



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Mecatrónica)

**Sistema para la detección y clasificación de alteraciones de la bóveda  
plantar mediante el uso de aprendizaje automático**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias (Mecatrónica)

Presenta:

**Ing. Rafael Eduardo Velasco Cerros**

Dirigido por:

**Dr. Daniel Jaramillo Quintanar**

Co-Director:

**Dr. Luis Alberto Morales Hernández**

San Juan del Río, Querétaro, Octubre 2025.

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Mecatrónica)

**Sistema para la detección y clasificación de alteraciones de la bóveda  
plantar mediante el uso de aprendizaje automático.**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias (Mecatrónica)

**Presenta:**

Ing. Rafael Eduardo Velasco Cerros

**Dirigido por:**

Dr. Daniel Jaramillo Quintanar

Dr. Daniel Jaramillo Quintanar  
Presidente

Dr. Luis Alberto Morales Hernández  
Secretario

Dr. Irving Armando Cruz Albarrán  
Vocal

Dr. Emmanuel Reséndiz Ochoa  
Suplente

Dr. Juan Pablo Amézquita Sánchez  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Octubre 2025  
México

## Resumen

El pie humano es una estructura compleja que actúa como soporte y distribuidor de cargas durante actividades estáticas y dinámicas. En su parte inferior se encuentra la bóveda plantar, encargada de adaptarse al terreno y cuya morfología permite clasificar el pie como plano, cavo o normal. Cuando dicha estructura presenta deformaciones, puede limitar la movilidad cotidiana y ocasionar afecciones en otras partes del sistema musculoesquelético. Según datos de la Secretaría de Salud, alrededor del 20% de la población Mexicana presenta alguna alteración en la bóveda plantar, afectando así su calidad de vida. Por ello, resulta necesario desarrollar herramientas que permitan clasificar automáticamente el tipo de pie. En el presente trabajo se desarrollaron metodologías basadas en visión artificial y aprendizaje automático. Se diseñó un procedimiento para la captura de imágenes RGB plantares mediante un equipo construido específicamente para este propósito. Posteriormente, se aplicaron técnicas de procesamiento de imágenes para extraer únicamente las bóvedas plantares, conformando una base de datos final con un  $n=180$  imágenes binarizadas, las cuales muestran exclusivamente la zona de contacto entre el pie y el piso, lo que permite su evaluación morfológica. Se validaron tres conjuntos de datos diferentes: el primero con las imágenes RGB convertidas a escala de grises; el segundo con once características morfológicas extraídas de las imágenes binarizadas; y el tercero con las mismas características, pero reducidas a dos dimensiones mediante análisis discriminante lineal. Estos conjuntos fueron entrenados y validados con dos algoritmos de clasificación: máquinas de vectores de soporte y  $k$  vecinos más cercanos, mediante la técnica de validación cruzada, empleando un 80% de los datos para entrenamiento y 20% para validación. Los resultados se presentan mediante matrices de confusión e indicadores de desempeño, alcanzando una precisión del 97.92% para el mejor modelo. El sistema propuesto puede representar una herramienta de apoyo objetiva, rápida y de bajo costo, con aplicaciones potenciales en ámbitos clínicos y deportivos.

**Palabras clave:** Bóveda plantar; visión artificial; aprendizaje automático; máquina de vectores de soporte;  $k$  vecinos más cercanos; clasificación; análisis discriminante lineal.

## Summary

The human foot is a complex structure that serves as both a support and a load distributor during static and dynamic activities. On its underside lies the plantar arch, responsible for adapting to the terrain and whose morphology allows the foot to be classified as flat, high-arched, or normal. When this structure presents deformities, it can limit daily mobility and cause conditions in other parts of the musculoskeletal system. According to data from the Secretaría de Salud, around 20% of the Mexican population presents some alteration in the plantar arch, thereby affecting their quality of life. For this reason, it is necessary to develop tools capable of automatically classifying foot types. In this work, methodologies based on computer vision and machine learning were developed. A procedure was designed for capturing plantar RGB images using equipment specifically built for this purpose. Subsequently, image processing techniques were applied to extract only the plantar arches, forming a final database with  $n=180$  binarized images that exclusively show the contact area between the foot and the surface, allowing for morphological evaluation. Three different datasets were validated: the first containing RGB images converted to grayscale; the second with eleven morphological features extracted from the binarized images; and the third with the same features reduced to two dimensions using linear discriminant analysis. These datasets were trained and validated using two classification algorithms: support vector machines and  $k$ -nearest neighbors, through cross-validation, employing 80% of the data for training and 20% for validation. The results are presented through confusion matrices and performance indicators, achieving an accuracy of 97.92% for the best model. The proposed system may serve as an objective, fast, and low-cost support tool with potential applications in clinical and sports fields.

**Keywords:** Plantar arch; computer vision; machine learning; support vector machine;  $k$  nearest neighbors; classification; linear discriminant analysis.

## **Dedicatorias**

*A mis padres Araceli Cerros Arguelles y Ramon Velasco Gutiérrez,  
por su dedicación, esfuerzo incansable y por el apoyo  
incondicional que me han brindado durante toda  
mi vida y mi trayectoria académica.*

*A mis hermanos, María Fernanda Velasco Cerros y Ricardo Elías Velasco Cerros,  
por estar siempre presentes en mi vida, por su compañía, apoyo constante  
y palabras de aliento que me han motivado a seguir adelante  
en cada etapa de mi formación académica y personal.*

*A mi novia Fátima Soledad González Hernández, por estar a mi lado en todo momento,  
por su amor, paciencia y confianza en mí. Gracias por ser mi apoyo en  
los días complicados y por compartir conmigo cada  
alegría y cada esfuerzo que hicieron posible  
la culminación de esta etapa.*

## Agradecimientos

*A mis padres*, quienes han sido mi mayor fuente de amor, apoyo y fortaleza a lo largo de toda mi vida. Su confianza en mis capacidades y su ejemplo de trabajo, dedicación y perseverancia me han guiado hasta este momento. Gracias por enseñarme que los sueños se logran con esfuerzo y que las metas se alcanzan con paciencia y determinación. Este logro es tanto mío como suyo, porque su apoyo incondicional me ha permitido llegar hasta aquí. Les dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud.

*A mis hermanos*, quienes han sido mis compañeros de vida, mi inspiración y mi refugio en los momentos difíciles. Gracias por las risas compartidas, los consejos sinceros y por siempre estar ahí cuando más lo he necesitado. Su apoyo y motivación me han impulsado a superar cada obstáculo en este camino. Este logro también es suyo, porque en cada paso sentí su cariño y fortaleza respaldándome. Les agradezco por ser una parte fundamental de mi vida y por demostrarme que, juntos podemos lograr cualquier cosa.

*A mis amigos*, quienes han sido una parte fundamental de esta etapa de mi vida. Gracias por su compañía, su apoyo incondicional y por ser mi refugio en los momentos de estrés y agotamiento. Su alegría, palabras de aliento y las incontables risas que compartimos hicieron que este camino fuera mucho más llevadero. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba y por recordarme siempre la importancia de disfrutar cada paso del proceso. Su amistad es un regalo que valoro profundamente, y este logro también es para ustedes.

*A mis asesores y profesores*, quienes han sido guías fundamentales a lo largo de este proceso. Gracias por compartir su conocimiento, su tiempo y su paciencia, y por orientarme con sabiduría y profesionalismo en cada etapa de este trabajo. Sus valiosos comentarios, sugerencias y apoyo constante han enriquecido este proyecto y me han permitido crecer tanto académica como personalmente. Aprecio profundamente su compromiso y dedicación, así como la confianza que depositaron en mí para llevar a cabo esta investigación. Este logro no habría sido posible sin su invaluable guía.

A la **Universidad Autónoma de Querétaro**, por brindarme el espacio y las herramientas necesarias para desarrollarme académica y profesionalmente. Este logro no habría sido posible sin el entorno de aprendizaje, las oportunidades y los recursos que encontré en esta institución.

Asimismo, expreso mi más profundo agradecimiento por la beca número 1316053 del **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, que me permitió continuar mis estudios y dedicarme plenamente a esta etapa de formación. Gracias por creer en mi potencial y apoyarme en este camino, haciendo posible que cumpliera este logro.

## Índice general

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introducción .....                                                                                         | 1  |
| 1.1. Antecedentes .....                                                                                       | 1  |
| 1.1.1. Patologías o alteraciones del pie humano y formas de evaluarlo.....                                    | 2  |
| 1.1.2. Uso de la visión artificial y/o aprendizaje automático para detectar patologías en el ser humano ..... | 4  |
| 1.2. Descripción del problema .....                                                                           | 6  |
| 1.3. Justificación .....                                                                                      | 6  |
| 1.4. Hipótesis y objetivos.....                                                                               | 7  |
| 1.4.1. Hipótesis.....                                                                                         | 7  |
| 1.4.2. Objetivo general .....                                                                                 | 7  |
| 1.4.3. Objetivos particulares.....                                                                            | 8  |
| 2. Fundamentación teórica.....                                                                                | 9  |
| 2.1. Biomecánica del sistema musculoesquelético .....                                                         | 9  |
| 2.1.1. Hueso.....                                                                                             | 9  |
| 2.1.2. Músculo esquelético.....                                                                               | 10 |
| 2.1.3. Pie-tobillo y análisis de marcha .....                                                                 | 10 |
| 2.2. La bóveda plantar.....                                                                                   | 11 |
| 2.2.1. División anatómica de la huella plantar .....                                                          | 12 |
| 2.2.2. Alteraciones de la bóveda plantar del pie humano.....                                                  | 13 |
| 2.2.2.1. Pie plano .....                                                                                      | 13 |
| 2.2.2.2. Pie cavo .....                                                                                       | 13 |
| 2.2.3. Formas o técnicas más usadas para evaluar la bóveda plantar del pie humano ..                          | 13 |
| 2.2.3.1. Índice de Chippaux-Smirak .....                                                                      | 14 |
| 2.2.3.2. Índice de Staheli .....                                                                              | 14 |
| 2.2.3.3. Índice de Cavanagh & Rogers .....                                                                    | 15 |
| 2.3. Preprocesamientos de imagen y visión artificial .....                                                    | 16 |
| 2.3.1. Procesamiento de imágenes digitales .....                                                              | 16 |
| 2.3.2. Etapas de procesamiento de imágenes .....                                                              | 16 |
| 2.3.3. Nivel o escala de gris .....                                                                           | 18 |
| 2.3.4. Detección de bordes o contornos .....                                                                  | 18 |
| 2.3.5. Morfología matemática .....                                                                            | 19 |

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.6. Filtros espaciales de imagen.....                                                       | 21 |
| 2.3.6.1. Filtro gaussiano .....                                                                | 21 |
| 2.3.7. Espacio de color RGB .....                                                              | 21 |
| 2.3.8. Espacio de color HSV .....                                                              | 22 |
| 2.3.9. Segmentación .....                                                                      | 22 |
| 2.3.10. Técnicas básicas de aumento de datos .....                                             | 23 |
| 2.3.10.1. Espejado horizontal o vertical.....                                                  | 23 |
| 2.3.10.2. Ruido sal y pimienta .....                                                           | 23 |
| 2.3.11. Momentos de Hu .....                                                                   | 23 |
| 2.3.12. Reflexión total interna (RTI).....                                                     | 24 |
| 2.4. Aprendizaje automático .....                                                              | 24 |
| 2.4.1. Aprendizaje no supervisado .....                                                        | 25 |
| 2.4.2. Aprendizaje supervisado .....                                                           | 25 |
| 2.4.2.1. Máquinas de vectores de soporte (SVM) .....                                           | 25 |
| 2.4.2.2. K vecinos más cercanos (KNN) .....                                                    | 26 |
| 2.4.3. Indicadores de desempeño y matriz de confusión.....                                     | 28 |
| 3. Metodología.....                                                                            | 29 |
| 3.1. Diseño y fabricación de equipo de escaneo .....                                           | 30 |
| 3.1.1. Normativas y cumplimiento del vidrio templado.....                                      | 31 |
| 3.2. Selección de participantes y adquisición de imágenes .....                                | 32 |
| 3.2.1. Procedimiento para la búsqueda de participantes .....                                   | 32 |
| 3.2.2. Adquisición de imágenes .....                                                           | 34 |
| 3.2.2.1. Procedimiento para las pruebas y adquisición de imágenes de los<br>participantes..... | 34 |
| 3.2.2.2. Entorno de pruebas .....                                                              | 37 |
| 3.3. Preprocesamiento de imágenes .....                                                        | 38 |
| 3.3.1. Base de datos.....                                                                      | 39 |
| 3.3.2. Selección de regiones de interés y extracción de características .....                  | 40 |
| 3.3.3. Análisis discriminante lineal a características.....                                    | 41 |
| 3.4. Modelos de clasificación de Aprendizaje Automático (ML).....                              | 41 |
| 3.5. Evaluación y comparación de resultados .....                                              | 42 |
| 4. Resultados y discusión .....                                                                | 43 |
| 4.1. Diseño y fabricación de equipo de escaneo .....                                           | 43 |

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2. Selección de participantes y adquisición de imágenes .....                                                                                           | 44 |
| 4.2.1. Clases o grupos de participantes .....                                                                                                             | 45 |
| 4.2.2. Adquisición de imágenes plantares .....                                                                                                            | 45 |
| 4.2.2.1. Acondicionamiento del lugar y equipo de escaneo .....                                                                                            | 46 |
| 4.2.2.2. Adquisición de imágenes RGB de los participantes.....                                                                                            | 46 |
| 4.3. Preprocesamientos aplicados .....                                                                                                                    | 47 |
| 4.3.1. Aumento de datos.....                                                                                                                              | 48 |
| 4.3.2. Base de datos .....                                                                                                                                | 49 |
| 4.3.3. Selección de regiones de interés (ROI) .....                                                                                                       | 50 |
| 4.3.4. Extracción de características .....                                                                                                                | 50 |
| 4.4. Modelos de clasificación de Aprendizaje Automático .....                                                                                             | 51 |
| 4.4.1. K-Vecinos más cercanos.....                                                                                                                        | 52 |
| 4.4.2. Máquina de soporte vectorial .....                                                                                                                 | 54 |
| 4.4.3. Mejor modelo obtenido .....                                                                                                                        | 55 |
| 5. Conclusiones y prospectivas.....                                                                                                                       | 56 |
| 5.1. Conclusiones .....                                                                                                                                   | 56 |
| 5.2. Prospectivas .....                                                                                                                                   | 58 |
| 6. Bibliografía.....                                                                                                                                      | 59 |
| 7. Anexos .....                                                                                                                                           | 64 |
| A. Carta de confidencialidad de datos.....                                                                                                                | 64 |
| B. Carta de consentimiento informado.....                                                                                                                 | 65 |
| C. Ficha técnica Vidrio Templado de 12mm .....                                                                                                            | 69 |
| D. Portada artículo “Clasificación automática de pacientes con COVID19 mediante procesamiento de imágenes radiográficas: comparativa de modelos IA” ..... | 71 |
| E. Portada artículo “Clasificación automática de alteraciones de la bóveda plantar mediante visión artificial y aprendizaje automático”.....              | 72 |
| F. Constancia de aceptación de artículo Coloquio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UAQ.....                                                  | 73 |
| G. Constancia de participación de artículo Coloquio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UAQ.....                                               | 74 |

## Índice figuras

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Bóveda plantar del pie humano (Kapandji, 1998). ....                                       | 1  |
| Figura 2: Curva carga-deformación de una estructura fibrosa (Nordin & Frankel, 2004). ....           | 9  |
| Figura 3: Fase portante y fase oscilante del ciclo de la marcha (Nordin & Frankel, 2004). ....       | 10 |
| Figura 4: Bóveda plantar del pie humano (Kapandji, 1998). ....                                       | 11 |
| Figura 5: División anatómica de la huella plantar (Cavanagh & Rodgers, 1987). ....                   | 12 |
| Figura 6: Índice de Chiappaux-Smirak (Echarri & Forriol, 2003). ....                                 | 14 |
| Figura 7: Índice de Staheli (Echarri & Forriol, 2003). ....                                          | 15 |
| Figura 8: Índice de Cavanagh & Rogers (Cavanagh & Rogers, 1987). ....                                | 15 |
| Figura 9: Sistema de coordenadas (píxeles) de una imagen (Autoría propia). ....                      | 16 |
| Figura 10: Etapas de procesamiento de imágenes (Autoría propia). ....                                | 17 |
| Figura 11: Erosión morfológica (Ruiz, 2020). ....                                                    | 19 |
| Figura 12: Dilatación morfológica (Ruiz, 2020). ....                                                 | 20 |
| Figura 13: Ejemplos de operaciones de apertura (a) y cierre (b) (Ruiz, 2020). ....                   | 20 |
| Figura 14: Espacio de color HSV (Girgis et al., 2014). ....                                          | 22 |
| Figura 15: Flujo de trabajo de algoritmos de aprendizaje supervisados (Mahesh, 2020). ...            | 25 |
| Figura 16: Hiperplanos de separación en espacio bidimensional (Gil-Leiva et al., 2019)...            | 26 |
| Figura 17: Simple KNN, clasificación nuevo dato con K=1 y K=3 (Taunk et al., 2019)...                | 27 |
| Figura 18: Matriz de confusión (autoría propia). ....                                                | 28 |
| Figura 19: Diagrama a bloques de la metodología propuesta (autoría propia). ....                     | 29 |
| Figura 20: Diseño de equipo de escaneo de bóvedas plantares (autoría propia). ....                   | 31 |
| Figura 21: Procedimiento para la selección de participantes (autoría propia). ....                   | 32 |
| Figura 22: Entorno de pruebas para la adquisición de imágenes (autoría propia). ....                 | 37 |
| Figura 23: Procesamientos de imagen (autoría propia). ....                                           | 39 |
| Figura 24: Sistema para clasificación de alteraciones de las bóvedas plantares (autoría propia)..... | 42 |
| Figura 25: Equipo de escaneo de imágenes plantares (autoría propia). ....                            | 44 |
| Figura 26: Distribución de imágenes binarias de la base de datos (autoría propia). ....              | 45 |
| Figura 27: Lugar pruebas (autoría propia). ....                                                      | 46 |
| Figura 28: Adquisición de imágenes plantares (autoría propia). ....                                  | 47 |
| Figura 29: Preprocesamientos aplicados (autoría propia). ....                                        | 48 |
| Figura 30: Técnicas de aumento de datos (autoría propia). ....                                       | 49 |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 31: Selección automática de ROIs (autoría propia). .....                   | 50 |
| Figura 32: Análisis de ANOVA de características extraídas (autoría propia). ..... | 51 |
| Figura 33: Proyección de datos del modelo tres (autoría propia). .....            | 52 |
| Figura 34: Matriz de confusión para el mejor modelo KNN (autoría propia). .....   | 53 |
| Figura 35: Matriz de confusión para el mejor modelo SVM (autoría propia). .....   | 54 |

## Índice tablas

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Clasificación de tipo de pie por Chippaux & Smirak (1947). .....    | 14 |
| Tabla 2: Clasificación de tipo de pie por Staheli et al. (1987). .....       | 15 |
| Tabla 3: Clasificación de tipo de pie por Cavanagh & Rogers (1987). .....    | 15 |
| Tabla 4: Rangos HSV para segmentación por tonos verdes. ....                 | 38 |
| Tabla 5: Características de la base de datos .....                           | 40 |
| Tabla 6: Características extraídas de las imágenes de la base de datos. .... | 41 |
| Tabla 7: Indicadores de desempeño para los modelos KNN. ....                 | 53 |
| Tabla 8: Indicadores de desempeño para los modelos SVM. ....                 | 54 |

# CAPITULO 1

## 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes

El pie humano realiza dos funciones: la primera es la de soportar el peso de todo el cuerpo y la segunda la de permitir tanto el desarrollo estático como el dinámico, es decir desde estar de pie hasta caminar, correr, etc., lo que significa que es resistente y flexible a la vez. Sin embargo, generalmente, el pie se encuentra deformado, ya que se ve sujeto a las sollicitaciones mecánicas del peso del cuerpo y las del calzado, que, a menudo, están lejos de ser ideales (Calais & Lamotte, 1994). Además de actuar como una plataforma de soporte estructural capaz de aguantar cargas repetitivas de múltiplos del peso corporal (Nordin & Frankel, 2004).

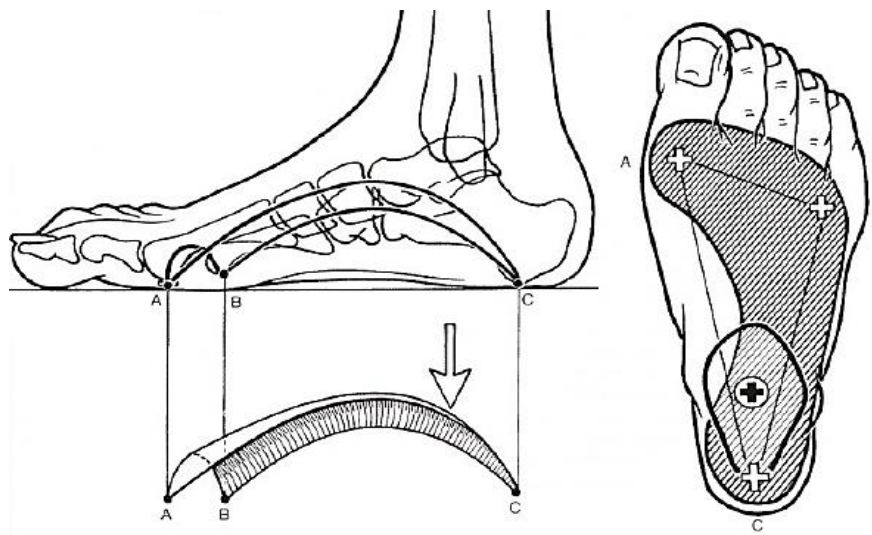


Figura 1: Bóveda plantar del pie humano (Kapandji, 1998).

La bóveda plantar (Figura1) se encuentra en la parte inferior del pie, es una lámina flexible que juega el papel de amortiguador de las presiones y adapta su forma según sea la del suelo (Calais & Lamotte, 1994), esta reúne músculos, ligamentos y huesos del pie humano, gracias a sus modificaciones de curva y a su elasticidad, es capaz de adaptarse a cualquier irregularidad del terreno y transmitir al suelo las fuerzas y el peso del cuerpo en las mejores condiciones mecánicas y en las circunstancias más diversas (Kapandji, 1998). El arco más importante de los tres que conforman a la bóveda plantar, es el arco plantar

longitudinal. Su altura define pies normales, planos y cavos, estos últimos son factores predisponentes de lesiones (Sánchez, 2017). Para la detección de estas patologías, es necesario analizar de manera sistemática la bóveda plantar del pie humano, por ello es importante desarrollar un sistema, el cual posibilite su valoración de manera automática, mediante un equipo de escaneo propio, el cual permita capturar la bóveda plantar para poder procesarla, evaluarla y clasificarla según el tipo de pie (pie cavo, plano o normal).

