



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS, ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES**

PROGRAMA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**TEMA:
DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA LA MEDICIÓN DE LAS PRESIONES
PLANTARES,
EMPLEANDO PROCESAMIENTO DE IMAGENES**

**Autor:
WILMER EFRÉN RIVERA CORREA**

**Director:
HERNANDO JOSÉ VELANDIA VILLAMIZAR
M. Sc. En ingeniería Biomédica**

**Co-Directora
GLADYS ELIANA TORRES PEÑA
Fisioterapeuta Especialista En Rehabilitación
Cardiaca Y Pulmonar**

**PAMPLONA N.D.S - COLOMBIA
NOVIEMBRE de 2021**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS, ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES**

PROGRAMA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**TEMA:
DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA LA MEDICIÓN DE LAS PRESIONES
PLANTARES,
EMPLEANDO PROCESAMIENTO DE IMAGENES**

**Autor:
WILMER EFRÉN RIVERA CORREA**

**Director:
HERNANDO JOSÉ VELANDIA VILLAMIZAR
M. Sc. En Ingeniería Biomédica**

**Co-Directora
GLADYS ELIANA TORRES PEÑA
Fisioterapeuta Especialista En Rehabilitación
Cardíaca Y Pulmonar**

JURADO CALIFICADOR:

**GERMAN ARLEY PORTILLA GONZALES
LUIS MENDOZA**

**PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER - COLOMBIA
NOVIEMBRE de 2021**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS, ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES**

PROGRAMA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**TEMA:
DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA LA MEDICIÓN DE LAS PRESIONES
PLANTARES,
EMPLEANDO PROCESAMIENTO DE IMAGENES**

**FECHA DE INICIO DEL TRABAJO:
FECHA DE TERMINACIÓN DEL TRABAJO:**

NOMBRES Y FIRMAS DE AUTORIZACIÓN PARA LA SUSTENTACIÓN

**WILMER EFRÉN RIVERA CORREA
AUTOR**

HERNANDO J. VELANDIA VILLAMIZAR

GERMAN A. PORTILLA GONZALES

LUIS MENDOZA

PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA

NOVIEMBRE DE 2021



DEDICATORIA

Dedico este trabajo a **Dios**, quién ha concedido todos mis logros, a mi madre **Luz Marlén Correa Elizalde**, a pesar de haber pasado por varias etapas duras de la vida, las ha superado con honores, llenándome de orgullo como hijo. A una mujer que en el transcurso de mi vida ha sido, es y será muy importante, quién lamentablemente no se encuentra con nosotros en este plano terrenal y que la llevaré por siempre en mi corazón, mi abuelita **Carlina Elizalde**, en vida me tuvo en sus oraciones a Dios. También a mi novia **Yesica Alejandra Trujillo**, gran amiga incondicional, mi apoyo, a quién admiro, respeto y aprecio mucho.



AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios, por cada paso que he dado, por permitirme formarme en crecimiento personal y profesional, debido a ello me siento bendecido, él ha sido mi mentor para tomar decisiones de manera sabia y responsable en cada oportunidad en el camino.

En segunda instancia, quiero agradecerle a mi mamá, **Luz Marlén Correa Elizalde**, por ser la mujer que me dio la vida y que, en ese proceso de crianza, ha sido padre y madre para mí, donde hoy por hoy es mi alegría y orgullo, por ser una madre ejemplar, que no se rinde ante las adversidades y que con amor y dedicación ha superado cuanto obstáculo se le ha presentado en el camino. Gracias a ese ejemplo de vida, cada día sigo mis ideales donde les quiero transmitir a mis futuras generaciones el compromiso de cumplir metas para alcanzar el éxito que queremos tener.

A mi novia **Yesica Alejandra Trujillo**, por estar en las buenas y en las malas apoyándome, y que en cada momento difícil de nuestra etapa de estudiantes hemos superado de la mano, una a una las adversidades, hasta llegar en la posición a la que hemos llegado. Ella es mi amiga incondicional, una persona con grandes cualidades, mi compañía, la razón de muchas de mis alegrías, pero, sobre todo, quién ha creído animándome a continuar.

Al **Ing. Hernando José Velandia**, mi tutor de tesis, quién incondicionalmente ha estado pendiente en mi progreso, cumpliendo con su deber de proveerme de conocimiento profesional, contando con valiosos consejos, que me han servido para ser una persona responsable y entregada al compromiso con la vida.

A la señora **Marina Duarte**, por tenderme su mano en la ciudad de Pamplona, con el pasar del tiempo hemos forjado una amistad valiosa; gracias a eso he aprendido que sin importar que estatus social tenga, nunca hay que dejar a un lado nuestros ideales como persona, la sencillez y la nobleza.

A mis amigos **Sindy Rojas, Edwin Buitrago, Axel López, Sigifredo Oliveros, Libia Bustamante, Jeison Villamizar Y Andrea Pabón**, les agradezco simplemente por ser un gran apoyo, por enseñarme a tener una mentalidad de no desfallecer, de crecer día a día en fortalecer nuestras debilidades y ser mejores personas que aporten un grano de arena para mejorar la sociedad.

Por último y no menos importante, al **cuerpo docente del programa de Ingeniería En Telecomunicaciones**, personas que invirtieron su tiempo en mí, impartieron grandes conocimientos, enseñanzas y orientaciones a lo largo de esta hermosa carrera universitaria.



RESUMEN

El presente proyecto plantea el desarrollo de un software que permita a través del procesamiento de imágenes de huellas plantares generar una herramienta que apoye al especialista en el diagnóstico de las diversas clases de patologías donde las más comunes son el PIE PLANO y EL PIE CAVO, que se pueden presentar en una persona, debido a causas laborales, condiciones de vida, enfermedades, etc. En primer lugar se realizará una versión importante acerca de esas patologías y cómo a nivel teórico y práctico se miden o se valoran. Posteriormente se analizarán que técnicas de pre y procesamiento son las más adecuadas para la implementación y generación de la herramienta de software. Luego para garantizar la efectividad del programa con el especialista se tendrá en cuenta el método manual y el método automático valorando la optimización residual de ambos métodos y finalmente a través de una base de datos variada en dichas patologías entregar un proceso de valoración importante que sea de gran utilidad al especialista.

Palabras Clave: Datos, Especialista, Herramienta, Huellas, Imágenes, Patologías, Plantares, Presión, Procesamiento, Software, Valoración.



ABSTRACT

The present project proposes the development of a software that allows, through the processing of images of plantar footprints, to generate a tool that supports the specialist in the diagnosis of the various kinds of pathologies where the most common are the FLAT FOOT and THE CAVO FOOT, which They can occur in a person, due to work causes, living conditions, diseases, etc. In the first place, an important version will be made about these pathologies and how at a theoretical and practical level they are measured or valued. Subsequently, it will be analyzed which pre and processing techniques are the most appropriate for the implementation and generation of the software tool. Then, to guarantee the effectiveness of the program with the specialist, the manual method and the automatic method will be taken into account, assessing the residual optimization of both methods and finally, through a varied database on these pathologies, deliver an important evaluation process that is of great utility to the specialist.

Keywords: Data, Specialist, Tool, Footprints, Images, Pathologies, Plantar, Pressure, Processing, Software, Assessment.



I. INTRODUCCIÓN

Bien es sabido que la tecnología representa no solo avances en la ciencia, sino progreso para potenciar el desarrollo de la sociedad, por ende, mejorar la calidad de vida de las personas, principal motivo de la unión entre las telecomunicaciones y la medicina dando paso al surgimiento de la telemedicina, como ciencia que posibilita optimizar los procesos en el diagnóstico de patologías y su posterior tratamiento para facilitar la pronta recuperación de los pacientes como meta prioritaria.

Existen muchas herramientas informáticas, así como bases teóricas que permiten enriquecer los conocimientos en el desarrollo de software médico, con la apropiación del pre procesamiento y procesamientos de imágenes, razones suficientes para pensar en la meta de plantear una forma innovadora de tomar y analizar las huellas plantares, disminuir los tiempos de diagnóstico de las mismas y por ende denotar la convergencia que existe entre la Ingeniería En Telecomunicaciones y la Medicina como ciencias al servicio de la humanidad.

Cabe destacar que las personas poco suelen cuidar sus pies, solo hasta presentar anomalías acuden al profesional especializado en ellos, muchas que se pudieron prever con la revisión temprana de los mismos, siendo la mayoría casos subyacentes de otras enfermedades, pero tan importantes como cualquier parte de nuestra anatomía humana, por lo que los métodos cuantitativos de evaluación de la biomecánica del pie y de la huella plantar suponen una importante ayuda en la identificación de las características morfológicas del pie, aportando información notable sobre posibles riesgos lesionales[1].



II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se conoce que actualmente se presentan en las personas dificultades de carácter ortopédico, esto con respecto a diversos factores, ya sea por lesiones al realizar actividad física o más comúnmente debido a variaciones normales de la anatomía humana que pueden requerir o no tratamiento. Estas variaciones anatómicas se conocen precisamente como trastornos ortopédicos con la posibilidad de persistir o agravarse en algunas situaciones, derivando otros trastornos en el cuerpo humano[2].

Por mencionar algún trastorno se enuncia, el pie plano, definido como el colapso de la curva del pie, causando que toda la parte física inferior de la extremidad tenga contacto directo con cualquier superficie llana, ocasionando dolor intenso en la misma. Esta patología se presenta mayormente en personas con sobrepeso, en envejecimiento, diabetes, artritis reumatoide; y en niños, ya que la curva de sus pies no se ha desarrollado completamente. Para la identificación de dichos trastornos, los especialistas toman como recurso un sistema manual, donde el paciente se expone a la aplicación de tinta negra en la parte inferior del pie, plasmando la huella del mismo sobre una hoja de papel dejándola marcada sobre esta para posteriormente realizar cálculos también manuales, con respecto a las medidas de la extremidad en mención. Debido al proceso realizado se puede llegar a incurrir en posibles errores humanos, además de ralentizar el diagnóstico, es por ello, que subyace la necesidad de desarrollar una herramienta de software para la medición de las presiones de las huellas plantares, y bajo el procesamiento de imágenes optimizar la valoración y juicio médico. La importancia de un diagnóstico asertivo radica en evitar ramificaciones de esta enfermedad tales como dolor en la articulación del pie, que puede verse incrementado si se está en constante actividad, ocasionando también hinchazón en toda la zona del tobillo, hasta llegar a traumas lumbares, además de generar una herramienta tipo software amigable para el trabajo del profesional encargado del área.



II. JUSTIFICACIÓN

Los avances tecnológicos actuales nos han permitido integrar herramientas cada vez más potentes y eficaces al bienestar y al mejoramiento de la calidad de vida de las personas, sin embargo en muchas localidades pequeñas y centros rurales principalmente por la cantidad de recursos financieros disponibles, es difícil acceder a herramientas computacionales en muchas ocasiones costosas que permitan valorar a la población de una manera más efectiva. En este sentido se opta por metodologías manuales que en la mayoría de los casos pueden generar imprecisiones. Con base en este panorama se plantea el siguiente proyecto, en el cual sea posible generar una herramienta digital empleando técnicas de pre y procesamiento de imágenes que permita de una manera más efectiva apoyar al especialista en su diagnóstico y que sea de fácil acceso a este tipo de poblaciones.

Es de suma importancia cuidar nuestro cuerpo, pues de ello depende directamente nuestra salud, para lo cual existen teorías, prácticas, medicamentos, tecnologías y profesionales especializados en cada área; en vista de que la anatomía humana es realmente compleja se requieren herramientas que faciliten el trabajo al momento de diagnosticar y tratar enfermedades. El desarrollo de los elementos médicos ha logrado gran avance a lo largo de las décadas, sin embargo, dadas las condiciones en que se encuentran algunos lugares de trabajo, ya sea por la falta de inversión, daño por uso continuo o descalibración, el personal médico opta aún por utilizar métodos manuales, que aunque aciertan en el análisis de patologías, suelen ser demorados, tediosos al atender a gran personal durante la jornada laboral, incurriendo en retrasos, falta de precisión e incomodidad para ambas partes relacionadas.

En vista de que el campo de la medicina tiene un gran abanico de ramas en el cuidado del ser humano, es preciso delimitar y resaltar una de ellas, siendo esta la Podología, debido a la poca importancia que le damos a los pies, que, aunque siendo ellos quienes nos transportan en el día a día, no acudimos a un profesional hasta tener lesiones graves o presentar problemas en la movilidad lamentablemente.

Lo anterior describe la cotidianidad de un gran porcentaje, motivos suficientes para plantear un sistema confiable, usando procesamiento de imágenes para arrojar un diagnóstico completo en tiempo real. Con este sistema se pretende mejorar el método tradicional de dictamen, garantizando un estudio completo con información coherente y satisfactoria a la hora de proceder con el tratamiento adecuado para el paciente. El sistema está orientado al mundo de la medicina, aportándole una herramienta que mejore el rendimiento en cuanto a la calidad de la información, no solamente las medidas que se presenten, sino que se visualicen las deformidades tanto las más conocidas, como las que no lo son, además de convertirse en un aporte pedagógico para quienes deseen continuar con un trabajo posterior a este.



IV DELIMITACIÓN

OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar una interfaz de Software para la medición de las presiones plantares, empleando procesamiento de imágenes.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar una base de datos apropiada para el desarrollo del proyecto, aplicando las técnicas recomendadas por la especialista en podología.
- Seleccionar técnicas de procesamiento de imágenes aplicables a la base de datos creada, para el óptimo manejo de la interfaz.
- Aplicar las técnicas seleccionadas hacia la medición de las presiones plantares tomadas de fuentes bibliográficas médicas y de recomendaciones tomadas por el especialista en el campo.
- Diseñar una interfaz gráfica de usuario interactiva y de fácil uso para el especialista en Podología.
- Validar el sistema con un número considerable de imágenes.



V ACOTACIONES

Delimito la adquisición de la materia prima (imágenes), a través de una base de datos personal que se va a crear, junto con su correspondiente digitalización en el área de estudio de la presente propuesta, ya que se va a enfocar específicamente en el estudio de las patologías que se le presentan con diferente perfil laboral en la comunidad pamplonesa.

Para que quede argumentado, no propongo ni establezco la construcción, ni el diseño, ni la implementación de un dispositivo, equipo o plataforma física de huella plantar debido a que esto implicaría un aumento de presupuesto en el cual, no cuento.

Realizar investigación de información más reciente no superior al lapso de 5 años. Es claro que se puede encontrar una cantidad considerable de documentos referentes al tema, motivo por el cual el material de consulta se comprenderá entre 2015-2020.

El pie tiene una función tanto estática como dinámica, este trabajo solamente se centra en la consulta de los métodos de análisis estáticos, escogiendo el que se considere mayormente viable.



CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

En éste primer capítulo se expresan de forma muy concisa algunos trabajos realizados previamente en referencia al tema, así como toda la parte conceptual requerida para comprender el desarrollo del presente proyecto, destacando el hecho de que el interés principal radica en el análisis vía software de las presiones plantares.



1.1 ESTADO DEL ARTE

Lejos de pensar que se avecinaba una pandemia por un coronavirus, desde hace poco más de una década Colombia cuenta con leyes y reglamentos que regulan la prestación de los servicios de salud bajo la modalidad de telemedicina, que permiten incorporar las Tecnologías de la Información y Comunicaciones - TIC en el Sistema General de Seguridad Social en Salud. "Aunque ningún país del mundo estaba preparado para esta pandemia, por lo menos Colombia en lo que respecta a telesalud contaba con un componente normativo fuerte, así como avances importantes por parte de los diferentes actores de salud", precisó Luis Fernando Correa, director (e) de Prestación de Servicios del Ministerio de Salud y Protección Social. Explicó Correa Serna que el objetivo de la telesalud es mejorar el acceso y la calidad de la atención clínica mediante el uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones con actividades como la teleorientación y el teleapoyo[3].

Lo anterior denota la gran importancia de trabajar en el área de la telemedicina, realizar aportes es vital, y que mejor que empezar desde la academia; seguido se encuentran algunos trabajos realizados por otros autores con respecto al tema postulado.

Análisis De Los Diferentes Métodos De Evaluación De La Huella Plantar (Analysis Of Different Methods To Evaluate The Footprint)

Autor(es): Silvia Lara Diéguez, Amador Jesús Lara Sánchez, María Luisa Zagalaz Sánchez, Emilio J. Martínez-López.

Universidad: Universidad De Jaén **País:** España **Año:** 2011

El objetivo de este trabajo fue realizar investigación acerca de los criterios de utilización de los métodos de análisis de la huella plantar, estableciendo que los métodos estáticos son una manera útil, más sencilla y menos costosa que los métodos dinámicos para estudiar la estructura del pie. Propusieron el estudio dinámico de la huella plantar y realizar algunas comparativas con los métodos estáticos, aconsejando tomar en cuenta la huella en dos deportes concretos durante un periodo de tiempo largo y observar los cambios en la misma[4].



Diseño E Implementación De Un Sistema De Medición De Las Presiones Plantares En Estática Basado En Procesamiento Digital De Imágenes

(Design and Implementation of a System for the Analysis of Plantar Pressures in Static Based on Image Processing)

Universidad: Universidad De Talca **País:** Chile **Año:** 2018

Proyecto que muestra el diseño bajo Matlab, de un sistema con interfaz gráfica que permite la obtención de las distintas presiones de la huella del pie por medio del procesamiento digital de imagen. Se analizó la presión que ejerce la planta del pie de una persona en bipedestación posicionada sobre una plataforma transparente. Concluyeron que el utilizar el pseudocolor facilita el trabajo al hacer mayormente visibles las áreas en algunas secciones de las imágenes para obtener el índice de cavidad y poder determinar de qué tipo de pie se trata[5].

