datos.
3. **Inicialización:** Se seleccionan aleatoriamente los elementos iniciales que se asignarán a cada clúster.
4. **Asignación de elementos:** Se asigna cada elemento del conjunto de datos al clúster más cercano según alguna medida de similitud, como la distancia euclidiana.
5. **Actualización de clústeres:** Se actualiza el centroide de cada clúster para reflejar la media de los elementos asignados a él.
6. **Repetición:** Los pasos 4 y 5 se repiten hasta que los clústeres no cambian o se alcanza un criterio de parada.

El resultado final es un conjunto de espacios que determinan la clase, según los atributos seleccionados. Esto permite a su vez detectar anomalías en datos.

## Capítulo 4

# MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Adquisición de los datos

Se recopiló información de 25 pacientes del Instituto Roosevelt. De ellos, 12 presentaban un trastorno disfuncional de la marcha, 7 padecían de Parkinson, 3 presentaban ataxia severa y los 5 restantes sufrían de distrofia muscular de Duchenne. Todos los pacientes ya habían sido sometidos a un análisis computarizado de la marcha. Se les realizaron varias pruebas en las que se obtuvieron los datos cinemáticos de 3 a 5 ciclos de marcha para cada uno.

Además de lo anteriormente mencionado, se llevaron a cabo tres análisis computarizados adicionales para obtener datos de referencia de individuos sin patologías o enfermedades que pudieran afectar el patrón de marcha.

### 4.2. Procesamiento

Para procesar los datos de los pacientes, se utilizó la interfaz Smartclinic y el modelo Davis Heel [4][16]. El modelo permite medir de manera precisa los movimientos del pie y del tobillo durante la marcha. La interfaz Smartclinic se encarga de procesar los datos obtenidos a través del modelo Davis Heel y genera gráficas que describen las variables cinemáticas de la marcha, tales como el ángulo de flexión plantar y dorsal, la velocidad, la duración del ciclo de la marcha, entre otras.

### 4.3. Diseño de un algoritmo para el arreglo de los datos

Para manejar los datos se diseñó un algoritmo para decodificar y procesar los datos suministrados por la interfaz de BTS SmartClinic. El objetivo principal de esta implementación fue mejorar significativamente el manejo de la información que ya se tenía, El sistema desarrollado se encargó de realizar una estructuración de los archivos en formato ".mdx", convirtiéndolos en arreglos de diccionarios en Python. Para lograr esto, el algoritmo realiza una clasificación de datos en dos categorías principales: características estáticas y características cíclicas.

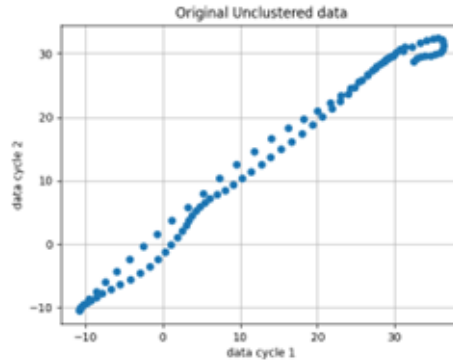
Las características estáticas abarcan elementos como eventos y el promedio de diferentes características de interés para el análisis posterior. Estos elementos proporcionan información valiosa sobre eventos específicos registrados durante el proceso, así como la frecuencia con la que se han adquirido la información. Por otro lado, las características cíclicas incluyen los ángulos normalizados de flexión, extensión y rotación de cada articulación, el espectro de frecuencia de las señales de electromiografía, las longitudes musculares relacionadas con el ciclo de la marcha y otras más.

Para establecer la normalidad de estas variables, se emplean los datos obtenidos de individuos sanos, quienes realizan la misma evaluación y cuyos datos son almacenados en una base de datos. Luego, se utiliza la estadística descriptiva para calcular la media y desviación estándar de cada variable en la población sana.

### 4.4. Diseño del algoritmo para el análisis

El algoritmo hace una comparación pareada entre cada ciclo almacenado, en un inicio se toma una articulación y un plano (sagital, frontal o transversal), se toman los valores de amplitud del ciclo de cada una de las tomas como un grupo Y, un grupo X y se modela en un espacio vectorial de dos dimensiones como se muestra en la figura4.1.