El uso del aprendizaje automático y profundo, acompañado de la visión artificial se ha usado generosamente tanto a nivel internacional como a nivel nacional para desarrollar trabajos en el área de salud (Velarde et al., 2015; Marino-Vera et al., 2017), debido a que permite a un computador interpretar la información visual del mundo de una forma similar a la que los humanos lo hacen. Esto implica desarrollar algoritmos que puedan procesar, analizar y extraer información importante de imágenes o videos, permitiendo reconocer las áreas de interés para su análisis e interpretación. Inclusive se han desarrollado trabajos relacionados de manera local dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), (Moreno et al., 2021; Trejo-Chavez et al., 2022; Jaramillo-Quintanar et al., 2023), los cuales se exponen más adelante.

#### **1.1.1. Patologías o alteraciones del pie humano y formas de evaluarlo**

El pie tiene una estructura muy bien construida, es parte fundamental del sistema motor, además es el responsable de soportar el peso total del cuerpo humano e inclusive múltiplos de el mismo, por ello es importante su estudio, con la finalidad de garantizar su buen funcionamiento. En seguida, se presentan trabajos internacionales, nacionales y locales relacionados a este trabajo:

Espinoza-Navarro et al. (2013) hicieron un estudio a niños Chilenos menores de 10 años y aparentemente sanos, mediante el uso de un podoscopio clásico, para la evaluación de sus huellas plantares, esto con el objetivo de determinar alteraciones postulares en ellos, encontrando que de un total de 420 pacientes (mujeres y hombres) estudiados y sin ningún antecedente, alrededor de 172 tuvieron problemas en su huella plantar, es decir aproximadamente el 41% del total de menores evaluados tuvieron un alteración en sus pies. Prieto et al. (2012) realizaron un trabajo sobre las enfermedades y/o patologías del pie en una población geriátrica femenil, haciendo análisis multivariado de regresión logística, tomando

como base las variables de función, marcha y caídas de los pacientes, teniendo como resultado que las enfermedades y/o patologías del pie son sumamente altas en los adultos mayores (mujeres), con un 93% de afectación en la población analizada, mencionando así mismo la importancia del seguimiento y la valoración de los pies en los humanos desde una etapa temprana. Boffino et al. (2012) trabajaron con pacientes de pie plano pediátrico, y encontraron que una forma para asegurar su diagnóstico cuando una exploración física y el uso del podoscopio no es suficiente, es mediante el uso de radiografías de ambos pies y en apoyo, esto para determinar con mayor precisión la distribución del peso del cuerpo sobre los pies y el ángulo de carga necesario, determinando con mayor certeza la patología del paciente.

En este contexto, Fuentes-Venado et al. (2020) realizaron un trabajo para determinar la altura del arco longitudinal medial a través diferentes métodos de estudio de la bóveda plantar, para poder diagnosticar un pie plano, basándose en una población menores de etapa preescolar, del Estado de México, a través del uso de un podoscopio clásico y la copia de su bóveda plantar con tinta. En su trabajo proponen la idea de utilizar diferentes técnicas de estudio para la huella plantar, además de la valoración clásica en podoscopio, los cuales permitan detectar un pie plano, aparte recomiendan vigilar el estado de salud del pie desde etapas tempranas, es decir desde niños, y con ello la detección oportuna de una patología relacionada a la bóveda plantar.

De manera internacional, se han desarrollado diversas investigaciones para la detección automática de alteraciones en la estructura del pie. Buchelly et al. (2016) desarrollaron un sistema automático basado en procesamiento de imágenes para identificar alteraciones en las huellas plantares, alcanzando una precisión del 90.2%. Por otro lado, Torres et al. (2020) implementaron un sistema que utilizó sensores piezoresistivos para detectar presiones en la bóveda plantar, proporcionando información detallada sobre la distribución de cargas. Por su parte, Zhao et al. (2023) propusieron un modelo basado en redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) para identificar deformidades del pie a partir de imágenes obtenidas mediante presiones plantares, logrando una precisión del 82.6%. Por su parte, Yeliz et al. (2023) desarrollaron un modelo SVM para el diagnóstico de pie plano mediante imágenes de rayos X, alcanzando una precisión del

95.1%. Asimismo, Ghandour et al. (2024) implementaron un modelo CNN para clasificar entre pie plano y pie cavo a partir de imágenes capturadas con un teléfono inteligente, obteniendo una precisión del 90%.

Otros métodos más precisos pero costosos para el diagnóstico de las patologías en relación a la bóveda plantar del pie son: mediante el uso de resonancias magnéticas (RM) o radiografías (RX), estas son herramientas más sofisticadas para la evaluación de un pie plano o cavo, que entregan información a detalle, la cual permite conocer la estructura con precisión y con ello la detección correcta de alguna patología. Además, permiten detectar las estructuras anatómicas lesionadas, dato esencial para elegir el tratamiento conservador o quirúrgico apropiado (Fernández et al., 2018). La radiografía simple no puede medir o mostrar completamente las dimensiones reales de un objeto 3D complejo como el pie y el tobillo (Alomar, 2021). La resonancia magnética es una técnica con una alta especificidad y una alta reproducibilidad (Aluja et al., 2016).

Aunque el uso del podoscopio clásico y técnicas como bañar en tinta la huella del pie y calcarlo sobre una superficie son métodos comúnmente empleados para la determinación de del tipo de pie (plano, cavo o normal), los resultados son subjetivos, puesto que se basan en la experiencia del especialista. Por otra parte, el empleo de tecnologías como la RM y la RX ofrecen resultados concretos, aunque implica un costo superior y un tiempo de espera para obtener el resultado.

#### **1.1.2. Uso de la visión artificial y/o aprendizaje automático para detectar patologías en el ser humano**

La tecnología de aprendizaje automático contribuye a recopilar datos de ayuda y seguimiento que son vitales para los doctores o especialistas de muchas de las áreas médicas, los cuales son importantes para detectar patologías o alteraciones en el ser humano, e inclusive para el desarrollo de novedosos métodos de análisis. Velarde et al. (2015) desarrollaron una herramienta interactiva y de bajo costo la cual ayuda a la rehabilitación de los humanos, permitiendo medir los movimientos de los miembros superiores del cuerpo, mediante la visión artificial, siendo necesaria la aplicación de un método de medición que sea adaptable a las condiciones de captura (iluminación, presencia de objeto, oclusiones entre otros) y que también guarde relación con lo que el especialista desea medir. Marino-Vera et

al. (2017) realizaron un sistema capaz de evaluar la respiración del humano mediante un sistema de medición automática de variables antropométricas haciendo uso de la visión artificial, el cual puede servir de ayuda a los especialistas para obtener medidas objetivas, teniendo mayor exactitud y precisión en el diagnóstico.

En este contexto, de manera local y dentro de la UAQ se han desarrollado varios trabajos, Moreno et al. (2021) realizaron un sistema de bajo costo, el cual permite realizar el análisis y diagnóstico de alteraciones de la marcha, mediante el aprendizaje automático y sensores montables que miden variables espaciotemporales, pudiendo clasificar entre pacientes con problemas óseos y musculares. Trejo-Chavez et al. (2022) desarrollaron una metodología basada en procesamiento de imágenes termográficas, con ello pudieron diferenciar automáticamente entre una rodilla sana y una con lesión, logrando una precisión del 98.2%, siendo esta una herramienta alternativa para ayudar a los médicos especialistas. De igual forma dentro de la UAQ, Jaramillo-Quintanar et al. (2023) desarrollaron una metodología para clasificar el nivel de estrés en humanos (basal, estresado y relajado) mediante la detección automática de regiones faciales térmicas de interés (nariz, mejilla derecha, mejilla izquierda, frente y mentón) en imágenes, combinada con técnicas de aprendizaje automático, obteniendo una precisión del 95.4%

La inteligencia artificial y el aprendizaje automático han traído cambios significativos y han transformado la vida cotidiana, y esto se observa también en la atención médica y la medicina (Rodríguez et al., 2022). La creación de este tipo de trabajos representa un gran avance tecnológico y científico dentro del campo de la salud, y con ello el surgimiento de nuevas herramientas para los especialistas del área, demostrando la efectividad y robustez para diferenciar entre un paciente sano y uno con alguna enfermedad, lesión o padecimiento, teniendo la ventaja de utilizar tecnología rápida, de bajo costo, inocua y no invasiva. Por ello, surge la iniciativa de desarrollar un sistema capaz de clasificar alteraciones en la bóveda plantar mediante técnicas de visión artificial y aprendizaje automático, con el objetivo de ofrecer resultados objetivos, rápidos y accesibles. Esta propuesta busca brindar a los profesionales de la salud una herramienta de apoyo eficiente para la evaluación del tipo de pie, que complemente el diagnóstico clínico tradicional y permita una intervención oportuna en etapas tempranas, tanto en entornos clínicos como deportivos.

## **1.2. Descripción del problema**

El pie humano desempeña una doble función: soporta el peso del cuerpo y permite el desarrollo dinámico del paso cuando se camina (Calais & Lamotte, 1994). En su parte inferior se encuentra la bóveda plantar, una estructura capaz de adaptarse a cualquier irregularidad del terreno y transmitir al suelo las fuerzas del peso del cuerpo en las mejores condiciones mecánicas y en las circunstancias más diversas (Kapandji, 1998). Cualquier deformación en esta zona puede repercutir negativamente en la calidad de vida y favorecer el desarrollo de otras malformaciones en la espalda, rodillas o caderas, lo que representa un problema de salud pública que afecta la movilidad y bienestar de un amplio sector de la población. Según datos de la Secretaría de Salud, aproximadamente el 20% de la población mexicana presenta algún tipo de alteración en la bóveda plantar.

Actualmente, existen diversos métodos para diagnosticar alteraciones en la bóveda plantar; sin embargo, los más usados dependen del criterio subjetivo del examinador. El análisis de alteraciones en la bóveda plantar suele ser impreciso, ya que la mayoría de técnicas son visuales o basadas en la experiencia del especialista. Métodos como la impresión de huellas plantares en tinta o el uso del podoscopio clásico, que proyecta la huella en un espejo para su interpretación, son comunes, pero carecen de objetividad.

Aunque existen técnicas más avanzadas, como resonancias magnéticas o rayos X, estas implican altos costos y tiempos de espera para los resultados, lo que limita su acceso en personas con recursos económicos limitados. Por lo tanto, es necesario desarrollar un sistema objetivo, no invasivo y seguro que permita la evaluación automática de la bóveda plantar, y de esta manera, su clasificación entre un pie sano y uno con alteraciones (pie cavo o pie plano), constituyendo así una herramienta de apoyo para los especialistas y un avance científico-tecnológico en el área de la salud y la visión artificial.

## **1.3. Justificación**

Actualmente existe un alto número de personas en el mundo que sufren de alguna patología relacionada a su bóveda plantar. Los pies son una de las estructuras más relevantes del ser humano, esta permite el desarrollo estático y dinámico para todas las actividades

cotidianas que realizamos. Una detección a tiempo de padecimientos los cuales perjudican al cuerpo humano, como lo son las alteraciones relacionadas a la bóveda plantar del pie, puede evitar desarrollar muchas otras anomalías musculoesqueléticas, por ejemplo, problemas de rodilla, cadera, espalda, etc., las cuales, si se diagnostican de manera temprana, impactan de manera directa en una mejor calidad de vida, puesto que los tratamientos y terapias físicas tienen un más alto porcentaje de éxito en estos pacientes.

Debido a lo anterior, resulta indispensable desarrollar un sistema automático que interprete de manera objetiva las alteraciones relacionadas con la bóveda plantar (pie plano y pie cavo), basado en un equipo propio de escaneo, aprendizaje automático y visión artificial. De esta forma, el sistema podrá servir como una herramienta de apoyo para los especialistas en el área, reduciendo la subjetividad del proceso y favoreciendo diagnósticos más confiables, rápidos y de bajo costo, que permitan conocer el estado actual de la salud de los pies del paciente. Todo ello mediante el uso de herramientas propias que posibiliten, en caso necesario, acceder a cada uno de los datos con el fin de realizar mejoras o correcciones.

Además, el sistema propuesto tendrá un impacto directo en el programa PRONACES de Salud de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), al generar información científico-tecnológica útil para los grupos de trabajo del sector médico, contribuyendo así al bienestar de la humanidad.

#### **1.4. Hipótesis y objetivos**

##### **1.4.1. Hipótesis**

Es posible desarrollar un sistema de evaluación del pie humano, basado en el procesamiento de imágenes y técnicas de visión artificial, el cual sea capaz de detectar y clasificar las alteraciones relacionadas a la bóveda plantar del pie humano, determinando si una persona tiene pie normal, pie plano o pie cavo.

##### **1.4.2. Objetivo general**

Crear un sistema de evaluación del pie humano, basado en el aprendizaje automático, a través del uso de un equipo propio de escaneo y técnicas de visión artificial, para detectar y clasificar las alteraciones relacionadas a las bóvedas plantares del ser humano (pie normal, pie plano o pie cavo).

### **1.4.3. Objetivos particulares**

- Diseñar y construir un equipo propio de escaneo, elaborado con materiales como madera y vidrio, capaz de soportar de pie a un humano promedio y garantizar la seguridad de los participantes durante su evaluación.
- Seleccionar el sensor / cámara optimo el cual permita su ensamble en el equipo de escaneo propio y con ello sea posible la obtención de las bóvedas plantares (parte inferior de los pies humanos).
- Crear una base de datos que permita la extracción de las variables de interés de la bóveda plantar del pie humano mediante técnicas de procesamiento de imagen, y, con ello, posibilite el trabajo con algoritmos clasificadores de aprendizaje automático
- Desarrollar una metodología a través de la visión artificial, la cual sea capaz de obtener las variables de interés (características) de la bóveda plantar, permitiendo así la detección y clasificación de un pie sano, plano o cavo.
- Evaluar la eficiencia del sistema de detección y clasificación de alteraciones de la bóveda plantar desarrollado, mediante matrices de confusión e indicadores de desempeño, con el fin de validar su precisión en la identificación de los diferentes tipos de pie.

## CAPITULO 2

### 2. Fundamentación teórica

#### 2.1. Biomecánica del sistema musculoesquelético

El arco plantar humano desempeña un papel fundamental en la distribución del peso corporal y en la dinámica de la marcha, actuando como un soporte clave para la biomecánica del movimiento. Las variaciones en su estructura, como el pie plano o el pie cavo (arco elevado), pueden repercutir significativamente en la calidad de vida, provocando molestias, alteraciones funcionales, limitaciones en la movilidad o incluso el desarrollo de otras patologías musculoesqueléticas.

##### 2.1.1. Hueso

El hueso tiene propiedades mecánicas importantes, estas son, su fuerza y rigidez, las cuales pueden ser comprendidas mediante el análisis de comportamiento cuando se aplica una carga, es decir bajo fuerzas externas aplicadas. Si una carga en una dirección conocida se aplica sobre una estructura, la deformación de esa estructura puede ser medida y representada en una curva de carga-deformación (Figura 2) (Nordin & Frankel, 2004).

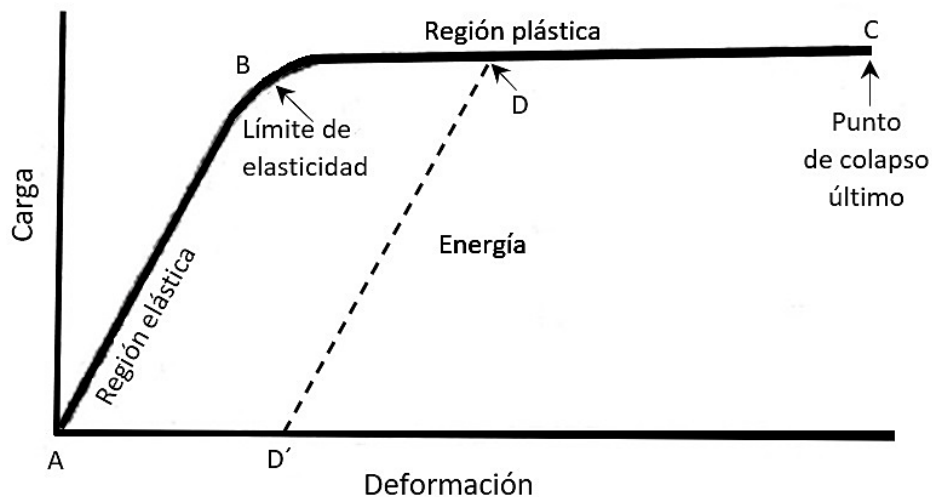


Figura 2: Curva carga-deformación de una estructura fibrosa (Nordin & Frankel, 2004).

### 2.1.2. Músculo esquelético

Los músculos proporcionan fuerza y protección al esqueleto distribuyendo cargas y absorbiendo impactos; permiten a los huesos moverse sobre sus articulaciones y permiten el mantenimiento de la postura corporal frente a una fuerza (Nordin & Frankel, 2004). Los músculos esqueléticos representan cerca del 44% del total de peso del cuerpo, estos permiten el trabajo estático y dinámico. El trabajo dinámico concede el movimiento del cuerpo, mientras que el estático solo la posición en el espacio. Los músculos de tipo esquelético se encuentran ligados al sistema óseo y permiten la realización de movimiento, la reacción a fuerzas externas y el control de la postura y el balance (Trew & Everett, 2006).

### 2.1.3. Pie-tobillo y análisis de marcha

La agrupación estructural entre el pie y el tobillo es compleja. Los pies son estructuras mecánicas fundamentales, lo cual permite el desarrollo de la marcha. El pie tiene la cualidad de poder ser flexible pero rígido a la vez, según las circunstancias en las que se encuentra. La transición desde la plataforma que absorbe el impacto a la palanca rígida capaz de propulsar hacia adelante tiene lugar con cada paso del ciclo de la marcha (Nordin & Frankel, 2004).

El ciclo de la marcha comprende dos partes principales: una fase en la que el pie está en contacto con el suelo, llamada fase de portante, y otra fase en la que el pie se levanta del suelo, llamada fase de oscilación. La Figura 3 muestra el ciclo de la marcha del pie humano.

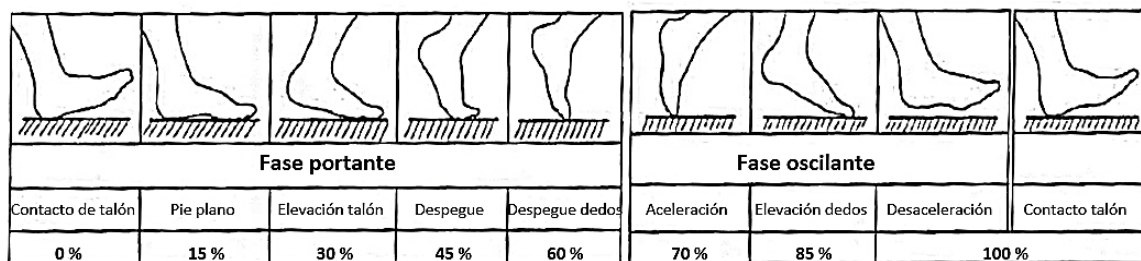


Figura 3: Fase portante y fase oscilante del ciclo de la marcha (Nordin & Frankel, 2004).

## 2.2. La bóveda plantar

La estructura conocida como bóveda plantar se encuentra en la parte inferior del pie y es un complejo arquitectónico que integra de manera equilibrada todos los componentes óseos, ligamentosos y musculares del pie. Gracias a su capacidad para modificar su curvatura y elasticidad, puede adaptarse a cualquier superficie irregular, distribuyendo las fuerzas del peso corporal de manera óptima ante diferentes situaciones. Además, cumple una función crucial como amortiguador, lo que es fundamental para la movilidad natural al caminar. Si se observa en su totalidad, la estructura de la planta del pie se puede comparar con una bóveda sostenida por tres arcos. El arco anterior, el más corto y bajo, se localiza entre los dos puntos de apoyo anteriores A y B. El arco externo, de longitud y altura intermedias, se localiza entre los dos puntos de apoyo externos A-C. Por último, el arco interno, el más largo y alto, se localiza entre los dos puntos de apoyo internos B y C. Es el más relevante de los tres, tanto en el plano estático como dinámico (Kapandji, 1998). El elemento de mayor importancia de la bóveda plantar (Fig. 4) es el arco plantar longitudinal medial (APLM) o arco interno, el cual permite el desarrollo en estática y dinámica de la propia bóveda. Su altura define pies normales, planos y cavos, estos últimos son factores predisponentes de lesiones (Sánchez,

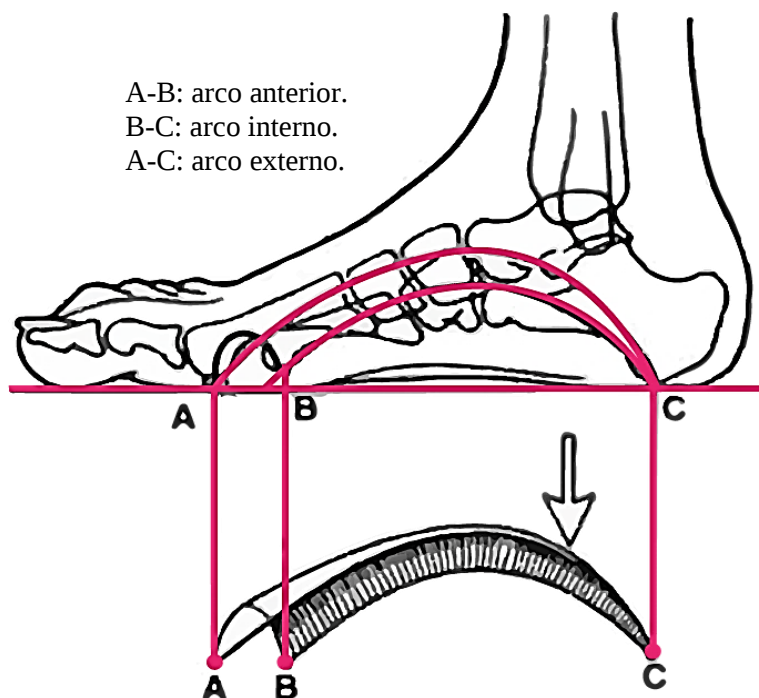


Figura 4: Bóveda plantar del pie humano (Kapandji, 1998).