Plataforma Baropodométrica PIPLAB

(Baropodometric Platform PIPLAB)

Universidad: Universidad Distrital Francisco José De Caldas **País:** Colombia **Año:** 2018

Trabajo que presenta el desarrollo de una plataforma baropodométrica para adquirir imágenes de la huella plantar y visualizar la presión que soporta la planta de los pies, es diseñado bajo Matlab, da a conocer los puntos máximos de presión bajo cada pie y la repartición de cargas entre el antepié y retropié, asimismo, las mediciones cuantitativas para brindar valoración y seguimiento de patologías a nivel plantar. Dentro de sus conclusiones mencionan robustecer la plataforma con control lumínico, ampliar la adquisición de datos para realizar análisis tanto estático como dinámico y emplear otro protocolo de comunicación como RS485, USB o Ethernet para facilitar las opciones de conexión[6].

Desarrollo De Un Sistema Para La Identificación De Alteraciones En La Postura Mediante El Análisis De La Huella Plantar

(Development of a System for the Identification of Alterations in Posture Through the Analysis of the Plantar Footprint)

Universidad: Universidad De Cundinamarca **País:** Colombia **Año:** 2019

El documento expone la implementación y validación de un podoscopio para el análisis de huellas plantares mediante el método de Hernández Corvo basado en procesamiento digital de imágenes bajo Matlab. Analizaron los resultados de 15 individuos, con el método manual y con la plataforma podoscopica; dichos resultados obtenidos con los dos métodos se compararon, encontrando una correlación del 59,3%; se concluyó que el prototipo presenta bajos índices de exactitud, pero da paso a la construcción de otros prototipos que adopte las virtudes y corregir los errores del primero[7].

1.2 ANATOMÍA BÁSICA DEL PIE HUMANO

Como parte fundamental del cuerpo, el pie se ve sometido a diferentes esfuerzos que muy generalmente acarrear cambios en el funcionamiento, motivos más que suficientes para interesarnos en su cuidado. La relevancia clínica del pie se pone de manifiesto por la gran cantidad de tiempo que los médicos de atención primaria dedican a sus problemas. La podología es la especialidad dedicada al estudio y los cuidados del pie[8].

1.1.1 DEFINICIÓN DE PIE HUMANO

La RAE lo define como extremidad de cada uno de los dos miembros inferiores del cuerpo humano[9]. El pie, es parte del sistema músculo-esquelético que recibe y distribuye el peso del cuerpo al caminar o correr. Está compuesto por 26 huesos diferentes, los cuales están relacionados por 30 articulaciones unidas por ligamentos y cápsulas articulares al igual que los músculos y tendones que lo envuelven [10]. En la figura 1 se aprecia un pie humano, visto desde la parte superior.

Figura 1 Pie Humano



Fuente.[11] .

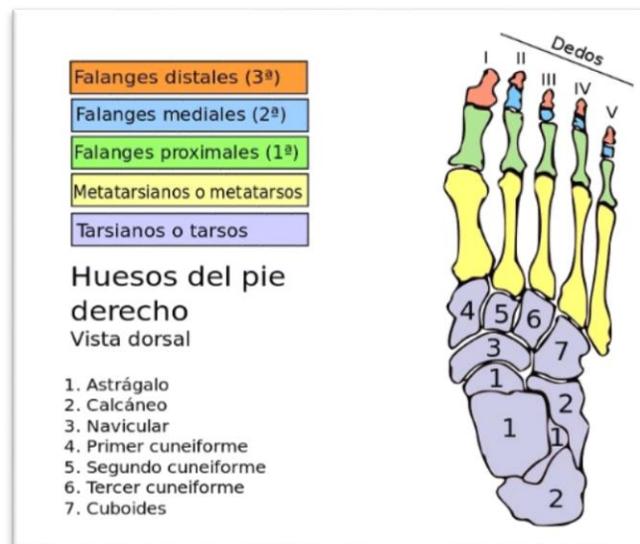
1.2.2 HUESOS DEL PIE

El esqueleto del pie está formado por tres grupos de huesos que de atrás adelante constituyen el tarso, el metatarso y los dedos. Consta de 7 huesos del tarso, 5 metatarsianos y 14 falanges, como se puede apreciar en la figura 2. Utilizando como guía para identificar las partes, los colores en la misma[12].

1.2.2.1 HUESOS DEL TARSO

Se halla constituido por siete huesos cortos dispuestos en dos hileras. La posterior posee sólo dos huesos superpuestos, el astrágalo y el calcáneo, mientras la anterior está formada por cinco huesos yuxtapuestos: el cuboide, el escafoide y los tres huesos cuneiformes. El conjunto de estos huesos, articulados entre sí, forma una bóveda, cóncava hacia abajo y hacia dentro, completada hacia delante por el metatarso, sobre la cual descansa todo el cuerpo en la posición vertical[12]. Los huesos tarsianos se pueden ver en la figura 2, identificados con color gris.

Figura 2 Huesos del pie, vista del pie derecho



Fuente [13].

1.2.2.1.1 HUESO ASTRAGALO

Es un hueso corto, situado en la parte más alta de la bóveda tarsiana, que se articula por arriba con los huesos de la pierna, por debajo con el calcáneo y por delante con el escafoide. Se distinguen en él tres porciones, una anterior o cabeza, otra posterior o cuerpo y una tercera intermedia o cuello[12]. Es esencial para la biomecánica del pie y del tobillo, uniéndose con diferentes elementos óseos del tarso, articulándose con la tibia y el peroné, participando en actividades como caminar y levantarse, movimientos de flexión, extensión, eversión e inversión del tobillo, equilibrio y soporte del peso corporal[14].

Los huesos astrágalos se pueden ver en la figura 2, identificados con color gris y el número 1.



1.2.2.1.2 HUESO CALCANEEO

Es un hueso corto, situado por debajo del astrágalo en la parte posteroinferior del tarso. Es el más voluminoso de los huesos de esta región y constituye el esqueleto del talón del pie[12]. Los calcáneos son de suma importancia para la articulación astragalocalcánea, siendo el primer punto de soporte al realizar la marcha, constituyen la eminencia principal del talón, participando en los movimientos del tobillo (flexión plantar y dorsal)[14].

El hueso calcáneo se aprecia en la figura 2, identificado con color gris y el número 2.

1.2.2.1.3 HUESO NAVICULAR O ESCAFOIDES

Es un hueso corto, alargado transversalmente y aplanado de adelante atrás. Su parte posterior es cóncava y se articula con la cabeza del astrágalo, mientras en la anterior, convexa, se articulan los tres huesos cuneiformes. Se distinguen en él dos caras, dos bordes y dos extremidades[12]. Este es un hueso importante para que la biomecánica del pie se pueda ejecutar de la mejor manera, contribuyendo a movimientos de flexión dorsal y plantar del tobillo; estabilidad y equilibrio del pie; participando en la marcha y bipedestación[14].

El hueso navicular o escafoides se evidencia en la figura 2, identificado con color gris y el número 3.

1.2.2.1.4 HUESOS CUNEIFORMES

Tienen forma de cuña, siendo el primero de base inferior y de base superior los otros dos. Se articulan con la cara anterior del escafoides por detrás, y con los tres primeros metatarsianos por delante[12]. Trabajan armónicamente con los metatarsianos para formar las articulaciones tarsometatarsianas, participan en locomoción, marcha, bipedestación, y equilibrio, tanto estático como dinámico, formando parte de los elementos óseos que soportan el peso corporal[14].

Los huesos cuneiformes se aprecian en la figura 2, identificado con color gris y los números 4, 5 y 6.

1.2.2.1.5 HUESO CUBOIDES

Está situado en la parte externa de la segunda hilera del tarso y son de forma más o menos cúbica, a lo que alude su nombre. Se articula hacia atrás con el calcáneo en tanto que por delante lo hace con el cuarto y quinto metatarsianos[12]. A pesar de ser cortos, se articulan directamente con diferentes ligamentos, tendones y músculos para formar las articulaciones encargadas de los movimientos en el tobillo; también realizan actividades que requieren de desplazamiento corporal y funcionan como un mecanismo en forma de rueda, para el tendón peroneo largo, en pocas palabras hace que el pie y el tobillo puedan realizar el desplazamiento del miembro inferior [14]. El hueso cuboides se estima en la figura 2, identificado con color gris y el número 7.



1.2.2.2 HUESOS DEL METATARSO

Está formado por cinco huesos que se designan de adentro afuera como metatarsianos primero, segundo, tercero, cuarto y quinto; se hallan articulados por atrás con los huesos de la segunda hilera del tarso, mientras por delante se articulan con las extremidades posteriores de las primeras falanges, como los metacarpianos. Estos huesos tienen forma de prisma triangular. Su cara dorsal es más ancha atrás que adelante y ligeramente convexa [12]. Estos huesos intervienen en el equilibrio y la armonía corporal, interceden en la flexión de los dedos colaborando con la marcha y bipedestación[15].

Los huesos metatarsianos se aprecian en la figura 2, identificado con color amarillo.

1.1.2 MÚSCULOS DEL PIE

Los músculos del pie se pueden dividir en músculos del dorso y de la planta. A su vez, los últimos se agrupan en tres regiones, a saber: región plantar interna, plantar media y plantar externa[12].

1.2.3.1 MÚSCULOS DEL DORSO DEL PIE

Un solo músculo constituye la masa muscular del dorso del pie y se llama músculo pedio[12].

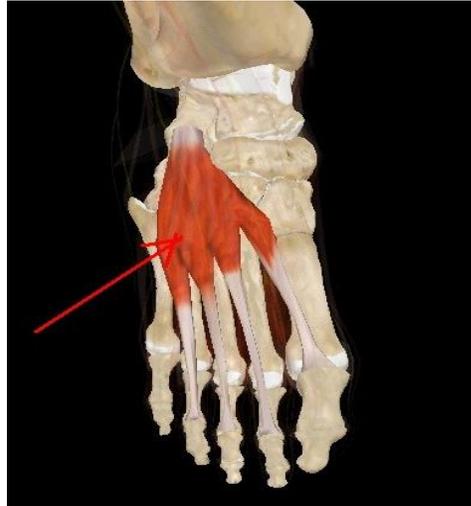
1.2.3.1.1 MÚSCULO PEDIO

Este músculo, aplanado y provisto anteriormente de cuatro digitaciones, se extiende del calcáneo a los cuatro primeros dedos[12].

- **Origen:** En la superficie superoexterna del calcáneo, desde ahí se forman cuatro vientres musculares que se dirigen a los cuatro primeros dedos.
- **Función:** Extensor metacarpofalángico de los cuatro primeros dedos, pero siempre con tendencia a llevar los dedos hacia fuera o a corregir la desviación hacia dentro del músculo extensor largo[16].

A continuación, en la figura 3 se puede apreciar dicho músculo.

Figura 3 Músculo Pedio



Fuente[17].

1.2.3.2 REGION PLANTAR INTERNA

En esta región se encuentran tres músculos, a saber, el aductor del dedo grueso, el flexor corto del dedo grueso y el abductor del dedo grueso[12].

1.2.3.2.1 FLEXOR CORTO DEL DEDO GRUESO

Es un músculo grueso y potente que se encuentra cubierto por una gran fascia denominada fascia plantar, lo que le confiere función de resorte, permitiéndole actuar como tal.

- **Origen:** En la cara posteroinferior del calcáneo. En la parte media del pie se divide en 4 vientres que son continuados por cuatro tendones hasta los 4 últimos dedos y se dividen en la falange proximal en dos bandas que son aprovechadas para que pase el músculo flexor largo.
- **Función:** Flexor metatarsofalángico, flexor interfalángico proximal, estabilizador de los arcos plantares[18].

En la figura 4 se puede ver este músculo.

Figura 4 Flexor Corto Del Dedo Grueso



Fuente[17].

1.2.3.2 ABDUCTOR DEL DEDO GRUESO

Es el más profundo de los músculos de la región plantar interna, está colocado por debajo de los espacios interóseos, se divide en dos haces perfectamente diferenciados, que por su dirección se denominan oblicuo y transverso[12].

- **Origen:** El fascículo oblicuo en la cara plantar de las bases de los metatarsianos II, III y IV. El fascículo transversal en la zona metatarsfalángica del tercer, cuarto y quinto dedo.
- **Función:** Flexor metatarsfalángico, abductor del primer dedo, estabilizador del arco plantar transverso[19].

En la figura 5 encontramos este músculo.

Figura 5 Abductor del dedo grueso



Fuente[17].

1.2.3.3 REGION PLANTAR EXTERNA

1.2.3.3.1 ABDUCTOR DEL DEDO PEQUEÑO

En esta región se encuentran tres músculos, a saber: el abductor, el flexor corto y el oponente del dedo pequeño[12].

- **Origen:** En la cara posteroexterna plantar del calcáneo.
- **Función:** Flexor metatarsofalángico, separador del quinto dedo[20].

Para apreciar este músculo por favor dirigirse a la figura 6.

Figura 6 Abductor del dedo pequeño



Fuente[17].

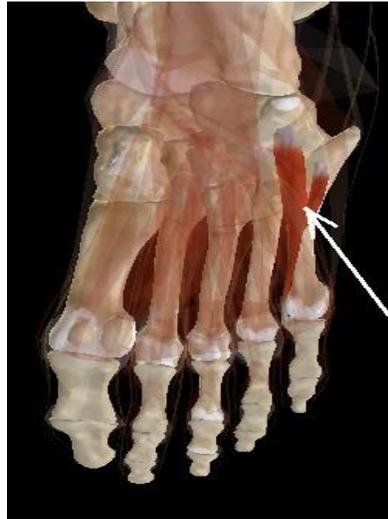
1.2.3.3.2 FLEXOR CORTO DEL QUINTO DEDO

Es menos largo que el anterior y está colocado por encima de él. Se extiende de la base del quinto metatarsiano a la primera falange del quinto dedo[12].

- **Origen:** En la extremidad proximal del quinto metatarsiano.
- **Función:** Flexor metatarsofalángico, separador del quinto dedo.

La imagen de este músculo se encuentra en la figura 7.

Figura 7. Flexor corto del quinto dedo



Fuente[17]

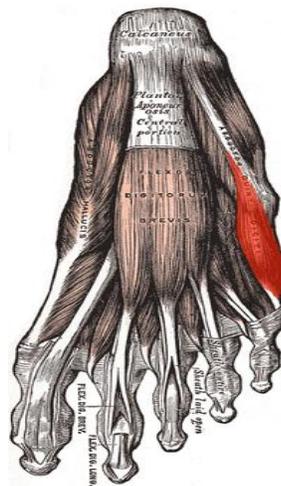
1.2.3.3 OPONENTE DEL QUINTO DEDO

Como el anterior, con el cual se confunde en su origen, se extiende de la vaina del peroneo largo al quinto metatarsiano.

- **Origen:** En cara inferior del cuboides
- **Función:** Flexor metatarsofalángico, separador del quinto dedo del pie[21]

La figura 8 denota este músculo.

Figura 8 Oponente del quinto dedo



Fuente[21]

1.2.3.4 REGION PLANTAR MEDIA

En esta región se encuentran en esta región los siguientes músculos: el flexor corto plantar, el accesorio del flexor largo, los lumbricales y los interóseos[12].

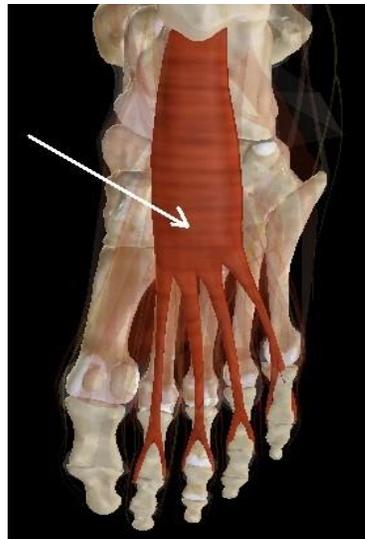
1.2.3.4.1 FLEXOR CORTO PLANTAR

Este músculo aplanado, el más inferior o superficial de la región, se extiende del calcáneo a los cuatro últimos dedos[12].

- **Origen:** En la cara posteroinferior del calcáneo, en la parte media del pie, se divide en cuatro vientres que son continuados por cuatro tendones hasta los cuatro últimos dedos y se dividen en la falange proximal en dos bandas que son aprovechadas para que pase el músculo flexor largo.
- **Función:** Flexor metatarsofalángico, flexor interfalángico proximal, estabilizador de los arcos plantares[22].

Para ver este músculo ubicar la figura 9 a continuación

Figura 9 Flexor corto plantar



Fuente[17].

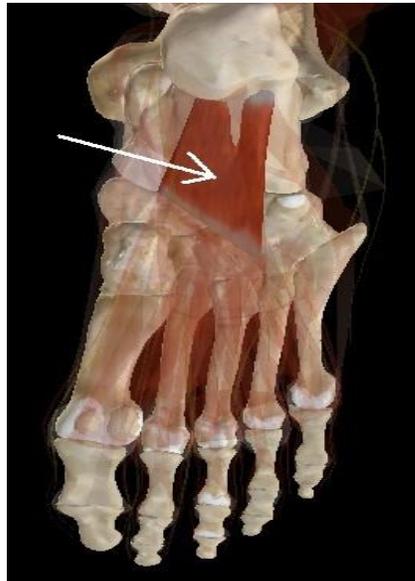
1.2.3.4.2 ACCESORIO DEL FLEXOR LARGO O MÚSCULO CUADRADO CARNOSO DEL SYKVIUS

Está colocado por encima de la parte posterior del músculo precedente y se extiende del calcáneo al tendón del flexor largo común de los dedos[12].

- **Origen:** En la cara plantar de la apófisis posterior del calcáneo.
- **Función:** Rectifica la desviación de ese tendón, contribuye a la flexión de la última falange de los cuatro últimos dedos[23].

La figura 10 muestra el musculo mencionado.

Figura 10 Músculo Accesorio del flexor largo



Fuente[17].

