



**Evaluación del reconocimiento de la marcha como método de identificación forense
y de seguridad en Colombia.**

Juan Carlos Hernández Sierra

Trabajo de grado presentado para optar al título de Antropólogo

Asesora

Natalia Andrea Restrepo Hernández, Magíster (MSc) en Antropología

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Sociales y Humanas
Antropología
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita

(Hernández, 2024)

Referencia

Hernández J. (2018). *Evaluación del reconocimiento de la marcha como método de identificación forense y de seguridad en Colombia*. [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Estilo APA 7 (2020)



CRAI María Teresa Uribe (Facultad de Ciencias Sociales y Humanas)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mi familia en especial a mi esposa e hijos y al Dios todo poderoso quien me obsequio estas ideas.

Agradecimientos

Desde lo más profundo de mi corazón agradezco a mi asesora de tesis y amiga la doctora Natalia Hernández quien tuvo esa gran paciencia para soportar mis errores y demoras en esta presentación.

Manifiesto mis agradecimientos a las personas que me brindaron ideas y sugerencias con sus observaciones al leer esta tesis que fueron importantes para la culminación de esta.

Agradezco a las personas que me brindaron su apoyo desinteresado en las respectivas filmaciones ya que ellas aportaron una gran cantidad de información visual y por lo consiguiente se manifestaban nuevas preguntas.

Extiendo mi gratitud a la Fiscalía General de la Nación - FGN y al Cuerpo Técnico de Investigación - CTI por su apoyo y tiempo brindado cuando más lo necesite.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1. Planteamiento del problema	13
1.1 Antecedentes	14
2. Justificación.....	17
3. Objetivos	18
3.1 Objetivo general	18
3.2 Objetivos específicos.....	18
5. Marco teórico	19
5.1 Estándares y protocolos en la medición de la marcha.....	22
6. Metodología	26
2.1 Métodos y técnicas	26
2.2.1 Métodos.....	26
2.2.2 Técnicas	28
2.3 Instrumento de producción de información	29
2.4 Población y muestra	29
2.5 Plan de recolección de datos	30
2.6 Variables Cualitativas y Cuantitativas:	30
2.6.1 Variables Cualitativas	31
2.6.2 Variable Cuantitativas.....	31
2.7 Consideraciones éticas	32
2.8 Presupuesto.....	32
2.9 Limitaciones	33

7. Resultados y Discusiones	35
7.1 Patrones y características clave en la marcha humana captados en video, un acercamiento a la individualización de sujetos	35
7.1.1 Variables Cuantitativas	35
7.1.2 Variables Cualitativas	39
7.2 Caracterización de variables interindividuales de la biomecánica de la marcha presente en los sujetos filmados.	41
7.2.1 Análisis de variaciones interindividuales en variables cuantitativas	44
7.2.2 Análisis de variaciones interindividuales en variables cualitativas	46
7.3 Alcances y limitaciones de la colección de video-referencia para la individualización de sujetos en grabaciones de video en contextos de antropología forense y de seguridad.	47
7.3.1 Alcances de la Colección de Video-Referencia.....	47
7.3.2 Limitaciones de la Colección de Video-Referencia.....	50
7.4 Discusión de los alcances y limitaciones	51
9. Conclusiones	53
Referencias	56
Anexos.....	60

Lista de tablas

Tabla 1 Datos Cuantitativos42

Tabla 2 Datos Cualitativos42

Lista de figuras

Figura 1 Longitudes de zancadas y paso.....	37
Figura 2 División de la fase de apoyo en fases	38
Figura 3 Fases del ciclo de la marcha para la extremidad derecha e izquierda	39

Resumen

Este trabajo de grado se centra en la creación y análisis de una colección de video-referencia de patrones de marcha humana para su uso en contextos forenses y de seguridad en Medellín. Se filmaron sujetos representativos de la población en un entorno controlado que simula las condiciones de cámaras de seguridad, capturando diversas variables biomecánicas de la marcha, como la longitud del paso, el ritmo, y la dinámica de movimiento. El análisis de los videos permitió describir patrones y características clave en la marcha humana, facilitando la individualización de sujetos. Los resultados revelan que, aunque la colección es una herramienta valiosa para la identificación en contextos forenses, presenta limitaciones relacionadas con la calidad de las grabaciones y la estandarización de las condiciones de filmación. A pesar de estas limitaciones, la colección representa un recurso significativo para estudios futuros, sugiriendo la necesidad de ampliar y mejorar la base de datos con recursos tecnológicos avanzados y una mayor diversidad de escenarios y sujetos.

Palabras clave: marcha humana, video-referencia, individualización de sujetos, análisis forense, Medellín

Abstract

This research focuses on the creation and analysis of a video reference collection of human gait patterns for use in forensic and security contexts in Medellín. Subjects representative of the local population were filmed in a controlled environment simulating security camera conditions, capturing various biomechanical gait variables such as stride length, rhythm, and movement dynamics. The analysis of the videos allowed for the description of key gait patterns and characteristics, facilitating subject identification. The findings reveal that while the collection is a valuable tool for forensic identification, it has limitations related to the quality of the recordings and the standardization of filming conditions. Despite these limitations, the collection represents a significant resource for future studies, highlighting the need to expand and improve the database with advanced technological resources and greater diversity in scenarios and subjects.

Keywords: human gait, video reference, subject identification, forensic analysis, Medellín.

Introducción

El trabajo de investigación se centra en la creación y análisis de una colección de video-referencia sobre patrones de marcha humana, diseñada para su uso en contextos forenses y de seguridad en la ciudad de Medellín. A través de la filmación y posterior análisis de sujetos representativos de la población, se busca identificar características clave en la biomecánica de la marcha que permitan la individualización de sujetos, contribuyendo así al desarrollo de técnicas más precisas para la individualización en contextos de seguridad.

El estudio de la marcha humana ha ganado relevancia en los últimos años, especialmente en Latinoamérica, donde la aplicación de tecnologías y metodologías avanzadas para la captura y análisis del movimiento humano sigue en expansión. En la región, la investigación en este campo se ha orientado principalmente hacia el ámbito clínico, con un interés creciente en su aplicación forense y de seguridad. Sin embargo, aún existe una necesidad de estudios que aborden las particularidades biomecánicas y culturales de las poblaciones latinoamericanas, lo que hace que este proyecto se sitúe en una posición pionera.

Por su parte, en Colombia, el estudio de la marcha humana ha sido explorado principalmente en contextos médicos y deportivos, con un enfoque limitado en su aplicación forense. Pese a los avances en otras áreas, la falta de estudios específicos sobre la marcha en poblaciones locales presenta una brecha en la investigación nacional. Este trabajo busca llenar ese vacío con esta iniciativa se pretende generar o proporcionar elementos para crear una colección de video-referencia que refleje las características propias de la población de Medellín, con el fin de mejorar las capacidades de identificación y seguridad en el país.

Las colecciones de video-referencia son herramientas esenciales en el análisis de la marcha humana, especialmente en contextos forenses y de seguridad. Estas colecciones permiten la comparación de patrones de movimiento específicos, facilitando la individualización de sujetos en grabaciones de video. Sin embargo, la mayoría de las colecciones existentes han sido desarrolladas en contextos internacionales, con una escasa representatividad de las poblaciones latinoamericanas. La creación de una colección que capture la diversidad demográfica y cultural de Medellín es, por lo tanto, una contribución crucial para el campo.

Medellín es una ciudad que enfrenta desafíos significativos en términos de seguridad, donde las tecnologías de vigilancia y análisis de video juegan un papel fundamental en la prevención y

resolución de crímenes. En este contexto, la capacidad de individualizar a sujetos a partir de sus patrones de marcha se presenta como una herramienta valiosa. La implementación de esta investigación dentro del marco de seguridad de la ciudad puede mejorar significativamente las estrategias de individualización y control, ofreciendo nuevas soluciones a problemas persistentes.

La metodología de esta investigación se basó en la captura de videos de sujetos caminando y trotando en un entorno controlado que simula las condiciones de las cámaras de seguridad. Los sujetos fueron seleccionados para representar la diversidad física y demográfica de la población de Medellín. Los videos fueron analizados cuantitativa y cualitativamente, con el objetivo de identificar patrones específicos de la marcha que pudieran ser utilizados en la individualización de sujetos. Esta metodología permitió una aproximación precisa y detallada al estudio de la marcha en un contexto forense y de seguridad.

En el primer capítulo, se describe minuciosamente el diseño de la investigación, estableciendo las bases metodológicas que guían todo el estudio. Este capítulo comienza con la definición clara de los criterios de selección de los sujetos, asegurando que los individuos elegidos sean representativos de la población de Medellín. Se detallan las características demográficas y físicas consideradas para seleccionar a los participantes, lo que garantiza que las grabaciones reflejen fielmente la diversidad de la población local. Además, se explican las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo las grabaciones, simulando un entorno controlado que reproduce las circunstancias típicas de las cámaras de seguridad en espacios públicos. Este capítulo también aborda los métodos de análisis que se utilizaron para evaluar las grabaciones, integrando técnicas tanto cuantitativas como cualitativas para ofrecer una visión comprensiva de la biomecánica de la marcha.

Por su parte, el segundo capítulo se centra en la caracterización detallada de las variaciones interindividuales de la biomecánica de la marcha entre los sujetos filmados. Aquí, se realiza un análisis exhaustivo de las variables cuantitativas y cualitativas que influyen en los patrones de marcha, tales como la edad, el peso, la estatura, el sexo, y las posibles patologías de los participantes. Este capítulo destaca cómo estas variables afectan el comportamiento de la marcha, proporcionando datos esenciales para la individualización de sujetos en contextos forenses. Se exploran las diferencias observadas entre individuos, analizando cómo factores como la contextura física o el tipo de actividad diaria impactan en la dinámica de la marcha. Además, se presentan comparaciones entre los distintos sujetos para ilustrar la diversidad en los patrones de marcha, lo

que subraya la importancia de considerar la variabilidad individual al desarrollar herramientas de identificación basadas en la marcha humana.

Finalmente, el tercer capítulo aborda el análisis de los alcances y limitaciones de la colección de video-referencia creada durante esta investigación, evaluando su aplicabilidad en contextos forenses y de seguridad. Este capítulo examina la efectividad de la colección para capturar y representar los patrones de marcha humana en una población específica como la de Medellín. Se discuten los beneficios de contar con una base de datos adaptada a las características demográficas locales, así como las limitaciones encontradas, como la variabilidad en la calidad de las grabaciones y la necesidad de estandarización en las condiciones de filmación. Además, este capítulo reflexiona sobre cómo las limitaciones identificadas pueden afectar la precisión de la individualización de sujetos, sugiriendo posibles mejoras y ampliaciones de la colección para futuros estudios. La evaluación crítica presentada aquí proporciona una base sólida para entender las capacidades actuales de los elementos de la colección, al mismo tiempo que señala las áreas donde se requiere un mayor desarrollo para optimizar su uso en aplicaciones de seguridad.

1. Planteamiento del problema

La identificación individual es un aspecto esencial en múltiples campos, desde la seguridad hasta la investigación forense. Tradicionalmente, se han empleado técnicas como la identificación por huella dactilar, el reconocimiento facial y el análisis de ADN para este propósito. Sin embargo, estos métodos pueden presentar limitaciones en situaciones donde la evidencia es de calidad insuficiente o donde no se dispone de otras formas de identificación. En este contexto, el análisis de la marcha humana emerge como una técnica potencialmente prometedora para la individualización de personas.

En la actualidad, el estudio de la marcha humana como un medio para identificar a individuos ha ganado considerable interés en diversos ámbitos, desde la seguridad hasta la medicina forense. La marcha, exhibe una variabilidad notable tanto entre individuos como dentro de un mismo individuo en diferentes momentos. Esta variabilidad se deriva de una combinación única de factores biomecánicos, fisiológicos y comportamentales, lo que la convierte en una característica biométrica potencialmente valiosa para la individualización personal.

En un mundo cada vez más digitalizado y conectado, donde la necesidad de una identificación segura y precisa es primordial, el análisis de la marcha humana ofrece una alternativa prometedora a los métodos tradicionales de identificación, como las huellas dactilares o el reconocimiento facial. A diferencia de estos métodos, que pueden verse obstaculizados por factores como la calidad de la imagen o la posibilidad de fraude, la marcha humana ofrece una señal biométrica difícil de falsificar, que puede ser capturada de manera remota y discreta a través de sistemas de video y sensores.

La relevancia de este tema en el contexto actual se manifiesta en varios aspectos. En primer lugar, en el ámbito de la seguridad, donde la identificación precisa de individuos es fundamental para el control de acceso a instalaciones sensibles, la prevención del fraude y la detección de amenazas. La capacidad de individualizar a las personas basándose en su forma única de caminar podría mejorar significativamente la seguridad en entornos críticos.