### 2.2.1. División anatómica de la huella plantar

La división anatómica de la huella plantar permite establecer regiones funcionales del pie con fines de análisis morfológico, siendo fundamental para la aplicación de técnicas que evalúan cuantitativamente la bóveda plantar. En este contexto, Cavanagh & Rodgers (1987) describen en su estudio una segmentación estandarizada de la huella plantar (excluyendo los dedos), la cual se describe a continuación:

1. Trazado del eje longitudinal del pie: Se dibuja una línea recta que conecta el punto más posterior del talón (k) con el punto más anterior del dedo más largo (j) (generalmente el segundo dedo), formando el eje longitudinal del pie.
2. Delimitación del área total del pie: Se recorta o descarta el área correspondiente a los dedos. El área analizada va desde el talón hasta el inicio de los dedos (L).
3. División en tercios iguales: Esta área útil (sin los dedos) se divide en tres partes iguales mediante líneas perpendiculares al eje longitudinal del pie (L). Estas líneas delimitan las regiones del retropié (A), mediopié (B) y antepié (C), lo que permite analizar la distribución de carga y morfología del arco plantar (Figura 5).

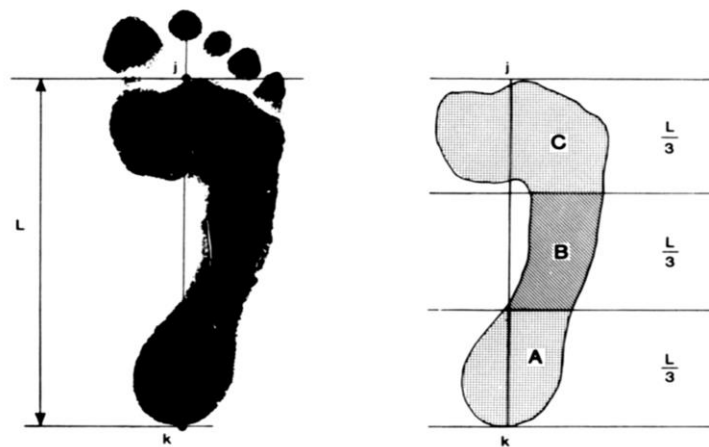


Figura 5: División anatómica de la huella plantar (Cavanagh & Rodgers, 1987).

## **2.2.2. Alteraciones de la bóveda plantar del pie humano**

### **2.2.2.1. Pie plano**

También conocido como calcáneo-valgus, pes-planus o planovalgus, el pie plano es una caída del arco longitudinal medial del pie, este padecimiento transforma al mediopié, al antepié y al retropié de una forma anormal. El término pie plano es una descripción que engloba cualquier proceso que relaja la estabilidad del arco óseo del pie, que puede ser de desarrollo, presente en la niñez, o adquirido presente durante la adultez o en el adulto como una deformidad residual del pie plano de desarrollo durante la niñez (García et al., 2022).

### **2.2.2.2. Pie cavo**

Un pie cavo se define como una “deformidad caracterizada por un aumento excesivo de la bóveda plantar acompañado de una desviación del retropié”. A este también se le conoce como pie en garra, pie arqueado, pie equino, pie varo o pie excavado. En edades tempranas los pies cavos son muy flexibles y apenas causan molestias; con el tiempo, se hacen rígidos y entonces pueden aparecer cambios degenerativos en las articulaciones sobrecargadas (Gamallo et al., 2017).

## **2.2.3. Formas o técnicas más usadas para evaluar la bóveda plantar del pie humano**

Para determinar el estado de la bóveda plantar del pie humano y, con ello, identificar el tipo de pie, se han desarrollado diversas técnicas de evaluación que permiten detectar alteraciones como el pie plano o el pie cavo. Aunque muchas de estas metodologías fueron desarrolladas hace años, siguen siendo de las más utilizadas en la actualidad. Una de ellas es el análisis con podoscopio, que consiste en que la persona a evaluar se coloca sobre una plataforma de vidrio con un espejo en la base, este dispositivo refleja la huella plantar hacia el especialista, quien determina el tipo de pie únicamente a partir de la observación y su experiencia clínica.

Por otro lado, existen técnicas que consisten en copiar la huella plantar sobre papel mediante el uso de tinta, obtenida con el pie en posición de carga, es decir, con el sujeto de pie y distribuyendo su peso de forma natural sobre ambos pies. Esto permite realizar

mediciones específicas según el método aplicado. A continuación, se describen algunas de las técnicas más utilizadas para la evaluación de la bóveda plantar.

### 2.2.3.1. Índice de Chippaux-Smirak

Este método fue propuesto originalmente por Chippaux & Smirak (1947), consiste en calcular (Ecuación 1) la relación entre la anchura más estrecha de la huella en la región del mediopié (b) y la anchura máxima de la región del antepié (a), expresada como un porcentaje (Figura 6). Finalmente, en base a la Tabla 1 se obtiene el tipo de pie.

Su simplicidad, bajo costo y capacidad para detectar el tipo de pie lo han convertido en una herramienta ampliamente adoptada en contextos clínicos, escolares y deportivos. Esta técnica ha sido validada y retomada por diversos autores posteriores, como Echarri & Forriol (2003), quienes han demostrado su aplicabilidad en el análisis del desarrollo del arco plantar en población infantil.

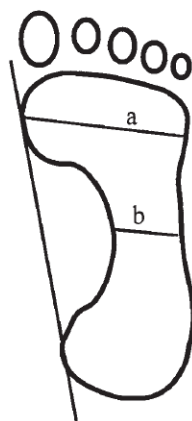


Figura 6: Índice de Chiappaux-Smirak (Echarri & Forriol,2003).

$$\% ICS = \frac{b}{a} * 100 \quad (1)$$

donde a= ancho del antepié

b= ancho del mediopié

**Tabla 1: Clasificación de tipo de pie por Chippaux & Smirak (1947).**

| <i>Tipo de pie</i> | <i>Resultado</i> |
|--------------------|------------------|
| Pie plano          | Mayor a 45       |
| Pie normal         | 25 a 45          |
| Pie cavo           | Menor a 25       |

### 2.2.3.2. Índice de Staheli

El índice propuesto por Staheli et al. (1987) ofrece una medida cuantitativa, simple y no invasiva para clasificar el tipo de pie. Para aplicar esta técnica, se obtienen las huellas del pie (Figura 7) y se divide mediante la Ecuación 2 la medida más estrecha de la huella en la zona del mediopié (b), entre la parte más ancha del retropié (c). Según el resultado obtenido después y en base a la Tabla 2, se obtiene el tipo de pie.

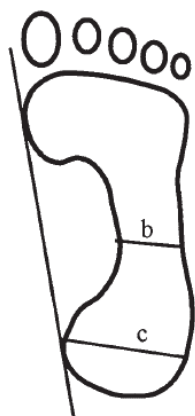


Figura 7: Índice de Staheli (Echarri & Forriol,2003).

$$\% IS = \frac{b}{c} \quad (2)$$

donde b= ancho del mediopie

c= ancho del retropie

**Tabla 2: Clasificación de tipo de pie por Staheli et al. (1987).**

| <i>Tipo de pie</i> | <i>Resultado</i> |
|--------------------|------------------|
| Pie plano          | Mayor a 0.89     |
| Pie normal         | 0.44 a 0.89      |
| Pie cavo           | Menor a 0.44     |

### 2.2.3.3. Índice de Cavanagh & Rogers

Esta técnica requiere dividir la huella plantar como se describió anteriormente en tres regiones: retropie (A), mediopie (B) y antepie (C). A partir de esta segmentación, Cavanagh y Rodgers (1987) desarrollaron el Índice de Cavanagh (I.C.), una medida planimétrica que permite evaluar cuantitativamente la morfología de la bóveda plantar de forma sencilla y no invasiva.

El cálculo del Índice de Arco (Figura 8) se basa en la proporción del área correspondiente al mediopie respecto al área total de la huella (excluyendo los dedos), se calcula mediante la Ecuación 3 y se clasifica el tipo de pie en base a la Tabla 3.

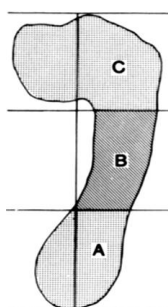


Figura 8: Índice de Cavanagh & Rogers (Cavanagh & Rogers, 1987).

$$\% I.C. = \frac{B}{A+B+C} \quad (3)$$

**Tabla 3: Clasificación de tipo de pie por Cavanagh & Rogers (1987).**

| <i>Tipo de pie</i> | <i>Resultado</i> |
|--------------------|------------------|
| Pie plano          | Mayor a 0.26     |
| Pie normal         | 0.21 a 0.26      |
| Pie cavo           | Menor a 0.21     |

## 2.3. Preprocesamientos de imagen y visión artificial

### 2.3.1. Procesamiento de imágenes digitales

Una imagen se describe como una función bidimensional  $f(x,y)$ , en la que  $x$ ,  $y$  representan una posición en el espacio, la amplitud  $f$  de cualquier coordenada  $(x, y)$  se conoce como intensidad de la imagen en esa coordenada. La imagen digital está compuesta por una cantidad de elementos finitos, cada elemento tiene ubicación específica y un valor asociado. A estos elementos se les conoce como: elementos de fotografía, elementos de imagen o pixel. “Pixel es el término más utilizado para designar los elementos de una imagen digital” (Gonzalez et al., 2009).

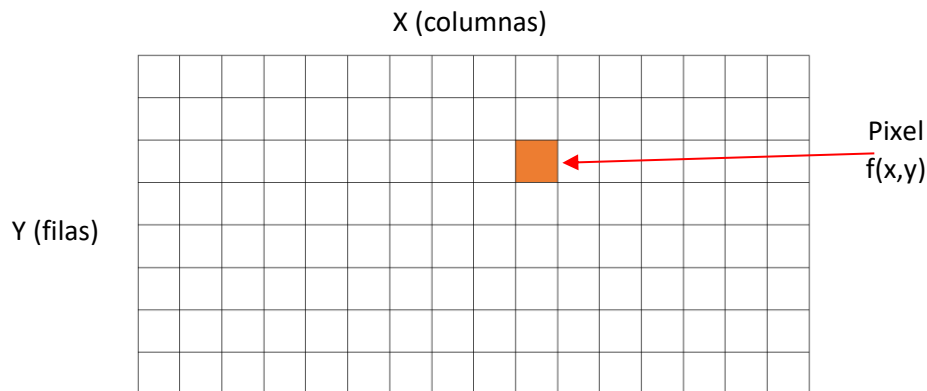


Figura 9: Sistema de coordenadas (píxeles) de una imagen (Autoría propia).

Como muestra la Figura 9, dentro del sistema de coordenadas de una imagen, se puede referenciar a un elemento de imagen o pixel dentro de ella, donde  $x$ ,  $y$  es la posición dentro de la imagen que ocupa dicho pixel y  $f(x,y)$  el valor o intensidad que tiene. Cabe destacar que, a diferencia de un plano coordenado tradicional, el primer elemento de la imagen se encuentra en  $x=0$ ,  $y=0$ .

### 2.3.2. Etapas de procesamiento de imágenes

La visión por computadora, también conocida como visión artificial, se enfoca en sistemas que utilizan el procesamiento de imágenes. Estos sistemas combinan cámaras o sensores de imagen, dispositivos de entrada y salida, así como redes de computadoras para controlar distintos equipos.

El correcto funcionamiento de la visión artificial depende de diversos componentes que deben trabajar de manera coordinada. En la Figura 10 se presentan las distintas etapas necesarias para llevar a cabo un buen procesamiento de imágenes. (Castro et al., 2015).

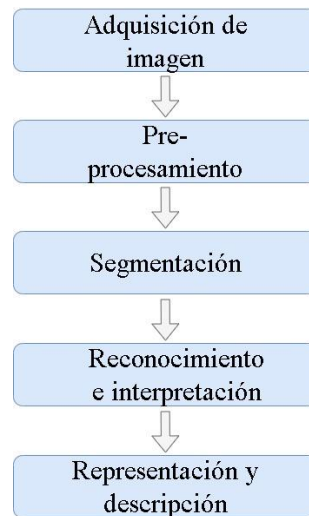


Figura 10: Etapas de procesamiento de imágenes (Autoría propia).

- a) **Adquisición de la imagen:** Es la etapa en la que un sensor o dispositivo convierte algún tipo de energía (como luz o calor) en una señal visual que forma la imagen. Esto puede lograrse, por ejemplo, mediante el ojo humano, cámaras térmicas, fotográficas o de video. Es importante mencionar que, en este proceso, la imagen puede verse afectada por ruido o interferencias.
- b) **Preprocesamiento:** Tiene como objetivo reducir al máximo el ruido introducido durante la adquisición y mejorar ciertas características de la imagen, como los bordes, el brillo o los colores, para facilitar su análisis posterior. Ejemplos básicos de preprocesamiento de imágenes son, por ejemplo, el reescalado y el recorte. El reescalado consiste en modificar el tamaño de la imagen original, ya sea ampliándola o reduciéndola, de forma proporcional en relación con sus dimensiones originales. Por su parte, el recorte se refiere a eliminar partes de la imagen, comúnmente en sentido horizontal o vertical, con el fin de conservar únicamente una región de interés.
- c) **Segmentación:** Es la fase en la que se divide la imagen en partes o regiones para separar los elementos importantes que se quieren analizar o estudiar.

- d) Representación y descripción: En esta etapa se extraen atributos que permiten diferenciar cada objeto de los demás, como su tamaño, forma o perímetro. También se prepara la imagen para su visualización en dispositivos electrónicos, como pantallas o monitores.
- e) Reconocimiento e interpretación: Aquí se identifican los objetos presentes en la imagen y se les asigna un significado, permitiendo comprender qué representa cada uno.

### **2.3.3. Nivel o escala de gris**

Dentro del campo del procesamiento de imágenes, las imágenes en tonos de gris se crean mediante la composición de píxeles, cada uno tiene un nivel específico de intensidad de gris, es decir, que tan claro o tan oscuro es. El rango de nivel de gris cambia en base a la profundidad de bits que tenga la imagen, profundidades altas admiten una mejor representación del nivel de gris y con ello una distinción más precisa entre tono de grises. Las imágenes en tonos de gris simplifican la aplicación de herramientas para el procesamiento de imágenes, como lo es la detección de un borde. Es posible transformar cualquier imagen de color en una de escala de gris, mediante el cálculo del tono de gris del total de píxeles RGB como se muestra en la Ecuación 4 (Gonzalez et al., 2009).

$$\text{Nivel de gris} = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.11 * B \quad (4)$$

donde;  $R, G, B$  es la intensidad de color rojo, verde y azul respectivamente.

### **2.3.4. Detección de bordes o contornos**

Un borde se caracteriza por un cambio repentino de intensidad en un área pequeña, lo que permite identificar y delimitar los objetos que se encuentran dentro de la imagen. Existen varios filtros u operadores para detección de bordes, uno de los más usados por su practicidad es el operador Sobel.

- Operador Sobel:

El filtro Sobel es un método de detección de contornos basado en gradientes que se aplica a imágenes en escala de grises. Utiliza dos máscaras de convolución independientes  $M_h$  y  $M_v$  para obtener los cambios de intensidad en dirección horizontal y vertical.

$$Mh = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad Mv = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

En cada píxel de la imagen, los resultados de las aproximaciones de ambos gradientes pueden ser combinados para obtener su magnitud (o tasa de cambio de intensidad) con la Ecuación 6 (Millon et al., 2020).

$$\text{Gradiente} = \sqrt{Gx^2 + Gy^2} \quad (6)$$

donde,  $Gx$ =Gradiente en x  $Gy$ =Gradiente en y

### 2.3.5. Morfología matemática

La teoría de conjuntos representa el lenguaje de la morfología matemática. Este proporciona un enfoque integral y eficaz para abordar distintas dificultades en el procesamiento de imágenes. En la morfología matemática, los conjuntos representan objetos presentes en la imagen. Un ejemplo puedes ser la totalidad de los píxeles blancos de una imagen binaria, la cual constituye una representación morfológica de dicha imagen.

- Erosión: Es una operación que elimina los píxeles del borde de un objeto si en su vecindad hay al menos un píxel que pertenece al fondo, es decir, al área no perteneciente al objeto (Figura 11). Su función es la de disminuir los objetos de tamaño o suprimir los pequeños objetos. Se expresa como  $I \ominus H$ , en la cual  $I$  es la imagen y  $H$  el vecindario especificado.

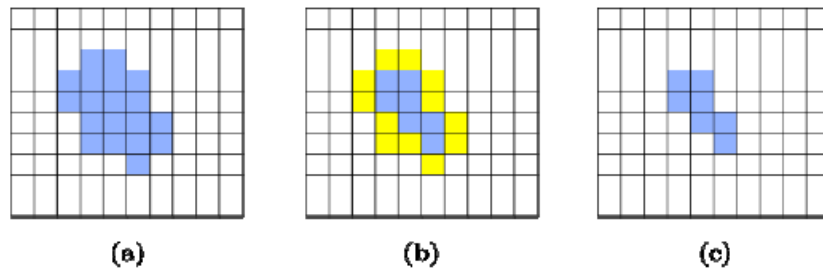


Figura 11: Erosión morfológica: (a) objeto original (en azul), (b) píxeles eliminados en la operación de erosión (en amarillo), y (c) resultado final (Ruiz, 2020).

- Dilatación: Es una operación que convierte en parte del objeto a todos los píxeles del fondo que tienen al menos un píxel del objeto en su vecindad (Figura 12). Su función

es la de agrandar los objetos o cerrar los pequeños agujeros. Se expresa como  $I \oplus H$  donde  $I$  es la imagen y  $H$  un vecindario conocido.

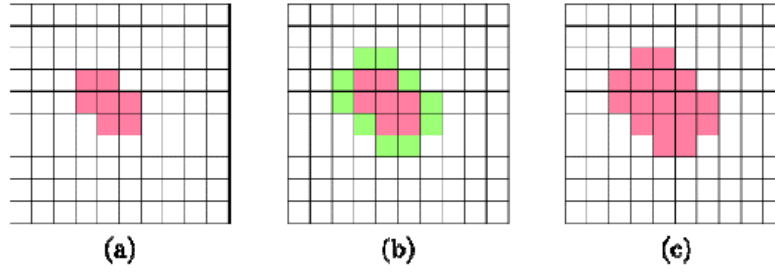


Figura 12: Dilatación morfológica: (a) objeto original (en rojo), (b) píxeles convertidos en objeto al aplicar la dilatación (en verde), y (c) resultado final. (Ruiz, 2020).

- **Apertura:** Este proceso implica aplicar primero una erosión y luego una dilatación. Su propósito es eliminar protuberancias, conexiones delgadas o la del suavizado de bordes de un objeto en una imagen. Se representa mediante la Ecuación 7. La Figura 13a muestra un ejemplo de apertura.

$$I \circ H = (I \ominus H) \oplus H \quad (7)$$

- **Cerradura:** Este proceso implica aplicar primero una dilatación y luego una erosión. Su objetivo es juntar dos objetos que están separados por un margen angosto, suprimir agujeros pequeños mientras se conserva la dimensión del objeto, rellenar agujeros en el contorno o la de suavizado de bordes. La Ecuación 8 representa la cerradura. La Figura 13b muestra un ejemplo de cerradura.

$$I \bullet H = (I \oplus H) \ominus H \quad (8)$$

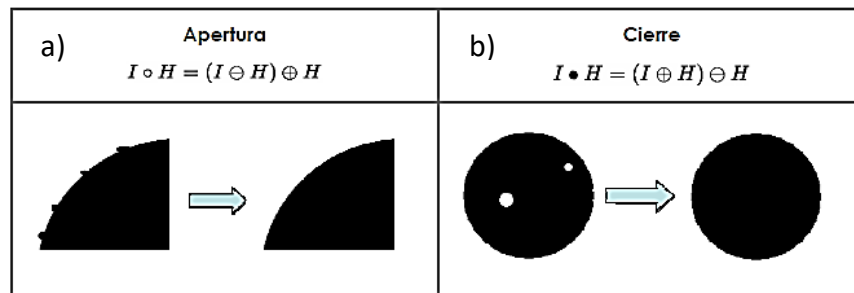


Figura 13: Ejemplos de operaciones de apertura (a) y cierre (b) (Ruiz, 2020).

### 2.3.6. Filtros espaciales de imagen

El filtrado espacial es una de las principales herramientas utilizadas en el procesamiento digital de imágenes, ya que permite modificar directamente los valores de los píxeles en función de sus vecinos para lograr efectos específicos. Este enfoque es ampliamente aplicado en tareas como la mejora de imágenes, la reducción de ruido, la detección de bordes y el realce de detalles.

#### 2.3.6.1. Filtro gaussiano

Entre los distintos tipos de filtros espaciales, el filtro gaussiano destaca por su capacidad para suavizar imágenes de forma eficiente, preservando mejor los bordes en comparación con otros métodos. En base a la Ecuación 9, este filtro aplica una convolución con una máscara basada en la distribución gaussiana, lo que lo convierte en una opción ideal para preprocesar imágenes antes de etapas más complejas como la segmentación o el reconocimiento (González et al., 2009).

$$G_{(x,y)} = e^{\frac{-x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

donde  $G(x, y)$  es el valor del filtro gaussiano en las coordenadas  $(x, y)$  y  $\sigma$  la desviación estándar que determina el nivel de desenfoque.

### 2.3.7. Espacio de color RGB

El espacio de color RGB (rojo, verde y azul, por sus siglas en inglés) es uno de los modelos de color más utilizados en procesamiento de imágenes y sistemas de visualización digital. En este modelo, los colores se representan como combinaciones de tres componentes: rojo, verde y azul. Cada píxel de una imagen codificada en RGB contiene una intensidad para cada uno de estos tres canales, y la mezcla de ellos determina el color final percibido. Aunque el modelo RGB es adecuado para la visualización y almacenamiento de imágenes, no siempre resulta el más conveniente para tareas de análisis o segmentación, ya que los componentes de color están fuertemente correlacionados con la intensidad de luz, lo que puede dificultar operaciones en condiciones de iluminación variables.

### 2.3.8. Espacio de color HSV

El espacio de color HSV (matiz o tono, saturación y valor, por sus siglas en inglés) es una representación alternativa al modelo RGB, diseñada para aproximarse de manera más intuitiva a cómo los humanos perciben y diferencian los colores. En este modelo:

- Hue (matiz o tono) representa el tipo de color (como rojo, azul, amarillo).
- Saturation (saturación) indica la pureza del color.
- Value (valor) corresponde al brillo o luminosidad.