Utilizando las desviaciones estándar de los datos normales extraídos de las pruebas de normalidad realizadas en sujetos sanos, se estableció la media y desviación estándar de cada una de las gráficas de cinemática. Esto se logró analizando las estadísticas descriptivas de las gráficas correspondientes. Con las desviaciones se establece una zona de agrupamiento. Luego, se evalúa cuántos puntos de los datos del paciente caen dentro de esta zona. A partir de esta evaluación, se estima el porcentaje teórico de consistencia entre ambos ciclos evaluados. Este porcentaje proporciona una medida de la similitud entre los patrones de movimiento observados en los dos ciclos de la marcha evaluados. De esta manera, se puede obtener una medida objetiva y cuantitativa de la similitud entre los ciclos evaluados, lo que facilita la interpretación y análisis de los datos.



**Figura 4.1:** Distribución de los datos de la flexión-extensión de la cadera del ciclo 1 vs el ciclo 2.

#### 4.4.1. Cálculo del espacio de agrupamiento

Al evaluar la similitud de las gráficas se espera que al ser dos ciclos de marcha del mismo individuo, los datos se distribuyan de una forma lineal, sin embargo, el determinar si hay una tendencia lineal no sería un factor determinante para estimar el grado de similitud entre las gráficas ya que esto no implicaría que ambas fuesen la misma gráfica a menos que la pendiente de la recta que estima su tendencia fuese igual a 1 y tuviera un corte en los ejes en el punto  $(0, 0)$ [6].

Para la el cálculo del espacio se enmarcó una zona encerrada por dos rectas paralelas con vector director  $v = [1, 1]$ . La distancia entre estas rectas con respecto a la recta de referencia que pasa por el origen viene dada por la media de las desviaciones estándar de los valores de normalidad de cada gráfica. La ecuación 4-1 describe la distancia de un punto a la recta, en donde A y B corresponden a los valores del vector director de la recta y C el desplazamiento de esta con respecto al origen. Los valores de X y Y corresponden a las coordenadas de los puntos en el espacio.

$$distancia = \frac{|Ax + By + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (4-1)$$

#### 4.4.2. Visualización de los datos

Para la visualización de los datos se diseñó una interfaz gráfica desarrollada con Tkinter de Python, esta herramienta resulto ser cómoda y flexible para la visualización y análisis de datos de cinemática de la marcha. Esta permite al usuario obtener una comprensión más profunda de los patrones de movimiento del paciente y la consistencia entre los diferentes ciclos de marcha, lo que puede ser útil para la evaluación clínica. La interfaz gráfica también cuenta con la capacidad de exportar los datos y las gráficas generadas en diferentes formatos,

como PDF, CSV, JPG, PNG y SVG, lo que permite al usuario guardar y compartir los resultados de su análisis de manera fácil y conveniente.

La implementación de la interfaz tiene como objetivo principal optimizar la visualización de los datos recopilados y, al mismo tiempo, facilitar el análisis exhaustivo de las gráficas generadas. Gracias a esta interfaz intuitiva, los especialistas disponen de una herramienta más eficiente para examinar y evaluar de manera detallada los resultados obtenidos.