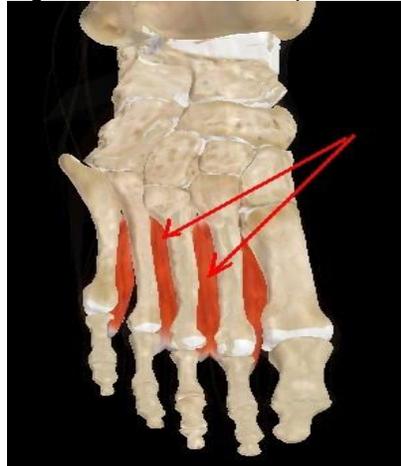
1.2.3.5 INTERÓSEOS DEL PIE

Igualmente, que los de la mano, los interóseos del pie se dividen en plantares y dorsales. Los interóseos dorsales llenan el espacio interóseo en que se encuentran situados, en, tanto que los plantares sólo ocupan la mitad de dicho espacio[12].

- **Origen:** En las caras de los dos metatarsianos vecinos.
- **Función:** Flexión metatarsofalángica, extensión interfalángica, abducción de los dedos[24].

A continuación, se evidencia en la figura 11 los músculos interóseos del pie.

Figura 11 Interóseos de pie



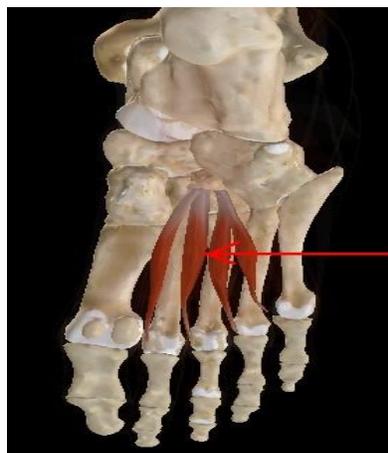
Fuente[17]

1.2.3.5.1 MÚSCULOS LUMBRICALES

Como los de la mano, los y lumbricales del pie son en número de cuatro y se les designa de dentro afuera como primero, segundo, tercero y cuarto. En la figura 12, se muestran estos músculos.

- **Origen:** En la cara lateral de los tendones del músculo flexor común profundo de los dedos por su cara palmar.
- **Función:** Sirven de unión entre el tendón flexor profundo y el tendón extensor. Por ello, juegan un papel capital en el equilibrio de los dedos; tensan el músculo flexor común profundo y producen flexión de los dedos[25].

Figura 12 Músculos Lumbricales



Fuente[17].

1.2.4 ESTRUCTURA DEL PIE HUMANO

La estructura del pie es compleja, no solo por los músculos, huesos, articulaciones y vascularización sino también porque muchos la comparan con un arco romano de medio punto (una estructura arquitectónica en la que la superficie inferior y cóncava de un arco tiene forma de semicírculo) debido a su fino equilibrio que viene dado por los pequeños huesos del tarso y la coordinación de las fuerzas opuestas que actúan sobre el mismo[26].

1.2.4.1 BOVEDA PLANTAR

Es un conjunto arquitectónico que asocia con armonía todos los elementos osteoarticulares, ligamentosos y musculares del pie. Gracias a sus modificaciones de curva y a su elasticidad, la bóveda 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. Desempeña papel de amortiguador indispensable para flexibilidad en la marcha. Está sujeta por tres arcos, siendo estos los arcos: interno, externo y anterior[27].

1.2.4.2 ARCOS DEL PIE

Los huesos del pie no se disponen en un plano horizontal, sino que forman arcos longitudinales y transversos respecto al suelo, favoreciendo la absorción y distribución de las fuerzas del cuerpo en bipedestación, desplazándose en diferentes superficies[28]. Estos arcos son vistos en la figura 13.

La planta del pie tiene tres arcos principales, un arco anterior, un arco externo y un arco interno, estos arcos, tienen que estar adecuadamente equilibrados para conseguir un apoyo perfecto del pie tanto al andar como al estar de pie[26].

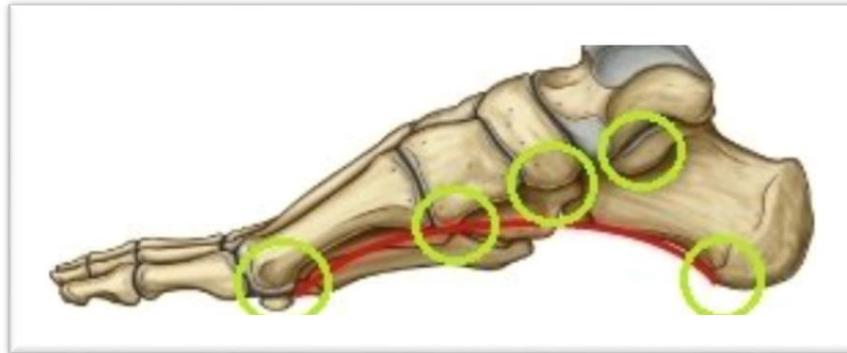
Figura 13 Arco transversal y longitudinal del pie



Fuente[29].

- **Arco interno:** Recorre la cara interna del pie desde el calcáneo a la cabeza del primer metatarsiano, está formado por cinco piezas óseas de adelante hacia atrás que en el caso de la figura 14 se observan encerradas por círculos verdes, marcadas de izquierda a derecha se marcan las piezas óseas: Primer Metatarsiano, Primera Cuña, Escafoides, Astrágalo, y Calcáneo [26].

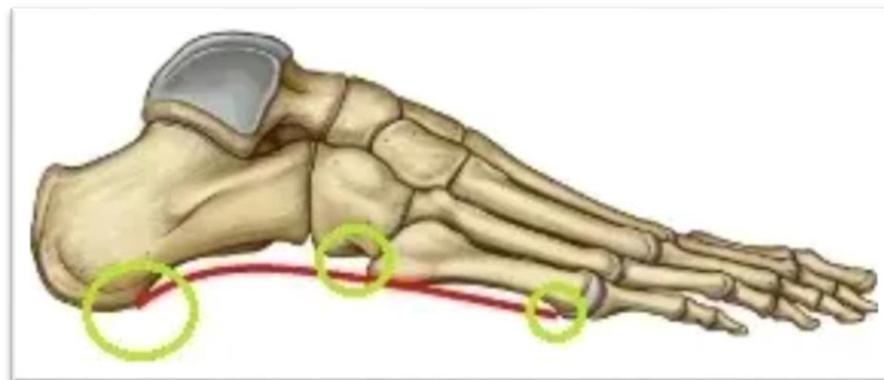
Figura 14 Arco interno del pie



Fuente[26].

- **Arco externo:** Está distanciado del suelo solo 3-5 mm. Recorre la cara externa del pie, está formado por tres piezas óseas, que en la figura 15 se pueden ver encerradas en círculos verdes: Calcáneo, Cuboides y Quinto metatarsiano[26].

Figura 15 Arco interno del pie



Fuente[26].

- **Arco anterior:** Es un arco transversal entre los apoyos anteriores de los arcos interno y externo, que va desde la cabeza del primer metatarsiano hasta la cabeza del quinto metatarsiano, en la figura 16 se denota lo descrito con círculos verdes, la segunda cabeza es la más elevada siendo el punto de clave de la bóveda[26].

Figura 16 Arco interno del pie



Fuente[26].

1.2.5 PATOLOGÍAS SEGÚN LOS ARCOS DEL PIE

Los arcos del pie se ven sometidos a grandes fuerzas y el desequilibrio de estas puede llevar a la alteración del tipo de pie que tengamos, existen diversos desequilibrios que pueden darse en la planta del pie y es importante conocerlos[26].

Cuando se hace referencia a patologías, es el abordaje de los trastornos fisiológicos y anatómicos que en este caso en particular se orienta al pie humano. La acción de los pies en conjunto, permite la adaptación a las irregularidades del terreno, gracias a la acción de la bóveda plantar, y es por ello que está sometido a cambios constantes todo el tiempo, o, por el contrario, dichas patologías pueden ser de origen genético, en ambos casos las mismas ocasionan molestias en el paciente a nivel de bipedestación, postura y demás. Es vital destacar que este trabajo está enfocado netamente al análisis bajo software de las huellas plantares de los diferentes tipos de pie. En la figura 17 se expresan los principales tipos de pie.

Figura 17 Huellas plantares de los tipos de pie



Fuente[30].

1.2.5.1 PIE NORMAL

No resulta tarea fácil catalogar al pie normal en términos absolutos, no sólo porque siempre debe ser valorado de forma global, y por tanto relacionada con el resto de la estructura que soporta, además se debe tener presentes sus distintos comportamientos funcionales, desde la sedestación a la estática, pasando por la dinámica, las deformidades que imprime al calzado, etc., sino porque también se requiere conocimiento exacto de sus distintas fases evolutivas durante el crecimiento. También debe ser considerado el medio ambiente o la actividad del sujeto, de forma que no es igual el pie de un campesino que el de un deportista o una persona de raza negra o de una tribu indígena. Por ello se piensa que se puede catalogar un pie normal, al pie biomecánicamente equilibrado, y en cambio, no siempre será normal el pie asintomático, y que un gran número de patologías estructurales no se van a manifestar de forma inmediata, sino con frecuencia a largo plazo[31].

Por tales motivos en este trabajo se considera un pie normal bajo el método Hernández Corvo a aquel que luego del análisis plantar arroja un resultado entre 40 y 54% en cuanto a la curvatura interna del pie. De ello se trata más adelante en el apartado 1.5.

1.2.5.2 PIE PLANO

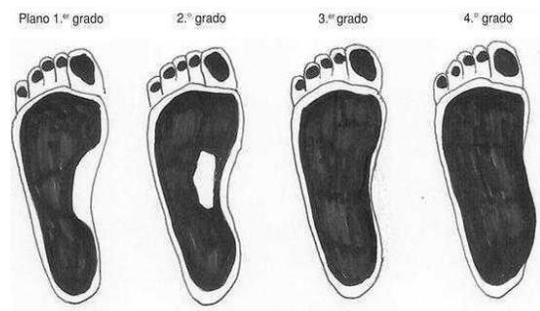
En este tipo de pie los arcos de la bóveda plantar caen parcial o totalmente, puede formarse por la debilidad de sus medios naturales de sostén músculos y ligamentos la insuficiencia de estos músculos, hace que el peso cuerpo descansa sobre la bóveda plantar y el arco interno se hunda. La pérdida de los arcos del pie representa un trastorno a partir de los 2 años de edad, y tiene consecuencias no sólo en el pie, sino en todo nuestro cuerpo. A este trastorno se le llama pie caído o pie plano, que a modo de ejemplo puede verse en la figura 18. Existen variaciones de este tipo de pie, que pueden pasar por desapercibidas, sin embargo, en la imagen 19 son mostradas las mismas bajo las huellas plantares.

Figura 18 pie plano



Fuente[26].

Figura 19 pie plano y variaciones

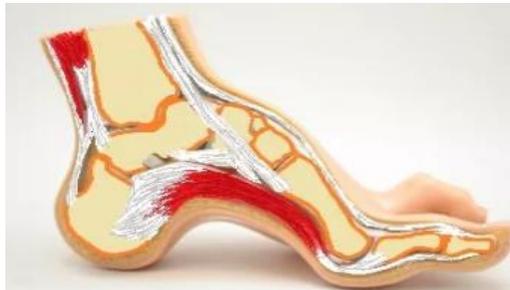


Fuente[32].

1.2.5.3 PIE CAVO

Tienen como características que los arcos de la bóveda plantar se ven aumentados. Existen tres tipos de pies cavos[26]. Este tipo de pies concentran su apoyo en la zona del talón y del metatarso (debajo de los dedos) y no realizan el apoyo que deberían por la parte media y externa del pie[33]. La imagen 20 muestra gráficamente como es un pie cavo. Al igual que los pies planos este tipo de pie presenta variaciones vistas bajo el análisis de la huella plantar, tal como se muestra en la figura 21.

Figura 20 pie cavo



Fuente[26].

Figura 21 pie cavo y variaciones



Fuente[32].

1.3 BIOMECÁNICA DEL PIE

La Biomecánica es una disciplina científica que se dedica a estudiar la actividad de nuestro cuerpo, en circunstancias y condiciones diferentes, y de analizar las consecuencias mecánicas que se derivan[34].

El pie del ser humano, con sus 28 huesos, 55 articulaciones, múltiples ligamentos y músculos, es una estructura perfectamente adaptada para cumplir con las múltiples exigencias de apoyo y locomoción del cuerpo humano, así como para la realización de los movimientos más complejos.

Las funciones del pie se dividen en:



- **Función motora:** Gracias a la cual se logra el impulso necesario para caminar, correr y saltar.
- **Función de equilibrio:** Ésta se lleva a cabo a expensas de la articulación del tobillo, los huesos metatarsianos en el antepié y los ligamentos laterales que actúan a modo de cinchos.
- **Función amortiguadora de las presiones:** Al correr, el pie permanece sobre el suelo 0.25 segundos a 12 km/h, soportando un individuo de 70 kg una media de 110 toneladas durante 1,500 m[35].

1.4 MEDICIÓN DE HUELLAS PLANTARES

Al caminar sobre ciertas superficies, nuestros pies dejan huellas, es algo totalmente natural al que comúnmente no le damos importancia, sin embargo, dichas huellas pueden proporcionar información significativa acerca de la salud de las mencionadas extremidades y algunas partes de nuestro cuerpo.

1.4.1 HUELLA PLANTAR

Las disposiciones de todos los huesos del pie forman entre sí una bóveda en la parte media que le da una gran resistencia para la carga de peso y el esfuerzo apoyándose en tres puntos que se conocen como trípode podálico. Esta bóveda tiene semejanza a un triángulo equilátero no exacto y sus puntos de apoyo están comprendidos en la zona de contacto con el suelo, al captar la imagen mediante líquido sobre una superficie plana se forma lo que se denomina impresión o huella plantar[35].

1.4.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA HUELLA PLANTAR

Existe una gran cantidad de métodos para cuantificar la huella plantar y establecer una clasificación del tipo de pie, estos se pueden clasificar como estáticos o dinámicos, cuya diferencia radica en que para los primeros el pie es analizado de forma detenida o paralizada sobre una superficie y para los segundos el pie se estudia en marcha sobre plataformas que permiten su libre movimiento.

Es vital mencionar que los métodos estáticos de obtención y análisis de la huella plantar son una manera útil, más sencilla y menos costosa que los métodos dinámicos. Los métodos dinámicos son más usados para estudiar la funcionalidad del pie aportando información más precisa, sin embargo, los estáticos son una manera útil, sencilla y menos costosa de obtención y análisis de la huella plantar. En la tabla 1, a manera de comparación se muestran los métodos más destacados bajo análisis estático[36].

A su vez se hace necesario mencionar las siguientes herramientas de obtención de la huella plantar, utilizadas en la gran mayoría de este tipo de métodos.

- **Fotopodograma:** El fotopodograma permite obtener registros válidos, duraderos y de alta calidad de la huella plantar, recogiendo el contorno del pie que se apoya y aportando una impresión de la huella plantar sobre papel fotográfico.
- **Pedígrafo:** Consiste en pisar sobre un dispositivo de goma, impregnado en tinta, y posteriormente pisar sobre papel marcando la huella plantar[37].

Tabla 1 Métodos estáticos de análisis de huella plantar

Métodos De Análisis	Autor/Es (Año/S)	Parámetro Medido	Ventajas	Inconvenientes	Tipo De Método
Inspección Visual No Cuantitativa	Cavanagh y Rodgers (1987).	Forma del pie por observación visual	Rápido y útil	Subjetivo, mucha experiencia	Cualitativo /Estático
Altura Del Dorso Del Pie	Cowan, et al. (1993); Williams y McClay (2000).	Longitud más alta del dorso del pie tomada al 50% de la longitud real del pie.	Válido	Subjetividad	Cuantitativo/ Estático
Índice Del Arco (IA)	Cavanagh y Rodgers (1987); Hamil et al. (1989); McCrory et al. (1997); Nikolaidou y Boudolos (2006).	Proporción entre áreas de contacto de diferentes partes de la huella plantar.	Medida útil y predictor válido de la altura del arco interno del pie.	Errores al determinar la superficie del pie.	Cuantitativo/ Estático
Índice De La Impresión Del Pie	Redmon et al. (2006); Redmon et al. (2008).	Observacional clasificación de postura estática del pie.	Rápido y sencillo, toma datos de la huella plantar impresa.	Experiencia, destreza manual para palpación y subjetividad.	Cualitativo /Estático
Método De Hernández Corvo	Hernández (1989); Sirgo y Aguado (1991); Sirgo et al. (1997); Abián et al. (2005); López et al. (2006); Zurita et al. (2006); Abián et al. (2008); Aguilar et al. (2009).	Tipificar el pie según medidas de impresión plantar.	Precisión, en realización Y clasificación del tipo de pie.	Basado en medida estática.	Cuantitativo /Estático

Fuente[36]

1.4.3 CLASIFICACION DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA HUELLA PLANTAR

Es preciso mencionar que los pies son nuestro apoyo sobre las diferentes superficies por las que nos movemos a diario, motivo más que suficiente para orientar trabajos, investigaciones y estudios destinados a conocer su estructura y puesta en marcha, como también las patologías asociadas a la edad, el peso, las actividades que realizamos, entre otras cosas.

Por tales razones, existen diferentes métodos para cuantificar la huella y se clasifican en:



- **Inspección visual no cuantitativa:** basado en exploración visual, uso del podoscopio, valoración de la pronación o supinación del pie por inspección para ello se debe tener una experiencia clínica considerable, ya que son métodos muy subjetivos que pueden llevar a errores metodológicos a un investigador. Dichos métodos son útiles para aportar idea de la estructura o el tipo de pie.
- **Valoración antropométrica:** se toman mediante referencias óseas marcadas a través de la piel como la altura del escafoides, el ángulo tibio-calcáneo o el ángulo del retropié.
- **Parámetros recogidos de la huella plantar:** aquí son analizados el índice del arco (IA), índice del arco modificado (IAM), ángulo del arco, índice de la huella, índice del arco truncado, índice de la longitud del arco, entre otras estructuras del pie.
- **Evaluación radiográfica:** estudio del ángulo de inclinación del calcáneo y ángulo entre el calcáneo y primer metatarsiano[36].