Una de las principales ventajas del espacio HSV (Figura 14) es que separa la información de color (tono y saturación) de la información de intensidad (valor). Esto permite realizar tareas como la segmentación de objetos basándose en el color, de forma más robusta ante cambios de iluminación. Además, facilita la manipulación y comparación de colores de forma más intuitiva que en el espacio RGB, lo que lo hace muy útil en aplicaciones de visión artificial, detección de objetos y análisis de escenas.

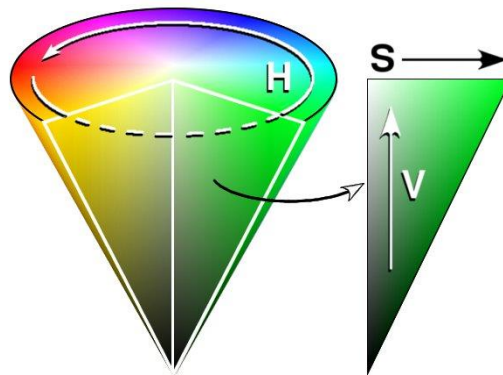


Figura 14: Espacio de color HSV (Girgis et al., 2014).

### 2.3.9. Segmentación

La segmentación (Wang et al., 2023) es una etapa crucial en el procesamiento de imágenes que consiste en dividir una imagen en regiones homogéneas o segmentos, facilitando la identificación y análisis de objetos dentro de la imagen. Su objetivo principal es separar las áreas de interés del fondo o de otras regiones, basándose en características como color, intensidad, textura o forma. La segmentación es esencial para tareas posteriores

como el reconocimiento, clasificación o interpretación, ya que permite aislar elementos relevantes para el análisis automático o humano.

### **2.3.10. Técnicas básicas de aumento de datos**

En contextos donde la cantidad de datos (imágenes) disponibles es limitada, el aumento de datos es fundamental para tener modelos robustos de aprendizaje automático. Su objetivo es generar nuevas muestras a partir de las imágenes originales, aplicando transformaciones que preserven las características esenciales del objeto de estudio, con el fin de mejorar la capacidad de generalización del modelo y reducir el sobreajuste (Shorten & Khoshgoftaar, 2019).

Entre las técnicas básicas más utilizadas se encuentran el espejeado horizontal o vertical, y la adición de ruido de sal y pimienta.

#### **2.3.10.1. Espejeado horizontal o vertical**

Esta técnica de aumento de datos consiste en reflejar la imagen a lo largo de un eje (horizontal o vertical), generando una versión simétrica de la original, lo cual permite simular variaciones espaciales naturales en los datos y ha demostrado ser eficaz para mejorar la robustez de los modelos de clasificación de imágenes.

#### **2.3.10.2. Ruido sal y pimienta**

El ruido de sal y pimienta introduce píxeles blancos (sal) y negros (pimienta) aleatoriamente sobre la imagen, simulando imperfecciones o interferencias que pueden encontrarse en la adquisición real de datos. Este tipo de ruido ayuda a que los modelos aprendan a ser más resistentes a pequeñas perturbaciones o defectos en las imágenes de entrada.

### **2.3.11. Momentos de Hu**

Los momentos invariantes propuestos por Hu (1962) constituyen una técnica ampliamente utilizada en el análisis de imágenes para la extracción de características geométricas, ya que permiten describir la forma de un objeto de manera independiente de transformaciones como la traslación, rotación y escala. Esta propiedad los convierte en herramientas particularmente útiles en tareas de reconocimiento y clasificación de patrones.

Hu derivó siete momentos invariantes a partir de combinaciones de momentos centrales normalizados de segundo y tercer orden. Entre ellos, los tres primeros momentos son los más utilizados debido a que concentran una gran parte de la información morfológica del objeto. Estos momentos se definen como: Reflexión total interna (RTI):

- H1 (Momento de energía total): Representa la distribución general de la imagen y está relacionado con la varianza.
- H2 (Momento de contraste): Captura información sobre la distribución de la intensidad y la simetría de la forma.
- H3 (Momento de asimetría): Indica la presencia de asimetrías en la imagen.

#### **2.3.12. Reflexión total interna (RTI)**

Es un fenómeno físico que se produce cuando un rayo de luz atraviesa un material y queda atrapado en él, reflejándose entre sí a lo largo del mismo, esto debido a la diferencia entre los índices de refracción del material y el medio que lo rodea. La reflexión total interna en un prisma de vidrio es a menudo usada para reflejar rayos luminosos en un ángulo sin pérdida de intensidad apreciable, convirtiendo al vidrio en un tipo de escáner (Rossi B, 2021).

### **2.4. Aprendizaje automático**

Dentro de la inteligencia artificial se encuentra el aprendizaje automático, el cual se basa en el desarrollo de sistemas que aprenden a través de los datos y se optimizan con el tiempo sin necesidad de estar reprogramando los algoritmos que permiten a un pc tomar decisiones, reconocer patrones y hacer predicciones basadas en datos. La intención de un aprendizaje automático es la de aprender a través de datos. El tipo de algoritmo empleado depende del tipo de problema que se desea resolver, el número de variables, el tipo de modelo que mejor se adapta, etc. (Mahesh, 2020).

Existen muchos tipos de algoritmos de aprendizaje, dentro de ellos los no supervisados y los supervisados.

### 2.4.1. Aprendizaje no supervisado

Este tipo de algoritmos aprenden pocas características de los datos, son utilizados en su mayoría para agrupar o reducir características.

### 2.4.2. Aprendizaje supervisado

A diferencia de los algoritmos de aprendizaje automático, estos necesitan de asistencia externa, el grupo de datos de entrada se subdividen en dos grupos (entrenamiento y prueba), a partir de los datos de entrenamiento etiquetados, los algoritmos aprenden patrones para predecir o clasificar los datos del grupo de prueba. Algunos de los algoritmos supervisados más usados son: Maquinas de vectores de soporte (SVM) y K vecinos cercanos (KNN). El flujo de trabajo de algoritmos de aprendizaje supervisados se muestra en la Figura 15.

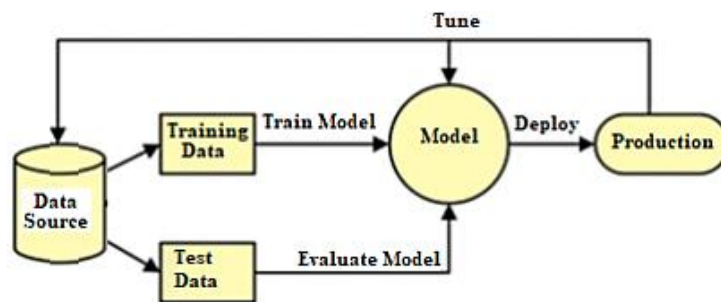


Figura 15: Flujo de trabajo de algoritmos de aprendizaje supervisados (Mahesh, 2020).

#### 2.4.2.1. Máquinas de vectores de soporte (SVM)

SVM es un algoritmo que a partir del producto escalar de los vectores multidimensionales de las muestras construye un hiperplano o conjunto de hiperplanos y un espacio de dimensionalidad muy alta que separa los grupos (Gil-Leiva et al., 2019). Este tipo de algoritmo analiza los datos para su clasificación y tareas de regresión, indaga el mejor hiperplano que separe las distintas clases en el universo de características, es decir; encuentra trazar márgenes entre clases de modo que la separación entre el margen y las clases sea la mayor posible. La Figura 16 muestra un ejemplo de los hiperplanos de separación de una

SVM.

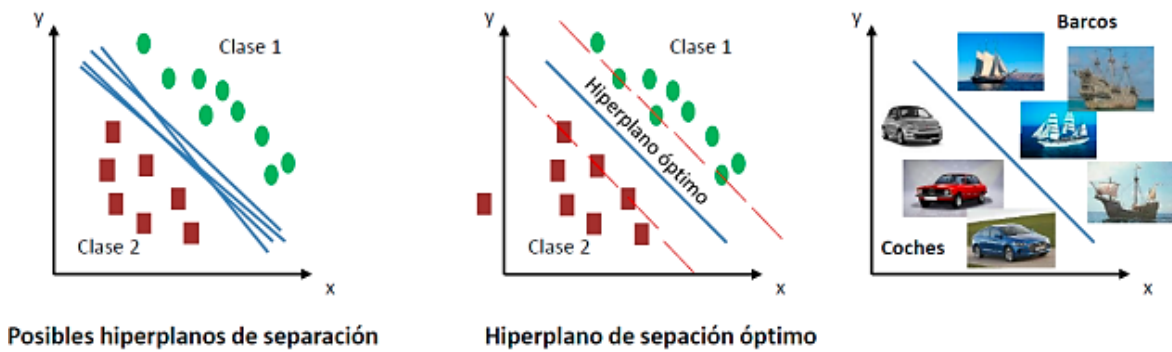


Figura 16: Hiperplanos de separación en un espacio bidimensional (Gil-Leiva et al., 2019).

En este contexto, la SVM tiene propiedades fundamentales que necesitan conocerse para comprender su funcionamiento, estas son:

- Hiperplano y vectores de soporte: El hiperplano actúa como la frontera que separa las distintas clases dentro del espacio de características. Para definir esta frontera de manera óptima, el modelo identifica los vectores de soporte, que son aquellos puntos de datos más cercanos al límite de separación. Estos vectores resultan esenciales, ya que determinan directamente la posición y orientación del hiperplano, influyendo así en la capacidad del modelo para generalizar.

- Funciones kernel: Las SVM no solo pueden clasificar datos que son linealmente separables, sino también aquellos que no lo son, gracias al uso de las funciones kernel. Estas funciones permiten transformar los datos originales a un espacio de mayor dimensión, donde es más probable encontrar una separación lineal entre clases. Entre las funciones kernel más utilizadas se encuentran la lineal, polinómica, radial base (RBF) y sigmoidea.

#### 2.4.2.2. K vecinos más cercanos (KNN)

KNN se caracteriza por su simplicidad y efectividad en tareas de clasificación supervisada. Este algoritmo compara nuevas muestras con un conjunto de datos etiquetados, calculando la distancia euclidiana para identificar los K vecinos más cercanos. La clase asignada corresponde a la mayoría entre esos vecinos. Su funcionamiento no depende de suposiciones previas sobre la distribución de los datos, lo que lo hace especialmente adecuado para conjuntos con clases bien separadas.

- Selección del valor de K:

El valor de 'K' tiene un papel distinguido a la hora de clasificar datos sin etiquetar, ya que determina la precisión y eficacia del algoritmo. Hay muchas formas de decidir los valores de "K", pero simplemente podemos ejecutar el clasificador varias veces con diferentes valores para ver qué valor da el resultado más efectivo.

Un clasificador KNN trabaja de la siguiente manera:

1) Paso de aprendizaje: Utilizando los datos de entrenamiento se construye un clasificador.

2) Evaluación del clasificador: Según la técnica del vecino más cercano, los nuevos datos sin etiquetar se clasifican determinando a qué clases pertenecen sus vecinos. En primer lugar, se analizan los K vecinos más cercanos del nuevo punto de datos. En segundo lugar, utilizando las clases de los vecinos, KNN determina en qué clase se deben clasificar los nuevos datos. Por lo tanto, es necesario calcular la distancia euclidiana (Ecuación 10) entre la muestra de prueba y las muestras de entrenamiento especificadas (Taunk et al., 2019).

$$\text{Distancia euclidiana} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (10)$$

$x_i, y_i$  = componentes  $i$  – ésimos de  $x$  y  $y$      $n$  = num de características

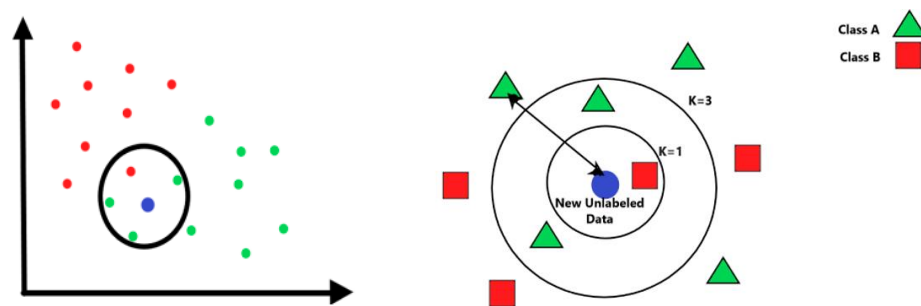


Figura 17: Simple KNN, clasificación de nuevo dato con K=1 y K=3 (Taunk et al., 2019).

El valor de K es importante, en la Figura 17 se observa que al elegir K=1 el nuevo dato (azul) se clasificara en la clase B, pero al modificar este valor con k=3, el nuevo dato se

clasificara en la clase A. Por lo tanto, es necesario sintonizar este valor para tener modelos robustos.

### 2.4.3. Indicadores de desempeño y matriz de confusión

Para evaluar la robustez de un modelo de aprendizaje automático, los indicadores de desempeño juegan un papel muy importante en este ámbito, ya que sirven para conocer qué tan bien cumplen su tarea, comparar modelos y detectar áreas de mejora, garantizando que los resultados sean útiles y confiables. Estas métricas son: exactitud, precisión, sensibilidad y puntaje F1 (Ecuaciones (11-14)), las cuales se obtienen a partir de una tabla que resume el rendimiento de un modelo de clasificación, llamada matriz de confusión (Figura 18), esta compara las predicciones con las etiquetas reales.

$$Exactitud = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (11)$$

$$Precisión = \frac{TP}{TP+FP} \quad (12)$$

$$Sensibilidad = \frac{TP}{TP+FN} \quad (13)$$

$$Puntaje F1 = \frac{2 * TP}{2 * TP + FP + FN} \quad (14)$$

|            |                    | Clase predicha          |                         |
|------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
|            |                    | Condición positiva      | Condición negativa      |
| Clase real | Condición positiva | (TP) Verdadero positivo | (FP) Falso positivo     |
|            | Condición negativa | (FN) Falso negativo     | (TN) Verdadero negativo |

Figura 18: Matriz de confusión (autoría propia).

## CAPITULO 3

### 3. Metodología

En este capítulo se detallan cada una de las etapas que conforman el desarrollo de la investigación. La Figura 19 muestra el diagrama de la metodología propuesta el cual cuenta de cinco principales pilares, los cuales se describen enseguida.

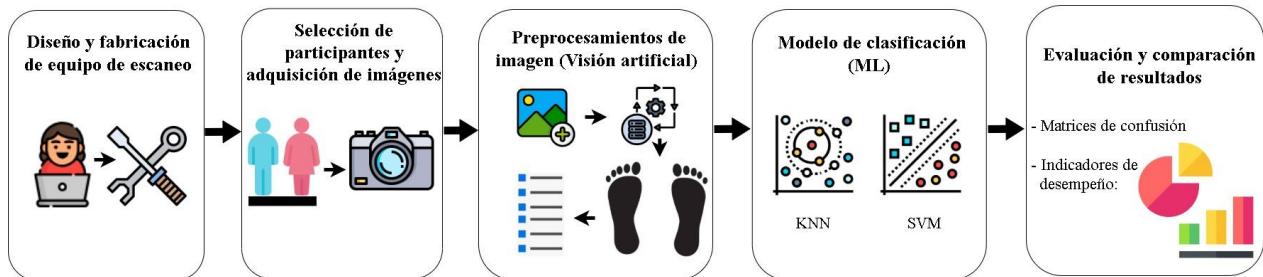


Figura 19: Diagrama a bloques de la metodología propuesta (autoría propia).

Como se observa en la Figura 19, el primer paso consistió en el diseño y fabricación de un equipo propio de escaneo, el cual permite la captura de la parte inferior de los pies (huella plantar) de los participantes. Después se reunieron a los participantes en los centros de atención de la facultad de enfermería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), con previa invitación y valoración realizada por un experto de la salud.

En este contexto, una vez reunidos los participantes, se adquirieron imágenes RGB de la sección de interés (bóveda plantar), mediante el equipo de escaneo propio. A partir de estas imágenes, se formaron tres carpetas o clases correspondientes a los tipos de bóveda plantar: pie plano, pie cavo y pie sano. Se generó una base de datos con las bóvedas plantares de los participantes ( $n=180$ ), las cuales fueron obtenidas mediante técnicas de visión artificial aplicadas a las imágenes originales capturadas. A estas imágenes de la base de datos se les extrajeron características relevantes, las cuales se utilizaron para entrenar y evaluar dos algoritmos de clasificación inteligentes (KNN y SVM) de aprendizaje automático (ML, por sus siglas en inglés). Finalmente, se presentan los resultados del sistema de clasificación de la bóveda plantar (pie plano, cavo o normal) mediante matrices de confusión e indicadores de desempeño.

Para este trabajo se tomaron en cuenta las consideraciones éticas correspondientes (NOM-012-SSA3-2012), además de las técnicas y reglamentos apropiados para el uso de laboratorio, materiales y recursos humanos que permiten no causar ningún daño físico o psicológico a los participantes, es importante mencionar que el tipo de pruebas que se realizan son no invasivas.

Además, se cuenta con las cartas de “*Confidencialidad de Datos*” y de “*Consentimiento Informado*”, (Anexo A y B) las cuales se encuentran en la sección de anexos de este documento, en ellas los investigadores se comprometen a cumplir con los lineamientos establecidos en el Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud, la Declaración de Helsinki, el código de Nuremberg y las Buenas Prácticas Clínicas emitidas por la Comisión Nacional de Bioética. Se tiene la autorización del uso de datos de cada uno de los participantes involucrados en el estudio mediante su consentimiento informado.

### **3.1. Diseño y fabricación de equipo de escaneo**

Para la adquisición de las imágenes (bóvedas plantares) se diseñó (Figura 20) y fabrico un equipo de escaneo propio, el cual fue construido a base de madera de pino de primera calidad y un cristal de vidrio templado de 12mm de espesor, el cual puede soportar más de 170kg de carga puntual. En su interior del equipo se encuentra una cámara RGB Go Pro Hero 3+ con resolución de 5M (2624x1968 pixeles) y enfoque automático, la cual tiene un control inalámbrico (wifi/bluetooth), que permite la captura (escaneo) de las plantas de los pies de cada participante. De igual manera, el diseño requirió incorporar una luz led color verde sobre el canto del vidrio, haciendo uso del fenómeno físico de reflexión total interna, la cual permite destacar la huella plantar.

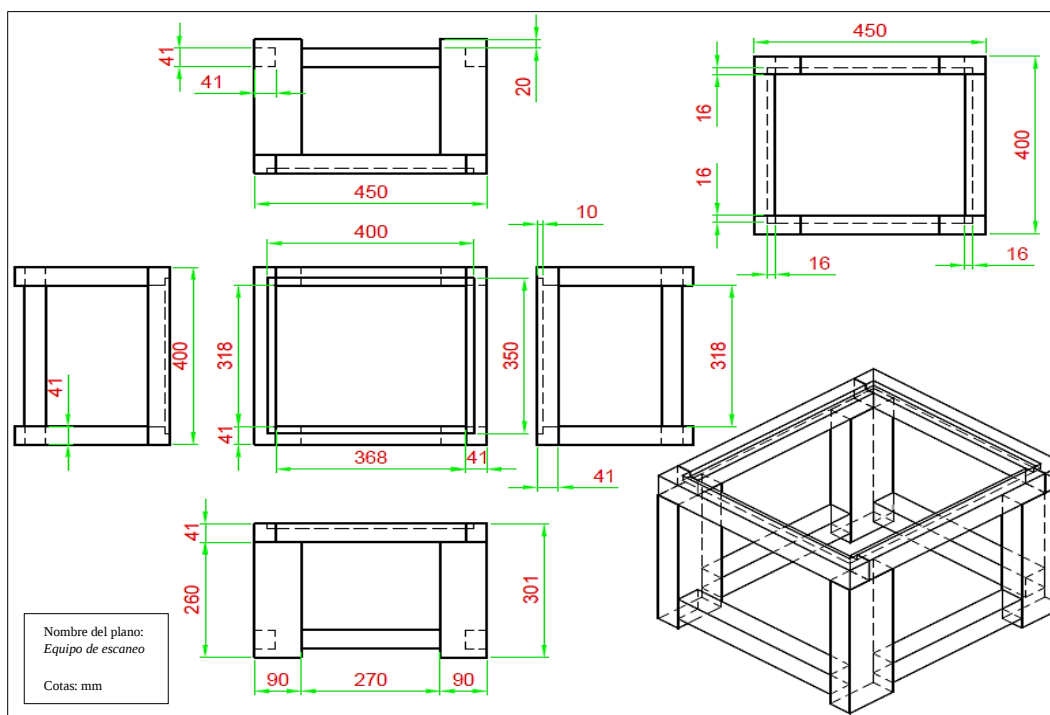


Figura 20: Diseño de equipo de escaneo de bóvedas plantares (autoría propia).

### 3.1.1. Normativas y cumplimiento del vidrio templado

Para garantizar la seguridad de los participantes, es necesario que el vidrio templado que requiere el equipo resista sin problemas el peso de un humano promedio. Por ello, cumple los estándares de calidad y las normas NOM-146-SCFI-2016, ANSI Z97.1-2015, ASTM C1048 avaladas por el Consejo de Certificación de Acristalamientos de Seguridad (SGCC, por sus siglas en ingles) y el Consejo de Certificación de Vidrio Aislante Council (IGCC, por sus siglas en ingles). Los cuales garantizan que una probeta de 30x30cm y 6mm de espesor soporta 170 kg de carga concentrada (*Anexo C*). Sin embargo, el vidrio con el que se diseñó el equipo de escaneo es de 12mm, lo que permite tener aún mayor resistencia y un factor de seguridad a fin de salvaguardar la integridad y seguridad de los participantes.

### 3.2. Selección de participantes y adquisición de imágenes

Esta investigación implica a participantes voluntarios masculinos y femeninos, Mexicanos residentes del estado de Querétaro, con alteración en su bóveda plantar (pie plano o cavo) y personas clínicamente con pies sanos. La selección y evaluación de los mismos fue realizada por especialistas del área de la salud pertenecientes a la UAQ. Los participantes se clasificaron en tres diferentes grupos (pie normal, plano o cavo), como se muestra en la Figura 21.

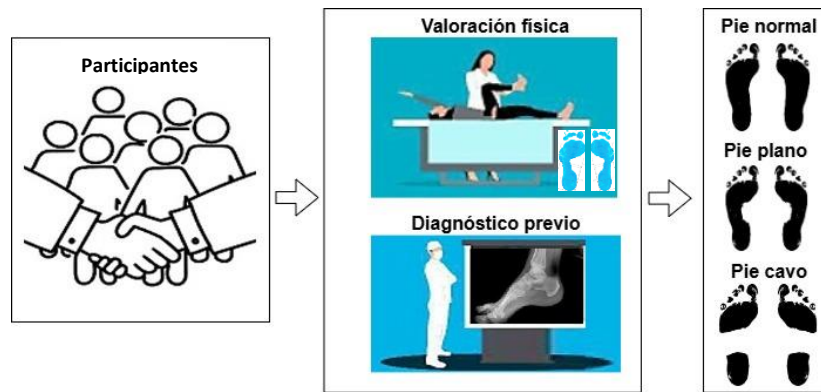


Figura 21: Procedimiento para la selección de participantes (autoría propia).