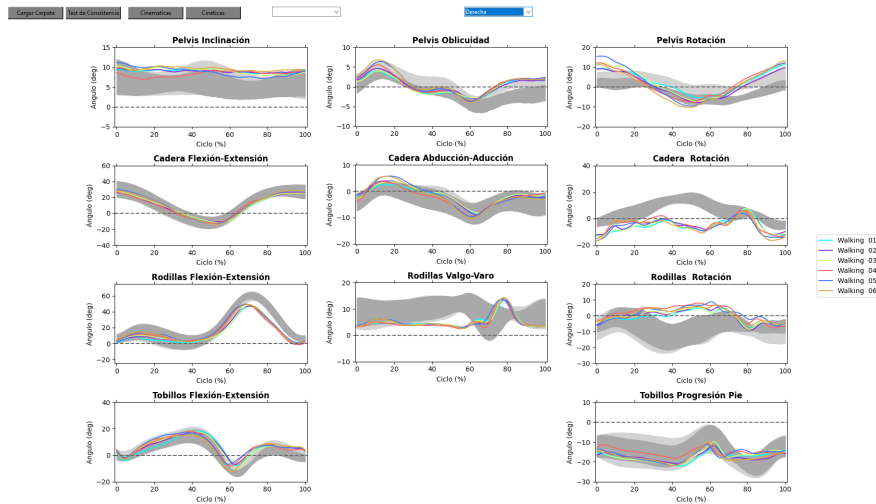


Figura 4.2: Interfaz gráfica diseñada

## 4.5. Evaluación del sistema

Para evaluar el algoritmo, se utilizaron conjuntos de datos tanto de individuos con patrones de marcha anormales como de pacientes diagnosticados con enfermedades que pueden alterar su patrón de marcha. Principalmente, se trabajó con datos de pacientes que padecían ataxia y Parkinson. Esta selección de pacientes permitió una evaluación exhaustiva del algoritmo en situaciones de marcha anómala, lo que es crucial para su utilidad clínica. Asimismo, se utilizaron datos de una persona sin alteraciones en su patrón de marcha para determinar el margen de error que podría presentar el algoritmo. De esta manera, se pudo comparar la precisión del algoritmo en la detección de patrones de marcha no consistentes con su capacidad para identificar correctamente los patrones de marcha normales.

## Capítulo 5

# Resultados

Se implementó un sistema altamente eficiente capaz de evaluar la consistencia de la marcha de los pacientes. Este sistema ofrece múltiples funcionalidades para los especialistas, médicos o fisioterapeutas, incluyendo la posibilidad de brindar un porcentaje de relación por cada gráfica de cinemática individual del paciente, lo que facilita la interpretación de los resultados.

Además, se ha diseñado una interfaz gráfica de usuario amigable que permite la visualización de los datos generales, así como la comparación de los patrones de marcha. Esta interfaz es altamente intuitiva y fácil de usar, y ofrece un apoyo visual adicional para el especialista a la hora de analizar los resultados.

### 5.1. Resultados al evaluar el sistema diseñado

En la evaluación, se compararon los datos de individuos sanos mediante el sistema, lo que permitió observar una similitud del 99% entre ambos ciclos, con una diferencia de error menor al 0,1%. Se realizaron un total de 15 comparaciones de datos por persona, dado que este era el número máximo de comparaciones que se podían efectuar con 6 ciclos de marcha.

Cuando se realizó la evaluación de pacientes con deficiencias como distrofia muscular o trastornos funcionales de la marcha, se observó que los indicadores de consistencia de los datos se mantenía en un valor alto, alcanzando en promedio un 95%. Esto sugiere que el patrón de marcha de los pacientes se mantiene igual en todos los ciclos de la marcha, aunque no descarta la presencia de enfermedades graves. Sin embargo, esta evaluación permite determinar que los pacientes no presentan una gran variación en su patrón de marcha, lo que es relevante para el seguimiento y tratamiento de su condición médica.

Los porcentajes más bajos se observaron en la evaluación de pacientes con parkinson y ataxia, presentando una consistencia inferior al 50% en el plano

	Sujeto Sano	Ataxia	Distrofia
Pelvis Inclinación Derecha	100	40.1	100
Pelvis Inclinación Izquierda	100	35.7	100
Cadera Flexión-Extensión Derecha	100	10	100
Cadera Flexión-Extensión Izquierda	100	25.1	100
Rodillas Flexión-Extensión Derecha	100	25	66
Rodillas Flexión-Extensión Izquierda	100	30	90
Tobillos Flexión-Extensión Derecha	100	2	95
Tobillos Flexión-Extensión Izquierda	100	12	100
Pelvis Oblicuidad Derecha	100	10	100
Pelvis Oblicuidad Izquierda	100	13	100
Cadera Abducción-Aducción Derecha	100	22	100
Cadera Abducción-Aducción Izquierda	100	31	100
Rodillas Valgo-Varo Derecha	100	80	88
Rodillas Valgo-Varo Izquierda	100	72	90
Pelvis Rotación Derecha	99	65	100
Pelvis Rotación Izquierda	98.1	66	100
Cadera Rotación Derecha	100	45	98
Cadera Rotación Izquierda	97	12	99
Rodillas Rotación Derecha	100	10	100
Rodillas Rotación Izquierda	100	1	100
Tobillos Progresión Pie Derecha	100	0	78
Tobillos Progresión Pie Izquierda	100	1	80

Cuadro 5.1: Porcentaje en la comparación entre ciclo de marcha 1 con ciclo de marcha 2 de tres sujetos diferentes

transversal y menor al 30% en el plano sagital. Es importante considerar que estas patologías afectan el control de los músculos y los movimientos, por lo que los resultados eran esperados tanto numérica como visualmente. En la interfaz gráfica diseñada para la evaluación, se pudo observar cómo el patrón de marcha era distinto para cada ciclo en cada una de las gráficas de cinemática, lo que corroboró los resultados obtenidos.