1.5 METODO DE ANÁLISIS DE HUELLA PLANTAR HERNANDEZ CORVO

El Índice de Hernández-Corvo permite determinar el tipo de pie mediante un protocolo establecido, así el pie se tipifica según las medidas obtenidas a través de la imagen plantar, dando como resultado seis posibilidades que abarcan desde el pie plano hasta el pie cavo extremo. Este índice presenta una buena precisión, tanto en la realización como en la clasificación del tipo de pie.

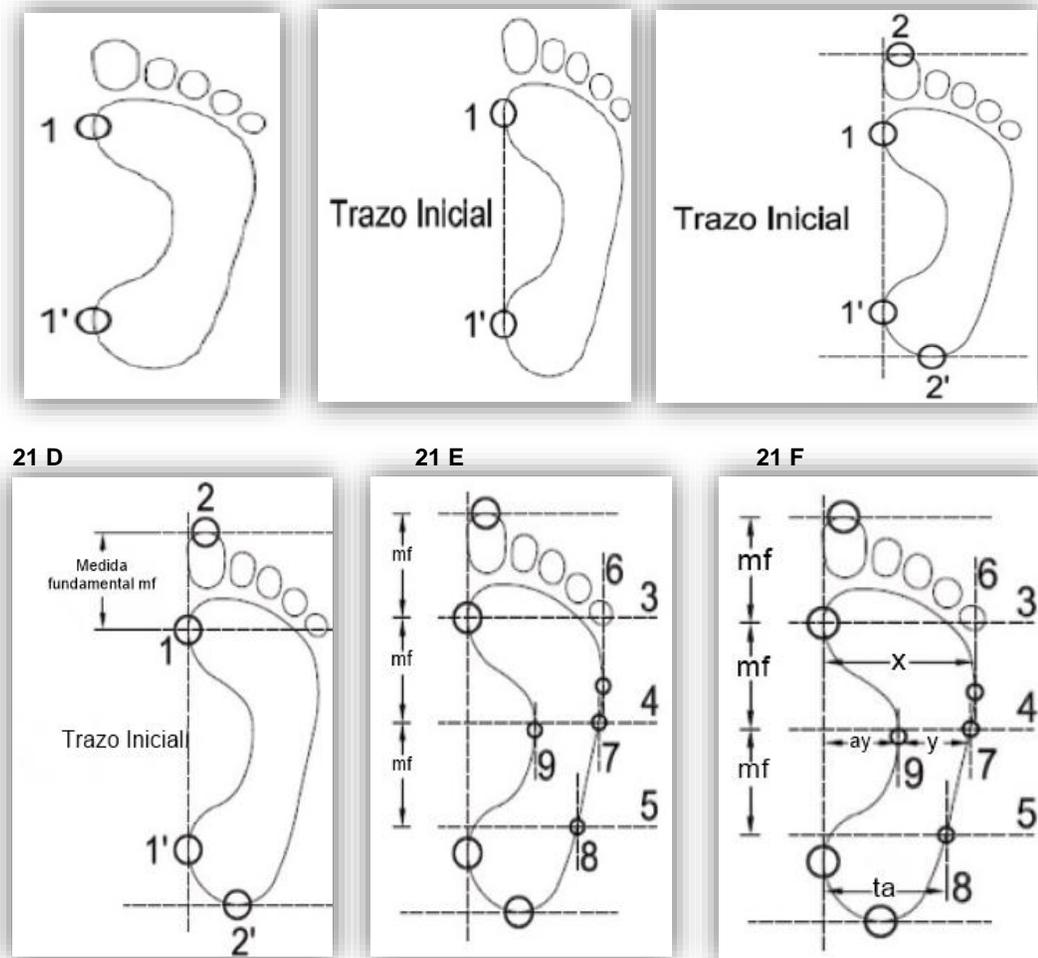
Sobre cada huella se aplica el protocolo de valoración que se describe a continuación:

1. Marcación de los puntos 1 y 1' en las prominencias internas del antepié y del retropié respectivamente, figura 2A.
2. Unión de los puntos 1 y 1' para formar el trazo inicial, figura 2B.
3. Marcación de los puntos 2 y 2' en el extremo anterior y posterior de la huella respectivamente, figura 21C.
4. Trazado de dos líneas perpendiculares al trazo inicial que pasen por 2 y por 2'.
5. La distancia entre la línea que pasa por 2 y el punto 1 se llama medida fundamental (mf), 2D.
6. Trazado de tres líneas perpendiculares al trazo inicial que pasen por las divisiones de la medida fundamental (se les denomina de arriba abajo 3, 4 y 5), figura 21E.



7. Trazado de una línea entre 3 y 4 perpendicular a 3 (y paralela al trazo inicial), que pase por el punto más externo del pie. Se llama línea 6, Figura 21F.
8. Medición del valor X , que es la distancia entre el trazo inicial y la línea 6 y que corresponde a la anchura del metatarso.
9. Trazado de la línea 7, paralela al trazo inicial, que pasa por el punto más externo de la línea 4, Figura 21F.
10. Trazado de la línea 8, paralela al trazo inicial, que pasa por el punto más externo del pie de la línea 5, 21F.
11. Medición de la distancia entre la línea 8 y el trazo inicial.
12. Trazado de la línea 9 paralela al trazo inicial y que pasa por el punto más externo de la zona interna entre 4 y 5, Figura 21F
13. Medición de la distancia Y , entre 9 y 7.
14. Medición de la distancia entre la línea 9 y el trazo inicial.
15. Se calcula el $\%X$ según la Ecuación 1.

Figura 21. Protocolo de Hernández Corvo para análisis de huellas plantares
 21 A 21 B 21 C



Fuente[37].

La valoración del pie se da según el valor obtenido en la ecuación 1,

Ecuación 1

$$\%X = \frac{(X - Y)}{X} * 100$$

El porcentaje obtenido en la anterior ecuación es posteriormente comparado con los valores expresados en la tabla2, para finalmente determinar el tipo de pie[37].

Tabla 2. Valoración del pie según el índice de Hernández-Corvo

Porcentaje (%X)	Tipo de pie
0-35	Plano
35-40	Plano – Normal
40-55	Normal
55-60	Normal – Cavo
60-75	Cavo
75-85	Cavo fuerte
85-100	Cavo extremo

Fuente[37]

1.6 DEFINICIÓN DE UNA IMAGEN DIGITAL

Una imagen se define como una función de dos dimensiones $f(x, y)$ donde x e y son las coordenadas de un plano que contiene todos los puntos de la misma, y $f(x, y)$ es la amplitud en el punto (x, y) a la cual se le llama intensidad o nivel de gris de la imagen en ese punto. En el caso de que tanto las coordenadas x e y como los valores de intensidad de la función f sean discretos y finitos, se habla de una imagen digital.

Una imagen digital está compuesta de un número finito de elementos y cada uno tiene una localidad y un valor particular. A estos elementos se les llama píxeles. En la Figura 22 se muestra una imagen con 256 niveles de intensidad. En ella, cada uno de los píxeles está representado por un número entero que es interpretado como un nivel de intensidad luminosa en la escala de grises. Ampliando la imagen en una zona cualquiera, se pueden apreciar estos valores, que se muestran en forma de matriz en la misma figura, correspondiéndose cada elemento de la matriz N_{ij} con las coordenadas en el plano $x=i, y=j$ [39].

Figura 22 Representación de una imagen digital con zoom a detalle



Fuente[38]



1.7 ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

El análisis y procesamiento de imágenes ha permitido un gran avance en muchos campos, especialmente en la medicina, en 1971 se produjo la primera imagen del TAC (Tomografía Axial Computarizada); por medio de la cual haciendo uso de los rayos X se obtienen imágenes del interior del organismo y de esta forma es posible detectar desde un tumor hasta daños en la columna vertebral; así como la toma de fotografías con satélites cuyo respectivo procesamiento, detectando todo tipo de fenómenos naturales, como huracanes, cambios de clima, tornados, entre otros; dándose así el procesamiento de imágenes en el campo climatológico, técnica que también permite identificar huellas digitales de personas y ofrecernos mayor seguridad en nuestros dispositivos de uso cotidiano[39].

Es el área de la ingeniería que se encarga de la extracción de mediciones, datos o información contenida en una imagen. Incluye aquellas técnicas cuyo principal objetivo es facilitar la búsqueda e interpretación de la información contenida en ellas. **Un sistema de análisis de imágenes** se distingue debido a que tiene como parámetro de entrada una imagen, y cuyo resultado es comúnmente una salida numérica, en lugar de otra imagen. Esta salida es la información referente al contenido de la imagen de entrada[40].

En cambio, el **procesamiento de imágenes** busca mejorar el aspecto de las mismas y hacer más evidentes en ellas ciertos detalles que se desean hacer notar, proceso que se lleva a cabo a través de una computadora. [41]. Para llegar desde la imagen original al conjunto de parámetros requeridos, es necesario pasar por distintas etapas de tratamiento de las estas, en donde en muchas ocasiones se utilizan técnicas denominada filtrado, en la que se analiza la imagen, adecuándola para cierta aplicación específica[42].

El procesamiento y análisis de imágenes se ha desarrollado en respuesta a tres de los más grandes problemas concernientes a estas:

- La digitalización y codificación de imágenes que facilite la transmisión, representación y almacenamiento de las mismas.
- Mejora y restauración de una imagen para interpretar más fácilmente su contenido.
- Descripción y segmentación de imágenes para aplicaciones de visión robótica o visión artificial.

El conjunto de métodos de procesamiento de imágenes está dividido en tres grandes grupos: Algoritmos en el dominio espacial, Algoritmos en el dominio de la frecuencia, Algoritmos de extracción de características.

- **Algoritmos en el dominio espacial:** Se refiere a métodos que procesan una imagen píxel por píxel, o también tomando en cuenta un conjunto de píxeles vecinos.

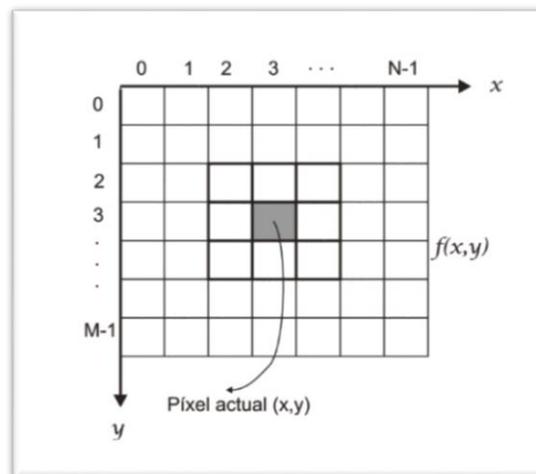
- **Algoritmos en el dominio de la frecuencia:** Frecuentemente, estos métodos son aplicados sobre los coeficientes resultantes de la Transformada de Fourier de una imagen.
- **Algoritmos de extracción de características:** A diferencia de los dos grupos anteriores, los algoritmos de extracción de características están enfocados al análisis de imágenes para la extracción de atributos y regiones de interés, separación de objetos del fondo, detección de bordes o formas, entre otros[43].

1.7.1 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES CON ALGORITMOS EN EL DOMINIO ESPACIAL

Tienen como base usar los valores de nivel de gris de los píxeles para conseguir mejorar la imagen. Matemáticamente se estudia que tipo de transformaciones se deben aplicar a una imagen para que el resultado sea otra imagen pero con características visuales mucho mejores, es decir, se estudian las transformaciones T que aplicadas a la imagen $f(x, y)$ dará otra imagen $g(x,y)$ con mejores propiedades visuales acordes al trabajo que se requiera, esto es: $g(x,y) = T(f(x,y))$

Se utiliza la hipótesis de que el valor en un punto de imagen tan solo está relacionado con unos pocos píxeles de los que le rodean, tan solo se consideran transformaciones T que están definidas sobre el píxel dado (x, y) (denominado píxel actual), los píxeles en el entorno (denominados píxeles vecinos) 3×3 del píxel (x, y) o como mucho a los píxeles en el entorno 5×5 de dicho píxel[44]. Esto se ejemplifica en la tabla 3.

Tabla 3 píxel actual y píxeles vecinos



Fuente. Autor

1.7.1.1 RELACIONES ENTRE PÍXELES VECINOS

Un píxel p situado en un plano del espacio cuyas coordenadas son (x, y) tiene 4 vecinos horizontales y 4 verticales, cuyas coordenadas están dadas por: $(x + 1, y)$, $(x - 1, y)$, $(x, y + 1)$, $(x, y - 1)$.

+1), $(x, y - 1)$ Este grupo de píxeles se nota como $N4(p)$. Así mismo, las vecindades diagonales con el punto (x, y) se notan como $ND(p)$, y sus coordenadas son: $(x - 1, y + 1)$, $(x + 1, y + 1)$, $(x - 1, y - 1)$, $(x + 1, y - 1)$ El conjunto del píxel p y sus vecinos crea una región. Esta región establece que dos píxeles son adyacentes si, y solo si, tienen en común una de sus fronteras, o al menos una de sus esquinas. En la figura 23 a continuación se ejemplifica lo anteriormente mencionado.

Figura 23 Vecinos del píxel actual 3x3

*	*	*
*	(x,y)	*
*	*	*

Fuente[45]

Cabe destacar que, según la relación de píxel de salida con el píxel actual, las respectivas transformaciones de una imagen de entrada se clasifican en:

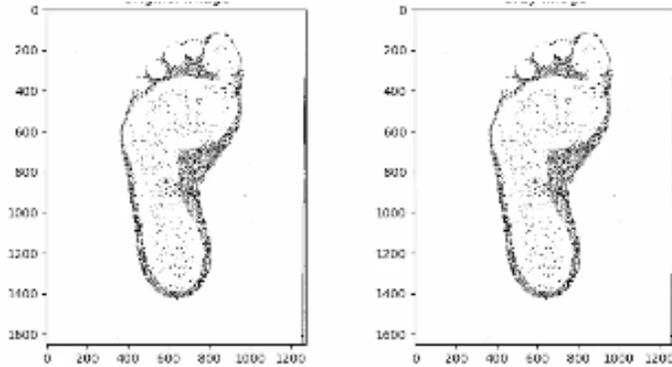
- **Transformaciones puntuales:** El píxel resultante de la operación depende sólo del valor del píxel de entrada, con ello se puede efectuar manipulación de píxeles uno a uno, bancarización, segmentación, corrección de color, tono, saturación, gamma, etc.
- **Transformaciones locales:** Para obtener el píxel de salida, se utilizan las contribuciones de los píxeles vecinos en la operación. Muchas operaciones son locales, por ejemplo, suavizado, media, operaciones morfológicas, realce de bordes.
- **Transformaciones globales:** El píxel de salida como resultado de la operación, se obtiene a partir del total de datos de la imagen como valor de entrada. Las operaciones globales se realizan a menudo en el dominio de la frecuencia. Un ejemplo es la compresión de imágenes.
- **Transformaciones geométricas:** Se realizan tomando en cuenta las posiciones de los píxeles en la imagen, realizando operaciones de translación, rotación, cambios de escala, rectificación, y transformaciones radiométricas de los píxeles[38].

1.7.1.2 TRANSFORMACIONES DE SUAVIZADO

Esta técnica se orienta para reducción de los picos de ruido y hacer menos bruscos los cambios de intensidad en la imagen, comúnmente con la utilización de filtros paso-bajo.

- **Filtro Media:** Es el filtro de suavizado más simple es el correspondiente a la media, en la cual se obtiene un píxel de salida haciendo la media aritmética de los píxeles de la ventana elegida. En la figura 24 se puede apreciar como en una imagen original (figura24A) se aplica dicho filtro obteniendo un cambio sutil (figura24B).

Figura 24 Filtro Media



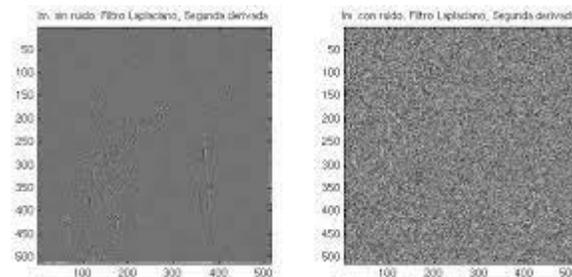
24A

24B

Fuente[46]

- **Filtro Gaussiano:** En este filtro los píxeles más cercanos al píxel actual tienen más peso que los exteriores. Los pesos de los píxeles se calculan con una campana de Gauss dependiente de la distancia al píxel actual, y su varianza indica el nivel de suavizado[38]. En la figura 25 se denota la aplicación del filtro en la imagen original (figura 25A) obteniendo la figura 25B.

Figura 25 Filtro Gaussiano



25A

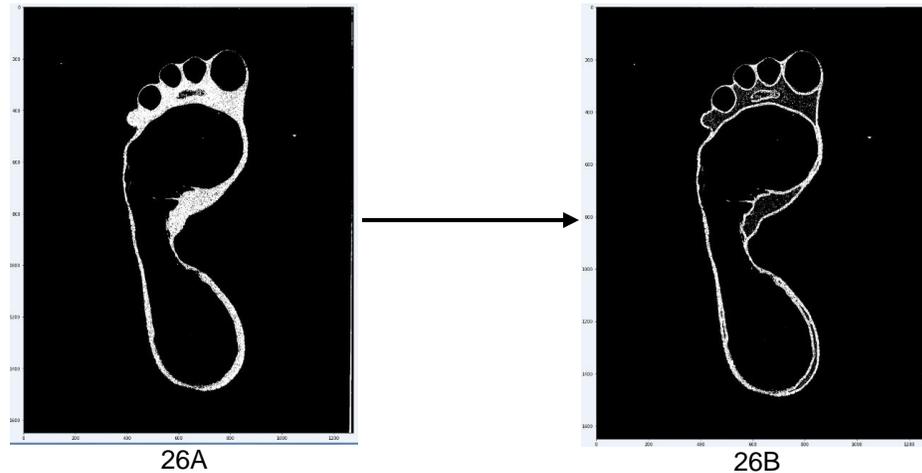
25B

Fuente[46]

1.7.1.3 TRANSFORMACIONES DE PERFILADO

Las transformaciones de perfilado realizan la operación contraria al suavizado, utilizadas para destacar y hacer más visibles las variaciones y bordes de la imagen, mejorando la apariencia difuminada de las imágenes[38]. En la figura 26 a continuación se puede apreciar como a través de la utilización del perfilado se destacan los bordes del letrero, difuminado el paisaje de fondo.