En este contexto, se desarrolló el “*Procedimiento para la búsqueda de participantes*” el cual se muestra a continuación, en él se definen los criterios de inclusión y exclusión, los métodos de reclutamiento, las sesiones de prueba y los documentos o registros que se tienen para cada uno de los participantes.

#### 3.2.1. Procedimiento para la búsqueda de participantes

El presente procedimiento aplica para la búsqueda y selección de participantes que se tiene para el desarrollo del trabajo titulado “Sistema para la detección y clasificación de alteraciones de la bóveda plantar mediante el uso de aprendizaje automático”.

a. Definición de los criterios de inclusión y exclusión:

Criterios de Inclusión:

- Edad: Participantes entre 18 y 69 años.
- Género: Ambos géneros.

- Diagnóstico: Participantes con diagnóstico previo de alteraciones en la bóveda plantar (pie plano o cavo), así como individuos sanos (pie normal).
- Disponibilidad: Capacidad y disposición para asistir a la visita programada para la prueba.
- Consentimiento informado: Participantes que puedan proporcionar su consentimiento informado por escrito.

#### Criterios de Exclusión:

- Condiciones médicas concurrentes: Enfermedades sistémicas graves o condiciones que afecten la marcha.
- Cirugía reciente: Cirugía del pie o tobillo en los últimos 6 meses.
- Embarazo: Mujeres embarazadas o en período de lactancia.
- Adicción a sustancias: Abuso de drogas o alcohol.

#### b. Reclutamiento de Participantes:

- Anuncio público: Se publican anuncios/convocatorias dentro de la comunidad UAQ, los cuales mencionan los requisitos, así como los criterios de inclusión y exclusión para que el público forme parte de la población de participantes.
- Contacto con profesionales de salud: Se informa a especialistas del sector salud de la comunidad UAQ como fisioterapeutas, ortopedistas, fisiólogos, etc., sobre el estudio para que refieran participantes.

\*De hacer extensiva esta convocatoria a instituciones externas se busca el convenio pertinente.

#### c. Sesión de pruebas:

- Cita de Evaluación: Se programa una cita para los candidatos que cumplen con los criterios establecidos.
- Entrevista clínica: Se realiza una entrevista detallada para confirmar el cumplimiento de los criterios de inclusión y exclusión antes de cada prueba.
- Consentimiento Informado: Se explica el estudio en detalle al participante, y de estar de acuerdo con ello, se obtiene su consentimiento informado por escrito.

#### d. Documentación y registro:

- Archivos de participantes: Se mantiene un registro de todos los participantes, incluyendo : nombre, edad, peso y tipo de pie que tiene (normal, plano o cavo).
- Confidencialidad: Se mantiene de manera confidencial y segura toda la información personal y de pruebas de los participantes.

### **3.2.2. Adquisición de imágenes**

Para la adquisición de todas y cada una de las de las imágenes de los participantes se desarrolló el “*Procedimiento para las pruebas y adquisición de imágenes de los participantes*”, el cual se muestra a continuación, donde se describe detalladamente los pasos que se siguen para la captura de la zona inferior de los pies de cada participante (bóveda plantar), así como los requerimientos del lugar de pruebas y consideraciones adicionales.

#### **3.2.2.1. Procedimiento para las pruebas y adquisición de imágenes de los participantes**

**Procedimiento general:** Las tomas de muestras de las imágenes de bóvedas plantares de los participantes se llevan a cabo bajo la supervisión directa y acompañamiento de un profesional en ciencias de la salud, en los horarios que se le asignan de acuerdo con la agenda de actividades del día \_\_\_\_ del mes \_\_\_\_ y año \_\_\_\_\_. Todos los procedimientos, equipos y materiales utilizados para la evaluación son de tipo no invasiva lo que significa que en ningún caso tienen que ingerir, recibir o sentir ningún dolor. Cada medición se realiza después de alrededor de 10 minutos de que el participante a ingresado al lugar designado para el estudio. El participante tiene que descubrirse ambos pies para permitir sus tomas. Para las evaluaciones se utiliza un dispositivo propio el cual soporta de pie al participante, para la obtención de sus dos huellas plantares (parte inferior del pie humano) y un pc. Las pruebas y adquisiciones de imágenes tienen la modalidad de una sola intervención breve, es decir que esta demora entre 2 y 3 minutos por persona. Las pruebas se realizan en el lugar designado, el cual cumpla con los “Requerimientos del lugar de pruebas” que se muestran en este documento.

#### **a) Procedimiento específico para las pruebas y adquisición de imágenes:**

1. Consentimiento informado:

Se explica el procedimiento a seguir al participante y de aceptarlo, se obtiene su consentimiento por escrito.

2. Preparación del participante:

Se proporciona lo necesario para tener un ambiente privado, cómodo y seguro para el participante, en el cual se le pide que se retire las calcetas/calcetines/zapatos y que mantenga un breve tiempo de reposo.

3. Preparación del dispositivo:

Se verifica la estabilidad, calibración, limpieza y desinfección del dispositivo antes de cada prueba mientras el participante está en el periodo de reposo.

4. Posicionamiento del participante:

Una vez pasado el tiempo de reposo, se le pide al participante que suba al equipo de escaneo de bóvedas plantares y de ser posible que mantenga una postura natural y equilibrada.

5. Tiempo para la adquisición de imágenes (periodo que el participante permanece sobre el equipo de escaneo):

Se le pedirá al participante mantenerse sobre el equipo de escaneo por unos segundos, este tiempo permitirá la captura de imágenes de sus bóvedas plantares.

6. Procesamiento de los datos de la bóveda plantares:

Durante el tiempo de adquisición de las bóvedas plantares el equipo de escaneo y el pc hacen el procesamiento necesario para poder guardar las imágenes de las bóvedas plantares manteniendo la confidencialidad de los mismos. Se verificará la correcta captura y se comunicara al participante que la prueba ha finalizado.

7. Finalización de la prueba:

Una vez que se le indica al participante que la prueba a finalizado, se puede bajar del equipo de prueba y regresar a su asiento para colocarse sus calcetines, zapatos y tomar sus pertenencias para poder retirarse del lugar y continuar sus actividades de manera normal.

## 8. Documentación y seguimiento:

Se registra la prueba en una bitácora para tener el control de los participantes evaluados y se conservan los datos de manera confidencial y segura.

### **b) Requerimientos de los participantes:**

Los requerimientos de los participantes se presentan a continuación:

- Evitar el ejercicio físico al menos seis horas antes de la prueba.
- No haber consumido drogas, alcohol o bebidas energéticas por al menos 24 horas.
- Utilizar calzado cómodo el día de la prueba.
- Evitar el uso de sustancias o polvos en la región plantar (loción, talco, crema, etc.), o algún otro agente ajeno que pueda intervenir con la obtención de la huella plantar el día de la prueba.
- Llegar con anticipación a la prueba, de preferencia 10 min antes, para permitir un periodo breve de reposo e indicarle instrucciones.
- Durante el periodo de reposo, de preferencia evitar el uso de tines/calcetines/calceas, y permanecer lo más relajado posible, tratando de descansar los pies.
- Evitar estar de pie al menos en el tiempo de reposo antes de la prueba.

### **c) Requerimientos del lugar de pruebas:**

Los requerimientos para el lugar donde se realiza las pruebas se presentan a continuación:

- Se recomienda como mínimo un lugar con dimensiones de 3 x 2 m.
- No es recomendable un lugar en el que se tengan que subir o bajar varios pisos o escaleras.
- El lugar no debe de tener grandes corrientes de aire las cuales entorpezcan el procedimiento.
- De preferencia el lugar debe contar con aire acondicionado o al menos tener una temperatura cómoda de trabajo.
- La humedad relativa del lugar es insignificante.

### **d) Consideraciones adicionales:**

- Limpiar y desinfectar el dispositivo tras cada uso.

- Mantener un ambiente cómodo, seguro, respetuoso y profesional en todo momento.
- De ser requerido, notificar al participante los resultados obtenidos por la prueba.
- Considerar la presencia de lesiones, prótesis o cirugías en la región a evaluar del participante.
- Preguntar al participante si ha tenido un diagnóstico previo por algún método convencional para detección de alteraciones en sus bóvedas plantares.
- Responder a cualquier consulta del participante.
- De ser necesario o expresado por el participante, se detendrá el procedimiento en cualquier momento.

\*Este procedimiento garantiza un enfoque ético, centrado en la seguridad y el bienestar del participante.

### 3.2.2.2. Entorno de pruebas

El entorno de pruebas (Figura 22) que se tuvo para la obtención de imágenes de los participantes es en base a lo especificado en la sección 3.2.2.1. *inciso (c)*, el cual habla acerca de los requerimientos mínimos que debe tener el lugar donde se realizan las tomas de imágenes de los participantes.

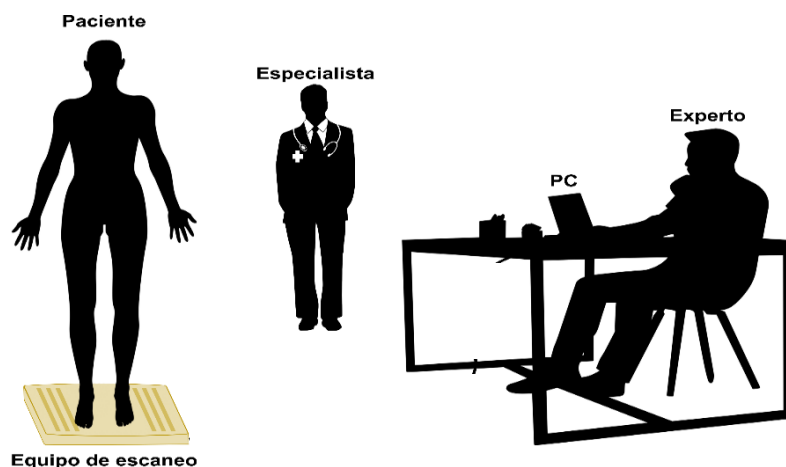


Figura 22: Entorno de pruebas para la adquisición de imágenes (autoría propia).

### 3.3. Preprocesamiento de imágenes

Una vez adquiridas el total de imágenes RGB, estas se organizan en tres diferentes carpetas, cada una correspondiente a una condición específica del tipo de pie: normal, plano o cavo. Para optimizar el manejo de los datos para su almacenamiento, transmisión y extracción de información, se aplican varios preprocesamientos a las imágenes. A partir de las imágenes originales, se obtuvo un primer modelo de imágenes a las que se les aplicó un recorte vertical por la mitad para separar pie izquierdo y derecho y un reescalado a 328x492 es decir en una proporción de 1:4 con respecto a las originales, esto con el fin de reducir el recurso computacional necesario, tratando de preservar la máxima información posible. Posteriormente, cada imagen fue convertida a escala de grises con el fin de aplanar la información y posibilitar su evaluación en el sistema de clasificación.

El segundo modelo se obtuvo igualmente realizando recorte y reescalado, además se aplica filtrado gaussiano para obtener imágenes con menor ruido y se realiza la conversión del espacio de color RGB al HSV. Enseguida se realiza la segmentación por tonos verdes mediante rangos definidos para los canales de tono (hue), saturación (saturation) y valor (value), según lo especificado en la Tabla 4. Para ello, se genera una máscara umbralizada que asigna un valor de 255 (blanco) a los píxeles que cumplen con los rangos establecidos y 0 (negro) al resto. Sin embargo, este procedimiento puede incluir píxeles no pertenecientes a la huella plantar, por ello, se aplicó una operación de apertura (morfología matemática) a las imágenes umbralizadas, con el fin de eliminar ruido aislado y garantizar una segmentación limpia y precisa. Como resultado, se obtienen imágenes binarias en la que la huella plantar se representa en blanco (255) y el fondo en negro (0), facilitando su posterior análisis y caracterización.

**Tabla 4: Rangos HSV para segmentación por tonos verdes.**

| <i>Característica</i>      | <i>Rango</i> |
|----------------------------|--------------|
| Tono (hue)                 | 50 – 80      |
| Saturación (saturation)    | 50 – 255     |
| Valor o intensidad (value) | 50 - 255     |

Todos los preprocesamientos aplicados se realizaron utilizando el software Python y la librería Open CV, mismos que se muestran en la Figura 23.

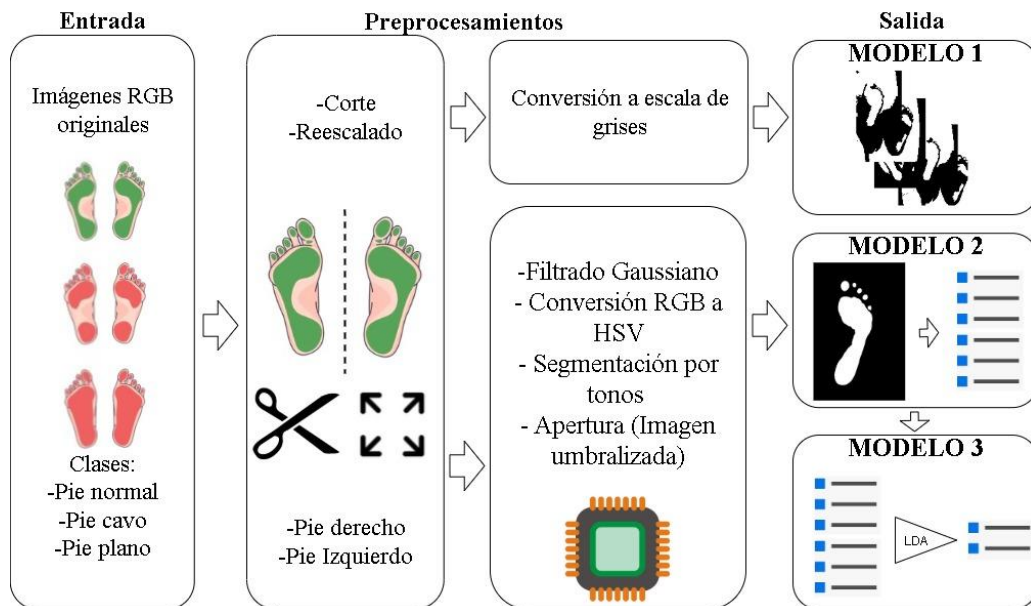


Figura 23: Procesamientos de imagen (autoría propia).

En el mismo contexto, se emplearon técnicas de aumento de datos (Shorten y Khoshgoftaar, 2019), mediante la aplicación de ruido de sal y pimienta al 1 % y espejeo vertical, con el objetivo de generar modelos de clasificación más robustos y seleccionar el de mejor desempeño entre los evaluados.

### 3.3.1. Base de datos

Finalmente, la base de datos generada y utilizada en este estudio, tiene un total de  $n=180$  imágenes umbralizadas, las cuales muestran exclusivamente la huella plantar y con ello posibilitan su caracterización para posteriormente poder clasificarlas en base al tipo de pie que cada una representa (plano, cavo o normal). Las características de la base de datos generada se muestran en la Tabla 5.

| <b>Tabla 5: Características de la base de datos</b> |                              |
|-----------------------------------------------------|------------------------------|
| <i>Características</i>                              | <i>Datos</i>                 |
| n                                                   | 180                          |
| Clases                                              | 3 (pie plano, normal y cavo) |
| Distribución                                        | 60 imágenes por clase        |
| Formato                                             | JPG (binarizadas)            |
| Resolución                                          | 328x492 pixeles              |
| Participantes                                       | 45 (60% Mujeres/40% Hombres) |
| Edad                                                | 18-69 años                   |
| Peso                                                | 69±21 kg                     |
| Estatura                                            | 1.64±0.13 m                  |

### 3.3.2. Selección de regiones de interés y extracción de características

Para facilitar la extracción de características, se define una región de interés (ROI) para cada imagen umbralizada. Esta región se delimita automáticamente mediante la detección de los cuatro puntos extremos de la huella plantar (sin considerar los dedos): el más superior, el más inferior, el más izquierdo y el más derecho. A partir de estos puntos, se establece un recuadro que contiene exclusivamente el área correspondiente a la huella.

Una vez delimitada esta región general, se procede a su segmentación en tres partes: antepié, mediopie y retropié, conforme a la división en tercios propuesta por Cavanagh y Rodgers (1987). Esta segmentación permite analizar de forma independiente las diferentes zonas funcionales de la huella plantar para posteriormente poder caracterizarlas.

En cada una de estas tres regiones se calcularon características de cada una de las imágenes de nuestra base de datos, tomando en cuenta las “Formas o técnicas más usadas para evaluar la bóveda plantar del pie humano”, las cuales incluyen medidas de ancho y área de cada región, así como largo de pie y área total, adicionalmente se calcularon los tres primeros momentos invariantes de Hu, los cuales aportan información relevante sobre la forma y distribución espacial de la huella, siendo además invariantes a traslación, rotación y escala. En total se extraen 11 características mismas que se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6: Características extraídas de las imágenes de la base de datos.**

| <i>Numero</i> | <i>Característica</i> |
|---------------|-----------------------|
| 1             | Área total            |
| 2             | Área antepié          |
| 3             | Área mediopié         |
| 4             | Área retropié         |
| 5             | Ancho máximo antepié  |
| 6             | Ancho mínimo mediopié |
| 7             | Ancho máximo retropié |
| 8             | Largo de pie          |
| 9             | Momento de Hu 1       |
| 10            | Momento de Hu 2       |
| 11            | Momento de Hu 3       |

### **3.3.3. Análisis discriminante lineal a características**

Con el objetivo de mejorar la separabilidad entre clases, se aplicó el Análisis Discriminante Lineal (LDA, por sus siglas en inglés) a las 11 características extraídas de cada imagen. Esta técnica busca proyectar los datos a un nuevo espacio en el que las muestras de una misma clase estén lo más agrupadas posible, mientras que las distintas clases entre si estén lo más separadas posible.

En este contexto, se realizó una reducción de dimensionalidad a dos componentes, permitiendo representar cada imagen con solo dos valores discriminantes. Este conjunto reducido de características conformó un tercer modelo de datos, el cual fue evaluado junto con los modelos dos modelos anteriores mediante los algoritmos clasificadores de aprendizaje automático utilizados en este trabajo.

### **3.4. Modelos de clasificación de Aprendizaje Automático (ML)**

Una vez conformada y caracterizada cada una de las imágenes de nuestra base de datos, fue necesario clasificarlas según el tipo de pie que representa cada una, es decir, identificar si corresponde a un pie sano o a una alteración (pie plano o pie cavo). Para ello, se implementaron dos algoritmos clasificadores basados en aprendizaje automático: KNN y SVM.

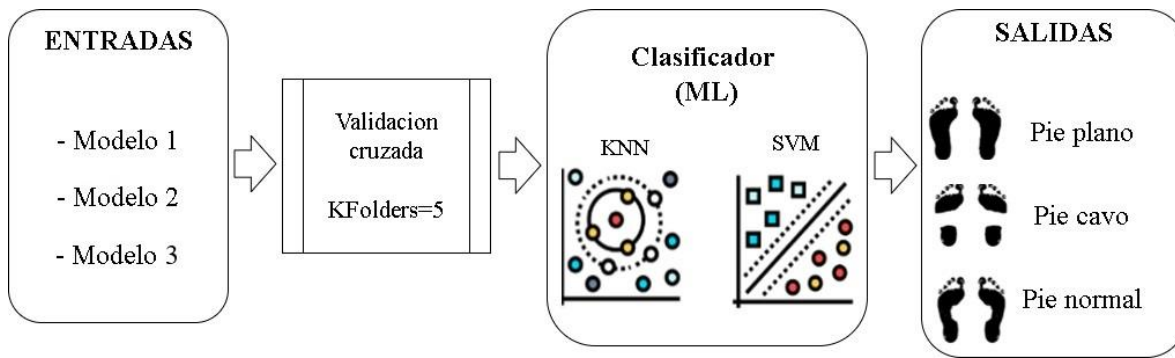


Figura 24: Sistema para clasificación de alteraciones de las bóvedas plantares (autoría propia).

En la Figura 24 se muestra el sistema de clasificación propuesto, como entradas se tienen los tres modelos de datos de entrada descritos anteriormente, seguido se tienen dos diferentes algoritmos de aprendizaje automático implementados para la clasificación, mismos que fueron entrenados y evaluados mediante la técnica de validación cruzada con un valor de KFolders=5, lo que significa que el 80% de las muestras fueron usadas para el entrenamiento y el 20% para la validación, con ello se reduce el posible riesgo por sobre ajuste de los modelos al evaluar los clasificadores con muestras no vistas en el entrenamiento. Finalmente, como salidas el sistema clasifica el tipo de pie en base a uno normal o uno con alteración (pie plano o cavo).

### 3.5. Evaluación y comparación de resultados

La evaluación y comparación de los modelos desarrollados, encargados de clasificar pies humanos como cavos, planos o normales, se realizó utilizando matrices de confusión e indicadores de desempeño (Ecuaciones 11–14). Con ello, se analiza la efectividad general de cada uno y se selecciona al modelo con mayor precisión de entre los evaluados, asegurando así una evaluación integral orientada a optimizar la capacidad del sistema para detectar alteraciones en la bóveda plantar.

## **CAPITULO 4**

### **4. Resultados y discusión**

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de la investigación. Se detalla el proceso seguido desde la construcción del equipo de escaneo de bóvedas plantares, la selección de participantes, la adquisición y el preprocesamiento de las imágenes, hasta la conformación de la base de datos empleada para el entrenamiento y la evaluación del modelo de clasificación.

Asimismo, se describen los enfoques comparativos aplicados para determinar la técnica de clasificación más adecuada para la identificación automática del tipo de pisada (plano, cavo o normal).

Los resultados se organizan por etapas, permitiendo observar el desempeño del sistema propuesto en cada fase. Se incluyen matrices de confusión, métricas de desempeño, representaciones gráficas y análisis cuantitativo del comportamiento de los algoritmos, con el objetivo de validar la efectividad del enfoque planteado frente a los objetivos establecidos.

#### **4.1. Diseño y fabricación de equipo de escaneo**

Se diseñó y fabricó un equipo de escaneo para capturar imágenes plantares de alta calidad a través de madera de pino de primera calidad. El componente principal es un vidrio templado de 12 mm de espesor, cuya resistencia estructural garantiza un uso seguro. Según la ficha técnica del fabricante, un vidrio de 6 mm de 30x30 cm soporta una carga concentrada de hasta 170 kg, por lo que el vidrio utilizado (de mayor espesor) ofrece una resistencia superior (ver Anexo C), con lo cual se salvaguarda la integridad y seguridad de los participantes.