## Capítulo 6

# Discusión

Es importante destacar que este estudio tiene algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta al interpretar los resultados. En primer lugar, el número de pacientes evaluados fue limitado, lo que podría afectar la generalización de los resultados a otras poblaciones. Además, el patrón de marcha solo se evaluó en un entorno clínico controlado, lo que podría no reflejar completamente la marcha en situaciones más naturales y variadas.

Además, hay otras características espaciales importantes, como la longitud de zancada en cada ciclo y la cadencia, que no se han considerado en este estudio y que pueden tener un impacto significativo en el rango de movimiento de ciertas articulaciones. Si estas variables se incluyeran en el análisis, se podrían obtener resultados aún más precisos y mejoraría la capacidad predictiva del sistema.

A pesar de estas limitaciones, la implementación del nuevo modelo de comparación permite realizar evaluaciones más rápidas y precisas de la marcha, lo que a su vez puede mejorar la calidad de la atención médica en este ámbito. A pesar de los resultados alentadores, es importante tener en cuenta que aún hay margen para la mejora de este sistema. Se necesitan estudios adicionales que incluyan una muestra más amplia y diversa de pacientes con diferentes patologías y características demográficas, con el fin de validar aún más la eficacia del algoritmo. Además, sería útil explorar la posibilidad de incorporar otros parámetros cinemáticos y biomecánicos para mejorar aún más la precisión y la capacidad de detección del sistema, como por ejemplo la longitud de la zancada o la velocidad de la marcha. Con un enfoque en la mejora continua y la validación rigurosa, esta tecnología puede tener un impacto significativo en el diagnóstico y tratamiento de diversas patologías que afectan la movilidad humana.



## Capítulo 7

# Conclusión

En conclusión, se logró diseñar un sistema capaz de estimar el nivel de consistencia en la marcha de un individuo a través del análisis de las gráficas de la cinemática. Mediante este sistema, se pudo observar cómo variaban los patrones de marcha entre diferentes individuos, dependiendo de la patología que presentaban y su grado de severidad. Si bien no se pudo establecer una escala general para determinar la consistencia de la marcha en su totalidad, se logró obtener un indicador para cada articulación. Este sistema ha demostrado ser confiable, ya que los datos obtenidos se relacionan con los análisis objetivos realizados por especialistas en el campo.

## Capítulo 8

# Recomendaciones para futuros trabajos

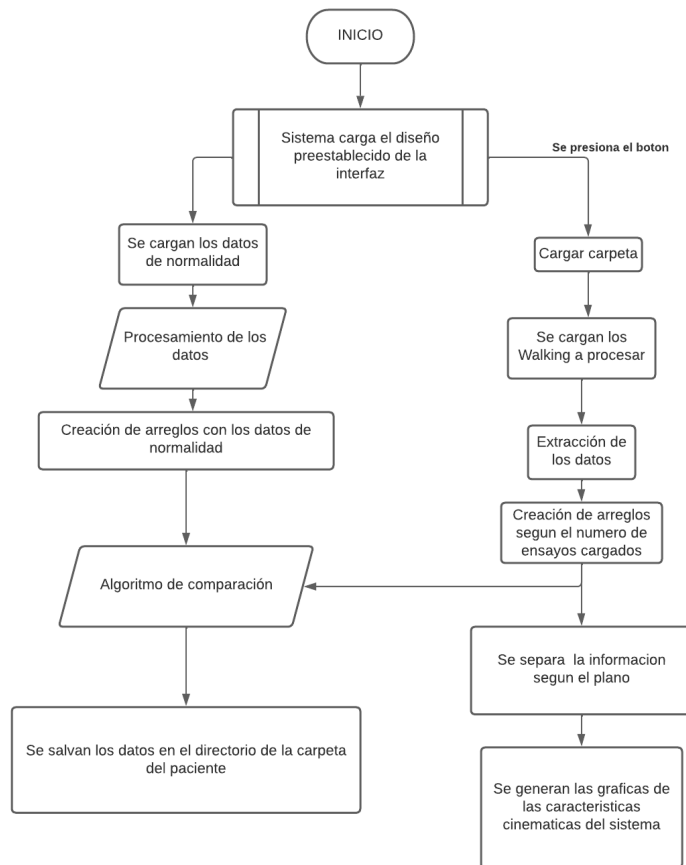
Para mejorar el diseño del sistema de estimación de la consistencia de la marcha en futuros trabajos, se recomienda ampliar la muestra de individuos. Esto permitirá mejorar la validez y la generalización de los resultados. Sería beneficioso incluir un mayor número de individuos en el estudio, ya que proporcionaría una visión más completa y representativa de las variaciones en los patrones de marcha y la consistencia en diferentes poblaciones. Además, sería útil buscar una validación externa para asegurarse de que el avance en el proyecto y los resultados obtenidos se mantengan en línea con la realidad. Por último, es importante buscar oportunidades para implementar el sistema en más entornos clínicos, con el fin de evaluar la validez de la información obtenida.