Figura 26 Transformaciones De Perfilado



Fuente[38]

1.7.1.4 DETECCIÓN DE BORDES

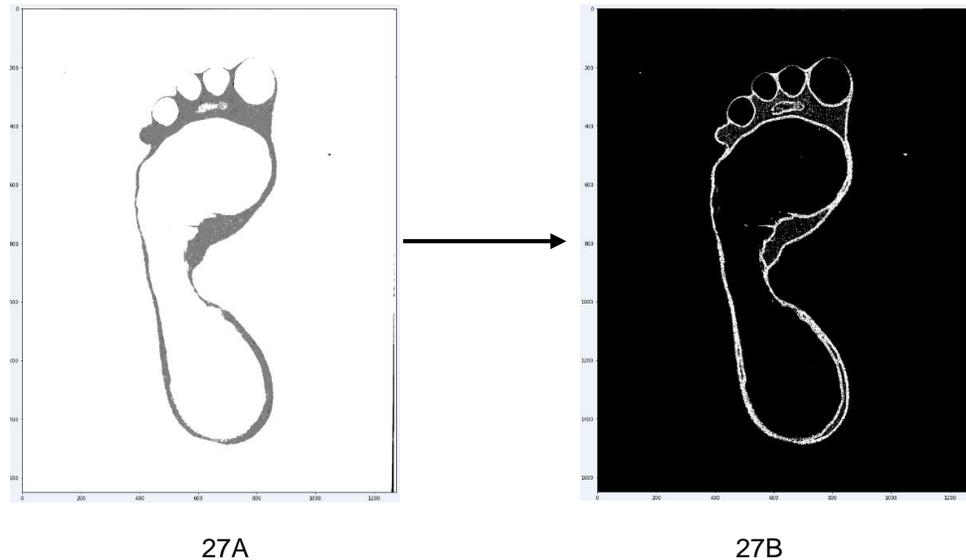
La detección de contornos proporciona información útil acerca de los límites del objeto que pueden ser utilizados para el análisis y detecciones puntuales, simplificando el análisis de imágenes, a través de la reducción de datos a ser procesados, mientras que al mismo tiempo preservan la información estructural alrededor de los límites del objeto. Tiene como objetivo detectar las zonas de cambios bruscos de intensidad y realzarlas, obteniendo una imagen resultante en la que se destacan los bordes, acentuando el contraste y detectar puntos aislados o pequeños detalles.

La característica común en los filtros de detección de bordes es la combinación de pesos positivos con negativos, como forma discreta de las derivadas (gradientes) espaciales de la imagen. Los bordes de una escena suelen ser invariantes a los cambios de luz, es por ello que muchos sistemas de análisis de imágenes utilizan detección de bordes para trabajar con éstos, y no con la imagen original, sin embargo, los filtros de detección de bordes son muy sensibles al ruido, por lo cual es habitual combinarlos con filtros de suavizado previos a la etapa de detección. Los más comunes se mencionan a continuación[38].

- **Filtros De Prewitt:** Se basa en otorgar el mismo peso a los píxeles contiguos en vertical y horizontal, que a los contiguos en diagonal. Se divide en operadores horizontales y verticales, que se utilizan para detectar los bordes verticales y horizontales respectivamente[38]. Es el método más común para detectar discontinuidades en los niveles de intensidad, requiere la aplicación de la derivada de primer y segundo orden, como se trata de cálculos locales, la transición en el nivel de intensidad asociado a un punto tiene que ser significativamente diferente al fondo en ese punto. Los operadores de gradiente calculan el cambio en las intensidades de niveles de gris y también la dirección en que se produce el cambio. Esto se calcula por la diferencia en los valores de los píxeles vecinos[47].

En la figura 27 se observa como a través de la utilización del filtro en la imagen 27A se destacan los bordes del objeto, obteniendo la imagen 27B.

Figura 27 Utilización De Filtro Prewitt



Fuente[48]

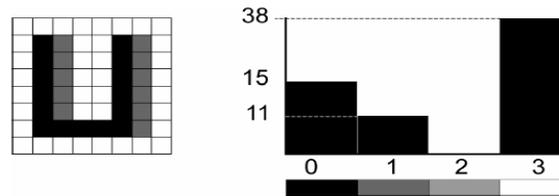
1.7.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES CON ALGORITMOS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Estos algoritmos se basan en filtros que procesan una imagen trabajando sobre el dominio de la frecuencia en la Transformada de Fourier de la imagen. Debido a que la imagen es considerada como una función de dos dimensiones finita y discreta, existe su Transformada Discreta de Fourier (DFT). Para obtener la DFT, se modifica la imagen original siguiendo el Teorema de la Convolución.

1.7.2.1 TRANSFORMACIONES BASADAS EN HISTOGRAMA

El histograma de una imagen es una representación gráfica de la frecuencia con la que los niveles de gris aparecen en ella (o niveles de intensidad en cada plano de color, en caso de una imagen en color). Es una herramienta fundamental para el análisis de imágenes digitales, ya que permite “condensar” mucha información sobre la imagen (probabilidades de cada nivel de gris) aunque se pierde la localización espacial. Su rango dinámico es el conjunto de niveles de gris presentes. Comúnmente se representa como una gráfica de puntos, donde el eje horizontal representa todos los posibles valores de intensidad de un píxel, y el eje vertical la frecuencia de aparición de dichos valores en la imagen, esto se muestra en la figura 31[38].

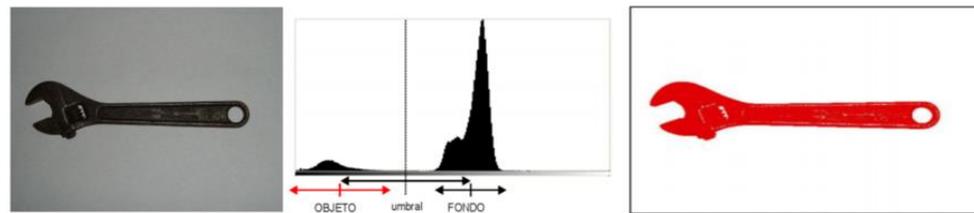
Figura 30 Ejemplo De Imagen Y Su Histograma



Fuente[38]

A continuación, en la figura 32 se aprecia el proceso de aplicación de la umbralización en una imagen.

Figura 31 Umbralización de una imagen con ayuda del histograma.



Fuente[51]

1.7.3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES CON ALGORITMOS DE EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

La extracción de características es un método que toma una imagen como entrada y extrae atributos de interés de la misma como detección de curvas y formas, etiquetado de componentes, etc., constituyendo la primera etapa en la inteligencia de un sistema de visión artificial.

Es importante denotar que no existe un método universal para la detección automática de características, por lo que según los requerimientos del problema a abordar se debe personalizar la metodología a llevar a cabo. Cabe resaltar que el sistema de visión artificial siempre debe enfocarse a tomar siempre la información que resulte útil, es decir, tomar las características de la imagen que denoten los datos necesarios para una posterior interpretación cumpliendo, entre otras, las siguientes condiciones:

- Extracción de información útil a partir de la imagen no debe suponer uso excesivo de recursos del sistema, y tiempo total dedicado a la tarea debe ser el menor posible.
- La localización de las características de la imagen debe ser lo más precisa posible, reduciendo los errores de estimación.
- El método utilizado para la extracción de características debe ser robusto y estable.



Los tres métodos más comunes en la extracción de características son: la segmentación, el etiquetado y la detección de formas[38].

1.7.3.1 SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES

La segmentación subdivide una imagen en sus regiones u objetos constituyentes, de tal manera que los píxeles de esas regiones posean propiedades o atributos similares, como niveles de gris, contraste o texturas. La mayoría de los algoritmos de segmentación están basados en dos propiedades fundamentales de intensidad de la imagen: la discontinuidad y la similitud. En la segmentación por discontinuidad, el proceso se realiza dividiendo la imagen por cambios abruptos en intensidad, como es el caso de la detección de bordes; en cambio a la segmentación por similitud, se logra mediante la partición de una imagen en regiones que son similares de acuerdo a un conjunto de criterios predefinido.

El proceso de segmentación se encarga de evaluar cada píxel de la imagen y decidir si contiene o no las características de interés. Como resultado, este método genera una imagen binaria, donde los píxeles que pertenecen al objeto se representan con un '1' (objeto en primer plano), mientras que los que no pertenecen al mismo se representan con un '0' (fondo).

Los diferentes tipos de segmentación se enuncian a continuación:

- **Segmentación Basada En Características De Píxel**
 - Segmentación por niveles de gris
 - Segmentación de imágenes en color
 - Segmentación por texturas
- **Segmentación Basada En Transiciones**
 - Detección de bordes (ejemplo, filtro Prewitt, Sobel y Canny)
- **Segmentación basada en modelos**
 - Transformada de Hough
- **Segmentación basada en homogeneidad**
 - Fusión de regiones
 - Zonas planas
 - Propagación de Marcadores
- **Segmentación basada en Morfológica Matemática[52]**

1.7.3.2 ETIQUETADO DE COMPONENTES

El etiquetado de componentes, es una operación que agrupa los píxeles correspondientes al mismo objeto y les asigna una marcación o rotulo, separando así unos objetos de otros.

1.8.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE PYTHON

Como todo software posee una serie de características que lo hacen muy particular y que, sin duda, le aportan muchas ventajas y están en la raíz de su uso tan extendido, así como también algunas desventajas[53].

El logo de tan versátil software se puede apreciar en la figura34.

Figura 33 Logo De Python



Fuente[54]

1.8.1.1 VENTAJAS DE PYTHON

Seguidamente se encuentran algunas de las ventajas más destacables de este software:

- **Python es un lenguaje muy expresivo**, es decir, los programas Python son muy compactos: un programa Python suele ser bastante más corto que su equivalente en lenguajes como C. (Python llega a ser considerado por muchos un lenguaje de programación de muy alto nivel).
- **Python es muy legible**. La sintaxis de Python es muy elegante y permite la escritura de programas cuya lectura resulta más fácil que si utilizáramos otros lenguajes de programación.
- **Python ofrece un entorno interactivo** que facilita la realización de pruebas y ayuda a despejar dudas acerca de ciertas características del lenguaje.
- **El entorno de ejecución de Python** detecta muchos de los errores de programación que escapan al control de los compiladores y proporciona información muy rica para detectarlos y corregirlos.
- **Python puede usarse como lenguaje imperativo procedimental** o como lenguaje orientado a objetos.
- **Posee un rico juego de estructuras de datos** que se pueden manipular de modo sencillo.



- **La gratuidad de su intérprete.** Se Puede descargar de la página web <http://www.python.org> sin ningún costo.
- **Es un software multiplataforma,** es decir, puede ser utilizado bajo sistemas operativos como Windows, Linux, entre otros[55].

1.8.1.2 DESVENTAJAS DE PYTHON

Como vemos, los beneficios son muchos, pero existe un inconveniente menor. El principal obstáculo de Python radica en que se trata de un lenguaje interpretado, es decir, no se compila, sino que se interpreta en tiempo de ejecución. Como consecuencia, es más lento que Java o C/C++, Sin embargo, esto no es un gran problema, ya que las diferencias en velocidad son pequeñas y hoy en día el cuello de botella en los proyectos de desarrollo de software no está en la CPU, gracias a avances como la computación en la nube, en la actualidad disponemos de una gran capacidad de cómputo a un coste muy asequible[53].

1.8.2 FUNCIONAMIENTO DE PYTHON

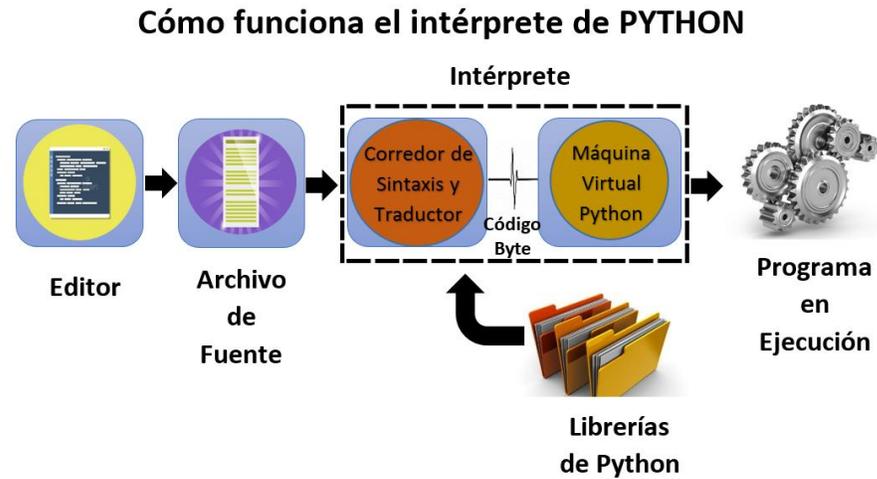
El lenguaje de programación Python utiliza módulos de código que son intercambiables en lugar de una larga lista de instrucciones que era estándar para los lenguajes de programación funcional. La implementación estándar de Python se llama **cpython**. En definitiva, no convierte su código en lenguaje de máquina o código máquina, algo que el hardware puede entender. En realidad, lo convierte en algo llamado código de byte. Este código de bytes no puede ser entendido por la CPU. Así que necesitamos un intérprete llamado Máquina Virtual Python (PVM) que ejecuta los códigos de bytes.

El intérprete de Python realiza las siguientes tareas para ejecutar un programa:

- **Paso 1:** El intérprete lee un código o instrucción Python. Luego verifica que la instrucción esté bien formateada, es decir, comprueba la sintaxis de cada línea. Si encuentra algún error, detiene inmediatamente la traducción y muestra un mensaje de error.
- **Paso 2:** Si no hay ningún error, es decir, si la instrucción o el código Python está bien formateado, el intérprete lo traduce a su forma equivalente en un lenguaje intermedio llamado «código Byte». Así, después de la ejecución exitosa de la escritura o el código Python, se traduce completamente en código Byte.

- **Paso 3:** El código del byte se envía a la Máquina Virtual Python, donde de nuevo se ejecuta el código del byte en PVM. Si se produce un error durante esta ejecución, ésta se detiene con un mensaje de error.

Figura 34 Diagrama De Bloques Del Funcionamiento De Python



Fuente[56]



CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

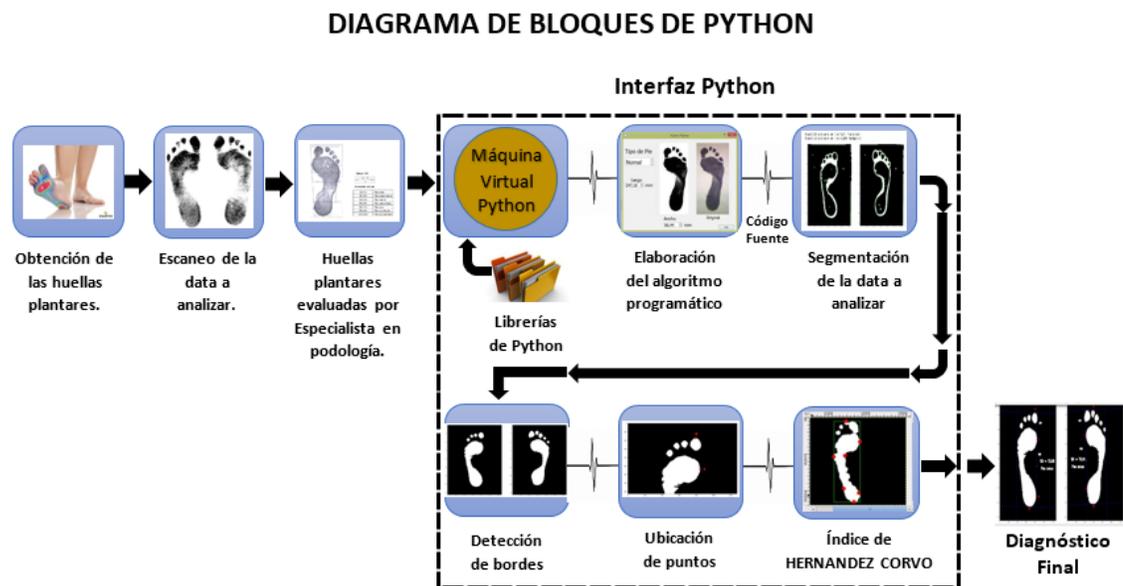
En éste capítulo se esboza la toma de huellas plantares para la construcción de la base de datos, selección de las técnicas de procesamiento de las mismas y funcionamiento del software desarrollado.

2. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	63
2.1. INTRODUCCIÓN	64
2.2 ETAPA I: ESPECIFICACIÓN Y ANÁLISIS	64
2.3 ETAPA II: DISEÑO SIMPLIFICADO.....	80
2.4 ETAPA III: PRODUCTO FINAL.....	83

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

En este apartado se desglosó el procedimiento para el desarrollo del algoritmo basado en una serie de pasos que como programador se ha intentado reunir la mayor parte de los requisitos y funcionalidades donde el especialista en podología requiere para un diagnóstico completo de las huellas plantares. Para ello se consideró dos métodos que le servirán de mucha ayuda al momento de ejecutar el análisis que son el método manual y el automático. Donde el primero de ellos todos los puntos los selecciona el especialista y que a través de las ecuaciones explicadas más adelante se trazan las rectas perpendiculares y paralelas logrando un diagnóstico más preciso. Y el método automático la diferencia es que es el algoritmo mismo selecciona los puntos.