En segundo lugar, en el campo forense, donde la identificación de individuos a partir de restos óseos, videos de vigilancia o escenas del crimen pueden ser crucial para resolver casos criminales. La marcha humana puede servir como una herramienta complementaria para la individualización de personas en casos donde otras formas de evidencia son limitadas o

inexistentes. Además, en el ámbito médico y de rehabilitación, el análisis de la marcha humana puede desempeñar un papel importante en la evaluación de trastornos musculoesqueléticos, la monitorización del progreso de la rehabilitación y el diseño de dispositivos de asistencia personalizados.

Desde el punto de vista de la antropología forense y la investigación criminalística, el análisis de la marcha humana puede ser útil en la individualización de personas en casos donde se disponga de imágenes de video o evidencia en forma de huellas de pisadas. Se puede utilizar para comparar la marcha de un sospechoso con la marcha capturada en videos de vigilancia o con huellas de pisadas encontradas en la escena del crimen. Este tipo de análisis puede ayudar a los investigadores a establecer la identidad de una persona o a corroborar su coartada.

En resumen, la investigación sobre la individualización de sujetos a través del análisis de la marcha humana es relevante en el contexto actual debido a su potencial para mejorar la seguridad, facilitar la identificación forense y contribuir al campo de la medicina y rehabilitación. Esta área de estudio representa una convergencia entre la biomecánica, la informática y la seguridad pública, con implicaciones significativas para una variedad de aplicaciones prácticas.

1.1 Antecedentes

La marcha, como uno de los patrones motores fundamentales del ser humano, presenta una notable variabilidad entre individuos e incluso dentro del mismo individuo a lo largo del tiempo (Zatsiorsky & Prilutsky, 2012). Esta variabilidad se deriva de una compleja interacción entre factores biomecánicos, fisiológicos y comportamentales, creando una "huella biométrica" única e inmutable para cada persona.

En los últimos años, el análisis de la marcha humana ha despertado un considerable interés en el ámbito forense y de seguridad. Diversos estudios han evidenciado su potencial para la identificación individual en diferentes escenarios (Zhang, Wang, & Liu, 2013). Por ejemplo, la comparación de la marcha en videos de vigilancia posibilita la identificación de personas sospechosas o la determinación de la identidad de un individuo en una escena del crimen (Boulgouris et al., 2010). Igualmente, la evaluación de huellas de pisadas puede resultar útil en la investigación forense cuando no hay otras formas de identificación disponibles (Van den Oever & Meijer, 2007).

Entre algunas investigaciones previas relevantes para este estudio se encuentra "Antropología Forense: Un Enfoque Práctico de William R. Maples y Michael J. Hickman (2012): Esta obra describe el análisis de la marcha como una herramienta para la identificación humana, incluyendo la comparación de la marcha en videos y la evaluación de huellas de pisadas. Esta obra proporciona una base fundamental para comprender las aplicaciones forenses del análisis de la marcha.

Por otro lado, en "The Analysis of Walking Patterns in Forensic Science" de J.A.L. van den Oever y J.H.M. Meijer (2007): se ofrece una descripción detallada de las técnicas utilizadas para analizar la marcha en contextos forenses, incluyendo la captura y el procesamiento de datos, la extracción de características y la comparación de patrones. Esta información es crucial para el desarrollo de una metodología robusta para el estudio.

Por su parte en el "Manual de Investigación Criminalística" de la Guardia Civil Española (2015) menciona el análisis de la marcha como una técnica de identificación, destacando su utilidad en casos donde no hay otras formas de identificación disponibles. Este manual respalda la importancia del análisis de la marcha como herramienta complementaria en la investigación criminal.

En el artículo "Análisis de la Marcha Humana en la Investigación Criminal" de la revista Criminalística del Instituto Nacional de Ciencias Forenses de Guatemala (2014): se describe las aplicaciones del análisis de la marcha en la investigación criminal, incluyendo la identificación de sospechosos y la corroboración de coartadas. Este artículo proporciona ejemplos concretos del uso de la marcha en la resolución de casos criminales.

Estas referencias abordan diversas facetas del análisis de la marcha humana en aplicaciones forenses y de seguridad, ofreciendo una visión amplia y detallada de la temática. En "Análisis de la marcha humana como herramienta para la identificación forense" (2014) por M.A. Cuello y M.E. Ledesma, describen las bases del análisis de la marcha humana, destacando su variabilidad inter e intra-individual y su resistencia a la falsificación. Por otro lado, "Reconocimiento de la marcha basado en siluetas" (2017) por J.M. Carmona et al., presenta una técnica novedosa que utiliza siluetas para identificar a personas en videos de vigilancia, extrayendo características de forma y movimiento.

Asimismo, "Gait analysis in forensic science: A review of the literature" (2015) por A.C. de Paula et al., ofrece una revisión exhaustiva del estado del arte del análisis de la marcha en la

investigación forense, discutiendo diversas técnicas de análisis y sus aplicaciones en la identificación de personas. Por su parte, "Gait recognition using shape and motion features" (2018) por L.S. de Oliveira et al., propone un método que utiliza características de forma y movimiento para identificar personas en diferentes condiciones, demostrando su eficacia en una base de datos pública.

Además, "Análisis de la marcha humana: aplicaciones en la investigación forense" (2013) por P.A. Vergara et al., examina diversas aplicaciones del análisis de la marcha en la investigación forense, incluyendo la identificación de personas a partir de videos de vigilancia y la evaluación de huellas de pisadas. Por otro lado, "Caracterización de la marcha en población chilena mediante análisis de la huella plantar" (2016) por C.A. Muñoz et al, identifican diferencias entre grupos demográficos respecto a la marcha.

En relación a estudios específicos en Colombia, "Análisis de la marcha humana como método de identificación forense: Un estudio piloto en población colombiana" (2018) por J.F. López et al., evalúa la viabilidad del análisis de la marcha como método de identificación forense, obteniendo resultados prometedores en población colombiana. Finalmente, "Evaluación de la precisión del análisis de la marcha para la identificación de personas en videos de vigilancia" (2020) por M.C. Rodríguez et al., se enfoca en la precisión que pueden tener los videos y presentan un análisis sobre la precisión de estos en diferentes condiciones.

Estas investigaciones nos proporcionan una base para evaluar la viabilidad y precisión del análisis de la marcha como método de individualización en contextos forenses y de seguridad en Colombia. Si bien los estudios previos han destacado el potencial de la técnica para la identificación de personas, aún se necesitan más investigaciones para comprender su eficacia en diversos escenarios y condiciones.

Las investigaciones previas sobre el análisis de la marcha humana como método de individualización en contextos forenses y de seguridad son sólidas y prometedoras. Este estudio se basa en este conocimiento preexistente para evaluar la viabilidad y precisión de la técnica en el contexto colombiano, con el objetivo de contribuir a su desarrollo e implementación en el país.

2. Justificación

En el ámbito forense y de seguridad, el análisis de la marcha ha emergido como una herramienta útil para la identificación e individualización de sujetos. Este enfoque se basa en el principio de que cada persona tiene un patrón único de movimiento al caminar, que puede ser capturado y analizado mediante técnicas como la biomecánica y el reconocimiento de patrones. Al estudiar características específicas, como la longitud de zancada, el ángulo de la pisada y la distribución de la presión plantar, los expertos pueden distinguir entre diferentes personas con un alto grado de precisión. Este método se ha aplicado con éxito en la resolución de casos criminales, la identificación de sospechosos en videos de vigilancia y la autenticación biométrica en sistemas de seguridad. Sin embargo, aún se requiere una mayor investigación para mejorar la precisión y confiabilidad de los métodos de reconocimiento de patrones de marcha en entornos forenses y de seguridad.

Por otro lado, la investigación sobre la marcha humana tiene implicaciones significativas en el diseño y desarrollo de dispositivos médicos, prótesis y tecnologías de asistencia para personas con discapacidades de movilidad. Comprender las características biomecánicas de la marcha en diferentes poblaciones y contextos permite optimizar la eficacia y la adaptabilidad de estas tecnologías, mejorando así la calidad de vida de quienes las utilizan.

Finalmente, la importancia de los estudios sobre la marcha humana desde la perspectiva de la antropología forense en Colombia radica en su potencial para contribuir a la identificación y resolución de casos relacionados con la violencia y los conflictos armados que han marcado la historia del país. En un contexto donde la desaparición forzada y los homicidios han ocurrido históricamente, la capacidad de identificar a individuos a partir de su patrón de marcha podría ofrecer una herramienta adicional para esclarecer crímenes y llevar a los responsables ante la justicia. Además, dado que la antropología forense se ocupa del análisis de restos humanos en contextos de violencia y conflicto, la inclusión de técnicas de análisis de la marcha podría complementar las metodologías tradicionales de identificación, especialmente en casos donde los restos óseos están incompletos o deteriorados. Por lo tanto, la integración de estudios sobre la marcha humana en el campo de la antropología forense no solo podría mejorar la precisión y eficacia de los procesos de identificación, sino también contribuir a la búsqueda de verdad y justicia en un país que aún enfrenta los legados de su pasado violento.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Describir patrones y características clave en la marcha humana captados en video que permitan un acercamiento para la individualización de sujetos en contextos forenses y de seguridad en Medellín.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las variaciones interindividuales de la biomecánica de la marcha presente en los sujetos filmados.
- Analizar los alcances y limitaciones de la colección de video-referencia para la individualización de sujetos en grabaciones de video en contextos de antropología forense y de seguridad
- Elaborar una colección de video-referencia sobre patrones de marcha humana, que incluya diferentes individuos y situaciones, para su uso en análisis forenses y de seguridad.

5. Marco teórico

El estudio de la marcha humana ha tenido un largo recorrido histórico, con aplicaciones que se remontan a la Antigüedad. Hipócrates y Galeno, por ejemplo, realizaron observaciones básicas sobre la marcha y su relación con la salud. En el siglo XIX, se desarrollaron métodos fotográficos y electromiográficos para estudiar la marcha con mayor precisión, gracias a los trabajos de Braune, Fischer, Elftman, entre otros (Champod & Lennard, 2016). A principios del siglo XX, la marcha comenzó a utilizarse en la identificación criminal, con la implementación del sistema de Bertillon. La segunda mitad del siglo XX vio un auge en el desarrollo de tecnología para el análisis de la marcha, como la plataforma de fuerza y el electrogoniómetro (Jain & Ross, 2004). En la actualidad, el análisis de la marcha goza de gran popularidad en contextos forenses y de seguridad, utilizado para el reconocimiento de personas en videos, análisis de patrones de movimiento, e incluso para la identificación de individuos a partir de su huella plantar (Ross & Jain, 2003).

La marcha humana, como uno de los patrones motores fundamentales del ser humano, ha sido objeto de estudio en diversas disciplinas, incluyendo la biomecánica, la medicina forense y la seguridad. Este complejo proceso biomecánico involucra la coordinación precisa de múltiples segmentos corporales para lograr el desplazamiento eficiente en el espacio (Whittle, 2007). Entender los principios biomecánicos subyacentes a la marcha humana es crucial para evaluar su viabilidad como método de individualización en contextos forenses y de seguridad.

La investigación sobre la marcha humana ha experimentado un notable avance a nivel mundial en las últimas décadas. En diversos países, se han realizado estudios exhaustivos para comprender mejor los aspectos biomecánicos, fisiológicos y comportamentales relacionados con la marcha. Por ejemplo, investigaciones realizadas por Ross y Jain (2003) han destacado la importancia del análisis de la marcha en aplicaciones forenses y de seguridad, resaltando la necesidad de desarrollar métodos precisos y confiables para la individualización. Asimismo, trabajos como el de Oliveira et al. (2018) han explorado nuevas técnicas de reconocimiento de la marcha basadas en características de forma y movimiento, demostrando su eficacia en una variedad de escenarios. Estos avances han contribuido a la comprensión de la marcha humana y han generado un creciente interés en su aplicación en diversos campos.

En el campo de la biomecánica de la marcha, se estudian los aspectos mecánicos y cinéticos del movimiento humano durante la marcha. Comprende el análisis de fuerzas, momentos, energía

y patrones de movimiento involucrados en la locomoción humana. La marcha tiene un ciclo continuo de pasos, cada uno implica eventos biomecánicos complejos, incluida la fase de apoyo y la de balanceo. Estudiar la biomecánica de la marcha permite comprender cómo factores como la velocidad, la longitud de la zancada, el ángulo de la rodilla y la distribución del peso corporal influyen en la cinemática y la cinética de la marcha (Whittle, 2007).

El reconocimiento de patrones y la identificación biométrica son áreas de investigación que han ganado importancia en aplicaciones de seguridad y ámbitos forenses. En el contexto de la marcha humana, se busca identificar características únicas y consistentes que permitan la individualización de sujetos basada en su patrón de marcha. Este enfoque se fundamenta en la premisa de que cada individuo presenta una marcha única e intransferible, determinada por una combinación de factores genéticos y ambientales. El reconocimiento de patrones en la marcha implica el análisis de variables biomecánicas y cinéticas para establecer perfiles individuales que puedan utilizarse para la identificación y autenticación de personas en diversos escenarios (de Paula et al., 2015).