En el canto del vidrio se colocó una tira led verde que resalta claramente las zonas en contacto con la superficie. La iluminación es alimentada por baterías AA, lo que proporciona portabilidad. Para la captura de imágenes se utilizó una cámara GoPro Hero 3+ ubicada en la parte inferior, alineada al centro del vidrio.

El equipo (Figura 25) tiene una altura de 30 cm, permitiendo un acceso cómodo para la mayoría de los participantes. Adicionalmente, se incorporó un banco auxiliar para casos especiales, el cual puede separarse del equipo cuando se desee, aunque fue utilizado en pocas ocasiones. El diseño se enfocó en la funcionalidad, seguridad y facilidad de uso, cumpliendo con los requerimientos necesarios para la adquisición correcta de imágenes plantares.



Figura 25: Equipo de escaneo de imágenes plantares (autoría propia).

#### 4.2. Selección de participantes y adquisición de imágenes

Para la realización del estudio se contó con la participación de hombres y mujeres en su mayoría pertenecientes a la comunidad UAQ. La convocatoria se realizó de manera voluntaria, enfocándose en individuos adultos sanos sin antecedentes recientes de cirugías o lesiones graves en los pies, en su mayoría pertenecientes a la comunidad UAQ.

La clasificación de los participantes según su tipo de pisada (pie plano, cavo o normal) fue realizada con el apoyo del Sistema Universitario para Atención en Fisioterapia (SUAF), quienes colaboraron en la valoración morfológica de la bóveda plantar. Este proceso permitió

asegurar una correcta categorización clínica necesaria para la construcción confiable de la base de datos y la posterior implementación del sistema de clasificación.

#### 4.2.1. Clases o grupos de participantes

Con base en la valoración realizada por el personal del SUAF, los participantes fueron clasificados en tres grupos, según el tipo de bóveda plantar (Figura 26): pie plano, pie normal y pie cavo. Se recolectaron un total de 45 imágenes RGB, divididas en 15 imágenes plantares, para cada clase, las cuales después de aplicar técnicas de preprocesamiento y aumento de datos se convirtieron en 180 imágenes umbralizadas, las cuales muestran únicamente la huella plantar en blanco sobre fondo negro, mismas que conforman nuestra base de datos generada para el estudio. Esta distribución equilibrada permitió estructurar una base de datos balanceada, adecuada para el entrenamiento y evaluación de los modelos de clasificación.

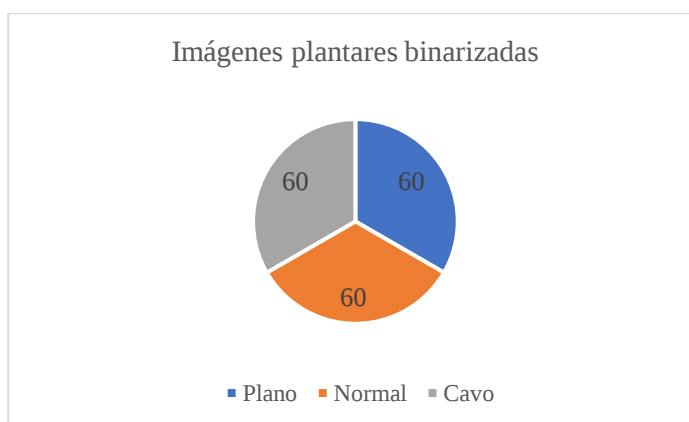


Figura 26: Distribución de imágenes binarias de la base de datos (autoría propia).

#### 4.2.2. Adquisición de imágenes plantares

La adquisición de imágenes plantares fue una etapa fundamental para la construcción de la base de datos utilizada en el presente estudio. El objetivo fue obtener imágenes plantares con suficiente claridad y contraste para facilitar su análisis automatizado posteriormente.

La captura de las imágenes se realizó utilizando el equipo de escaneo previamente descrito, cumpliendo con las condiciones establecidas en la *sección 3.2.2.1*. A continuación, se muestran los pasos seguidos para la obtención de las imágenes.

#### 4.2.2.1. Acondicionamiento del lugar y equipo de escaneo

El lugar designado para la adquisición de imágenes (Figura 27) fue seleccionado cumpliendo con los “*Requerimientos del lugar de pruebas*” establecidos en el procedimiento especificado en la *sección 3.2.2.1*. Dicho procedimiento no exige condiciones específicas como control de temperatura, humedad, etc., sin embargo, se procuró que el espacio estuviera bien ventilado y con los elementos necesarios, con el fin de garantizar la comodidad y seguridad de los participantes para favorecer una captura uniforme y controlada de las imágenes.

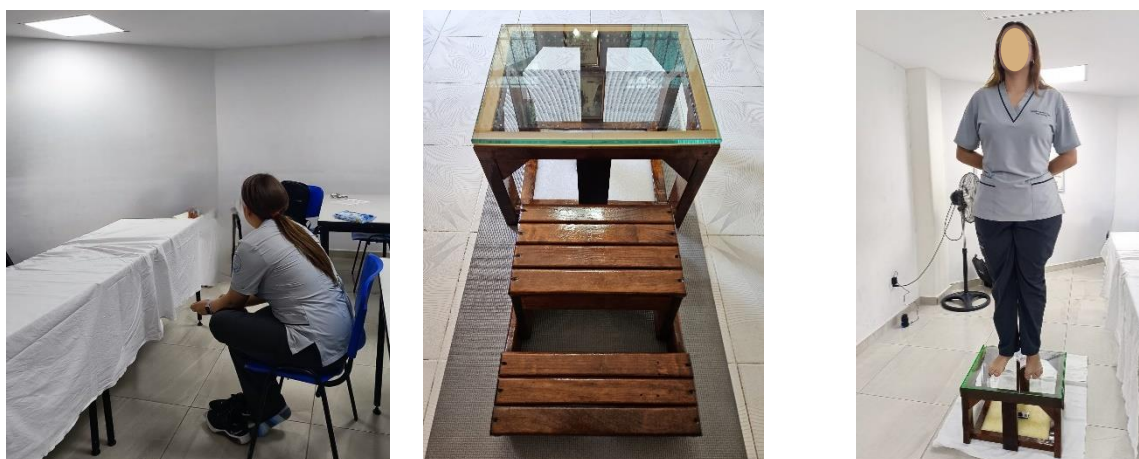


Figura 27: Lugar pruebas (autoría propia).

El lugar de pruebas cuenta con iluminación y ventilación adecuada para la tarea, así como con sillas y camilla donde los participantes pueden sentarse para retirarse el calzado y quedar descalzos para permitir la captura de sus huellas plantares.

En cuanto al equipo de escaneo, se verificó antes de cada toma para asegurar su correcto funcionamiento. Además, se limpia y desinfecta entre cada uso, garantizando condiciones adecuadas de higiene y cuidado de la salud de los participantes en todo momento.

#### 4.2.2.2. Adquisición de imágenes RGB de los participantes

El proceso de adquisición de imágenes consistió en una rutina simple, una vez listo el equipo de escaneo, se indicaba al participante que debía subir y colocarse de pie sobre el equipo de escaneo, manteniéndose en una posición relajada durante algunos segundos.

Durante este tiempo, se realizaba la captura de la imagen plantar mediante la cámara GoPro Hero 3+, controlada remotamente a través de un smartphone conectado por WiFi.

Una vez obtenida la imagen, se indicaba al participante que podía descender del equipo y regresar a su silla para colocarse nuevamente su calzado. Este procedimiento se repetía de manera individual con cada participante, garantizando consistencia y calidad en todas las capturas. En la Figura 28 se muestra un ejemplo de una de las pruebas realizadas, así como la imagen capturada por la cámara.



Figura 28: Adquisición de imágenes plantares (autoría propia).

Posteriormente, se aplicaron técnicas de aumento de datos, con el fin de ampliar el conjunto de datos y mejorar la robustez de los modelos frente a variaciones propias de la adquisición.

#### **4.3. Preprocesamientos aplicados**

Como resultado de los preprocesamientos aplicados a las imágenes RGB originales (Figura 29), se obtuvo un conjunto de imágenes umbralizadas (binarias) en las que únicamente se conserva el área correspondiente a la huella plantar en color blanco (255), mientras que el fondo se representa en negro (0). Esta transformación permitió aislar de manera precisa la región de interés (huella plantar), facilitando su posterior caracterización y análisis para la correcta evaluación del tipo de pie.

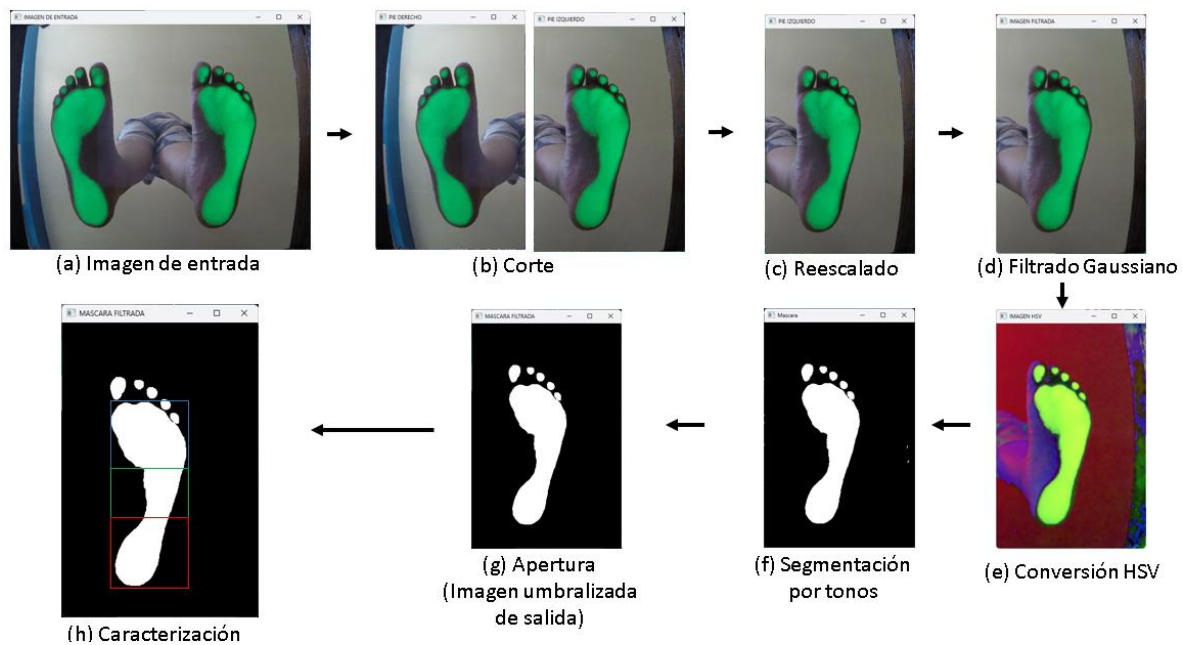


Figura 29: Preprocesamientos aplicados (autoría propia).

En base a la Figura 29, se generó una colección muestras individuales al separar las imágenes en pies izquierdo y derecho. Posteriormente, se logró una reducción del tamaño de las imágenes a 328x492 píxeles, con una relación de 4:1 con respecto a su tamaño original, sin afectar sustancialmente los detalles relevantes de las huellas. Además, tras aplicar la segmentación por tonos verdes, se delimito claramente la huella plantar y el fondo, permitiendo una extracción precisa de la región de interés.

Las operaciones de filtrado gaussiano y apertura morfológica eliminaron eficazmente el ruido presente en las imágenes. Esto se tradujo en imágenes umbralizadas limpias, con buen contraste y sin interferencias externas.

#### 4.3.1. Aumento de datos

Con el objetivo de construir una base de datos robusta para el entrenamiento y validación de los modelos de clasificación automática, se aplicaron dos técnicas de aumento de datos sobre el conjunto de imágenes umbralizadas obtenidas tras aplicar los preprocesamientos mencionados a las imágenes plantares originales de los participantes. Estas imágenes umbrales, que muestran exclusivamente el área de la huella plantar, fueron la base inicial sobre la cual se implementaron los preprocesamientos adicionales.

La primera técnica aplicada fue el espejeado vertical (Figura 30b)), que consistió en reflejar la imagen con respecto a su eje vertical. Este procedimiento permitió simular que una huella capturada de un pie derecho corresponde a un pie izquierdo, y viceversa, sin alterar la morfología real de la huella, esto resultó útil para ampliar la variabilidad del conjunto de datos sin introducir distorsiones relevantes. Como resultado de esta operación, el número de imágenes se duplicó, pasando de 45 a 90 muestras.

Posteriormente, sobre este nuevo conjunto de 90 imágenes se aplicó una segunda técnica de aumento: la adición de ruido de sal y pimienta con una intensidad del 5% (Figura 30c-d). Este tipo de ruido simula imperfecciones o interferencias propias de los sistemas de adquisición de imagen, contribuyendo a que el modelo de clasificación sea más robusto frente a variaciones no controladas o pequeñas perturbaciones. Con esta técnica se obtuvo un segundo duplicado, alcanzando un total de 180 imágenes umbralizadas.

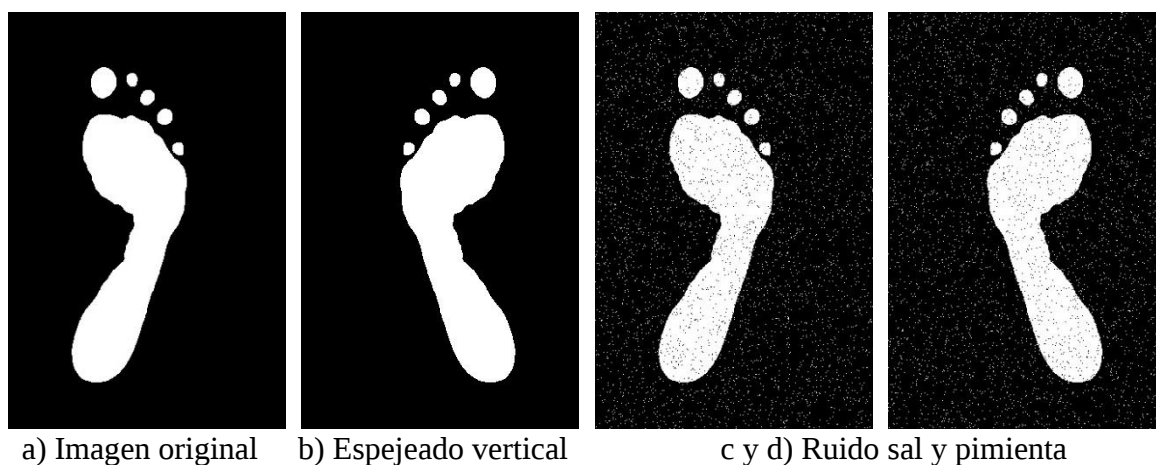


Figura 30: Técnicas de aumento de datos (autoría propia).

#### 4.3.2. Base de datos

Como resultado del proceso completo de adquisición, preprocesamiento y técnicas de aumento de datos, se construyó una base de datos final compuesta por 180 imágenes umbralizadas (binarias), en las que únicamente se conserva el área correspondiente a la huella plantar (área en contacto con el vidrio), representada en blanco (valor 255) sobre un fondo negro (valor 0). Las imágenes se distribuyeron equitativamente entre las tres clases estudiadas: pie plano, pie normal y pie cavo. Este incremento en el volumen de datos permitió reducir el riesgo de sobreajuste durante el entrenamiento de los modelos y mejorar su

capacidad de generalización en escenarios reales. Las características generales de la base de datos construida en este trabajo, se resumen en la Tabla 5.

#### 4.3.3. Selección de regiones de interés (ROI)

Como resultado del procedimiento automático de selección de regiones de interés, se logró identificar y delimitar con precisión el área correspondiente a la huella plantar en cada imagen umbralizada de la base de datos. Esta región se definió a partir de los puntos extremos de la huella (superior, inferior, izquierdo y derecho) sin considerar los dedos, permitiendo la caracterización de cada una de las imágenes.

En la Figura 31 se muestra un ejemplo de una imagen umbralizada con sus regiones de interés delimitadas y divididas en tres zonas (antepié, mediopié y retropié)s, lo cual permite visualizar claramente la metodología aplicada para el análisis de la huella plantar.

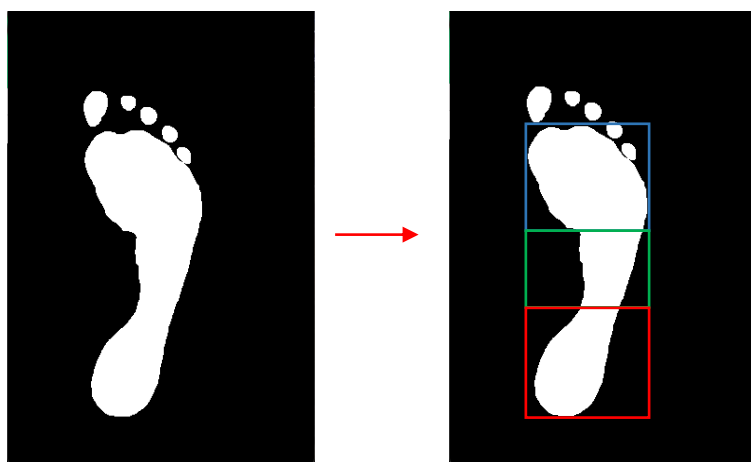


Figura 31: Selección automática de ROIs (autoría propia).

#### 4.3.4. Extracción de características

Una vez definidas las regiones de interés (ROIs) del antepié, mediopié y retropié, se extrajeron 11 características por imagen, las cuales se detallan en la Tabla 6. Estas incluyen características morfológicas como medidas de área, distancias y momentos invariantes de Hu. Posteriormente, se les aplicó un análisis ANOVA para evaluar su impacto en el desempeño del sistema desarrollado. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 32.

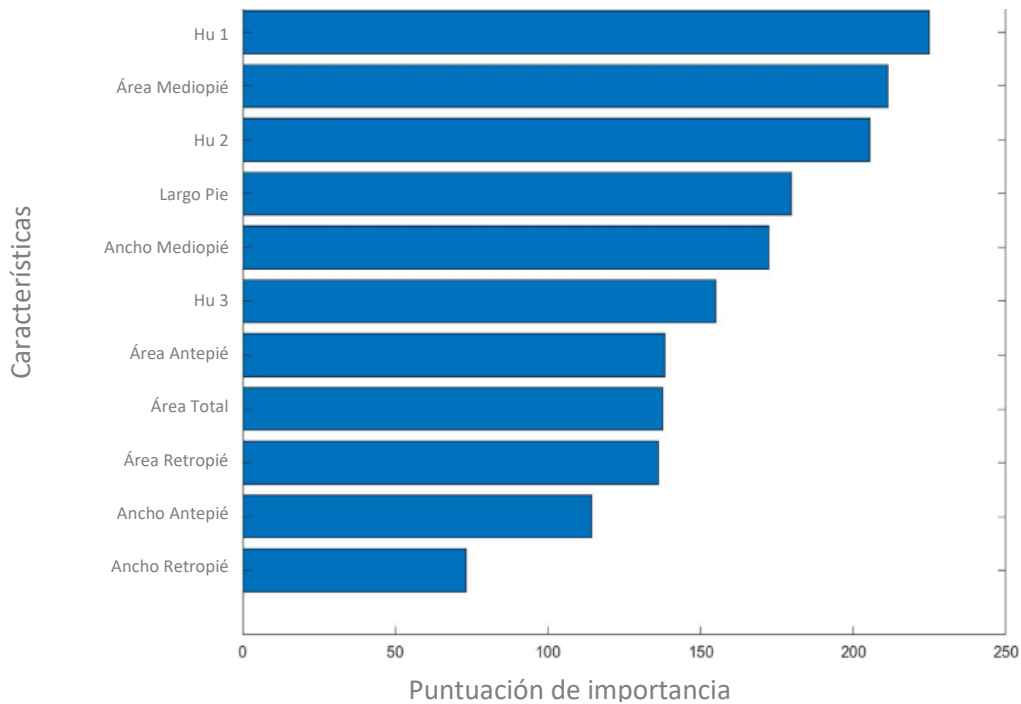


Figura 32: Análisis de ANOVA de características extraídas (autoría propia).

Finalmente, a estas 11 características extraídas de cada imagen se les realizó LDA para proyectarlas a una nueva dimensión de dos, con el fin de mejorar la variabilidad de los datos entre clases y la agrupación de los mismos dentro de clases. Esta proyección en dos nuevas dimensiones representó el tercer modelo de datos evaluado mediante los algoritmos clasificadores de aprendizaje automático utilizados.

#### 4.4. Modelos de clasificación de Aprendizaje Automático

Con el objetivo de identificar el modelo que ofreciera la mejor precisión en la clasificación automática del tipo de pie, se evaluaron los tres modelos de datos de entradas previamente generados: 1) el modelo con las imágenes originales únicamente en escala de grises, 2) el modelo con las once características extraídas de las imágenes umbralizadas de nuestra base de datos y 3) el modelo reducido a dos nuevas dimensiones mediante LDA a partir de las características extraídas del modelo dos. La proyección de datos de este último modelo se muestra en la Figura 33, ya que, por sus dos dimensiones, es el único visualmente posible de observar de manera correcta.

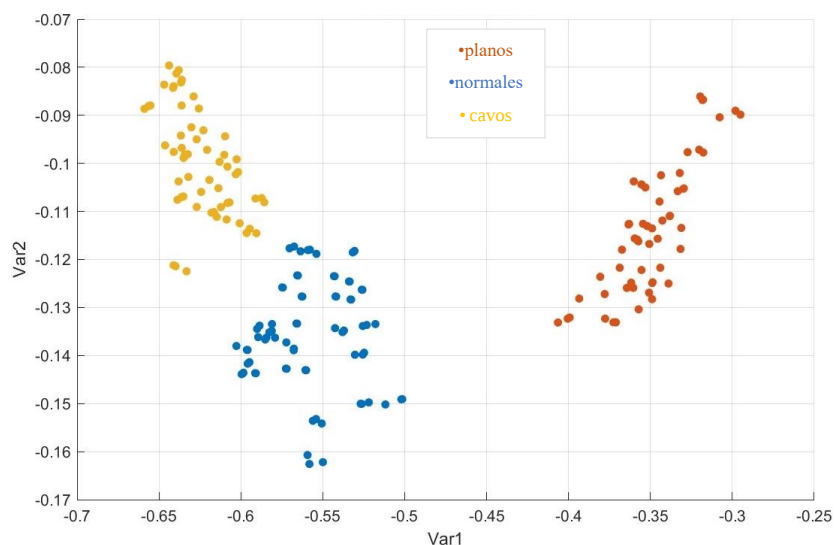


Figura 33: Proyección de datos del modelo tres (autoría propia).