Figura 35. Diagrama De Bloques De la estructura logarítmica con Python



Fuente Autor.

Según el diagrama anteriormente mostrado, se inicia con la obtención de las huellas plantares, donde el presente proyecto se enfatiza en adquirir la data de manera local con el fin de recopilar un estudio y abrir un historial realizando un seguimiento a los avances de cada diagnóstico.

Luego se hace un escaneo de las huellas a analizar, teniendo en cuenta que la data sea la más adecuada posible en cuanto a que sus bordes no estén desvanecidos y con menos ruido posible.

El siguiente paso se efectúa de manera manual el proceso de análisis de la data o las huellas plantares evaluadas por el especialista en podología como referencia.



Entrando en énfasis de desarrollador se obtiene y se instala la máquina virtual junto con las librerías correspondientes según las necesidades que tenga el algoritmo al momento de ejecutarlo. Python es el lenguaje de programación indicado por su soporte orientado a objetos, imperativo y funcional con una amplia gama de librerías.

Seguidamente se elabora el algoritmo programático por medio de un intérprete o un editor de texto, que me facilite digitar el código a ejecutar. En este caso Visual Studio Code, posee las herramientas necesarias para que se pueda desarrollar, en este caso un algoritmo que ejecute pre y procesamiento de imágenes aplicadas al campo profesional de la podología.

Gracias al código fuente, se segmenta la data a analizar, es decir, se extrae en una dimensión la huella libre de ruido para su correspondiente cálculo geométrico.

Posteriormente se detectan los bordes de las huellas para identificar los puntos claves siguiendo la metodología de Hernández Corvo, y así llegar al resultado o producto final del proyecto.

2.1. INTRODUCCIÓN

El siguiente es un desarrollo metodológico para la medición de presiones plantares usando técnicas de procesamiento de imágenes clásicas, esta estrategia se usó dada la alta variabilidad de los datos frente a la poca existencia de estos, lo que descarto el uso de algoritmos de aprendizaje. El objetivo de este trabajo es clasificar huellas plantares en un grupo de posibles enfermedades que aquejan a la población, y cuya identificación automática puede disminuir los tiempos de atención y recursos utilizados por profesionales de la salud (podólogos) sin disminuir la calidad de sus diagnósticos. El lenguaje de programación utilizado fue *Python 3.7.8*, junto con el framework de visión por computadora *OpenCV 4.1*, y demás librerías auxiliares en el procesamiento de datos matriciales.

2.2. ETAPA I: ESPECIFICACIÓN Y ANÁLISIS

En el inicio del proyecto se tomó como primer paso la recopilación de la data en donde se pidió la colaboración del barrio “SEMINARIO MAYOR” de la ciudad de Pamplona, para que posteriormente se haya podido reunir 30 muestras. En este caso se utilizó papel fax como soporte o calqueo de la huella plantar y posteriormente alcohol como adherente para humedecer el pie del paciente y plasmarlo en el papel. Estos dos elementos fueron indispensables para recopilar la data por su efectividad en obtener una muestra bastante clara y de mayor precisión.

Figura 37. Evidencia de recolección de muestras.



37A



37B



37C

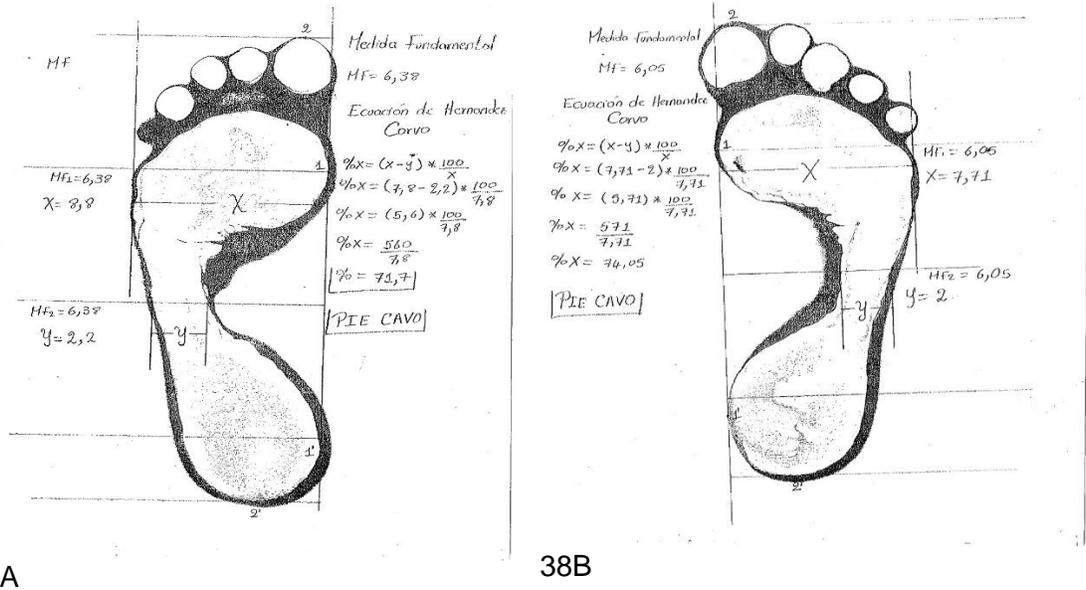


37D

Fuente Autor.

Luego de eso, con la ayuda de la especialista en el campo, se procedió a hacer la ejecución manual de diagnósticos para que al final se obtenga los resultados contemplados. Cabe resaltar que cada muestra evaluada debe estar compuesta por las dos huellas plantares, denominando cada huella como pie izquierdo y pie derecho, junto con un resultado basado geoméricamente que el especialista realiza para obtener cuantitativamente el diagnóstico y compararlo con las patologías conocidas en la rama de la podología.

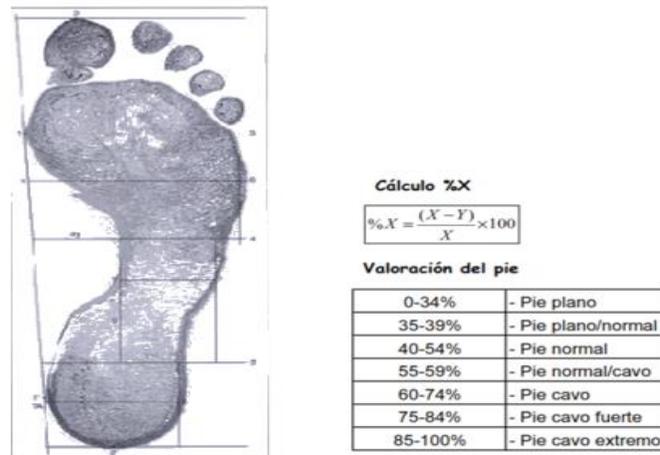
Figura 38. Análisis manual por la especialista en Podología



Fuente Autor.

Para obtener las patologías resultantes se realizó una profunda investigación con la colaboración de la especialista en podología y se determinó un método eficaz para obtener el diagnóstico más puntual. El método de Hernández Corvo contempla 7 patologías en las cuales se puntualiza según el porcentaje de curvatura situada en la parte intermedia de la huella plantar.

Figura 39. Huella, tabla y ecuación del método de Hernández Corvo



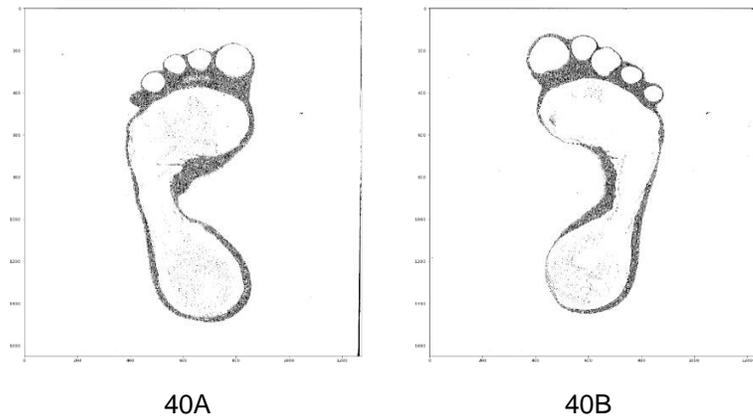
Fuente.

Siguiendo este orden de ideas se recalca la necesidad que el especialista tiene en obtener un desarrollador algorítmico que le facilite este trabajo, porque con la ayuda del programa obtiene un diagnóstico más puntual con un mínimo margen de error y posteriormente un paciente bien atendido según el grado de enfermedades que lo irrumpen.

2.2.1. Lectura de la imagen

La metodología supone que el usuario cargara las huellas de ambos pies al tiempo en la interfaz gráfica (en desarrollo), lo que supone que el software hará el procesamiento de ambas huellas en paralelo. La Figura 40 muestra las huellas, es importante recordar que dada la naturaleza de la imagen y en búsqueda de la eficiencia en tiempo y espacio del software a desarrollar, la imagen se lee en escala de grises.

Figura 40. Huellas Plantares del pie izquierdo y derecho leídas de forma simultánea.



Fuente Autor.

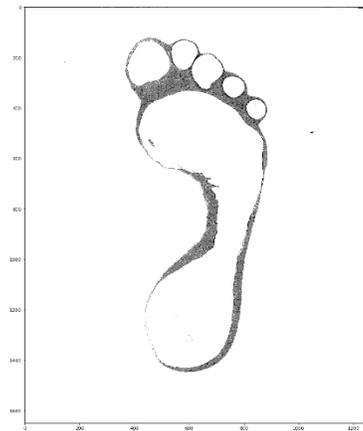
2.2.2. Experimentos con el difuminado

El difuminado (blurring) es el proceso de aplicar un filtro pasa-bajas a una imagen con el fin de reducir el ruido presente en la misma, pero manteniendo intacta la imagen. Para este caso en concreto se usó un filtro de mediana especialmente útil para remover el ruido de sal-y-pimienta presente en nuestra huella original. Se realizaron experimentos con un filtro de un kernel de 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 píxeles, como resultado se seleccionó el kernel de 3 dado que un kernel mayor difumina en mayor medida las secciones más finas. La Figura 41 muestra el resultado de aplicar un kernel de 3 y uno de 15 píxeles respectivamente.

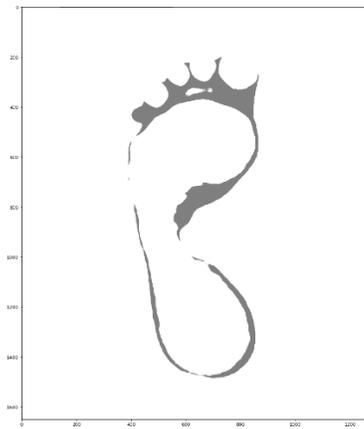
Figura 41. (Superior) Resultado de aplicar un filtro de mediana con un kernel de 3 píxeles. (Inferior) filtro de mediana con un kernel de 15 píxeles. Aunque el resultado en 15 píxeles es un suavizado completo del ruido secciones de interés de la imagen desaparecen, utilizando por tanto un kernel con un buen balance.



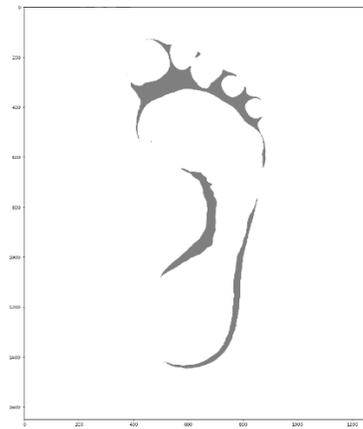
41A



41B



41C



41D

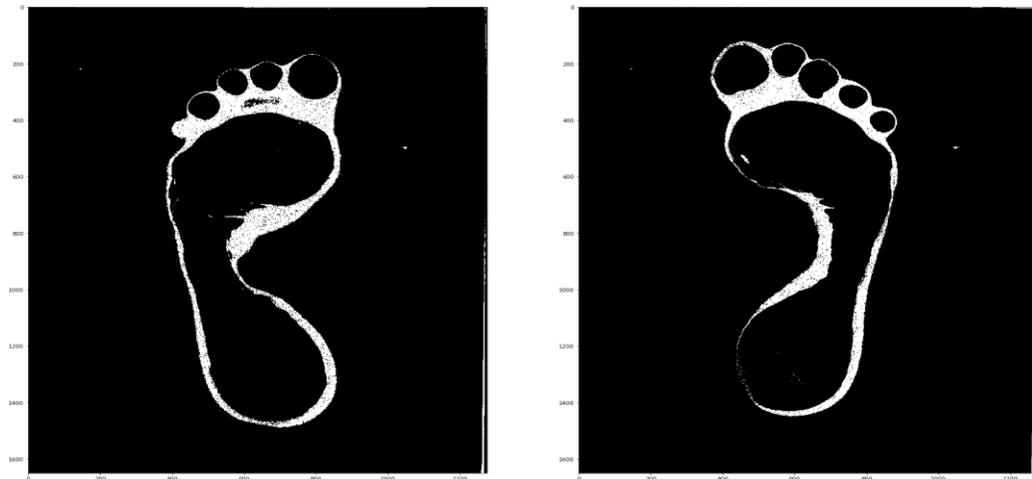
Fuente Autor.

2.2.3. Experimentos con el Umbralizado

El umbralizado es la técnica usada para binarizar la imagen, manteniendo características de interés en pixeles blancos y lo demás en negro. En este caso solo queremos que la huella plantar se mantenga en blanco y todo lo demás en negro. Para este proyecto se experimentó con tres estrategias de umbralizado (la estrategia adaptativa se experimentó, pero no se vio mejoras con respecto Otsu, debido a la naturaleza bi-modal de las imágenes utilizadas). El método simple que consiste en seleccionar un valor T de umbralizado entre 0 y 255 pixeles (recordar que estamos usando el estándar uint8 para nuestras imágenes). Todos los valores mayores a T serán 255 y todos los valores por debajo de T se pondrán en 0. La Figura 42 muestra los resultados usando esta estrategia.

Figura 42. Umbralizado usando una estrategia "simple". El inconveniente con esta estrategia es su naturaleza fija que no se adapta a la imagen en cuestión, y por lo tanto existen regiones dentro de

la huella plantar que no pasan el umbral colocado. Esta estrategia es solo útil cuando las condiciones lumínicas son fijas en la imagen, y este no es el caso.

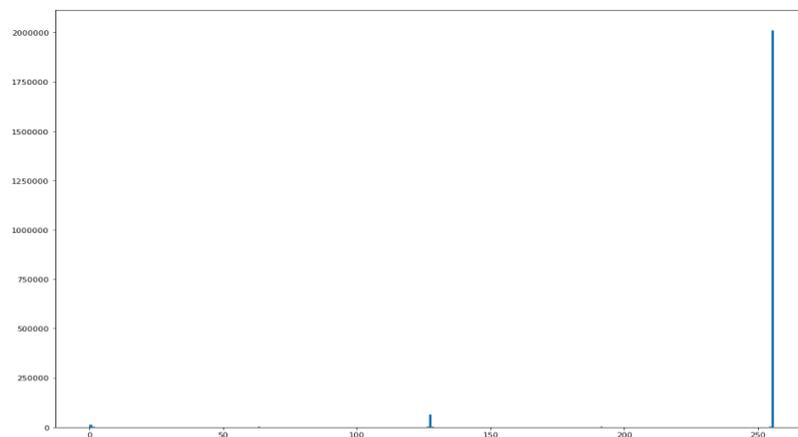


Fuente Autor.

2.2.4. Umbralizado por “Otsu”

La siguiente estrategia a analizar es el umbralizado por “Otsu”, que básicamente calcula el umbral T óptimo dependiendo de las condiciones de luz de la imagen, asumiendo que nuestra imagen contiene dos clases de pixeles: el fondo y el frente, es decir que el comportamiento de los pixeles en nuestra imagen es bi-modal. Al analizar un histograma de la imagen, deberían existir dos picos, uno para el fondo y otro para el frente, tal y como se muestra en la Figura 43.

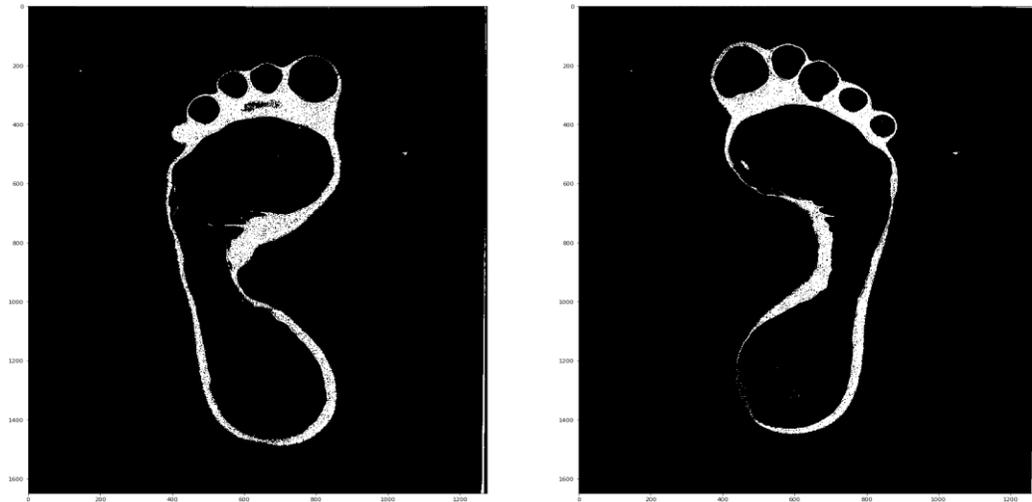
Figura 43. Naturaleza bi-modal de la imagen a escala de grises de la huella plantar derecha, confirmando la hipótesis del umbralizado de Otsu.