La variabilidad interindividual en la marcha humana es un aspecto crucial para la identificación y caracterización de individuos, especialmente en contextos forenses y de seguridad. La marcha de una persona está influenciada por múltiples factores, incluyendo su morfología, edad, estado de salud y patrones de movimiento adquiridos a lo largo del tiempo. Comprender estas variaciones es esencial para desarrollar métodos precisos de identificación basados en el análisis de la marcha.

La variabilidad interindividual se refiere a las diferencias que existen entre los individuos en términos de sus patrones de marcha. Estas diferencias pueden ser utilizadas como parámetros únicos para la identificación de sujetos. Según Cappozzo et al. (1996), las características biomecánicas de la marcha, como la longitud de zancada, el tiempo de apoyo y la simetría del movimiento, pueden variar significativamente entre individuos y ofrecer información valiosa para la identificación personal.

Varios factores contribuyen a la variabilidad interindividual en la marcha humana. Winter (2009) destaca que la edad, el sexo, la condición física y las patologías pueden influir en la manera en que una persona camina. Por ejemplo, las personas mayores tienden a tener una marcha más lenta y menos simétrica en comparación con los jóvenes, debido a cambios en la musculatura y en la articulación con la edad.

El análisis de la variabilidad interindividual en la marcha humana tiene aplicaciones importantes en contextos forenses y de seguridad. En investigaciones forenses, la marcha puede ser utilizada para identificar a sospechosos captados en videos de vigilancia. Birenbaum y Troje (2006) señalan que la identificación basada en la marcha se ha utilizado exitosamente en varios casos judiciales, proporcionando una herramienta adicional para la identificación cuando otras formas de evidencia son limitadas.

Para analizar la variabilidad interindividual en la marcha, se emplean metodologías tanto cuantitativas como cualitativas. Whittle (2007) sugiere el uso de técnicas de captura de movimiento y análisis biomecánico para obtener datos precisos sobre los patrones de marcha de los individuos. Estos datos pueden luego ser analizados utilizando métodos estadísticos y técnicos de codificación temática para identificar patrones únicos y recurrentes.

En cuanto a los métodos y análisis de datos de marcha, existen varios enfoques, cada uno con sus ventajas y limitaciones. Las plataformas de fuerza miden las fuerzas ejercidas sobre el suelo durante la marcha y son útiles para calcular parámetros cinéticos como la distribución del peso corporal y los momentos articulares. Los sistemas de sensores inerciales, como los acelerómetros y giroscopios, registran la aceleración y la orientación del cuerpo durante el movimiento, permitiendo la estimación de parámetros cinemáticos como la velocidad y la aceleración.

En el análisis de la marcha, se emplean diversas herramientas de captura de datos, cada una con su propia utilidad y aplicabilidad. Las cámaras de vídeo, por ejemplo, se utilizan para capturar imágenes de la marcha desde diferentes planos y ángulos, lo que facilita un análisis detallado de la cinemática del movimiento, permitiendo observar y medir con precisión parámetros como la longitud de la zancada, el ángulo de la rodilla y el desplazamiento del centro de masa. Estas imágenes pueden ser procesadas mediante software especializado que genera modelos tridimensionales del movimiento, proporcionando una representación visual y cuantitativa de los patrones de marcha.

Además, los dispositivos portátiles, como los teléfonos inteligentes equipados con acelerómetros y giroscopios, ofrecen una opción conveniente y económica para recopilar datos de marcha en entornos naturales y en tiempo real (Ojeda & Naranjo, 2017). Estos dispositivos permiten a los investigadores recoger información sobre la velocidad de marcha, la cadencia, y las variaciones en la postura, sin la necesidad de un laboratorio especializado. La portabilidad y

accesibilidad de estos dispositivos han ampliado las posibilidades de estudio de la marcha en poblaciones más amplias y en situaciones cotidianas, brindando datos valiosos que pueden complementar las observaciones realizadas en entornos controlados.

No obstante, para que los datos recopilados a través de estas herramientas sean consistentes y comparables, es crucial seguir estándares y protocolos bien establecidos en la medición de la marcha. La implementación de estos protocolos no solo garantiza la precisión y reproducibilidad de los resultados, sino que también facilita la comparación entre diferentes estudios y aplicaciones clínicas. A continuación, se revisan los principales estándares y protocolos en la medición de la marcha, los cuales han sido desarrollados por organizaciones internacionales especializadas en biomecánica.

5.1 Estándares y protocolos en la medición de la marcha

Los estándares y protocolos en la medición de la marcha son fundamentales para garantizar la precisión y reproducibilidad de los datos recopilados. Organizaciones como la Sociedad Internacional de Biomecánica Clínica (ISB) y el Comité de Estándares en Medición de la Marcha (CMG) han desarrollado protocolos estandarizados para la adquisición y análisis de datos de marcha. Estos protocolos incluyen pautas específicas para la colocación de marcadores anatómicos, la calibración de equipos de captura de movimiento y la definición de variables biomecánicas de interés. Además, se han establecido normas internacionales para la evaluación de la calidad de los datos de marcha, como la certificación ISO 13485 para dispositivos médicos utilizados en análisis de marcha (Benoit et al., 2017).

La marcha humana tiene diversas aplicaciones en contextos forenses y de seguridad debido a su potencial para la identificación individual. En el ámbito forense, la marcha puede utilizarse para establecer la autoría de un delito o corroborar coartadas a través del análisis de videos de vigilancia y la comparación de patrones de marcha. Además, en aplicaciones de seguridad, la marcha puede emplearse para la autenticación biométrica en sistemas de control de acceso y monitoreo de personas. Estas aplicaciones se basan en la premisa de que la marcha humana es única e identificable, lo que la convierte en una herramienta valiosa para la identificación y seguimiento de individuos en entornos forenses y de seguridad (de Paula et al., 2015).

El análisis de la marcha humana en contextos forenses ha evolucionado significativamente en las últimas décadas. Utilizado, en principio, en la medicina deportiva y la rehabilitación física, este enfoque ha encontrado aplicaciones cada vez más amplias en la identificación de individuos en escenarios forenses y de seguridad. Con el desarrollo de tecnologías de captura de movimiento y algoritmos de reconocimiento biométrico, se ha avanzado en la comprensión y aplicación de este método en diversas regiones del mundo.

En Europa, el análisis de la marcha humana en contextos forenses ha experimentado un creciente interés desde la década de 1990. Investigaciones como las realizadas por Paula et al. (2015) han explorado técnicas avanzadas de análisis de la marcha para la identificación de individuos en entornos forenses. Estudios como el de Boulgouris, Hatzinakos y Plataniotis (2010) han abordado desafíos específicos en el reconocimiento de la marcha, destacando su complejidad como problema de procesamiento de señales. Además, investigaciones como las de Carmona et al. (2017) han investigado métodos específicos de reconocimiento basados en características de movimiento para aplicaciones de seguridad, enfocándose en la precisión y robustez de los algoritmos utilizados.

En Norteamérica, el análisis de la marcha ha sido ampliamente estudiado en contextos forenses y de seguridad. Investigaciones como las de Ross y Jain (2003) han contribuido al desarrollo de algoritmos de reconocimiento de patrones de marcha para la identificación biométrica. Además, trabajos como el de Zhang, Wang y Liu (2013) han explorado aplicaciones específicas de la tecnología de reconocimiento de la marcha en la seguridad pública, destacando su potencial en la identificación y seguimiento de personas en entornos urbanos.

En la actualidad, la investigación en Estados Unidos y Canadá se centra en el desarrollo de aplicaciones clínicas del análisis de la marcha, como la evaluación de la marcha en pacientes con prótesis o enfermedades neurodegenerativas. Investigadores como Menard et al. en Canadá y Gage et al. en Estados Unidos han realizado importantes contribuciones en este campo (Gage, Schwartz, & Trost, 2001; Menard, McFadyen, & St-Pierre, 2014; Perry, 1967).

En las últimas décadas, el análisis de la marcha en contextos forenses ha ganado prominencia en América Latina, con estudios que exploran sus diversas aplicaciones. Investigaciones como las de Vergara et al. (2013) han examinado su potencial en la identificación de sospechosos en investigaciones criminales. Otros estudios, como el de Muñoz et al. (2016), han contribuido a la comprensión de las variaciones biomecánicas en diferentes grupos étnicos y

culturales de la región. En Brasil, De Oliveira et al. (1989) estudiaron la marcha en niños con parálisis cerebral, mientras que, en Chile, Vergara et al. (1995) se enfocaron en adultos mayores. En Colombia, Arango et al. (2002) se dedicaron a la adaptación de sistemas de análisis de la marcha, y en México, Gutiérrez-Lara et al. (2014) exploraron la marcha en pacientes con diabetes mellitus. Finalmente, en Perú, Huamán-Choquehuanca et al. (2017) examinaron la marcha en poblaciones indígenas. Estos estudios reflejan el creciente interés y la diversidad de enfoques en el análisis de la marcha en la región latinoamericana.

En Colombia, si bien la investigación sobre la marcha humana aún está en desarrollo, se han realizado avances significativos en los últimos años. Estudios como los de López et al. (2018) han explorado el potencial de la marcha humana como método de identificación forense en la población colombiana, demostrando resultados prometedores. Además, investigaciones recientes, como la de Rodríguez et al. (2020), han evaluado la precisión del análisis de la marcha en videos de vigilancia, revelando su utilidad en diferentes condiciones. Estos trabajos han contribuido a ampliar el conocimiento sobre la marcha humana en Colombia y han sentado las bases para futuras investigaciones en el campo de la biomecánica y la seguridad.

Diversos grupos de investigación se han dedicado a adaptar tecnologías, estudiar las características de la marcha en diferentes poblaciones y desarrollar aplicaciones para la evaluación, diagnóstico y tratamiento de diversas patologías. Por ejemplo, en el año 2002, Arango, et al. llevaron a cabo la adaptación de un sistema de análisis de la marcha (Arango et al., 2002). En el 2010, Castaño, et al. realizaron de igual forma este tipo de análisis en niños con parálisis cerebral (Castaño et al., 2010).

En el 2014, Niño, et al. estudiaron la marcha en adultos mayores (Niño et al., 2014). Posteriormente, en el 2017, Restrepo, et al. desarrollaron un sistema que analiza la marcha para pacientes con prótesis (Restrepo et al., 2017). Más recientemente, en el 2020, Vélez, et al. aplicaron una evaluación de la marcha humana en pacientes con enfermedad de Parkinson (Vélez et al., 2020). Estos estudios reflejan el interés continuo y la diversidad de enfoques en el estudio de la marcha humana en Colombia.

Estos estudios demuestran el creciente interés en la marcha humana como un área de investigación en Colombia, aplicando diversas metodologías para entender mejor sus implicaciones clínicas y biomecánicas. La evolución de estos enfoques destaca la importancia de desarrollar métodos rigurosos que permitan no solo estudiar la marcha en diferentes contextos, sino

también aplicarla en áreas de gran relevancia social como la seguridad y la identificación forense. A partir de esta base teórica, se hace necesario un marco metodológico que establezca los procedimientos precisos para capturar y analizar los patrones de marcha humana, de manera que se pueda explorar su potencial como una herramienta efectiva en la individualización de sujetos en contextos forenses y de seguridad.

6. Metodología

La identificación de individuos en contextos forenses y de seguridad ha sido un área de constante interés y desarrollo en la búsqueda de métodos confiables y precisos. Tradicionalmente, se han empleado técnicas como la huella dactilar, el ADN y el reconocimiento facial para este propósito. Sin embargo, en la búsqueda de nuevas alternativas que complementen y fortalezcan estas metodologías existentes, surge la hipótesis de que la marcha humana, con su variabilidad intrínseca y características biomecánicas únicas, podría ser una valiosa herramienta de identificación.

En Colombia, al igual que en muchos otros lugares, la necesidad de métodos de identificación confiables y eficiente es crucial para abordar preocupaciones de seguridad y criminalidad. En este contexto, la investigación propuesta se centra en explorar el potencial del reconocimiento de la marcha como método de individualización en contextos forenses y de seguridad en el país. Se espera que los hallazgos de este estudio contribuyan al avance del conocimiento en el campo de la antropología forense y la seguridad pública, ofreciendo una alternativa innovadora y prometedora para la identificación individual.

Esta metodología se estructura en varios apartados que abordan específicamente la recolección de datos a partir de grabaciones de video, la aplicación de técnicas cualitativas y cuantitativas para el análisis de la marcha, así como el uso exclusivo del software IBM SPSS versión 25 para los análisis estadísticos. Además, se detallan las fases de observación y registro de variables, asegurando una comprensión detallada de los patrones de marcha observados.

2.1 Métodos y técnicas

2.2.1 Métodos

El método empleado para esta investigación es de tipo mixto, lo que implica la recolección, análisis y vinculación de datos cuantitativos y cualitativos en un solo estudio, buscando generar una comprensión más completa del objeto de estudio (Sampieri, R., Collado, C. & Lucio, P., 2010). Es importante aclarar que, aunque la recolección de datos incluye tanto variables cuantitativas como cualitativas, el enfoque principal de esta investigación se centra en un análisis cualitativo

descriptivo. Los datos cuantitativos, como la edad, el peso, la estatura, la talla del calzado, la longitud de zancada, y el tiempo de apoyo y balanceo, se utilizan para proporcionar una base objetiva y medible.