En la Figura 33 se presenta la distribución de los datos correspondiente al tercer modelo evaluado, el cual fue reducido a dos dimensiones mediante LDA. Esta representación permite observar de manera clara la separación entre las tres clases de estudio (pie normal, plano y cavo). La proyección evidencia la efectividad del LDA para maximizar la separabilidad entre clases, facilitando su interpretación visual de los datos y confirmando su utilidad como técnica de reducción de dimensionalidad en problemas de clasificación.

Cada uno de estos modelos fue evaluado utilizando dos algoritmos de clasificación de aprendizaje automático: KNN y SVM. Esta evaluación permitió comparar el desempeño de cada modelo y clasificador, con el fin de seleccionar aquel que ofreciera la mayor precisión y capacidad de discriminación entre las clases establecidas (pie plano, cavo y normal). Los resultados para cada uno de los casos se muestran mediante los indicadores de desempeño descritos en la sección 2.4.3 y para el mejor modelo de cada clasificador se muestra su matriz de confusión.

#### 4.4.1. K-Vecinos más cercanos

El primer algoritmo de clasificación evaluado fue el KNN, el ajuste del hiperparametro del valor de k fue variado desde 2 a 9, obteniendo los mejores resultados para

k=5, para este caso, los resultados de los tres diferentes modelos de entrada de datos evaluados, se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7: Indicadores de desempeño para los modelos KNN**

| <i><b>Métricas</b></i> | <i><b>Modelo 1</b></i> | <i><b>Modelo 2</b></i> | <i><b>Modelo 3</b></i> |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Exactitud              | 44.44 %                | 92.78 %                | 95.56 %                |
| Precisión              | 61.62 %                | 92.84 %                | 95.68 %                |
| Sensibilidad           | 44.44 %                | 92.78 %                | 95.56 %                |
| Puntaje F1             | 40.87 %                | 92.77 %                | 95.55 %                |

Con base en los resultados presentados en la Tabla 7, el mejor modelo KNN fue el tercero, correspondiente al que utilizó como datos de entrada la proyección en dos dimensiones obtenida mediante LDA a partir de las 11 características extraídas de cada imagen umbralizada de la base de datos. La matriz de confusión correspondiente a este modelo se muestra en la Figura 34.

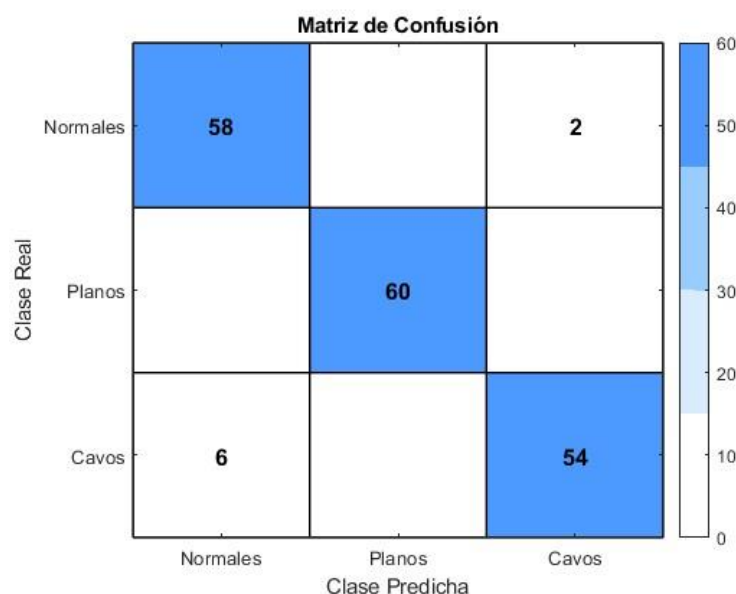


Figura 34: Matriz de confusión para el mejor modelo KNN (autoría propia).

Como se puede observar en la matriz de confusión para el tercer modelo de entrada evaluado con el algoritmo KNN, se tuvieron 8 muestras en total mal clasificadas, 6 pertenecientes a pies cavos que se clasificaron como normales y 2 pies normales que se clasificaron como cavos, y un total de 172 muestras bien clasificadas, alcanzando una precisión para este modelo del 95.68 %.

#### 4.4.2. Máquina de soporte vectorial

El segundo algoritmo de clasificación evaluado fue el SVM, para este caso, los resultados de los tres diferentes modelos de datos de entrada evaluados, se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8: Indicadores de desempeño para los modelos SVM**

| <i>Métricas</i> | <i>Modelo 1</i> | <i>Modelo 2</i> | <i>Modelo 3</i> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Exactitud       | 57.78 %         | 91.18 %         | 97.78 %         |
| Precisión       | 61.78 %         | 91.55 %         | 97.92 %         |
| Sensibilidad    | 57.78 %         | 91.18 %         | 97.78 %         |
| Puntaje F1      | 59.01 %         | 91.11 %         | 97.77 %         |

En base en los resultados presentados en la Tabla 8, el mejor modelo SVM fue el tercero, correspondiente al que utilizó como datos de entrada la proyección en dos dimensiones obtenida mediante LDA a partir de las 11 características extraídas de cada imagen umbralizada de la base de datos. La matriz de confusión correspondiente a este modelo se muestra en la Figura 35.

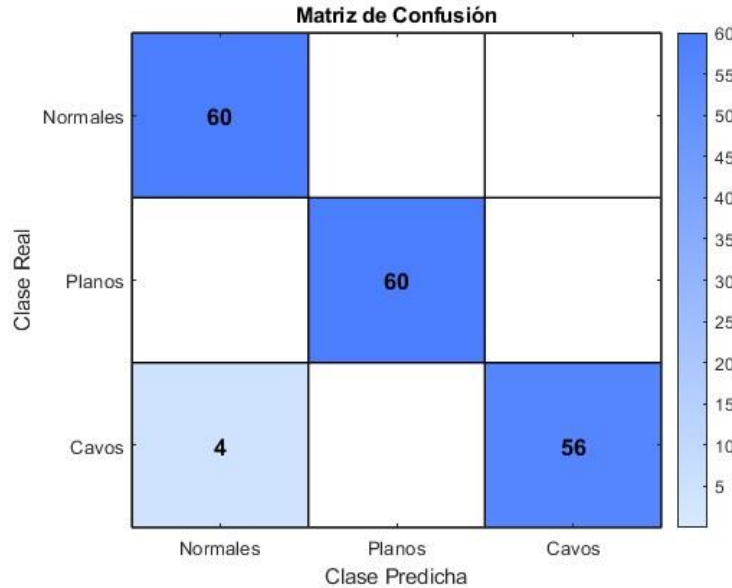


Figura 35: Matriz de confusión para el mejor modelo SVM (autoría propia).

En base a la Figura 35, se puede observar en la matriz de confusión para el tercer modelo de entrada evaluado con el algoritmo SVM, un total de 4 muestras mal clasificadas,

pertenecientes a pies cavos que se clasificaron como normales y un total de 176 muestras bien clasificadas, lo que representa un 97.92 % de precisión para este modelo.

#### **4.4.3. Mejor modelo obtenido**

De las Tablas 7 y 8 las cuales muestran los indicadores de desempeño obtenidos para los clasificadores KNN y SVM respectivamente, se puede observar para ambos casos que, cuando se evaluó el primer modelo de entrada de datos, el cual representa las imágenes RGB originales de los participantes simplemente con conversión a escala de grises, se tienen los resultados de exactitud más bajos. En consecuencia, se descarta este modelo como opción principal para la etapa de clasificación automática en este trabajo.

Por otro lado, los resultados obtenidos para el modelo dos en ambos clasificadores, los cuales fueron evaluados con nuestras imágenes umbrales obtenidas después de aplicar todos los procesamiento expuestos, representaron entre un 91-92% de precisión, es decir casi un 30% más que usando simplemente las imágenes en escala de grises del modelo uno.

En el caso donde se evaluaron los dos clasificadores ante la entrada del tercer modelo de datos, el cual represento el que uso las dos nuevas proyecciones obtenidas tras aplicar LDA a las características extraídas, obtuvieron los mejores resultados, alcanzando precisiones del 95.68% y 97.92%, para el caso de KNN y SVM respectivamente.

## CAPITULO 5

### 5. Conclusiones y perspectivas

#### 5.1. Conclusiones

Se desarrolló un sistema capaz de clasificar el tipo de pie humano (plano, cavo o normal), el cual incluye la fabricación de un equipo propio de escaneo; construido a través de madera, cristal y una cámara RGB para capturar imágenes de la planta del pie. El sistema abarca las etapas de adquisición, preprocesamiento, aumento de datos, segmentación automática de regiones de interés, extracción de características morfológicas, reducción de dimensionalidad mediante LDA y clasificación con algoritmos KNN y SVM de aprendizaje automático.

Se desarrolló una metodología de preprocesamiento que transformó imágenes RGB en representaciones umbralizadas (binarias), enfocadas únicamente en las huellas plantares. Este proceso mejoró la precisión de los modelos de clasificación en aproximadamente un 30 %, demostrando su impacto en el desempeño del sistema.

La incorporación de la luz led color verde en el canto del vidrio, permitió hacer uso del fenómeno de reflexión interna, lo cual resultó clave para facilitar la metodología de preprocesamientos generada. Esta técnica permitió resaltar de forma clara el área de contacto del pie con el vidrio (huella plantar), reduciendo la complejidad del procesamiento de imágenes.

Se construyó una base de datos compuesta por 180 imágenes umbralizadas, distribuidas equitativamente en tres clases correspondientes a los tipos de bóveda plantar: pie plano, pie normal y pie cavo (60 imágenes por clase). Esta base se generó a partir de las imágenes RGB originales capturadas con el sistema desarrollado. La estandarización en el formato de las imágenes y la segmentación de la huella plantar, permitió obtener una base

sólida y balanceada, adecuada para el entrenamiento y validación de los modelos de clasificación.

Se hizo un hallazgo relevante, al identificar que el primer momento de Hu presentó un mayor poder discriminativo entre clases en comparación con otras características comúnmente utilizadas en los métodos de diagnóstico clínicos tradicionales, como áreas y anchos de regiones del pie. Lo que puede representar una nueva forma para valorar la bóveda plantar.

Se propusieron dos diferentes algoritmos de clasificación de aprendizaje automático, evaluados ante tres diferentes conjuntos de datos de entrada, de ellos el mejor modelo obtenido fue el algoritmo de clasificación SVM, evaluado ante las dos nuevas proyecciones de datos obtenidas tras aplicar LDA a las once características extraídas de las imágenes umbrales de nuestra base de datos, obteniendo una precisión del 97.92 %. Por otro lado, para el caso del modelo KNN, evaluado ante la misma entrada de datos, alcanzo una precisión del 95.68 %, la cual es más baja, pero aun así representa un muy buen desempeño del sistema.

Se demostró que el uso de Análisis Discriminante Lineal (LDA) es una herramienta eficaz para mejorar el rendimiento de los modelos de clasificación empleados en este trabajo. Al reducir la dimensionalidad de los datos y maximizar la separabilidad entre clases, esto permitió optimizar la representación de las características usadas, lo que se tradujo en una mejora en la precisión de los algoritmos de aprendizaje automático evaluados.

En conjunto, el sistema propuesto puede ser una herramienta útil y escalable, con potencial para ser empleada en entornos clínicos y deportivos, apoyando a los especialistas en la evaluación objetiva del tipo de pie, y con ello, poder ayudar a mejorar la calidad de vida de los padecientes, mediante la detección temprana y tratamientos oportunos. Además, su diseño permite adaptaciones futuras según los requerimientos del usuario o del entorno de aplicación.

## **5.2. Prospectivas**

Aumentar la base de datos para incluir un mayor número de imágenes por clase representa una de las principales proyecciones de este trabajo. Una base de datos más amplia y diversa podría entrenar modelos de clasificación más precisos y con mayor capacidad de generalización. Además, esto facilitaría la evaluación de los algoritmos de aprendizaje automático ante una mayor variabilidad morfológica de las huellas plantares, fortaleciendo la validez del sistema.

Explorar nuevas técnicas de visión artificial representa otra línea de desarrollo relevante para este proyecto. Si bien los momentos invariantes de Hu utilizados en este trabajo demostraron ser útiles para caracterizar la morfología de la huella plantar, es posible que existan otras técnicas o características que ofrezcan un mayor poder discriminativo entre las clases.

## 6. Bibliografía

Aggarwal, C. C. (2018). *Neural networks and deep learning*. Cham: Springer International Publishing.

Aluja Jaramillo, F., & Upegui Jiménez, D. (2016). Estadificación del cáncer colorrectal mediante resonancia magnética. *Revista colombiana de Gastroenterología*, 31(3), 273-282.

Alomar, M. B. (2021). Todo lo que nos puede aportar la tomografía axial computarizada en carga en los problemas del pie y el tobillo. <https://doi.org/10.24129/j.mact.1301.fs2105003>

Arango, J. C. A., Nieto, D. C., & Rengifo, G. M. R. (2019). Análisis de huella plantar bajo el método HERZCO. *Lecturas: Educación física y deportes*, 24(251), 107-123.

Boffino, L., Meléndez, I., & Rodríguez, A. (2012). Pie plano pediátrico. Obtenido de Pie Plano pediátrico. Universidad del Salvador facultad de medicina catedra de ortopedia y traumatología.

Buchelly, F. J., Mayorca, D., Ballarin, V., & Pastore, J. (2016, April). Digital image processing techniques applied to pressure analysis and morphological features extraction in footprints. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 705).

Calais-Germain, B., & Lamotte, A. (1994). *Anatomía para el movimiento*. Los libros de la liebre de marzo.

Castro, D. R., & Acosta, I. R. (2015). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de temperatura corporal y ambiental aplicando procesamiento de imágenes térmicas utilizando software libre Opencv.

Cavanagh, P. R., & Rodgers, M. M. (1987). The arch index: a useful measure from footprints. *Journal of Biomechanics*, 20(5), 547–551. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(87\)90255-7](https://doi.org/10.1016/0021-9290(87)90255-7)

Chippaux, A., & Smirak, M. (1947). Les empreintes plantaires. Influence du poids du corps sur la forme du pied. *Bulletin de la Société Anatomique de Paris*

- Dileena, L., Sreeja, S. B., & Sreekala, C. O. (2021). A comparative study on piezoelectric and piezoresistive pressure sensor using COMSOL simulation. *Materials Today: Proceedings*, 46, 3121-3126. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.688>
- Echarri, J. J., & Forriol, F. (2003). Desarrollo de la morfología de la huella plantar en niños congoleños y su relación con el uso de calzado. *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología*, 47(6), 395-399.
- Espinoza-Navarro, O., Olivares Urquieta, M., Palacios Navarrete, P., & Robles Flores, N. (2013). Prevalencia de anomalías de pie en niños de enseñanza básica de entre 6 a 12 años, de colegios de la ciudad de Arica-Chile. *International Journal of Morphology*, 31(1), 162-168. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022013000100027>
- Fernández, M. M., Gerónimo, A. G., Sánchez, L. H., Fuentes, E. C., Zapata, I. V., & González, C. B. (2018). *PIE PLANO: LA APORTACIÓN DEL RADIOLOGO*. Seram.
- Fuentes-Venado, C. E., Ángeles-Ayala, A., Salcedo-Trejo, M. S., Sumano-Pérez, L. J., Viveros-del Valle, C. Y., Martínez-Herrera, E. O., ... & Pinto-Almazán, R. (2020). Evaluación comparativa del pie plano en preescolares. *Boletín médico del Hospital Infantil de México*, 77(6), 312-319. <https://doi.org/10.24875/bmhim.20000135>
- Gamallo, D. J. C., Casanova, J. G., & Altónaga, J. R. (2017). *Pie cavo del adulto*. Barcelona, España.
- García, L. E. C., López-García, R., Lagunes-Carrasco, J. O., Hernández-Cortés, P. L., Enríquez-Reyna, M. C., & Navarro-Orocio, R. (2022). Pie plano y tratamientos conservadores en adultos físicamente activos. Una revisión sistemática. *Revista Iberoamericana de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*, 11(3), 1-28. <https://doi.org/10.24310/riccafd.2022.v11i3.15205>
- Gil-Leiva, I., Díaz-Ortuño, P. M., & Rodríguez-Muñoz, J. V. (2019). Técnicas y usos en la clasificación automática de imágenes.
- Girgis, M. R., & Reda, M. S. (2014). Cono del espacio de color HSV [Imagen]. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/The-HSV-color-space-visualized-as-a-cone\\_fig4\\_228719004](https://www.researchgate.net/figure/The-HSV-color-space-visualized-as-a-cone_fig4_228719004)

Licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Ghandour, S., Lebedev, A., Tung, W. S., Semianov, K., Semjanow, A., DiGiovanni, C. W., & Pineda, L. B. (2024). Utilization of artificial intelligence in the diagnosis of pes planus and pes cavus with a smartphone camera. *World Journal of Orthopedics*, 15(12), 1146.

Gonzalez, R.C. & Woods, R. E. (2009). *Digital Image Processing*, Third Edition, Pearson, Prentice Hall.

Gül, Y., Yaman, S., Avcı, D., Çilengir, A. H., Balaban, M., & Güler, H. (2023). A novel deep transfer learning-based approach for automated Pes Planus diagnosis using X-ray image. *Diagnostics*, 13(9), 1662.

Hernández Corvo, R. (1989). *Morfología funcional deportiva*.

Hu, M. K. (1962). Visual pattern recognition by moment invariants. *IRE Transactions on Information Theory*, 8(2), 179–187. <https://doi.org/10.1109/TIT.1962.1057692>

Jaramillo-Quintanar, D., Gomez-Reyes, J. K., Morales-Hernandez, L. A., Dominguez-Trejo, B., Rodriguez-Medina, D. A., & Cruz-Albarran, I. A. (2023). Automatic Segmentation of Facial Regions of Interest and Stress Detection Using Machine Learning. *Sensors*, 24(1), 152. <https://doi.org/10.3390/s24010152>

Kapandji, A. I. (1998). *Fisiología articular* (Vol. 2, pp. 228-250). Médica Panamericana.

Mahesh, B. (2020). Machine learning algorithms-a review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. [Internet], 9(1), 381-386. doi:10.21275/ART20203995

Marino-Vera, H., Mendoza, L. E., & Gualdrón-Guerrero, O. E. (2017). Medición automática de variables antropométricas para la evaluación de la respiración usando visión artificial. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(1), 161-169. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n1.2017.7407>

Masmoudi, S., El Mahi, A., & Turki, S. (2016). Fatigue behaviour and structural health monitoring by acoustic emission of E-glass/epoxy laminates with piezoelectric implant. *Applied Acoustics*, 108, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.10.024>

Millon, R., Frati, F. E., & Rucci, E. (2020). Implementación de Filtro de Detección de Bordes Sobel en SoC usando Síntesis de Alto Nivel. In Congreso Argentino de Sistemas Embebidos (CASE2020)(Encuentro virtual, 24 al 26 de agosto de 2020).

Moreno, R. C. (2021). Análisis de la marcha a través de machine learning para la clasificación de alteraciones óseas y musculares.

Nordin, M., & Frankel, V. H. (2004). Biomecánica básica del sistema musculoesquelético. McGraw-Hill.

Norman, A. T. (2019). Aprendizaje automático en acción. Litres.

OpenCV Team. (2023). OpenCV (Version 4.8.0) [Computer software]. <https://opencv.org/>

Prieto, L. M. G., Galindo, L. F. H., & D'hyver de Las Deses, C. (2012). Prevalencia de patología del pie en una población geriátrica y su impacto en la función, la marcha y el síndrome de caídas. *Revista Española de Geriatria y Gerontología*, 47(1), 19-22. <https://doi.org/10.1016/j.regg.2011.05.004>

Rodríguez, F. A. R., Flores, L. G., & Vitón-Castillo, A. A. (2022, September). Artificial intelligence and machine learning: present and future applications in health sciences. In *Seminars in Medical Writing and Education* (Vol. 1, pp. 9-9). <https://doi.org/10.56294/mw20229>

Ruiz Fernández, L. Á. (2020). Aplicación de filtros morfológicos en imágenes.

Rossi, B. (2021). Fundamentos de óptica. Reverté.

Sánchez Ramírez, C. (2017). Caracterización morfológica del arco plantar longitudinal medial del pie en una población Chilena. *International Journal of Morphology*, 35(1), 85-91. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022017000100015>

Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of Big Data*, 6(1), 60. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>

Staheli, L. T., Chew, D. E., & Corbett, M. (1987). The longitudinal arch. *Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 69(3), 426–428.

Taunk, K., De, S., Verma, S., & Swetapadma, A. (2019, May). A brief review of nearest neighbor algorithm for learning and classification. In 2019 international conference on intelligent computing and control systems (ICCS) (pp. 1255-1260). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCS45141.2019.9065747>

Torres, D. M., Moncayo Torres, E. M., Lucero, C., & Riascos, M. A. J. (2020). Estudio preliminar de la distribución de presiones en posición bípeda mediante uso de baropodometría óptica y sensores de fuerza resistivos.

Trejo-Chavez, O., Amezquita-Sanchez, J. P., Huerta-Rosales, J. R., Morales-Hernandez, L. A., Cruz-Albarran, I. A., & Valtierra-Rodriguez, M. (2022). Automatic Knee Injury Identification through Thermal Image Processing and Convolutional Neural Networks. *Electronics*, 11(23), 3987. <https://doi.org/10.3390/electronics11233987>

Trew, M., & Everett, T. (2006). *Fundamentos del movimiento humano* (Masson (ed); 5th ed.). Elsevier.

Valle-Lopera, D. A., Castaño-Franco, A. F., Gallego-Londoño, J., & Hernández-Valdivieso, A. M. (2017). Test and fabrication of piezoresistive sensors for contact pressure measurement. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (82), 47-52. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n82a06>

Velarde, M. P., Perugachi, E., Romero, D., Sappa, A. D., & Vintimilla, B. X. (2015). Análisis del movimiento de las extremidades superiores aplicado a la rehabilitación física de una persona usando técnicas de visión artificial. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 28(1).