Fuente Autor.

El resultado del umbralizado de Otsu sobre ambas huellas plantares se puede ver en la Figura 44.

Figura 44. Resultado producto del umbralizado por Otsu, no se aprecian cambios drásticos con respecto al umbralizado simple debido a que el valor T del anterior se buscó de manera iterativa, en este caso fue de manera automática, siendo robusto ante diferentes huellas.

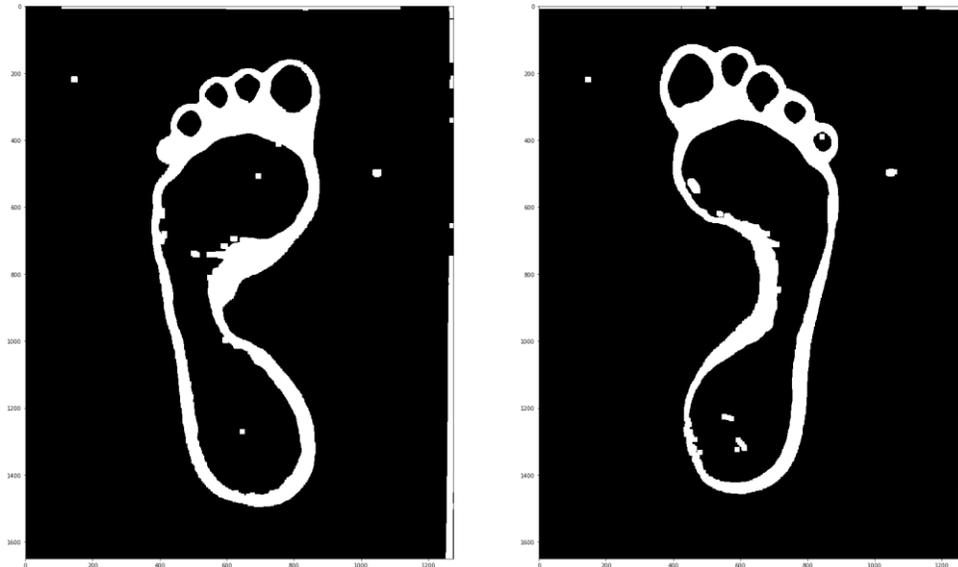


Fuente Autor.

2.2.5. Experimentos con la dilatación

La dilatación es una operación morfológica que consiste en incrementar la región blanca, es decir disminuye el fondo, esta estrategia es muy útil para unir regiones que están separadas. La Figura 45 muestra el resultado de la huella plantar luego de aplicar siete veces la operación de dilatación.

Figura 45. Resultado producto de siete iteraciones de dilatación.



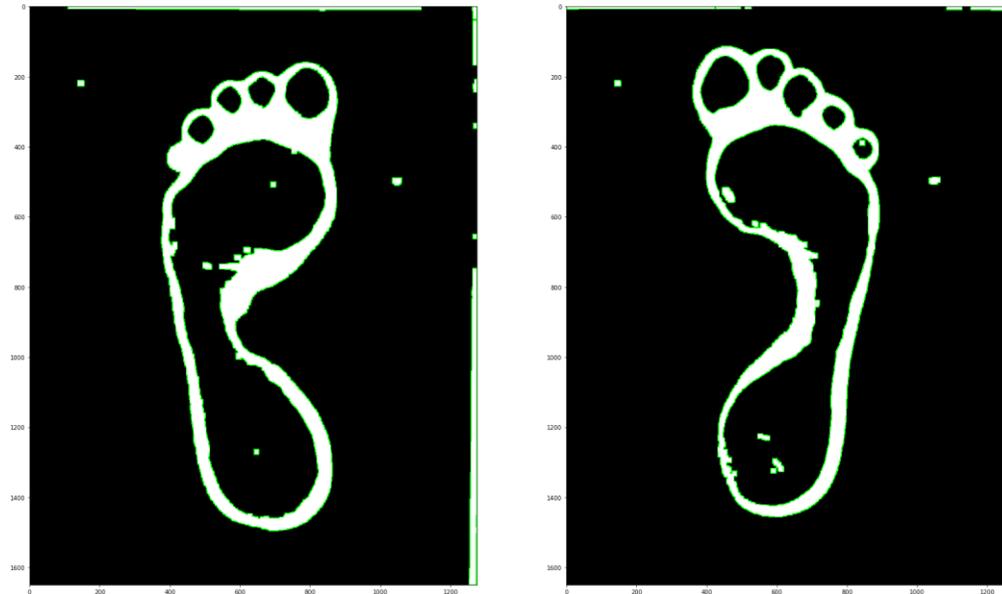
Fuente Autor.

La figura anterior es una buena candidata para una operación conocida como apertura, que consiste en aplicar una erosión (es el proceso inverso a la dilatación), seguida de una dilatación. El objetivo de esta estrategia es eliminar esas pequeñas marcas blancas alrededor y dentro de nuestra huella plantar que nos genera ruido para los procesos siguientes. Sin embargo, los resultados no fueron positivos, y se descartó esta estrategia.

2.2.6. Selección de contornos

Se buscan los contornos tanto internos como externos, dado que es importante recordar que nuestro interés más que en la zona blanca plantar, se encuentra sobre la parte interna de esa zona blanca. Es decir, la huella como tal. La Figura 46 muestra la imagen binaria con los contornos pintados.

Figura 46. Contornos internos y externos



Fuente Autor.

2.2.7. Filtrar contornos

La estrategia de filtrado consiste en encontrar el contorno con la mayor área, esta área es la perteneciente a la zona blanca de la huella plantar.

- El primer filtro es eliminar todo contorno blanco externo al área más grande.
- El segundo filtro usa la jerarquía de los contornos para poner negro todos aquellos contornos que se encuentren dentro de otro contorno, en este caso solo se afectaría los puntos blancos dentro de la huella. El resultado final se encuentra en la Figura 47.

Figura 47. Resultado del filtro de contornos

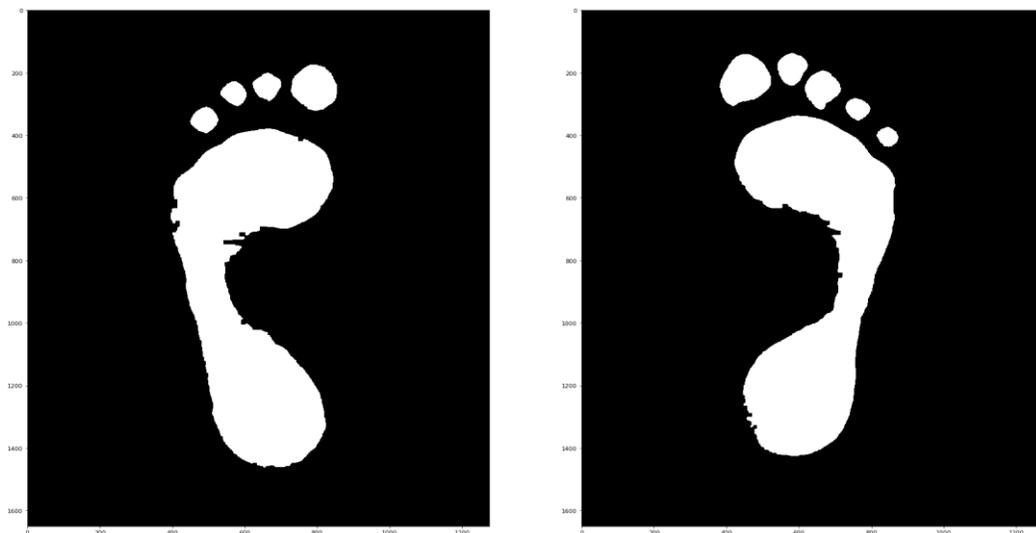


Fuente Autor.

2.2.8. Método inverso de colores

Por último se invierte los colores de la imagen, pero dejando blanco solo el área de interés, tal y como se muestra en la Figura 48.

Figura 48. Huella resultante final



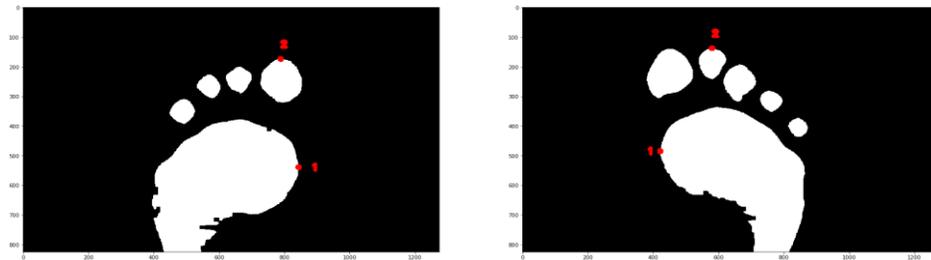
Fuente Autor.

2.2.9. Encontrando los puntos 1 y 2

Se divide la imagen por la mitad, el punto 1 se encuentra al buscar el píxel blanco más hacia la izquierda para el caso del pie derecho, y más hacia la derecha en el caso del pie izquierdo del contorno más grande, es decir, sin tener en cuenta los dedos del pie.

Por su parte el punto 2 se encuentra al buscar el primer píxel blanco de arriba hacia abajo, tanto para el pie derecho como para el izquierdo, normalmente corresponde al dedo gordo, pero tal y como se muestra en la Figura 49, esto no siempre es así.

Figura 49. Búsqueda de los puntos 1 y 2 en la imagen

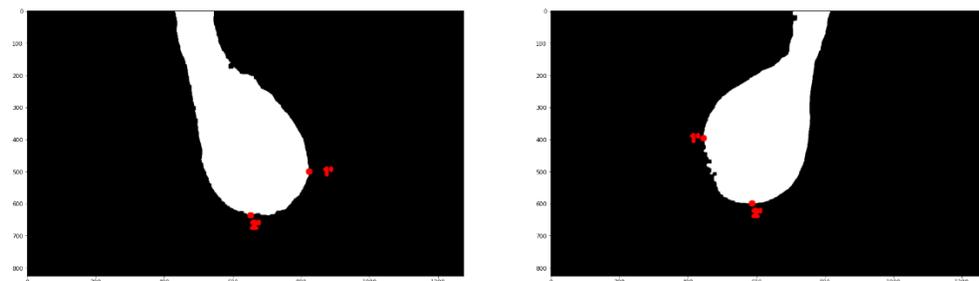


Fuente Autor.

2.2.10. Encontrando los puntos 1' y 2'

La razón de dividir la imagen por la mitad es que el punto 1' es la sección más hacia la izquierda o la derecha (dependiendo del pie), pero de la parte inferior, es por ello por lo que es más simple aislar ambas secciones. Para encontrar el punto 1' como se dijo anteriormente, se debe encontrar el píxel blanco más hacia la derecha para el caso del pie izquierdo, y más hacia la izquierda en el caso del pie derecho. Y por último para el punto 2' simplemente es el primer píxel blanco de abajo hacia arriba, tal y como se muestra en la Figura 50.

Figura 50. Búsqueda de los puntos 1' y 2' en la imagen

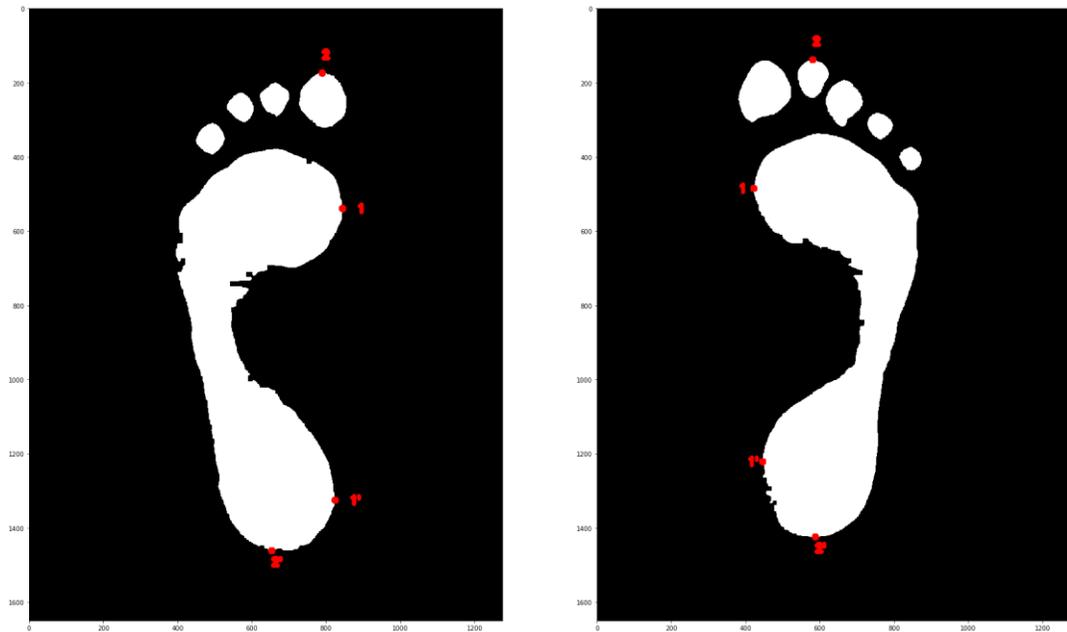


Fuente Autor.

2.2.11. Unión de las imágenes divididas junto con los puntos 1, 1' y 2, 2'

Finalmente se unen ambas secciones, contando con la ubicación de los punto 1, 1' y 2, 2' tal y como se muestra en la Figura 51.

Figura 51. Puntos de referencia finales.

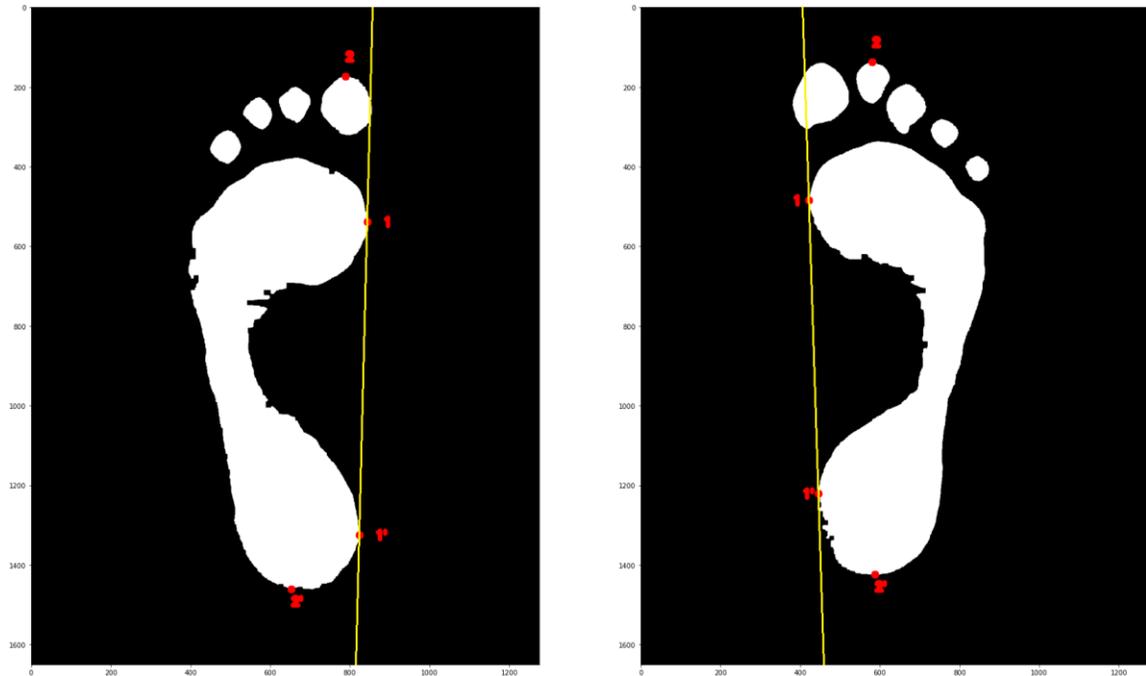


Fuente Autor.

2.2.12. Línea base de intersección entre los puntos 1, 1'.

En este paso, se traza una línea visible que permita hacer una intersección entre los puntos principales 1 y 1' con el fin de tener una línea guía como base, para posteriores derivaciones que cumplan con la condición estricta de perpendicularidad o paralelismo, según las necesidades.

Figura 52. Línea base de intersección entre 1 y 1'



Fuente Autor.