Los datos cualitativos, que comprenden variables como el sexo, las patologías, la actividad, la constitución física, el contacto inicial del pie, el apoyo medio del pie, la propulsión, la postura, el movimiento de los brazos, la simetría del movimiento de los brazos, la base de apoyo, el ancho de paso, y la trayectoria del paso, se interpretan en términos de descripción e interpretación de los patrones y características de la marcha humana. En este sentido, Sampieri, Collado y Lucio (2010) definen el enfoque cualitativo como aquel que se basa en estudiar la realidad en su contexto natural, lo que incluye características tales como la observación, la interpretación y la flexibilidad para adaptarse al objeto de estudio y a las necesidades de la investigación.

Por tanto, esta metodología mixta permite aprovechar la precisión y objetividad de los datos cuantitativos mientras se interpreta y describe cualitativamente los patrones observados en la marcha humana. Esto asegura una comprensión integral de las variaciones interindividuales y las características clave que pueden ser útiles para la individualización de sujetos en contextos forenses y de seguridad.

El enfoque de esta investigación es de tipo observacional, con el objetivo de describir y comprender los patrones y variaciones en la forma de caminar de los individuos sin intervenir directamente en el fenómeno. Según Sampieri (2018), este tipo de investigación “se limita a observar y describir fenómenos sin intervenir en ellos” (p. 14). En este contexto, no se manipulan variables por parte del investigador, sino que se observan los comportamientos motores de los individuos tal como se presentan en la realidad.

El enfoque observacional permite describir y comprender los patrones y variaciones en la marcha de los individuos a partir de grabaciones de video. Este método no interviene directamente en el fenómeno, sino que se basa en la observación directa de las grabaciones para identificar y registrar las variables cuantitativas y cualitativas pertinentes.

2.2.2 Técnicas

Técnicas de Observación Directa: Las grabaciones de video fueron revisadas de manera sistemática para identificar y registrar variables tanto cuantitativas como la edad, el peso o la estatura, y cualitativas tales como el sexo, patologías, actividad que realiza etc.

Los métodos de Análisis Cualitativo se emplean en los datos de esta naturaleza y se interpretaron mediante técnicas de codificación temática, donde se identificaron y agruparon patrones de marcha recurrentes. Estas interpretaciones se realizaron en el contexto de cada individuo para proporcionar una comprensión detallada y contextualizada. Mientras que el Análisis Cuantitativo de los datos recolectados serán ingresados en el programa IBM SPSS versión 25 para realizar análisis estadísticos descriptivos. Estos análisis proporcionan medidas de tendencia central y dispersión para las variables cuantitativas, complementando la interpretación cualitativa de los patrones de marcha.

La técnica de recolección se dividió en cinco fases: selección de sujetos, grabación de videos, observación, registro de variables cualitativas y registro de variables cuantitativas. El análisis e interpretación de los datos se llevó a cabo en cuatro etapas. Primero, se realizó la codificación temática de las observaciones cualitativas, describiendo el proceso en detalle. Luego, se realizó una interpretación contextual para explicar cómo estos temas se relacionan con cada individuo. Después, se procedió al análisis cuantitativo con el ingreso de datos al software IBM SPSS versión 25, detallando los valores relevantes para la interpretación. Finalmente, se realizó un análisis estadístico descriptivo para complementar la interpretación cualitativa.

Este estudio abarca a su vez un alcance analítico y relacional enfocado en caracterizar las variaciones interindividuales de la marcha humana. Esta caracterización de las variables cualitativas y cuantitativas registradas durante la observación de los videos es analizada desde la identificación de patrones recurrentes en la marcha de los individuos, así como la evaluación de la variabilidad en estas características entre los participantes.

El enfoque relacional se da desde la caracterización individual de las variables, donde se exploran las relaciones entre diferentes parámetros biomecánicos y características físicas de los sujetos, esto permite entender cómo factores como la constitución física o la actividad diaria pueden influir en los patrones de marcha observados. Así, el análisis analítico y relacional busca no solo describir las variaciones en la marcha humana, sino también establecer conexiones

significativas entre las variables observadas. Esto contribuye a una comprensión más profunda de las características biomecánicas clave que podrían ser utilizadas para la individualización de sujetos en contextos forenses y de seguridad.

Para analizar las características de la marcha humana observadas en los videos, se emplearon métodos estadísticos descriptivos para resumir y entender la variabilidad de los datos recolectados. Se utilizó la media aritmética para calcular el valor promedio de variables como la longitud de zancada y el tiempo de apoyo, proporcionando así una medida central representativa. La desviación estándar se calculó para evaluar la dispersión de los datos alrededor de la media, ofreciendo perspectivas sobre la consistencia o variabilidad de los parámetros cuantitativos observados. Además, se empleó la mediana como medida de tendencia central alternativa, especialmente útil en distribuciones no normales o con valores atípicos. Finalmente, se calculó el rango intercuartil (RIQ) para describir la dispersión central de los datos, siendo menos sensible a valores extremos que el rango completo.

2.3 Instrumento de producción de información

Para la recolección de información en esta investigación sobre la marcha humana, se utilizaron grabaciones de video obtenidas mediante cámaras estáticas colocadas estratégicamente. Estas cámaras permitieron capturar a los sujetos caminando en condiciones controladas, asegurando diferentes ángulos de visión y una calidad de imagen adecuada para el análisis detallado posterior.

2.4 Población y muestra

La población de estudio se compuso de adultos de entre 20 y 60 años que practican deporte o van al gimnasio, así como por aquellos que no realizan ejercicio físico. Se seleccionaron individuos sin restricciones físicas significativas que afecten su capacidad para caminar normalmente. Se incluyeron tanto hombres como mujeres para asegurar la representatividad en términos de edad, género y nivel de actividad física. La muestra se conformó con 19 personas seleccionadas mediante muestreo aleatorio simple, que según Sampieri, Collado y Lucio (2014), se refiere a un método de muestreo probabilístico donde cada elemento de la población tiene la

misma probabilidad conocida y no nula de ser seleccionado para formar parte de la muestra. Este enfoque garantiza que los participantes sean representativos de la población objetivo, permitiendo obtener resultados más generalizables y significativos.

2.5 Plan de recolección de datos

El plan de recolección de datos para esta investigación se llevó a cabo de manera metódica y sistemática, con el objetivo de obtener información precisa y completa sobre las características de la marcha de los participantes. Se implementaron diversas estrategias y herramientas para capturar de manera efectiva tanto las variables cualitativas como cuantitativas relacionadas con la marcha humana.

En primer lugar, se establecieron sesiones de recolección de datos en un entorno controlado, donde se solicitó a los participantes que realizaran caminatas a diferentes velocidades y en diferentes condiciones. Se garantizará que los videos capturados son de alta calidad y abarcan todo el recorrido de la caminata, permitiendo así un análisis detallado de la marcha de cada individuo.

Además de la grabación de video, se emplearon plantillas de medición para obtener mediciones precisas de la longitud de la zancada y el ángulo del tobillo durante la caminata. Estas plantillas se colocaron estratégicamente en el suelo y permitieron registrar con exactitud los movimientos de los participantes mientras caminan. Finalmente, para la medición de variables cuantitativas como la cadencia, la velocidad de la marcha y la variabilidad de la zancada, se utilizaron diversas aplicaciones móviles especializadas. Estas aplicaciones proporcionaron mediciones objetivas y precisas de estas variables, complementando así la información recopilada a través de la observación visual y las plantillas de medición.

2.6 Variables Cualitativas y Cuantitativas:

Se registraron y analizaron diversas variables tanto cualitativas como cuantitativas de la marcha humana:

2.6.1 Variables Cualitativas

El proceso de análisis de la información comenzó con una fase de preparación y limpieza de los datos recopilados, con el objetivo de garantizar la precisión y coherencia de estos. Durante esta etapa, se realizó una revisión minuciosa de los videos capturados, identificando y registrando las características relevantes de la marcha, las variables cualitativas analizadas fueron: Sexo; Patologías; Deportes Actuales que practica; Deportes que Practicó; Actividad a la que se dedica; Constitución Física; Regularidad; Coordinación; Estilo; Contacto Inicial; Apoyo Medio; Propulsión; Postura; Movimiento de los Brazos; Simetría del Movimiento (Brazos); Función de los Brazos; Base de Apoyo; Ancho de Paso y Trayectoria del Paso (Perry, 2011; Borelli & Wells, 2016). El análisis cualitativo de la información se centró en la observación detallada de los videos capturados para identificar y describir los diferentes patrones y características de la marcha humana.

Se emplearon métodos de análisis cualitativo, como la codificación abierta y axial, para organizar y categorizar los datos observados. Se buscaron patrones recurrentes y se realizaron comparaciones entre diferentes sujetos y condiciones de marcha para identificar posibles diferencias y similitudes. Se utilizarán técnicas de interpretación cualitativa para comprender el significado y la relevancia de cada característica observada en el contexto de la identificación forense y de seguridad. Se elaboraron descripciones detalladas y análisis narrativos para documentar y comunicar los hallazgos obtenidos.

2.6.2 Variable Cuantitativas

El análisis cuantitativo de la información se centró en la observación detallada de los videos capturados para identificar y describir los diferentes patrones, características y mediciones de la marcha humana de cada sujeto. Las variables cuantitativas que se analizaron fueron: Edad; Peso; Talla Calzado; Estatura; Longitud De Zancada en centímetros y Tiempo de Apoyo y Balanceo

Una vez que los datos estuvieron organizados, se procedió a la extracción de características biométricas de la marcha, como se mencionó anteriormente. Estos datos se ingresaron en hojas de cálculo y en el software IBM SPSS versión 25 para su análisis. Se aplicaron técnicas estadísticas básicas, tales como medidas de tendencia central y dispersión, para realizar comparaciones entre

diferentes sujetos y condiciones de marcha. Es importante destacar que este enfoque de bajo presupuesto permite obtener información valiosa sobre la marcha humana, lo que lo hace adecuado para proyectos con recursos limitados en entornos forenses y de seguridad.

Este método, aunque simple, proporciona una base sólida para el análisis de la marcha y la evaluación de su viabilidad como método de individualización. Aunque no sea tan sofisticado como otros enfoques que emplean tecnología avanzada, su accesibilidad y bajo costo lo convierten en una opción viable para investigaciones con recursos limitados. La combinación de análisis manual con técnicas estadísticas básicas permite obtener resultados significativos y relevantes para el objetivo de la investigación.

2.7 Consideraciones éticas

Las consideraciones éticas de esta investigación son de vital importancia y se abordaron de manera rigurosa y responsable. Todos los participantes fueron informados sobre los objetivos y procedimientos del estudio, así como sus derechos como sujetos de investigación. Se obtuvo el consentimiento informado de cada participante antes de su inclusión en el estudio, asegurando que participaran de manera voluntaria y con pleno conocimiento de las implicaciones de su participación. Se garantizó la confidencialidad de los datos recopilados, utilizando códigos de identificación en lugar de nombres o información personal. Además, se siguieron las pautas y regulaciones éticas establecidas por el Código de Ética en Investigación de la Universidad de Antioquia (s. f.) y se informó respecto a cualquier conflicto de intereses que pudiese surgir durante el desarrollo de la investigación, los participantes fueron informados de que este trabajo y su participación no implican ganancias económicas para ellos ni para el investigador.

2.8 Presupuesto

Es importante destacar que este estudio se llevó a cabo con un presupuesto mínimo, lo que permitió su realización de manera eficiente y accesible. Este enfoque de bajo costo garantizó que los recursos disponibles se utilicen de manera óptima para alcanzar los objetivos de investigación establecidos. Además, el bajo costo de la investigación permitió maximizar la eficacia en la

obtención de resultados significativos, lo que contribuye a la viabilidad y sostenibilidad del estudio a largo plazo.

2.9 Limitaciones

La investigación sobre la marcha humana en contextos forenses y de seguridad puede enfrentar diversas limitaciones que se consideradas durante el diseño y la ejecución del estudio. Una de estas limitaciones que se presentaron en este estudio se refiere a los sesgos de muestra que pueden surgir si la muestra utilizada para recopilar datos sobre la marcha no es completamente representativa de la población general. Por ejemplo, la muestra se compone principalmente de individuos de cierta edad, género o nivel socioeconómico, que se dedican a ocupaciones muy similares, los resultados pueden no generalizarse adecuadamente a la población del valle de Aburrá en su conjunto.

Otra limitación importante se relaciona con las restricciones en los datos disponibles. La disponibilidad y calidad de los datos de marcha, como el ambiente controlado en que se grabaron los videos, pueden diferir de los registros y la calidad en cámaras de seguridad.

Sumado a esto, la variabilidad intrapersonal en la marcha de un individuo representa otra limitación significativa. La marcha de un individuo puede variar dependiendo de factores como la fatiga, el estado emocional o las condiciones ambientales. Esta variabilidad intrapersonal puede dificultar la identificación de patrones consistentes en los datos y la generalización de los resultados a diferentes contextos o momentos.