Wang, Y., Ahsan, U., Li, H., & Hagen, M. (2023). A comprehensive review of modern object segmentation approaches. *Journal of Computer Science and Technology*, 38(1), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s11390-023-00089-4>

## 7. Anexos

### A. Carta de confidencialidad de datos

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                  | <p style="text-align: center;"><b>UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO</b></p> <p style="text-align: center;"><b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>CARTA DE CONFIDENCIALIDAD DE DATOS</b></p> |  |
| <p style="text-align: center;">San Juan del Río, Querétaro, a ____ de _____ del año 20__</p>                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                     |
| <p><b>A QUIEN CORRESPONDA</b></p> <p>PRESENTE.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                     |
| <p>Yo, _____ me comprometo a aceptar íntegramente el presente acuerdo de confidencialidad de datos. La información recabada será obtenida bajo el proyecto de investigación que tiene por objetivo el monitoreo y caracterización de la bóveda plantar del pie humano con y sin alteraciones en ella (pie normal, plano o cavo).</p>              |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                     |
| <p>Los acuerdos de confidencialidad a los que me comprometo son:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Resguardar la información obtenida en el presente proyecto de investigación.</li><li>• No divulgar ninguna información confidencial.</li><li>• La información obtenida solo será para fines académicos y de investigación.</li></ul> |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                     |
| <p>Así mismo, acepto los compromisos, exigencias y penalidades que implica la presente carta de confidencialidad de datos.</p>                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                     |
| <p style="text-align: center;">_____<br/>Firma del responsable</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                     |
| <p style="text-align: center;">Preguntas o dudas sobre este proyecto, pueden ser dirigidas al: Ing. Rafael Eduardo Velasco Cerros ( <a href="mailto:velasco25@alumnos.uaq.mx">velasco25@alumnos.uaq.mx</a> ).</p> <p style="text-align: center;">Facultad de ingeniería, UAQ.</p>                                                                 |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                     |

## B. Carta de consentimiento informado



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO**



San Juan del Río, Querétaro, a \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ del año 20 \_\_\_\_

Antes de expresar y en su caso aceptar participar, por favor lea este consentimiento cuidadosamente. Haga todas las preguntas y dudas que se produzcan, para asegurarse que entienda los objetivos, procedimientos y resultados del estudio, incluyendo los posibles riesgos y los beneficios.

**Propósito Principal del estudio:** Monitorear y caracterizar la bóveda plantar del pie con y sin alteración en ella (pie normal, plano o cavo).

**Participantes:** La participación es completamente voluntaria. Puede permanecer o abandonar la intervención en cualquier momento. Los datos e información que proporcione y que se obtendrán de las mediciones es parte de su propiedad y a través de la firma del consentimiento informado autoriza a utilizarlos para lograr un beneficio para esta investigación.

**Tiempo requerido:** Aproximadamente 10 minutos en una sesión por persona para completar todas las evaluaciones, durante la jornada programada para el día \_\_\_\_ del mes \_\_\_\_ y año \_\_\_\_, en un horario de las \_\_\_\_ hasta las \_\_\_\_.

**Beneficios:** Esta investigación no busca obtener beneficio económico alguno, ni para el investigador, ni para los colaboradores del estudio. Si decide participar, tendrá derecho a solicitar toda la información sobre sus mediciones personales recolectada al respecto, los resultados obtenidos y los análisis que se deriven de la información registrada durante todo el proceso.

**Derecho a retirarse del estudio de investigación:** Puede retirarse del estudio en cualquier momento. Sin embargo, los datos obtenidos hasta ese momento seguirán formando parte del estudio a menos que solicite expresamente que su identificación y su información sea borrada de la base de datos.

**Procedimiento general:** Las tomas de muestras de las bóvedas plantares de los participantes se llevarán a cabo bajo la supervisión directa y acompañamiento de un profesional en ciencias de la salud, en los horarios que se le asignaron de acuerdo con la agenda de actividades del día \_\_\_\_ del mes \_\_\_\_ y año \_\_\_\_. Todos los procedimientos, equipos y materiales utilizados para la evaluación son de tipo no invasiva lo que significa que en ningún caso tendrá que ingerir, recibir o sentir ningún dolor. Cada medición se realizará después de alrededor de 10 minutos de que el participante a ingresado al lugar designado para el estudio. El participante tendrá que descubrirse ambos pies para permitir sus tomas. Para las evaluaciones se utilizará un dispositivo propio el cual soportará de pie al participante, para la

obtención de sus dos huellas plantares (parte inferior del pie humano) y un pc. Las pruebas y adquisiciones de las bóvedas plantares tendrán la modalidad de una sola intervención breve, es decir que esta demorara entre 2 y 3 minutos por persona, una vez que este sobre el dispositivo de escaneo. Las pruebas se realizarán en el lugar designado, el cual cumpla con los "Requerimientos del lugar de pruebas" que se muestran en este documento.

**a) Procedimiento específico para las pruebas y adquisición de las bóvedas plantares:**

**1. Consentimiento informado:**

Se explicará el procedimiento a seguir al participante y de aceptarlo, se obtendrá su consentimiento por escrito.

**2. Preparación del participante:**

Se proporcionará lo necesario para tener un ambiente privado, cómodo y seguro para el participante, en el cual se le pedirá que se retire las calcetas/calcetines/zapatos y que mantenga al menos 10 minutos de reposo.

**3. Preparación del dispositivo:**

Se verificará la estabilidad, calibración, limpieza y desinfección del dispositivo antes de cada prueba mientras el participante está en el periodo de reposo.

**4. Posicionamiento del participante:**

Una vez pasado el tiempo de reposo, se le pedirá al participante que suba al equipo de escaneo de bóvedas plantares y de ser posible se le pedirá mantener una postura natural y equilibrada.

**5. Tiempo para la adquisición de las bóvedas plantares (periodo que el participante permanecerá sobre el equipo de escaneo):**

Se le pedirá al participante mantenerse entre 2 y 3 minutos sobre el equipo de escaneo, este tiempo permitirá el monitoreo y obtención de sus bóvedas plantares.

**6. Procesamiento de los datos de la bóveda plantares:**

Durante el tiempo de adquisición de las bóvedas plantares el equipo de escaneo y el pc harán el procesamiento necesario para poder guardar los datos de las bóvedas plantares, manteniendo la confidencialidad de los mismos. Se verificará la correcta captura y se comunicara al participante que la prueba ha finalizado.

**7. Finalización de la prueba:**

Una vez que se le ha indicado al participante que la prueba a finalizado, se podrá bajar del equipo de prueba y podrá regresar a su asiento para colocarse sus calcetines, zapatos y tomar sus pertenencias para poder retirarse del lugar y continuar sus actividades de manera normal.

#### 8. Documentación y seguimiento:

Se registrará la prueba en una bitácora para tener el control de los participantes evaluados y se conservaran los datos de manera confidencial y segura.

#### **b) Requerimientos de los participantes:**

Los requerimientos de los participantes se presentan a continuación:

- Evitar el ejercicio físico al menos seis horas antes de la prueba.
- No haber consumido drogas, alcohol o bebidas energéticas por al menos 24 horas.
- Utilizar calzado cómodo el día de la prueba.
- Evitar el uso de sustancias o polvos en la región plantar (loción, talco, crema, etc.), o algún otro agente ajeno que pueda intervenir con la obtención de la huella plantar el día de la prueba.
- Llegar con anticipación a la prueba, de preferencia 10 min antes, para permitir un periodo de reposo.
- Durante el periodo de reposo, de preferencia evitar el uso de tines/calcetines/calzetras, y permanecer lo más relajado posible, tratando de descansar los pies.
- Evitar estar de pie al menos en el tiempo de reposo antes de la prueba.

#### **c) Requerimientos del lugar de pruebas:**

Los requerimientos para el lugar donde se realizarán las pruebas se presentan a continuación:

- Se recomienda como mínimo un lugar con dimensiones de 3 x 2 m.
- No es recomendable un lugar en el que se tengan que subir o bajar varios pisos o escaleras.
- El lugar no debe de tener grandes corrientes de aire las cuales entorpezcan el procedimiento.
- De preferencia el lugar debe contar con aire acondicionado o al menos tener una temperatura cómoda de trabajo.
- La humedad relativa del lugar es insignificante.

#### **d) Consideraciones adicionales:**

- Limpiar y desinfectar el dispositivo tras cada uso.
- Mantener un ambiente cómodo, seguro, respetuoso y profesional en todo momento.
- De ser requerido, notificar al participante los resultados obtenidos por la prueba.

- Considerar la presencia de lesiones, prótesis o cirugías en la región a evaluar del participante.
- Preguntar al participante si ha tenido un diagnóstico previo por algún método convencional para detección de alteraciones en sus bóvedas plantares.
- Responder a cualquier consulta del participante.
- De ser necesario o expresado por el participante, se detendrá el procedimiento en cualquier momento.

\*Este procedimiento garantiza un enfoque ético, centrado en la seguridad y el bienestar del participante.

En este proyecto, los investigadores se comprometen a cumplir con los lineamientos establecidos en el Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud, la Declaración de Helsinki, el código de Nuremberg y las Buenas Prácticas Clínicas emitidas por la Comisión Nacional de Bioética.

**Investigadores principales durante la aplicación del protocolo:**

Ing. Rafael Eduardo Velasco Cerros. Facultad de Ingeniería UAQ

Dr. Daniel Jaramillo Quintanar. Facultad de ingeniería UAQ

Dr. Irving Armando Cruz Albarrán. Facultad de ingeniería UAQ

Yo, \_\_\_\_\_ he leído y aceptado el presente documento. El equipo de investigadores responsables me ha explicado el estudio y han contestado mis preguntas. Voluntariamente doy mi consentimiento para participar en este estudio.

\_\_\_\_\_  
Firma del participante

Preguntas o dudas sobre los derechos como participante en este proyecto, pueden ser dirigidas al: Ing. Rafael Eduardo Velasco Cerros  
( [rvelasco25@alumnos.uaq.mx](mailto:rvelasco25@alumnos.uaq.mx) ).

Facultad de Ingeniería, UAQ.

## C. Ficha técnica Vidrio Templado de 12mm



REFLEJANDO INSPIRACIÓN  
Formalmente Megaluminio Servicios S.A. de C.V.



www.megaglass.com.mx  
www.megaluminio.com

Jueves, 23 de septiembre de 2021

A través del presente documento, nuestra empresa **MEGAGLASS** garantiza que nuestro vidrio es cristal templado y cumple con los estándares de calidad indicados en las normas NOM-146-SCFI-2016, ANSI Z97.1 – 2015, ASTM C1048 y avaladas por la **SGCC (Safety Glazing Certification Council)** e **IGCC (Insulating Glass Certification Council)**.

**Pedido:**

**Cliente:**

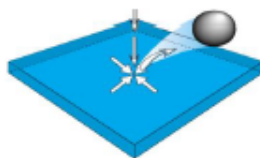
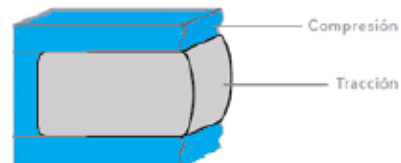
### PROPIEDADES DEL CRISTAL TEMPLADO

El cristal templado es más resistente física y térmicamente que el cristal regular del mismo espesor sometido a las mismas cargas de presión.

#### Características Físicas

Compresión en la superficie del cristal  $\geq 69$  MPa. (10,000 psi)

Compresión en la orilla del cristal  $> 66.8$  Mpa (9700 psi)



#### Resistencia Mecánica

Resistencia 4 a 5 veces más que un cristal regular y dos veces más que uno termo-endurecido del mismo espesor. (Para cristal templado de 4mm a 19 mm su resistencia es por lo menos 120 Mpa (17,405 psi))

📍 Planta: Autopista, Toluca-Atlaquemulco, Km. 58.3, Atlaquemulco, Edo. de México, C.P. 50450  
📍 Suc. Toluca: Río Papaloapan 203, Colonia 3 Caminos, Santa Cruz Atlaquemulco, Toluca Méx. Tel: 722 232 2937  
📍 Suc. Querétaro: Calle Pirineos 500, interior 27, Microparque Industrial Santiago, entre calle Vesubio y Av. de la Luz, Parque Industrial Benito Juárez, Querétaro, Qro. Tel: 442 209 5229

Tel: 01 (712) 690 1001 - Disponible con 20 líneas

📍 Suc. Naucalpan: Avenida Gustavo Baz Prada No. 347 Local B, Ex Hacienda de Cristo, Naucalpan, Méx. Tel: 555 035 0261  
📍 Suc. San Juan del Río: Av. Universidad Esquina Sonora No. 2, Col. Ampliación Banthi San Juan del Río, Qro. Tel: 427 264 0556

Jueves, 23 de septiembre de 2021

### Resistencia Térmica

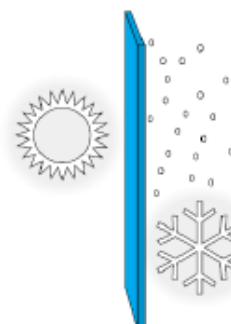
Un cristal templado puede resistir un gradiente térmico de hasta 250°C (sin exposición directa a la llama) entre sus caras.



### Resistencia a la Flexión

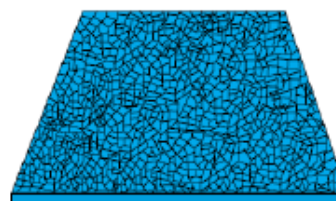
Resiste hasta 170 Kg. de carga concentrada, con una deflexión de 69 mm y con capacidad de regresar a su estado original al retirar la carga.

(Nota: prueba hecha en una probeta de cristal de 30 x 30 cm de 6 mm de espesor)



### Fractura

El vidrio normal (recocido) al llegar a su límite de resistencia, se rompe fragmentándose en piezas cortantes, puntiagudas, afiladas y de grandes dimensiones cuyo riesgo de lesión es muy alto. Ante este problema los cristales templados, al llegar a su punto de ruptura, se desintegra en pequeños trozos, sin aristas cortantes, de bajo peso y por lo tanto mínima fuerza de choque y con cantos redondeados que no causan daño alguno. Esta característica se presenta solo en cristales de seguridad, probado bajo el método de ensayo de la Nom-146-SCFI-2016 "Método de fractura del cristal templado", realizado en nuestra planta de producción el cual nos indica el mínimo de partículas contenidas en un cuadro de 50x50 mm.



### Pruebas realizadas al cristal templado.

| PRUEBA     | PARÁMETRO                    | RESULTADO                |
|------------|------------------------------|--------------------------|
| FRACTURA   | 50-80 PARTICULAS             | 62 PARTICULAS            |
| ESTRÉS     | 716-1724 kgf/cm <sup>2</sup> | 1120 kgf/cm <sup>2</sup> |
| PLANICIDAD | MENOR A 5mm                  | 2 mm                     |
| APARIENCIA | Libre de imperfecciones      | aceptable                |

Planta: Autopista Toluca-Atzacmulco, Km. 58.3, Atlacomulco, Edo. de México, C.P. 50450  
 Suc. Toluca: Río Papalapan 203, Colonia 3 Caminos, Santa Cruz Atzacpotzaltongo, Toluca Méx. Tel: 722 232 2937  
 Suc. Querétaro: Calle Pirineos 500, interior 27, Microparque Industrial Santiago, entre calle Vesubio y Av. de la Luz, Parque Industrial Benito Juárez, Querétaro, Qro. Tel: 442 209 5229

Tel: 01 (712) 690 1001 - Disponible con 20 líneas  
 Suc. Naucalpan: Avenida Gustavo Baz Prada No. 347 Local B, Ex Hacienda de Cristo, Naucalpan, Méx. Tel: 555 035 0261  
 Suc. San Juan del Río: Av. Universidad Esquina Sonora No. 2, Col. Ampliación Banthi San Juan del Río, Qro. Tel: 427 264 0556

**D. Portada artículo “Clasificación automática de pacientes con COVID19 mediante procesamiento de imágenes radiográficas: comparativa de modelos IA”**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

# Clasificación automática de pacientes con COVID19 mediante procesamiento de imágenes radiográficas: comparativa de modelos IA

## Automatic classification of COVID-19 patients using radiographic image processing: comparison of AI models

Velasco Cerros Rafael Eduardo<sup>1</sup>, Amézquita Sánchez Juan Pablo<sup>1</sup>, Jaramillo Quintanar Daniel<sup>1\*</sup>  
*División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería<sup>1</sup>*  
*Universidad Autónoma de Querétaro*  
*Santiago de Querétaro, Querétaro, México*  
*rvelasco25@alumnos.uaq.mx, daniel.jaramillo@uaq.mx\**

**Palabras clave:** MEC; clasificación automática; procesamiento de imágenes; aprendizaje automático; K vecinos más cercanos; redes neuronales convolucionales.

**Resumen.-** El COVID-19 es una enfermedad respiratoria contagiosa que afecta a millones de personas en el mundo entero y que puede causar desde síntomas leves como fiebre y tos, hasta problemas graves como neumonía, dificultad respiratoria y problemas cardiovasculares. Dada la importancia de un diagnóstico temprano y preciso, es crucial desarrollar tecnologías que apoyen a los científicos y especialistas en este proceso. El presente trabajo propone una metodología basada en el análisis de imágenes radiográficas pulmonares de pacientes con covid y sanos, la cual utiliza algoritmos clasificadores inteligentes de Machine Learning (K vecinos más cercanos, KNN) y Deep Learning (redes neuronales convolucionales, CNN), incluyendo el preprocesamiento de imágenes para optimizar su calidad y poder realizar su clasificación automática. Esta metodología se enfoca en realizar una exhaustiva comparativa entre ambos modelos, utilizando los mismos procesamiento de imagen para los dos casos, lo que garantiza una evaluación justa. Los modelos se entrenan y validan mediante la técnica de validación cruzada, a fin de mejorar la generalización y reducir el riesgo por sobre ajuste. Para medir y comparar los rendimientos, se emplean matrices de confusión y métricas de desempeño como la exactitud, precisión, recall y F1-Score.

**Keywords:** MEC; automatic classification; image processing; machine learning; K nearest neighbors; convolutional neural networks.

**Abstract.-** COVID-19 is a contagious respiratory disease that affects millions of people worldwide and can cause symptoms ranging from mild fever and cough to severe problems such as pneumonia, respiratory distress, and cardiovascular problems. Given the importance of an early and accurate diagnosis, it is crucial to develop technologies that support scientists and specialists in this process. This work proposes a methodology based on the analysis of lung radiographic images of patients with COVID and healthy patients, which uses intelligent Machine Learning (K nearest neighbors, KNN) and Deep Learning (convolutional neural networks, CNN) classifier algorithms, including image preprocessing to optimize their quality and perform automatic classification. This methodology focuses on performing an exhaustive comparison between both models, using the same image processing for both cases, which guarantees a fair evaluation. The models are trained and validated using the cross-validation technique, in order to improve generalization and reduce the risk of overfitting. To measure and compare performance, confusion matrices and performance metrics such as accuracy, precision, recall, and F1-Score are used to measure and compare performance.

## E. Portada artículo “Clasificación automática de alteraciones de la bóveda plantar mediante visión artificial y aprendizaje automático”



### Clasificación automática de alteraciones de la bóveda plantar mediante visión artificial y aprendizaje automático

#### Automatic classification of plantar arch alterations using computer vision and Machine Learning

Rafael E. Velasco-Cerros<sup>1</sup>, Irving A. Cruz-Albaran<sup>1</sup>, Luis A. Morales-Hernandez<sup>1</sup>, Mayra P. Gonzalez-Hernandez<sup>2</sup>, Daniel Jaramillo-Quintana<sup>1\*</sup>

*Maestría en Ciencias (Mecatrónica), DIPFI, UAQ, Facultad de Ingeniería<sup>1</sup>*

*Fisioterapia, UAQ, Facultad de Enfermería<sup>2</sup>*

*Universidad Autónoma de Querétaro*

*rvelasco25@alumnos.uaq.mx, daniel.jaramillo@uaq.mx\**

**Resumen:** El pie humano es una estructura compleja que actúa como soporte y distribuidor de cargas durante actividades estáticas y dinámicas. En su parte inferior se encuentra la bóveda plantar, encargada de adaptarse al terreno y cuya morfología permite clasificar el pie como plano, cavo o normal. Cuando dicha estructura presenta deformaciones, puede limitar la movilidad cotidiana y ocasionar afecciones en otras partes del sistema musculoesquelético. En México, alrededor del 20% de la población presenta alguna alteración en la bóveda plantar. Con el objetivo de clasificar automáticamente el tipo de pie, se desarrolló una metodología basada en visión artificial y aprendizaje automático. Se capturaron imágenes RGB de la planta del pie mediante un equipo diseñado específicamente para este propósito, posteriormente, se aplicaron técnicas de procesamiento de imagen para extraer únicamente las huellas plantares, conformando una base de datos final con un n=180 imágenes binarizadas. Se evaluaron tres modelos de datos: el primero con las imágenes RGB convertidas a escala de grises, el segundo con 11 características morfológicas extraídas de las imágenes binarizadas y el tercero con las mismas características, pero reducidas a dos dimensiones mediante análisis discriminante lineal. Los modelos fueron entrenados y validados con máquinas de vectores de soporte (SVM), mediante la técnica de validación cruzada, alcanzando así una precisión del 97.92% para el mejor modelo. El sistema propuesto puede representar una herramienta de apoyo confiable, no invasiva y de bajo costo, con aplicaciones potenciales en ámbitos clínicos y deportivos.

**Palabras clave:** MEC; Visión artificial; Bóveda plantar, Aprendizaje automático; Procesamiento de imagen; Maquinas de soporte vectorial.

**Abstract:** The human foot is a complex structure that functions as a support and load distributor during static and dynamic activities. On its lower part lies the plantar arch, which adapts to the ground and whose morphology allows the classification of the foot as flat, high-arched, or normal. When this structure presents deformities, it can limit daily mobility and cause disorders in other parts of the musculoskeletal system. In Mexico, around 20% of the population has some alteration of the plantar arch. To automatically classify foot type, a methodology based on computer vision and machine learning was developed. RGB images of the plantar surface were captured using a device specifically designed for this purpose, subsequently, image processing techniques were applied to extract only the plantar footprints, creating a final database of n=180 binarized images. Three data models were evaluated: the first with RGB images converted to grayscale, the second with 11 morphological features extracted from the binarized images, and the third with the same features reduced to two dimensions using linear discriminant analysis. The models were trained and validated with support vector machines (SVM) using cross-validation, achieving an accuracy of 97.92% for the best model. The proposed system can represent a reliable, non-invasive, and low-cost support tool with potential applications in clinical and sports fields.

**Keywords:** MEC; Computer vision; Plantar arch; Machine learning; Image processing; Support vector machines.

**F. Constancia de aceptación de artículo Coloquio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UAQ**



**G. Constancia de participación de artículo Coloquio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UAQ**