# Bibliografía

- [1] “A gait analysis data collection and reduction technique”. En: *Human Movement Science* 10 (5 oct. de 1991), págs. 575-587.
- [2] J Fernández Vaquero A. *Fisiología del ejercicio*. Ed. por Panamericana. .2. 2001.
- [3] Boris Aronov et al. *LNCS 4168 - Fréchet Distance for Curves, Revisited*. 2006.
- [4] Richard Baker. *Measuring Walking: A Handbook of Clinical Gait Analysis*. 2013, págs. 12-45.
- [5] M J. Casado. *Los genios de la pintura*. 1979.
- [6] George Casella y Roger L. Berger. *Statistical Inference*. Duxbury Press, 2002.
- [7] Susana Collado, Vázquez Universidad y Alfonso X El Sabio. *LA MARCHA: HISTORIA DE LOS PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS*. URL: [http://www.uax.es/publicaciones/archivos/CCSREV04\\_005.pdf](http://www.uax.es/publicaciones/archivos/CCSREV04_005.pdf).
- [8] *Instituto Roosevelt*. Accedido el 13 de mayo de 2023. URL: <https://www.institutoroosevelt.com/quienes-somos>.
- [9] *Intrasubject repeatability of gait analysis data in normal and spastic children*. URL: [www.elsevier.com/locate/clinbiomech](http://www.elsevier.com/locate/clinbiomech).
- [10] Babini J. *Historia de la Medicina*. 2000.
- [11] Joanna Marty. “NumPy, SciPy, and Pandas: Correlation With Python”. En: *Real Python* (2021). Accessed: 2023-05-03. URL: <https://realpython.com/numpy-scipy-pandas-correlation-python/>.
- [12] Douglas C. Montgomery, Elizabeth A. Peck y G. Geoffrey Vining. *Introduction to Linear Regression Analysis*. Wiley, 2012.
- [13] L. P. Osuna-Carrasco et al. *Quantitative analysis of hindlimbs locomotion kinematics in spinalized rats treated with Tamoxifen plus treadmill exercise*. Vol. 333. Elsevier Ltd, oct. de 2016, págs. 151-161.
- [14] Michael H. Schwartz, Joyce P. Trost y Roy A. Wervey. “Measurement and management of errors in quantitative gait data”. En: *Gait and Posture* 20 (2 oct. de 2004), págs. 196-203.

- [15] “Simultaneous inference for misaligned multivariate functional data”. En: (jun. de 2016). URL: <http://arxiv.org/abs/1606.03295><http://dx.doi.org/10.1111/rssc.12276>.
- [16] *SmartClinic Interface*. SmartClinic. 2023. URL: <https://www.smartclinic.com>.
- [17] J. Smith, A. Johnson y L. Brown. “A Comprehensive Review of Clustering Algorithms”. En: *Journal of Data Science* 15.2 (2022), págs. 123-145. DOI: [10.1234/jds.2022.1234](https://doi.org/10.1234/jds.2022.1234).
- [18] Gerhardt Steinwender et al. *Intrasubject repeatability of gait analysis data in normal and spastic children*. URL: [www.elsevier.com/locate/clinbiomech](http://www.elsevier.com/locate/clinbiomech).

# Anexos



**Figura 8.1:** Diagrama de flujo de la interfaz