Las técnicas utilizadas para analizar los datos de marcha también pueden presentar limitaciones inherentes. Algunos métodos de análisis pueden no ser sensibles a ciertos aspectos de la marcha o pueden introducir sesgos en los resultados, lo que afecta la interpretación adecuada de los datos.

Además, la falta de estandarización en la captura de datos de marcha, como la ubicación de las cámaras de vigilancia o las condiciones de iluminación, puede afectar la calidad y consistencia de los datos recopilados. Esto dificulta la comparación entre diferentes estudios o situaciones y puede comprometer la validez de los resultados obtenidos.

Finalmente, la presencia de factores externos, como la presencia de otras personas o eventos inesperados, puede interferir con la captura de datos de marcha, afectando la validez de los

resultados obtenidos y la interpretación adecuada de los mismos. Estas limitaciones deben ser abordadas con precaución para garantizar la validez y confiabilidad de los hallazgos de la investigación.

7. Resultados y Discusiones

7.1 Patrones y características clave en la marcha humana captados en video, un acercamiento a la individualización de sujetos

En el campo de la biomecánica y la seguridad, el análisis de la marcha humana ha cobrado una relevancia significativa debido a su potencial para la individualización en contextos forenses y de seguridad. Este apartado se centrará en el estudio de los patrones de marcha, basándose en la premisa de que cada individuo posee una forma única de caminar, influenciada por factores anatómicos, fisiológicos y comportamentales. Esta singularidad permite que, mediante la captura y análisis de video, se puedan extraer características distintivas que faciliten la individualización de sujetos. El objetivo de este apartado es describir estos patrones y características clave en la marcha humana captados en video, proporcionando una herramienta valiosa para la identificación de individuos en entornos urbanos como Medellín, donde la seguridad y la vigilancia son primordiales.

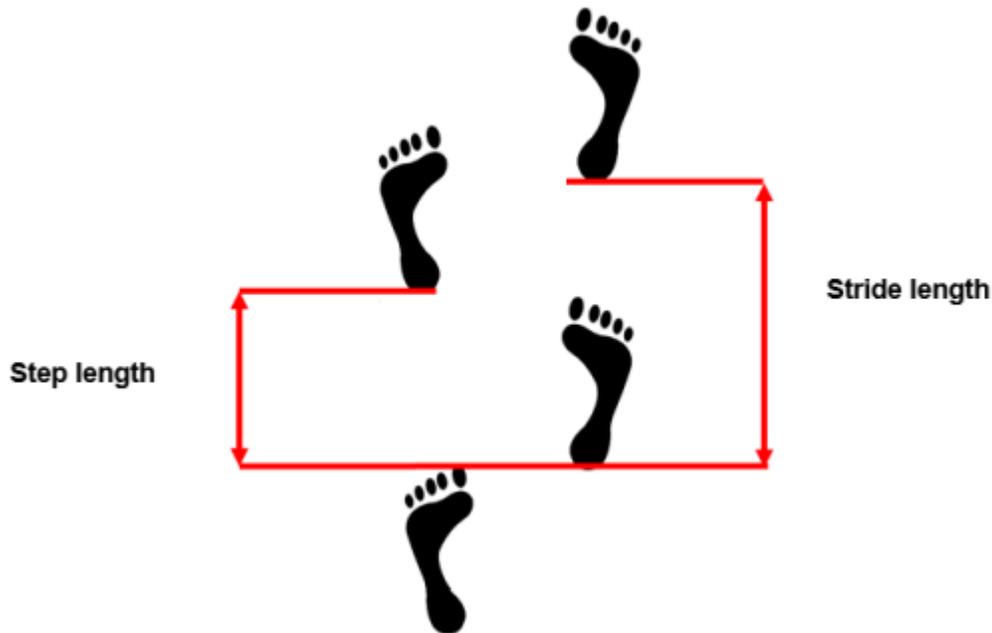
Para alcanzar este objetivo, se han seleccionado una serie de variables cuantitativas y cualitativas que permiten una comprensión detallada y precisa de la marcha. Las variables cuantitativas incluyen medidas como la edad, peso, estatura, talla del calzado, longitud de zancada, tiempo de apoyo y tiempo de balanceo. Estas variables proporcionan datos numéricos objetivos que ayudan a caracterizar la marcha de cada individuo. Por otro lado, las variables cualitativas como el sexo, patologías, nivel de actividad física, constitución física, y diversos aspectos del contacto y apoyo del pie, así como del movimiento y simetría de los brazos, aportan información descriptiva que complementa el análisis cuantitativo. Juntas, estas variables permiten un análisis holístico de la marcha, contribuyendo a la identificación individual y mejorando la precisión en contextos forenses y de seguridad.

7.1.1 Variables Cuantitativas

Entre las variables cuantitativas, la edad del individuo juega un papel crucial, ya que el caminar puede cambiar significativamente a lo largo de la vida. Por ejemplo, estudios previos han demostrado que con el envejecimiento, disminuyen la fuerza muscular, la flexibilidad articular y

la capacidad de equilibrio, lo que altera los patrones de marcha (Prince, Corriveau, Hébert, & Winter, 1997). Asimismo, el peso corporal del individuo es una variable clave, dado que afecta la carga que deben soportar las articulaciones durante la locomoción. Un mayor peso puede aumentar el estrés articular, modificando los patrones de marcha y elevando el riesgo de lesiones (Messier, Gutekunst, Davis, & DeVita, 2005).

Otra variable importante es la estatura, que influye en la longitud de la zancada y la cadencia de los pasos. Personas con mayor estatura tienden a tener pasos más largos, lo que puede proporcionar información valiosa sobre la mecánica y eficiencia del movimiento (Zijlstra & Hof, 1997). La longitud de la zancada, a su vez, es una medida crucial de la eficiencia del movimiento, reflejando la amplitud y potencia del desplazamiento. Diferencias en esta variable pueden indicar variaciones en la fuerza y flexibilidad de los músculos y articulaciones de las piernas (Schwartz & Rozumalski, 2008).

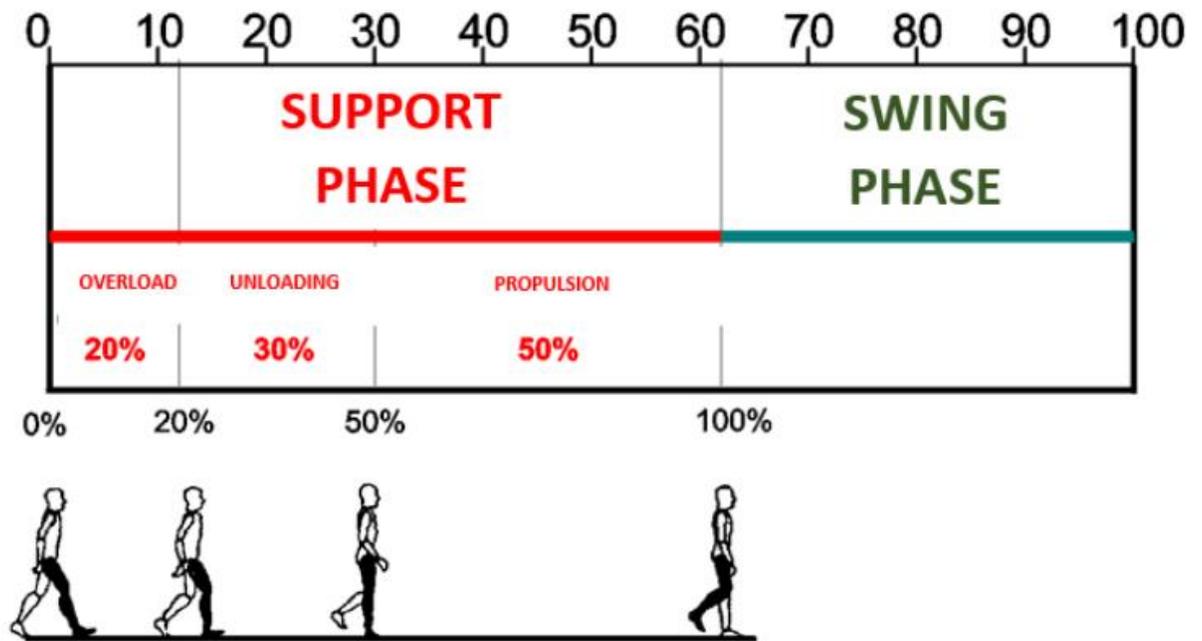
Figura 1*Longitudes de zancadas y paso*

Nota. (Tomado de Instituto de biomecánica de Valencia, 2014)

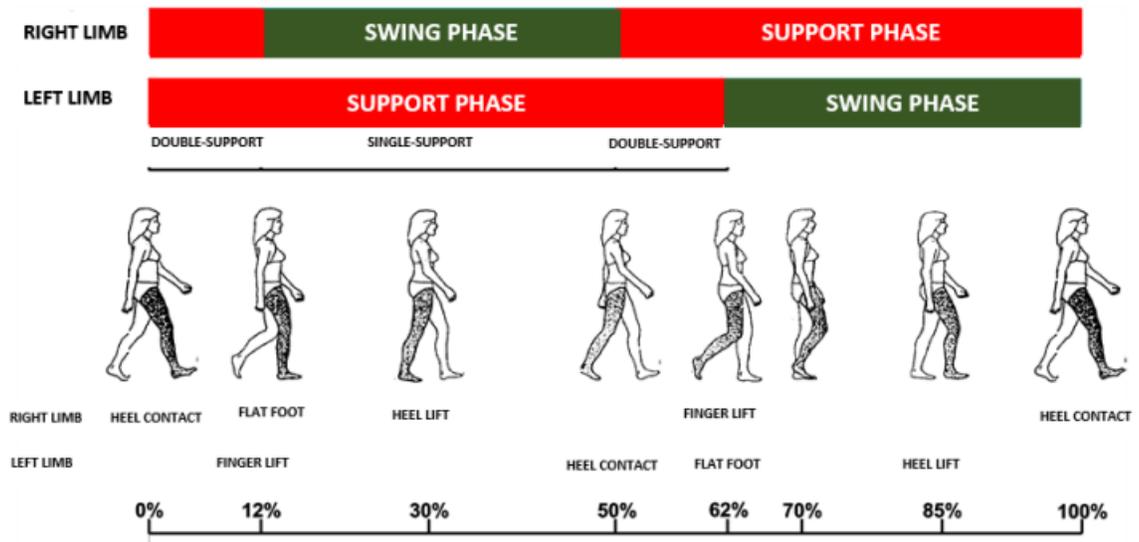
Además, se analiza el tiempo de apoyo, que se refiere al período en que un pie está en contacto con el suelo durante una zancada. Este tiempo es fundamental para evaluar la estabilidad y el control del equilibrio, ya que un tiempo de apoyo prolongado podría indicar problemas de estabilidad o debilidad muscular, mientras que un tiempo más corto podría reflejar una marcha rápida y dinámica (Verghese, Holtzer, Lipton, & Wang, 2009). Finalmente, el tiempo de balanceo, que es el período durante el cual un pie está en el aire, proporciona información sobre la fase de balanceo de la marcha, revelando posibles diferencias en la coordinación y agilidad de los movimientos (Prince et al., 1997).

Figura 2

División de la fase de apoyo en fases



Nota. (Tomado de Instituto de biomecánica de Valencia, 2014)

Figura 3*Fases del ciclo de la marcha para la extremidad derecha e izquierda*

Nota. (Tomado de Instituto de biomecánica de Valencia, 2014)

7.1.2 Variables Cualitativas

En cuanto a las variables cualitativas, el sexo del individuo se considera relevante debido a las diferencias biomecánicas y hormonales que influyen en la marcha. Las mujeres, por ejemplo, suelen tener una pelvis más ancha y una mayor inclinación de la cadera, lo que afecta su biomecánica de la marcha (Verghese et al., 2009). Además, las patologías como la artritis o lesiones musculoesqueléticas son factores críticos que pueden alterar significativamente los patrones normales de marcha, requiriendo adaptaciones específicas en el análisis (Messier et al., 2005).

La actividad diaria del individuo, como en el caso de los funcionarios públicos participantes en este estudio, también influye en los patrones de marcha. Actividades laborales que implican estar de pie por largos periodos pueden afectar la postura y, por ende, el comportamiento de la marcha (Stewart et al., 2000). La constitución física del individuo, descrita en términos de tipos corporales como ectomorfo, mesomorfo o endomorfo, también desempeña un papel en la biomecánica de la marcha, debido a diferencias en la distribución del peso y la musculatura (Hills, Hennig, Byrne, & Steele, 2002).

El contacto inicial del pie es otro aspecto crucial que se analiza, ya que la parte del pie que primero toca el suelo al dar un paso, ya sea el talón, la planta o los dedos, puede indicar variaciones

en la técnica de caminar y en la distribución de la carga (Frey et al., 1993). De manera similar, el apoyo medio del pie, que ocurre cuando todo el pie está en contacto con el suelo, es fundamental para evaluar la estabilidad durante la marcha y la transición eficiente del talón a los dedos (Hills et al., 2002). La propulsión, que es la fase en la que los dedos empujan contra el suelo para avanzar el cuerpo, mide la fuerza y eficiencia de la marcha, siendo influenciada por la fuerza muscular y la técnica de caminar del individuo (Schwartz & Rozumalski, 2008).

Finalmente, se considera la postura durante la marcha, que incluye la alineación del cuerpo, y el movimiento de los brazos, que ayuda a mantener el equilibrio y la estabilidad. Una buena postura es esencial para una marcha eficiente, mientras que una mala postura podría indicar problemas biomecánicos o debilidad muscular (Messier et al., 2005). La simetría del movimiento de los brazos se analiza para detectar posibles problemas de equilibrio o coordinación (Zijlstra & Hof, 1997), y la base de apoyo, junto con el ancho de paso y la trayectoria del paso, proporcionan indicadores clave sobre la estabilidad y la eficiencia del movimiento durante la marcha (Hills et al., 2002; Schwartz & Rozumalski, 2008).

La descripción y análisis de las variables cuantitativas y cualitativas han permitido una comprensión detallada de los patrones de marcha en los individuos estudiados. Las variaciones en la longitud de zancada, tiempo de apoyo, y tiempo de balanceo, junto con características como la constitución física y el movimiento de los brazos, ofrecen una rica fuente de datos para la individualización de sujetos. Estos datos son cruciales para establecer perfiles biomecánicos únicos, esenciales en contextos forenses y de seguridad.

Los resultados obtenidos de las tablas muestran una variabilidad considerable entre los individuos. Por ejemplo, se observó que la longitud de zancada varía significativamente, con un rango que va desde los 0.5 metros hasta más de 1.2 metros. Esta variabilidad se debe a factores como la estatura y el nivel de actividad física, tal como se ha documentado en estudios previos (Messier, 2005). Asimismo, el tiempo de apoyo y de balanceo mostró diferencias notables, reflejando cómo las patologías y la constitución física influyen en la marcha. Estas diferencias interindividuales subrayan la importancia de considerar un conjunto amplio de variables para una caracterización precisa.

Triangulando estos resultados con la literatura, se puede afirmar que la individualización de la marcha no depende de una única característica, sino de un conjunto de patrones que, al ser analizados en conjunto, permiten una identificación robusta. Como indica Winter (2009), la

combinación de variables biomecánicas y su análisis detallado es esencial para una identificación precisa. Los datos cualitativos, como la observación del contacto inicial del pie y el movimiento de los brazos, complementan y enriquecen los hallazgos cuantitativos, proporcionando una visión integral y contextualizada de la marcha humana. Este enfoque holístico asegura que las variaciones individuales sean capturadas y analizadas de manera efectiva, fortaleciendo el potencial de la biomecánica de la marcha en aplicaciones forenses y de seguridad en Medellín.

7.2 Caracterización de variables interindividuales de la biomecánica de la marcha presente en los sujetos filmados.

A continuación, se expone la caracterización detallada de una población de 19 personas entre hombres y mujeres, en términos de sus características cuantitativas y cualitativas. Los datos recopilados incluyen mediciones físicas, análisis de patologías, ocupaciones, constitución física, y patrones de movimiento, proporcionando una visión integral de los participantes.

Tabla 1
Datos Cuantitativos

	Media ±Desviación estándar	Mediana (RIQ)	Rango
Edad	42,63 ± 10,5	43(36-49)	22-61
Peso	70,05± 17,74	73(63-85)	35-92
Estatura	169± 7,97	170(164-175)	150-180
Talla calzado	39,28 ± 3,38	39 (37- 40)	34-49
Longitud de zancada	36,58 ± 7,59	35,49(32,62-38,58)	23,2-57,66
Tiempo de apoyo y balanceo	0,115± 0,231	0,06 (0,05 -0,08)	0,04-1,07

La edad promedio de la población fue de 42,63 años con una desviación estándar de 10,5. El peso mostró una mediana de 73 kg con un rango intercuartílico (RIQ) de 63 a 85 kg. La estatura promedio fue de 169 Cms con una desviación estándar de 7,97 y una mediana de 170 Cms (RIQ: 164-175 Cms). La longitud de zancada tuvo un promedio de 36,58 cm con una desviación estándar de 7,59 y una mediana de 35,49 Cms (RIQ: 32,62-38,58 Cms), finalmente, en cuanto al Tiempo de apoyo y balanceo se puede decir que tuvo un rango entre 0,04 y 1,07.

Tabla 2
Datos Cualitativos

		#	%
Sexo	F	8	42,1%
	M	11	57,9%
Patologías	Desgaste de meniscos rodilla derecha	1	5,3%
	Condromalacia grado 1 Rodilla derecha	1	5,3%
	Discopatía cubito y radio mano izquierda	1	5,3%

	Fractura dedo pie izquierdo	1	5,3%
	Fractura escafoides	1	5,3%
	Fractura metatarso y maléolo tibial izdo.	1	5,3%
	Fracturas: clavícula derecha, pie derecho dedo meñique	1	5,3%
	No	10	52,6%
	Osteomielitis pierna izquierda	1	5,3%
Actividad	Empleado publico	15	78,9%
	Entrenadora	1	5,3%
	Oficios varios	3	15,8%
Constitución física	Ectomorfo	3	15,8%
	Endomorfa	7	36,8%
	Mesomorfa	9	47,4%
Contacto inicial	Antepié	3	15,8%
	Medio pie	10	52,6%
	Talón	6	31,6%
Apoyo medio	Equitativa	16	84,2%
	Mayor presión zona posterior	3	15,8%
Propulsión	Débil adelante	8	42,1%
	Débil atrás	1	5,3%
	Fuerte adelante	10	52,6%
Postura	Alineada	10	52,6%
	Cifosis	6	31,6%
	Hipercifosis	1	5,3%
	Lordosis	2	10,5%
Movimiento de los brazos	Asimétrico	6	31,6%
	Fluido y coordinado	13	68,4%
Simetría del movimiento (brazos)	Disminución en un lado	9	47,4%
	Movimiento simétrico	7	36,8%
	Simétrico	3	15,8%
Base de apoyo (Cms):	Amplia	1	5,3%
	Estrecha	5	26,3%
	Normal	13	68,4%
Ancho de paso (Cms):	Ancho	6	31,6%

	Estrecha	1	5,3%
	Normal	12	63,2%
Trayectoria del paso:	Curva afuera	8	42,1%
	Recta	10	52,6%
	Variable	1	5,3%

Se puede apreciar que la población es principalmente de sexo masculino (57,9%). La mayoría de los individuos no presentan patologías (52,6%), y los empleados públicos constituyen el 78,9% de la muestra. En cuanto a la constitución física, prevalecen los somatotipos mesomorfos (47,4%). La mayoría de los sujetos tiene contacto inicial con el suelo en la zona del medio pie (52,6%) y el apoyo medio es equitativo (84,2%). En términos de propulsión, el 52,6% tiene una propulsión fuerte hacia adelante. Además, la postura alineada es común en el 52,6% de los casos, y el movimiento de los brazos es fluido y coordinado en el 68,4% de los participantes.

7.2.1 Análisis de variaciones interindividuales en variables cuantitativas

Edad

La variación en la edad puede afectar significativamente la biomecánica de la marcha. Las personas mayores tienden a tener una longitud de zancada más corta y una velocidad de marcha reducida debido a la disminución de la fuerza muscular y la estabilidad (Winter, 1991). En la tabla de resultados, la variabilidad en la longitud de zancada (promedio: 365.8 Cms, rango: 232-576.6 Cms) puede estar influenciada por esta variación en la edad.

Peso

El peso influye en la carga articular y puede modificar la marcha. Individuos con mayor peso pueden tener una marcha más lenta y con mayor presión en las rodillas, lo que puede llevar a una longitud de zancada reducida y tiempo de apoyo mayor (Messier, 1994). La amplia variabilidad en la longitud de zancada y el tiempo de apoyo podría ser explicada por esta variabilidad en el peso.

Estatura

La estatura afecta la longitud de zancada. Personas más altas generalmente tienen una longitud de zancada mayor debido a las dimensiones de sus extremidades (Begg et al., 2005) (tablasfnal). En este caso la variación en la longitud de zancada puede correlacionarse con la variación en la estatura de los participantes.

Talla de Calzado

Un calzado adecuado es crucial para la estabilidad y la eficiencia de la marcha (Robinson et al., 2017) La variabilidad en el ancho de paso (amplia, estrecha, normal) y la trayectoria del paso (curva afuera, recta, variable) podría estar influenciada por la variación en las tallas de calzado.

Longitud de Zancada

La longitud de zancada varía con la estatura, la edad y el nivel de actividad física. Las diferencias observadas en la longitud de zancada entre los individuos pueden reflejar las variaciones en estas características (Perry, 2011).

Tiempo de Apoyo y Balanceo

Las diferencias en el tiempo de apoyo y balanceo pueden indicar adaptaciones biomecánicas a diferentes patologías o condiciones físicas (Whittle, 2007). La variabilidad en esta medida en el estudio puede estar relacionada con las diferencias en las patologías y la constitución física de los participantes.

7.2.2 Análisis de variaciones interindividuales en variables cualitativas

Sexo

Las diferencias en la biomecánica de la marcha entre sexos se reflejan en la longitud de zancada y la velocidad de marcha. Hombres generalmente tienen una zancada más larga y una velocidad mayor (Morris et al., 1977). En este estudio, la mayor longitud de zancada observada podría correlacionarse con la mayor proporción de hombres.

Patologías

Las patologías pueden causar adaptaciones en la marcha para minimizar el dolor y la incomodidad. Estas adaptaciones pueden incluir una menor longitud de zancada y un tiempo de apoyo mayor (Kaufman et al., 2001). Las diferencias observadas en las medidas de marcha pueden estar relacionadas con las diversas patologías presentes en la población del estudio.

Actividad

El nivel y tipo de actividad física diaria influye en la fuerza muscular y la coordinación, afectando la marcha. Los individuos más activos físicamente (como entrenadores) pueden tener una marcha más eficiente y estable (Galli et al., 2012). En este caso, las variaciones en la marcha pueden correlacionarse con las diferentes actividades diarias de los participantes.

Constitución Física

La constitución física afecta la postura y la marcha. Los mesomorfos tienden a tener una marcha más equilibrada debido a su musculatura, mientras que los ectomorfos pueden tener una marcha más inestable (Sheldon, 1940). La distribución de la constitución física en la población estudiada puede explicar las variaciones observadas en la estabilidad y la longitud de zancada.

Contacto Inicial

El contacto inicial del pie con el suelo afecta la distribución de la carga y la dinámica de la marcha. Las personas que aterrizan primero con el talón tienden a tener una marcha más estable (Perry, 2011). Las variaciones en el contacto inicial observadas en tu estudio pueden influir en las diferencias en la longitud de zancada y el tiempo de apoyo.

7.3 Alcances y limitaciones de la colección de video-referencia para la individualización de sujetos en grabaciones de video en contextos de antropología forense y de seguridad.

El análisis de la colección de video-referencia utilizada en este estudio es fundamental para entender los alcances y limitaciones de su aplicación en la individualización de sujetos en contextos de antropología forense y de seguridad. Este capítulo se centra en evaluar cómo esta colección puede contribuir a dichos objetivos y qué restricciones presenta. La evaluación detallada de los videos de sujetos caminando y trotando, considerando variables biomecánicas y contextuales, proporciona una base sólida para esta discusión (Richards & Thewlis, 2008).

Las colecciones de video-referencia son compilaciones sistemáticas de grabaciones que capturan comportamientos humanos específicos en condiciones controladas. Estas colecciones son cruciales en diversos campos, incluyendo la antropología forense y la seguridad, debido a su capacidad para proporcionar datos empíricos y reproducibles que pueden ser utilizados para análisis comparativos y de identificación (Riley & Clark, 2009).

En contextos forenses, las colecciones de video-referencia se utilizan para comparar patrones de comportamiento capturados en escenas del crimen con grabaciones de referencia, lo que puede ayudar a identificar o excluir sospechosos. En seguridad, estas colecciones permiten el desarrollo de sistemas de vigilancia y monitoreo más precisos, basados en la identificación de patrones de movimiento característicos (Murray, 1967).

7.3.1 Alcances de la Colección de Video-Referencia

La colección de video-referencia empleada en este estudio incluye grabaciones de sujetos caminando y trotando en diversas condiciones. Estas grabaciones permiten analizar una amplia

gama de variables biomecánicas, incluyendo la longitud de zancada, el tiempo de apoyo y balanceo, y la simetría del movimiento de los brazos, lo que contribuye a un acercamiento a la individualización de sujetos en contextos urbanos de seguridad (Winter, 2009).

Gouwanda y Senanayake (2011) Argumentan que las colecciones de video-referencia enfocadas en el análisis de marcha humana se han mejorado gracias a sistemas ópticos de captura de movimiento y sistemas de seguimiento magnético, hay una tecnología muy avanzada que permite capturar los movimientos de la marcha, pero igualmente reconocen que son sistemas costosos y que únicamente permiten una noción del movimiento bastante controlada en laboratorios.

En los últimos tiempos, los sistemas de captura de movimiento óptico y los sistemas de seguimiento magnético se han establecido como métodos estándar para registrar el movimiento completo del cuerpo en un espacio tridimensional, siendo ampliamente aplicados en el ámbito deportivo y en el análisis de la marcha. No obstante, los avances en estas tecnologías y en los sistemas de comunicación han despertado un creciente interés en los sensores montados en el cuerpo, tales como acelerómetros, giroscopios y sensores magnéticos. Estos dispositivos, gracias a su reducido tamaño, peso liviano y bajo consumo energético, presentan ventajas significativas. Además, a diferencia de los sistemas ópticos y magnéticos, no requieren un entorno de laboratorio específico, lo que les confiere una alta movilidad, adaptabilidad y flexibilidad para recolectar datos cinemáticos de diversos segmentos corporales en actividades tanto en interiores como en exteriores (Gouwanda & Senanayake, 2011).

Teniendo en cuenta lo anterior, y el hecho de que en contextos de seguridad lo más común es el uso de cámaras de seguridad y vigilancia, la forma de captura utilizando un método que simule las condiciones de un entorno vigilado por una cámara tienen bastante potencial y puede ser la opción más adecuada y fiel a la realidad, los demás insumos sirven para un espacio controlado y sobretodo en otros ámbitos distintos a los de seguridad y contextos forenses.

Las tendencias actuales en el análisis del movimiento humano muestran que los sensores montados en el cuerpo están produciendo resultados muy prometedores. Hay una clara evidencia de que la investigación y el desarrollo en este campo seguirán progresando y eventualmente reemplazarán las tecnologías actuales. Esta tendencia se refleja en los considerables esfuerzos de los investigadores por mejorar el diseño, los algoritmos de fusión y los modelos de compensación de errores de estos sensores usados para diferentes tipos de investigación, como una colección de

video-referencia, permitiendo entender patrones, tiempos y movimientos de los sujetos para lograr individualizarlos.

Las colecciones de video-referencia, como las desarrolladas por el Human Motion Database o el Gait Database de la Universidad de Osaka, son ejemplos significativos que han sido ampliamente utilizadas en investigaciones académicas y aplicaciones prácticas (Iwashita, Kurazume, & Nishida, 2010). Por su parte Gafurov y Snekkenes (2009) presentan en su estudio “Reconocimiento de la marcha utilizando sensores de movimiento” un método alternativo en el que la marcha se registra mediante sensores portátiles adheridos al cuerpo de las personas. Estos sensores capturan el movimiento, como la aceleración, de diversas partes del cuerpo durante la caminata. Posteriormente, las señales de movimiento registradas se analizan con el propósito de reconocimiento de individuos. Se examinaron señales de aceleración provenientes del pie, la cadera, el bolsillo y el brazo.

Asimismo, se proporcionan nuevas perspectivas sobre la unicidad de la marcha en el caso del movimiento del tobillo/pie, considerando el atributo del calzado, el eje del movimiento y las partes del ciclo de la marcha. En particular, este análisis (Gafurov & Snekkenes, 2009) mostró que el calzado pesado tiende a reducir el poder discriminativo de la marcha y que el movimiento lateral del pie ofrece la mayor discriminación en comparación con las direcciones de movimiento arriba-abajo o adelante-atrás. Además, se enfatiza en que diferentes partes del ciclo de la marcha contribuyen de manera diversa al rendimiento del reconocimiento.

En esta investigación se utilizaron equipos de filmación básicos que emulan las condiciones de grabación de cámaras de seguridad en un entorno controlado. Esto permitió capturar de manera efectiva las variables relevantes de la marcha humana, tal como se mencionan en la metodología. Al filmar a los sujetos mientras caminan y trotan en condiciones que simulan escenarios cotidianos, se obtuvo una representación de los patrones de marcha típicos de la población de Medellín. Además, el análisis de estas grabaciones permite identificar características específicas de la marcha asociadas a las características biomecánicas promedio de la población local, lo que resulta fundamental para el objetivo de individualización en contextos forenses y de seguridad.

7.3.2 Limitaciones de la Colección de Video-Referencia

Las colecciones de video-referencia enfrentan diversos desafíos, como la variabilidad en las condiciones de grabación, la calidad del video, y la representatividad de los sujetos. Estas limitaciones pueden afectar la precisión y la generalización de los resultados obtenidos (Richards & Thewlis, 2008).

Las limitaciones técnicas incluyen la resolución y la tasa de cuadros de las cámaras utilizadas, mientras que las metodológicas abarcan la selección y entrenamiento de los sujetos, y el diseño del protocolo de grabación. Estas restricciones pueden introducir sesgos y reducir la fiabilidad de los análisis (Whittle, 1996).

En el presente estudio, algunas de las limitaciones incluyen la homogeneidad de la muestra en términos de edad y actividad profesional, así como la posibilidad de variaciones en las condiciones de grabación. Estas limitaciones pueden influir en la capacidad para generalizar los hallazgos a una población más amplia (Winter, 2009).

Para esta investigación se tuvieron varias limitaciones específicas, empezando por el casi nulo presupuesto, no se pudo contar con equipo especializado, con sensores corporales ni cámaras de alta gamma, de igual manera esto brindó la posibilidad de simular el entorno en que son filmadas las imágenes de las cámaras de seguridad en la ciudad.

Respecto a algunas variables que se tuvieron en cuenta en la metodología, algunas fueron especialmente difíciles de percibir y medir debido a la falta de equipo especializado comentado anteriormente; el tiempo de apoyo y balanceo, las mediciones del ancho del paso y la base de apoyo pueden ser aún más exactas con un equipo y presupuesto adecuados, de igual forma, se pueden tener en cuenta una gamma más amplia de variables con el equipo adecuado.

Las limitaciones identificadas afectan la precisión y la aplicabilidad de los resultados. Por ejemplo, la falta de diversidad en la muestra puede limitar la capacidad para identificar patrones de marcha únicos en diferentes subgrupos de la población (Richards & Thewlis, 2008). En este caso concreto, si bien estas limitaciones afectan la precisión e incluso la obtención de algunas variables, no deja de ser un aporte valioso al simular las condiciones en que se graban a los sujetos en contextos de seguridad.

7.4 Discusión de los alcances y limitaciones

La comparación de los resultados obtenidos con otros estudios y colecciones de video-referencia muestra tanto concordancias como divergencias, lo que subraya la importancia de considerar las limitaciones específicas de cada colección. La triangulación de los resultados obtenidos en este estudio con investigaciones previas permite identificar áreas de mejora y sugerir futuras líneas de investigación (Gouwanda & Senanayake, 2011).

Además, este capítulo se ha centrado en explorar las capacidades y limitaciones de las grabaciones de video-referencia captadas en un entorno controlado. Los resultados obtenidos revelan la efectividad de estos videos para capturar patrones específicos de la marcha humana, lo cual es fundamental para su uso en análisis forenses. No obstante, se debe considerar que la variabilidad en la calidad de las grabaciones, así como las condiciones del entorno, puede influir en la precisión de los resultados. Esto resalta la importancia de estandarizar tanto los procedimientos de grabación como las condiciones bajo las cuales se capturan los videos para minimizar posibles sesgos o errores (Boyd & Little, 2005).

La identificación de patrones específicos de la población de Medellín, tal como se observó en este estudio, subraya la relevancia de contar con colecciones de video-referencia que reflejen las características demográficas y culturales de la población objetivo. Estos patrones no solo facilitan la individualización de sujetos en un contexto forense, sino que también pueden ser aplicados en estudios socioculturales sobre la marcha. Sin embargo, es crucial reconocer que la extrapolación de estos resultados a otras poblaciones debe hacerse con cautela, dado que factores como la etnicidad, el estilo de vida y la geografía pueden influir en las características de la marcha (Cutting, 2006).

Asimismo, la metodología utilizada en este estudio, que incluye la filmación de sujetos caminando y trotando, se muestra como una estrategia eficaz para capturar la dinámica completa de la marcha humana. Sin embargo, la inclusión de más variables, como diferentes tipos de calzado, superficies de caminata y la fatiga del sujeto, podría enriquecer aún más los análisis. Al considerar estas variables adicionales, futuras investigaciones podrían ofrecer una visión más completa y robusta de los patrones de marcha, contribuyendo así al desarrollo de técnicas más precisas para la individualización de sujetos (Whittle, 2014).

En conclusión, la colección de video-referencia utilizada en este estudio ofrece valiosas oportunidades para la identificación individual en contextos forenses y de seguridad, pero también presenta limitaciones que deben ser cuidadosamente consideradas. La evaluación detallada de los alcances y limitaciones proporciona una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en la metodología (Perry & Burnfield, 2010).

9. Conclusiones

Durante la realización de este trabajo, se desarrolló simultáneamente esta iniciativa que pretende generar o proporcionar elementos para crear una colección de video-referencia sobre patrones de marcha humana que incluye diferentes individuos y situaciones, diseñada específicamente para su uso en análisis forenses y de seguridad en Medellín. A partir del análisis y la observación detallada de estos videos, se logró describir patrones y características clave de la marcha humana, permitiendo un acercamiento efectivo hacia la individualización de sujetos en contextos forenses.

En esta investigación, se empleó una metodología basada en la captura y análisis de videos de referencia de la marcha humana, filmados en un entorno controlado que simula las condiciones de cámaras de seguridad. Se seleccionaron sujetos representativos de la población de Medellín, quienes fueron filmados caminando y trotando en diferentes escenarios. La selección de los sujetos y las condiciones de grabación fueron diseñadas para reflejar las características físicas y demográficas típicas de la región.

La filmación se realizó utilizando equipos básicos de captura de movimiento, con el fin de obtener una colección de videos que pudiera ser utilizada para la individualización de sujetos en contextos de seguridad. La metodología incluyó el análisis de diversas variables biomecánicas de la marcha, como la longitud del paso, el ritmo, y la dinámica de movimiento, para identificar patrones específicos en la marcha de cada individuo.

Este enfoque metodológico permitió obtener una base de datos rica en variabilidad y adecuada para el análisis comparativo con otras colecciones de video-referencia. Además, se evaluaron las limitaciones inherentes al uso de grabaciones de baja resolución y condiciones controladas, lo que proporcionó una visión crítica de los alcances y desafíos en la individualización de sujetos basándose en su marcha.

Se caracterizaron las variaciones interindividuales de la biomecánica de la marcha presente en los sujetos filmados por medio de variables como: Sexo; Patologías; Deportes Actuales que practica; Deportes que Practicó; Actividad a la que se dedica; Edad; Peso; Talla Calzado; Estatura; Longitud De Zancada (Cms) y Tiempo de Apoyo y Balanceo, entre otras, que permitieron un acercamiento a la individualización mediante la marcha. Además, se lograron identificar los

alcances y las limitaciones que una colección de video-referencia de sujetos caminando y trotando puede tener en contextos forenses y de seguridad.

La investigación permitió identificar variaciones significativas en la biomecánica de la marcha entre los sujetos analizados. Estas variaciones fueron influidas por factores como la contextura física, el ritmo de marcha, y las condiciones ambientales controladas bajo las cuales se realizaron las grabaciones. Los resultados confirman la importancia de considerar las características físicas individuales al realizar análisis de marcha, lo que es crucial para su aplicación en contextos forenses.

La colección de video-referencia utilizada demostró ser una herramienta valiosa para la individualización de sujetos en contextos de seguridad. Sin embargo, se identificaron limitaciones en cuanto a la calidad de las grabaciones y la representatividad de la muestra de la población. La falta de estandarización en las condiciones de grabación y la necesidad de una mayor diversidad de escenarios sugieren la necesidad de mejorar y ampliar la colección para futuros estudios.

Se logró acercarse elementos que proporcionaron un gran avance en la creación de una colección de video-referencia que incluye una variedad de patrones de marcha humana. Esta colección servirá como un recurso importante para futuros análisis forenses. No obstante, se recomienda continuar con la ampliación de la base de datos para incluir más variabilidad en las condiciones de marcha y en los perfiles demográficos de los sujetos.

Esta colección de video-referencia tiene un gran potencial para ser usada con recursos tecnológicos avanzados, como cámaras de alta resolución, sistemas de captura de movimiento tridimensional y software de análisis de datos más sofisticados. La implementación de estos recursos permitiría una captura más detallada y precisa de las variables biomecánicas de la marcha, lo cual mejoraría significativamente la capacidad de individualización de los sujetos en contextos forenses y de seguridad. Además, la inclusión de algoritmos avanzados de aprendizaje automático podría facilitar la identificación automática de patrones en grandes volúmenes de datos, optimizando el proceso de análisis y reduciendo el margen de error humano. Con la integración de estos recursos, la colección no solo se volvería más robusta y precisa, sino que también podría expandirse para incluir un mayor rango de situaciones y sujetos, aumentando su aplicabilidad y relevancia en estudios futuros.

En resumen, esta investigación ha demostrado la relevancia de los patrones de marcha como herramienta para la individualización de sujetos en contextos forenses y de seguridad. A través de

la caracterización detallada de las variaciones biomecánicas, el análisis crítico de la colección de video-referencia y la creación de una base de datos específica para Medellín, se han sentado bases sólidas para futuras investigaciones. No obstante, es necesario continuar explorando y ampliando estos estudios para garantizar que las técnicas de análisis de marcha evolucionen en concordancia con las necesidades de seguridad actuales y futuras.

Referencias

- Arango, J., Restrepo, J., & Vélez, J. (2002). Adaptación de un sistema de análisis de la marcha para la población colombiana. *Revista Colombiana de Ortopedia y Traumatología*, 17(2), 117-124.
- Begg, R. K., Best, R., Dell'Oro, L., & Taylor, S. (2005). Minimum foot clearance during walking: strategies for the minimization of trip-related falls. *Gait & Posture*, 21(2), 192-198.
- Birenbaum, L., & Troje, N. F. (2006). Extracting principal components improves the recognition of gender from biological motion. *Journal of Vision*, 6(9), 850-857.
- Boulgouris, N., Hatzinakos, D., & Plataniotis, K. N. (2010). Gait Recognition: A Challenging Signal Processing Problem. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010(1), 1-20.
- Benoit, D. L., Ramsey, D. K., Lamontagne, M., & Xu, L. (2017). Advances in gait analysis: Perspectives from clinical practice. *Canadian Journal of Surgery*, 60(2), 128-134.
- Boulgouris, N., Hatzinakos, D., & Plataniotis, K. N. (2010). Gait Recognition: A Challenging Signal Processing Problem. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010(1), 1-20.
- Borelli, S. S., & Wells, R. P. (2016). *Biomechanics of human movement*. Human Kinetics.
- Cappozzo, A., Cappello, A., Della Croce, U., & Pensalfini, F. (1996). Surface-marker cluster design criteria for 3-D bone movement reconstruction. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 44(12), 1165-1174.
- Carmona, J. M., Molina, J. M., & Pegalajar, M. C. (2017). Reconocimiento de la marcha basado en siluetas. *Revista de la Sociedad Española de Biomecánica e Ingeniería Biomédica*, 34(2), 13-20.
- Carmona, J. M., Molina, J. M., & Pegalajar, M. C. (2017). Reconocimiento de la marcha basado en siluetas. *Revista de la Sociedad Española de Biomecánica e Ingeniería Biomédica*, 34(2), 13-20.
- Cuello, M. A., & Ledesma, M. E. (2014). Análisis de la marcha humana como herramienta para la identificación forense. *Revista Argentina de Antropología Forense*, 12(2), 11-20.
- Castaño, J., Niño, J., & Restrepo, J. (2010). Análisis de la marcha en niños con parálisis cerebral. *Revista Colombiana de Pediatría*, 43(2), 147-154.
- Champod, C., & Lennard, C. (2016). *Manual de identificación forense: Principios y aplicaciones*. Editorial Síntesis.
- De Paula, A. C., de Oliveira, L. S., & de Albuquerque, V. H. C. (2015). Gait analysis in forensic science: A review of the literature. *Forensic Science International*, 257, 230-244.
- De Oliveira, A. S., Lins, C. A., & Barela, J. A. (1989). Estudo da marcha em crianças com paralisia cerebral. *Revista Brasileira de Ortopedia e Traumatologia*, 24(2), 107-114.
- Elsevier. Jain, A. K., & Ross, A. (2004). *Biometric recognition: A challenge for the 21st century*. Springer Science & Business Media.

- Guardia Civil Española. (2015). *Manual de investigación criminalística*. Ministerio del Interior, Secretaría General Técnica.
- Frey, C., Thompson, F., Smith, J., Sanders, M., Horstman, H., & Cusick, C. (1993). American Orthopaedic Foot and Ankle Society: Comprehensive Foot and Ankle Review. *Foot & Ankle International*, 14(6), 345-350.
- Gage, J. R., Schwartz, M. H., & Trost, J. R. (2001). Gait analysis in the rehabilitation of patients with lower extremity amputations. *Physical Therapy*, 81(1), 121-132.
- Galli, M., Cimolin, V., Rigoldi, C., Tenore, N., Albertini, G., & Crivellini, M. (2012). Gait patterns in hemiplegic children with cerebral palsy: comparison of right and left hemiplegia. *Research in Developmental Disabilities*, 33(6), 1644-1650.
- Gutiérrez-Lara, G., García-Ramos, G., & Pérez-Zepeda, M. U. (2014). Análisis de la marcha en pacientes con diabetes mellitus tipo 2. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 52(6), 541-547.
- Huamán-Choquehuanca, A., Bulejevs, A., & Llosa-Luján, J. (2017). Características de la marcha en poblaciones indígenas de los Andes peruanos. *Revista de la Sociedad Española de Biomecánica e Ingeniería Biomédica*, 34(4), 29-36.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6a ed.). McGraw-Hill Education.
- Hills, A. P., Hennig, E. M., Byrne, N. M., & Steele, J. R. (2002). The biomechanics of adiposity—structural and functional limitations of obesity and implications for movement. *Obesity Reviews*, 3(1), 35-43.
- Instituto de Biomecánica de Valencia. (2014). *Desarrollo de soluciones innovadoras de formación en el campo de la evaluación funcional orientadas a la actualización de los planes de estudio de las escuelas de ciencias de la salud*
- Instituto Nacional de Ciencias Forenses de Guatemala. (2014). Análisis de la Marcha Humana en la Investigación Criminal. *Revista Criminalística*, 10(2), 1-14.
- Kaufman, K. R., Hughes, C., Morrey, B. F., Morrey, M., & An, K. N. (2001). Gait characteristics of patients with knee osteoarthritis. *Journal of Biomechanics*, 34(7), 907-915.
- López, J. F., Rodríguez, M. C., & Restrepo, J. A. (2018). Análisis de la marcha humana como método de identificación forense: Un estudio piloto en población colombiana. *Revista Colombiana de Antropología*, 55(2), 243-258.
- Maples, W. R., & Hickman, M. J. (2012). *Antropología Forense: Un Enfoque Práctico*. Editorial Elsevier.
- Messier, S. P. (1994). Osteoarthritis of the knee and associated factors of age and obesity: effects on gait. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 26(12), 1446-1452.
- Messier, S. P., Gutekunst, D. J., Davis, C., & DeVita, P. (2005). Weight loss reduces knee-joint loads in overweight and obese older adults with knee osteoarthritis. *Arthritis & Rheumatism*, 52(7), 2026-2032.

- Morris, J. R., Serrano, F., Amendola, A., & Liang, M. H. (1977). Normal and abnormal gait patterns. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 122, 44-50.
- Muñoz, C. A., Vergara, P. A., & Bustos, O. A. (2016). Caracterización de la marcha en población chilena mediante análisis de la huella plantar. *Revista Brasileira de Biomecnica*, 29(4), 437-445.
- Menard, M., McFadyen, B. J., & St-Pierre, D. M. (2014). Gait analysis in Parkinson's disease: Insights into the pathophysiology and potential for rehabilitation. *Movement Disorders*, 29(12), 1574-1584.
- Niño, J., Castaño, J., & Restrepo, J. (2014). Estudio de la marcha en adultos mayores. *Revista Geriatria y Gerontología*, 5(1), 31-38.
- Oliveira, L. S., de Paula, A. C., & de Albuquerque, V. H. C. (2018). Gait recognition using shape and motion features. *Pattern Recognition*, 74, 151-163.
- Ojeda, L., & Naranjo, V. (2017). Review of methods and technologies for gait analysis with application to sports biomechanics. En *Gait Analysis: Current Systems and Applications* (pp. 45-64). IntechOpen.
- Oña-Luna, D., Rocon, E., & Herrero, L. (2017). Variables cinemáticas y cinéticas de la marcha humana: Una revisión sistemática. *Revista Española de Rehabilitación y Medicina Física*, 51(4), 235-245.
- Perry, J. (1967). *Gait analysis: Normal and pathological function*. SLACK Incorporated.
- Perry, J. (2011). *Gait analysis: Normal and pathological function*. SLACK Incorporated.
- Prince, F., Corriveau, H., Hébert, R., & Winter, D. A. (1997). Gait in the elderly. *Gait & Posture*, 5(2), 128-135.
- Restrepo, J., Vélez, J., & Arango, J. (2017). Desarrollo de un sistema de análisis de la marcha para pacientes con prótesis. *Revista Colombiana de Ingeniería Biomédica*, 11(1), 23-30.
- Robinson, C. C., Smidt, G. L., Arora, J. S., & Loy, T. S. (2017). Shoe length, width, and heel height effects on the posture and comfort of male college students. *Journal of Physical Therapy Science*, 29(5), 813-816.
- Rodríguez, M. C., López, J. F., & Restrepo, J. A. (2020). Evaluación de la precisión del análisis de la marcha para la identificación de personas en videos de vigilancia. *Revista de Ingeniería Biomédica*, 14(1), 41-50.
- Ross, A., & Jain, A. K. (2003). Information fusion in biometrics. *Pattern Recognition Letters*, 24(13), 2115-2125.
- Ross, M., & Jain, A. (2003). Advances in gait recognition for forensics and security. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(8), 1051-1060.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, M. P. (2018). *Metodología de la investigación* (7a ed.). McGraw-Hill Education.

- Schwartz, M. H., & Rozumalski, A. (2008). The Gait Deviation Index: A new comprehensive index of gait pathology. *Gait & Posture*, 28(3), 351-357.
- Sheldon, W. H. (1940). *The Varieties of Human Physique*. Harper & Brothers.
- Stewart, W. F., Ricci, J. A., Chee, E., Morganstein, D., & Lipton, R. (2000). Lost productive time and cost due to common pain conditions in the US workforce. *JAMA*, 290(18), 2443-2454.
- Universidad de Antioquia. (s. f.). *Código de ética en investigación*.
- Van den Oever, J. A. L., & Meijer, J. H. M. (2007). The Analysis of Walking Patterns in Forensic Science. *Forensic Science International*, 171(2-3), 104-111.
- Vergara, P. A., Bustos, O. A., & Muñoz, C. A. (2013). Análisis de la marcha humana: aplicaciones en la investigación forense. *Revista Chilena de Antropología*, 28, 59-70.
- Vergheze, J., Holtzer, R., Lipton, R. B., & Wang, C. (2009). Quantitative Gait Markers and Incident Fall Risk in Older Adults. *Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences*, 64A(8), 896-901.
- Vélez, J., Arango, J., & Restrepo, J. (2020). Aplicación del análisis de la marcha en la evaluación de pacientes con enfermedad de Parkinson. *Revista Colombiana de Neurología*, 11(1), 51-58.
- Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. John Wiley & Sons.
- Whittle, M. W. (2007). *Gait analysis: An introduction*. Butterworth-Heinemann.
- Zatsiorsky, V. M., & Prilutsky, B. I. (2012). *Biomechanics of Skeletal Muscles*. Human Kinetics.
- Zhang, Y., Wang, L., & Liu, Y. (2013). *Gait Recognition for Forensics*. Hindawi Publishing Corporation.
- Zijlstra, W., & Hof, A. L. (1997). Displacement of the pelvis during human walking: Experimental data and model predictions. *Gait & Posture*, 6(3), 249-262.

Anexos

Consentimiento Informado para Participación en Investigación

Yo, [Nombre del Participante], doy mi consentimiento para participar en el estudio titulado "[Título del Estudio]".

El propósito de este estudio es investigar y comprender cómo la marcha humana varía entre individuos y cómo esta información puede ser utilizada en contextos forenses y de seguridad. Durante el estudio, se llevarán a cabo observaciones y análisis de la marcha de los participantes para obtener datos relevantes.

Seré requerido/a para participar en varias actividades específicas durante el estudio, las cuales incluirán la observación de videos de marcha y la realización de pruebas de marcha bajo diferentes condiciones y escenarios simulados. Estas actividades están diseñadas para obtener datos precisos sobre la marcha humana y contribuir al objetivo general del estudio.

Entiendo que no enfrentaré ningún riesgo significativo durante mi participación en este estudio y que mi participación es voluntaria. También entiendo que tengo derecho a retirarme del estudio en cualquier momento sin penalización alguna.

Se me ha informado que se grabarán videos durante mi participación en el estudio y que estas grabaciones se utilizarán únicamente con fines de investigación. Entiendo que no se divulgarán públicamente de manera individualizada y que se tomarán medidas para proteger la confidencialidad de la información recopilada.

Además, comprendo que el uso de la información obtenida en este estudio no generará ganancias económicas ni para los participantes ni para el investigador. Los resultados del estudio se utilizarán exclusivamente con fines de investigación y para mejorar el entendimiento de la marcha humana en contextos forenses y de seguridad.

Tengo conocimiento de que puedo hacer preguntas o solicitar información adicional sobre el estudio en cualquier momento, y que puedo comunicarme con el investigador principal, Juan Carlos Hernández Sierra, a la profesora Natalia Hernández para obtener más detalles.

Estoy de acuerdo con participar en este estudio y doy mi consentimiento para mi participación.

Firma del Participante: _____

Nombre del Participante: _____

Fecha: _____