2.2.13. Calculo de la función punto pendiente de la línea de intersección del punto 2.

En esta sección se da uso de la función punto pendiente de m_1 y m_2 , para dar certeza que las dos líneas queden totalmente perpendicular una de la otra. La función que se emplea es la siguiente:

$$m_1 * m_2 = -1$$

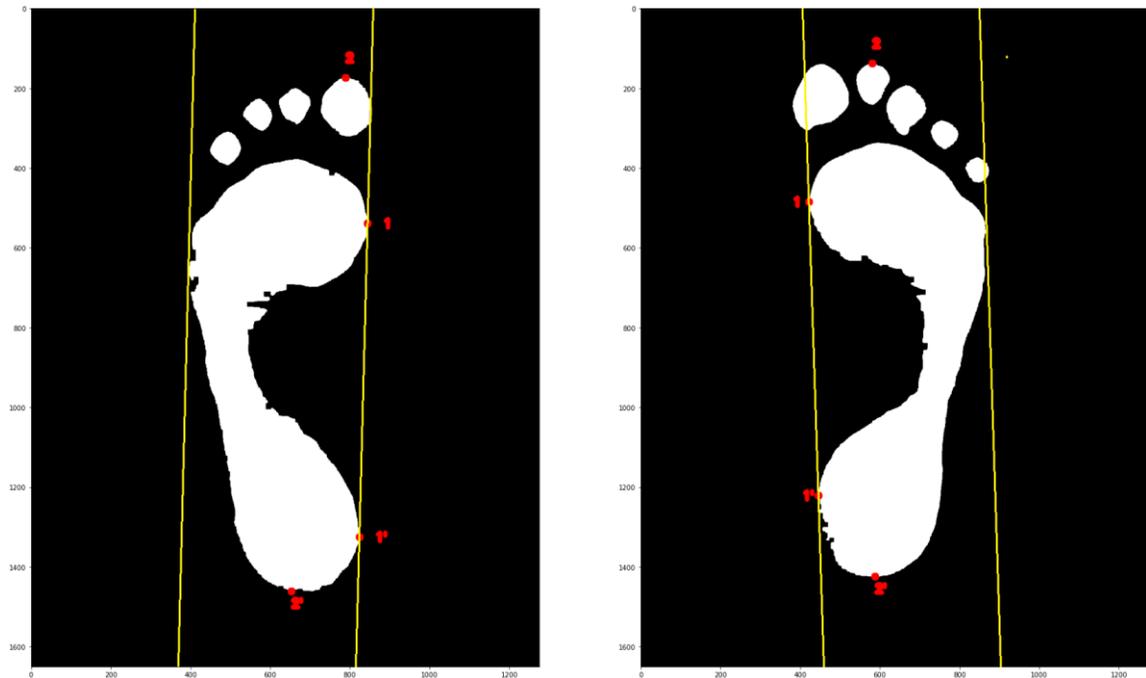
Al conocer la pendiente m_1 , el siguiente paso es despejar m_2 de la siguiente manera:

$$m_2 = \frac{-1}{m_1}$$

Ya despejada la pendiente m_2 , se concluye que las pendientes m_1 y m_2 tienen que estar inversamente proporcionales garantizando que las líneas se intersecten a un ángulo de 90 grados. El mismo procedimiento aplica para la línea paralela a la línea base, dándole

de nombre a la nueva pendiente como m_3 , donde a lo último a cada pendiente se calcula dos puntos para visualizar las líneas tal y como lo muestra en la Figura 53.

Figura 53. Calculo de las líneas perpendicular y paralela a la línea base.

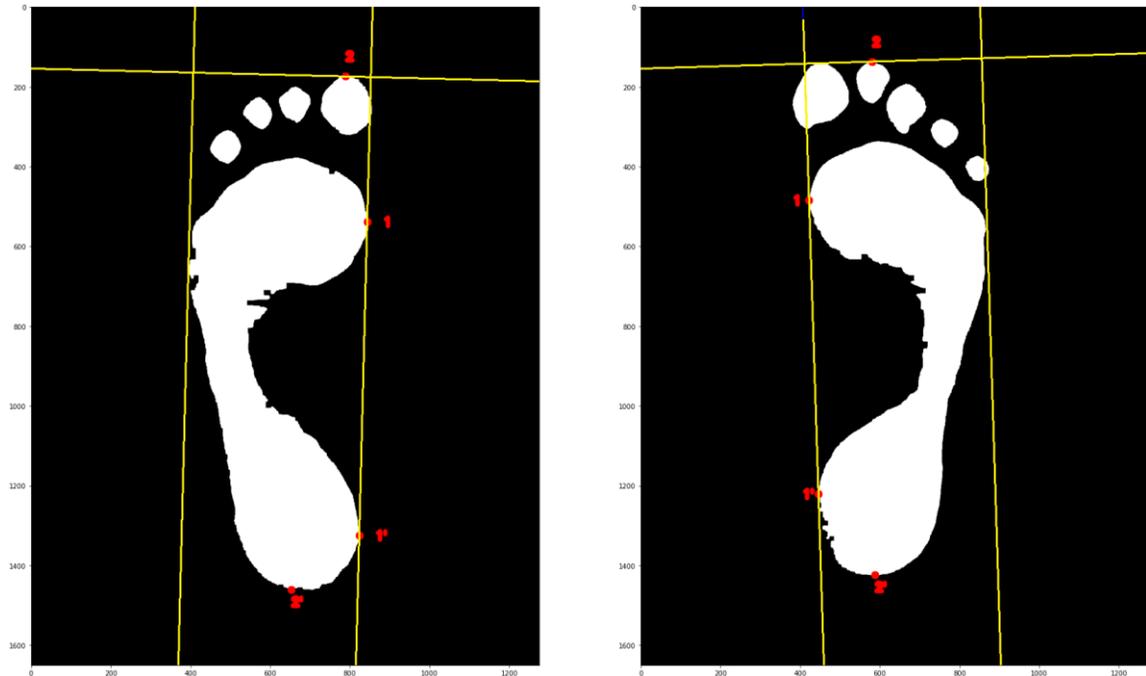


Fuente Autor.

2.2.14. Calculo de la función punto pendiente de la línea de intersección del punto 2'.

Para este caso se hace el mismo procedimiento que el punto anterior, tomando como referencia la pendiente m_1 de la línea base que interseca los puntos 1 y 1', nombrando la nueva pendiente calculada como m_4 , y por último se calcula dos puntos para la recta que se va a trazar, teniendo como resultado la Figura 54.

Figura 54. Calculo de la línea perpendicular a la línea base de intersección 1 y 1'

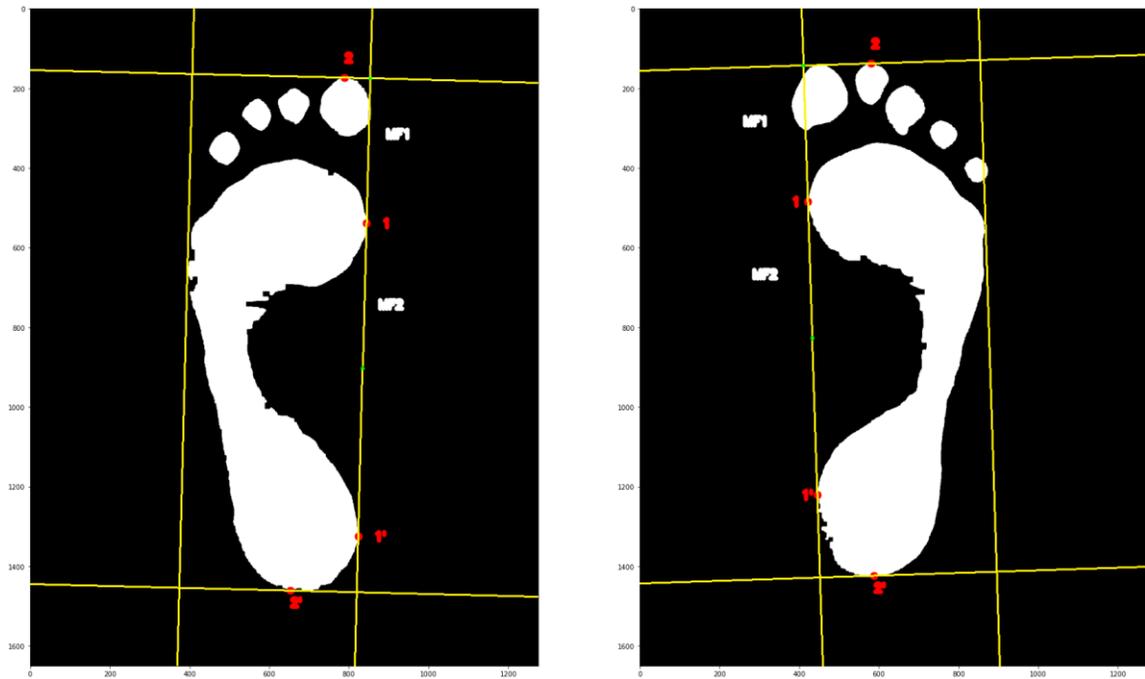


Fuente Autor.

2.2.15. Ubicación del punto de intersección de la línea base m1 con la línea perpendicular m2

Como proceso siguiente se determina con un punto verde la intersección de las líneas de pendientes m1 y m2, para poder calcular la medida fundamental (mf), entre el punto de intersección y el punto 1, dándole nombre como medida fundamental 1 (mf1). Ya calculada esa distancia, se recorre dicho valor por la línea base partiendo desde el punto 1 hacia abajo, obteniendo la medida fundamental 2 (mf2).

Figura 55. Ubicación y cálculo de las medidas fundamentales mf1 mf2.



Fuente Autor.

2.2.16. Calculo del Método de Hernández Corvo.

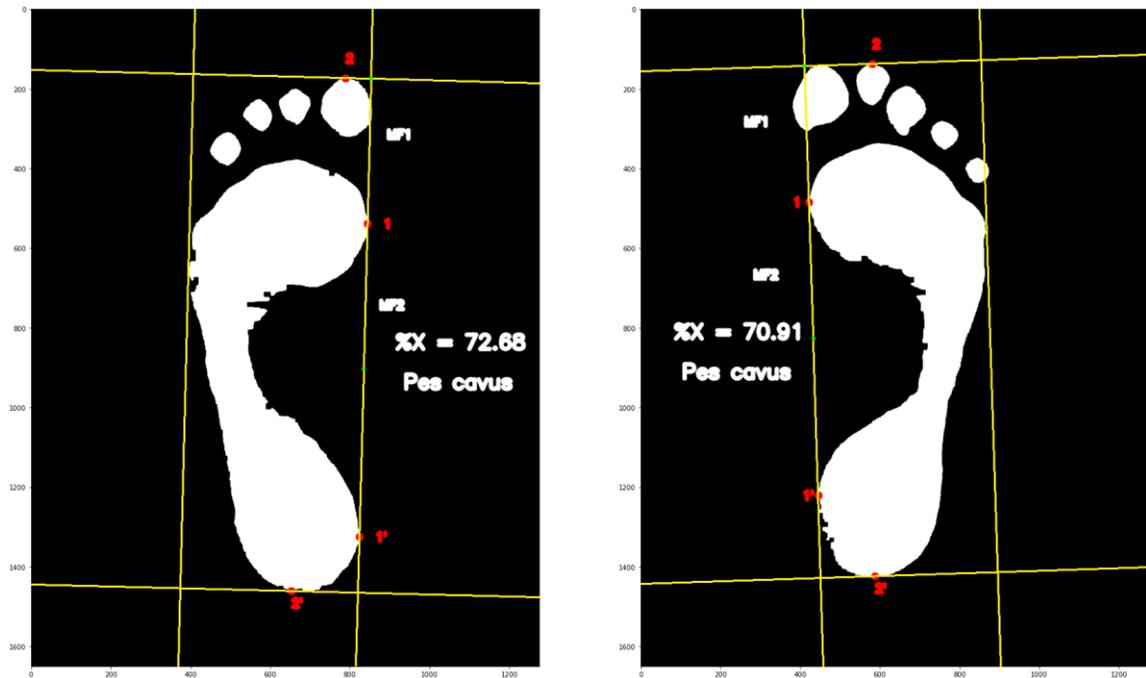
Para finalizar, se calcula la variable de porcentaje X por medio de la función siguiente:

$$\%X = \frac{(X - Y)}{X} * 100$$

Se calcula como (X), la distancia entre el punto de la medida fundamental 1 (mf1) y el punto de intersección con la línea paralela a la línea base. Y la variable (Y), se calcula haciendo un recorrido desde el punto de intersección de la medida fundamenta 2 (mf2), trazando una línea imaginaria perpendicular a la línea base, hasta encontrar un pixel blanco; luego inicia la medida partiendo desde el pixel blanco siguiendo su trayecto hasta encontrar un pixel negro. Sin contar el pixel negro se hace una resta de -1 para obtener la medida real de (Y) y posteriormente se reemplaza en la ecuación de Hernández Corvo, obteniendo el cálculo porcentual en (X). Por último, de acuerdo al valor porcentual se

declaran siete condiciones, donde si el resultado aplica para un rango en específico, el programa muestra en pantalla el diagnóstico final del paciente.

Figura 56. Diagnóstico fina del paciente.



Fuente Autor.

2.3. ETAPA II: DISEÑO SIMPLIFICADO

Para esta etapa, se tuvo en cuenta partiendo del punto de vista del especialista, el grado de complejidad en cuanto al manejo del programa. Cuando el podólogo tenga acceso a él, su interfaz gráfica debe ser atractivo en cuanto a las funciones principales empezando por dos ventanas donde ubiquen la muestra de las dos huellas plantares que represente el proceso de ejecución del programa, tal y como se muestra en la figura 18.

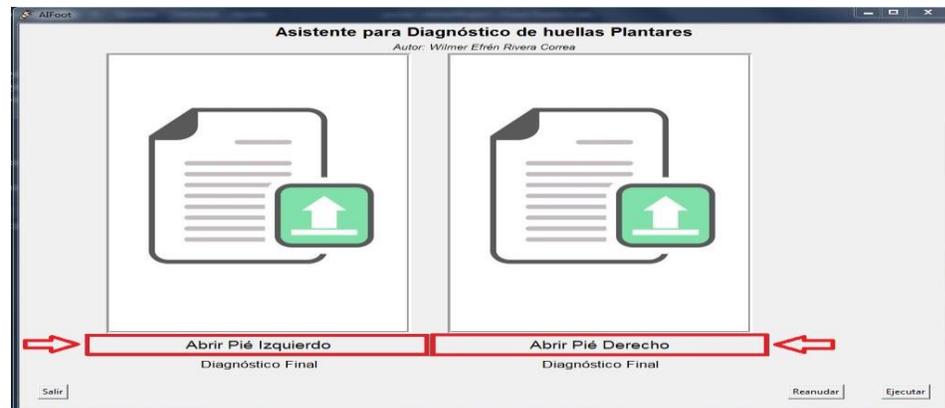
Figura 57. Representación del diseño gráfico para cargar las muestras a analizar.



Fuente Autor.

Seguidamente en la parte inferior encontramos dos botones denominados “**Abrir Pie Izquierdo**” y “**Abrir Pie Derecho**”, donde su principal función me permite redireccionar a la ubicación de la carpeta donde esta recopilada la data.

Figura 58. Representación del diseño gráfico para los botones de redireccionamiento a la base de datos.



Fuente Autor.

Ubicándonos en el siguiente espacio de arriba hacia abajo, encontramos dos posiciones denominados “**Diagnóstico Final**” tanto para el pie izquierdo como para el pie derecho, donde consiste en visualizar el grado porcentual resultante y el diagnóstico patológico que representa la huella plantar.

Figura 59. Representación del diseño gráfico para los espacios de diagnóstico final.



Fuente Autor.

Ahora, basándonos en la última fila de la interfaz gráfica encontramos tres comandos por botón, en donde el primero de izquierda a derecha se ubica el botón de **“Salir”**, la cual permite al especialista, ocultar la ventana de la interfaz de manera permanente al momento de haber terminado de analizar todas las muestras.

Figura 60. Representación del diseño gráfico para el comando “Salir”.



Fuente Autor.

El siguiente comando por botón se denomina **“Reanudar”**, y su función permite borrar un diagnóstico anteriormente ejecutado, llevando a la interfaz gráfica a su estado inicial para cargar la siguiente muestra.

Figura 61. Representación del diseño gráfico para el comando “Reanudar”.



Fuente Autor.

Para finalizar, dando paso al comando “**Ejecutar**”, ubicado en la parte inferior derecha de la interfaz gráfica, redirecciona al proceso de activación del código fuente, para su respectivo análisis o diagnóstico a mostrar.

Figura 62. Representación del diseño gráfico para el comando “Ejecutar”.



Fuente Autor.

2.4. ETAPA V: PRODUCTO FINAL

En este paso, se obtiene el producto finalizado dando la apertura al manejo confiable del programa para que el usuario o el especialista tengan completo control sobre el mismo. Al momento de ejecutarlo se tendrán en cuenta una serie de pasos que a continuación se dará a conocer a manera de manual.

2.4.1. MANUAL DE USUARIO

El presente manual dará a conocer el correcto funcionamiento del programa para poder obtener los análisis de manera ordenada y de calidad.

PASO No 1: Se obtiene la muestra de manera digital con la ayuda de una impresora que tenga escáner.

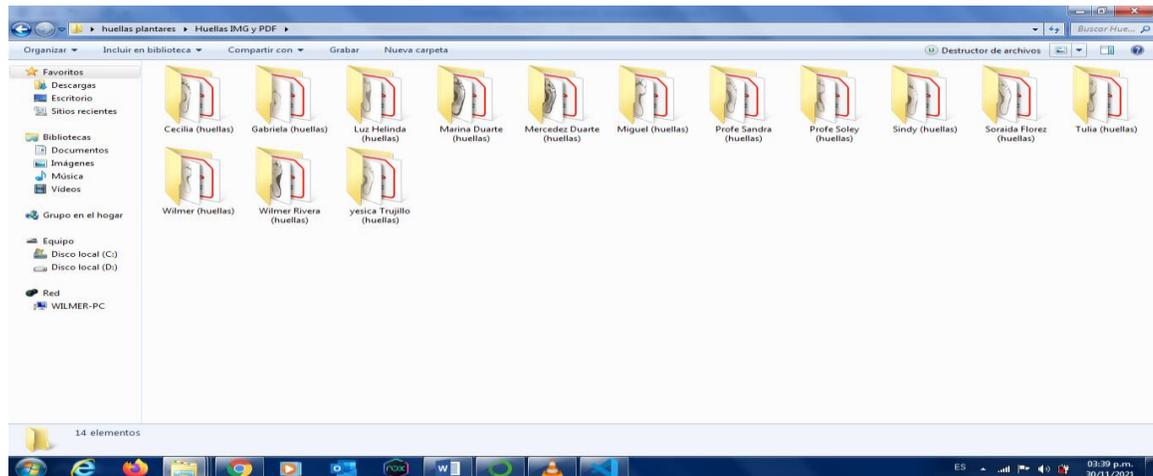
Figura 63. Imagen de una impresora con scanner.



Fuente.

PASO No 2: Se forma una base de datos lista para procesar las imágenes, guardándola en el equipo con el programa abierto y listo para usar.

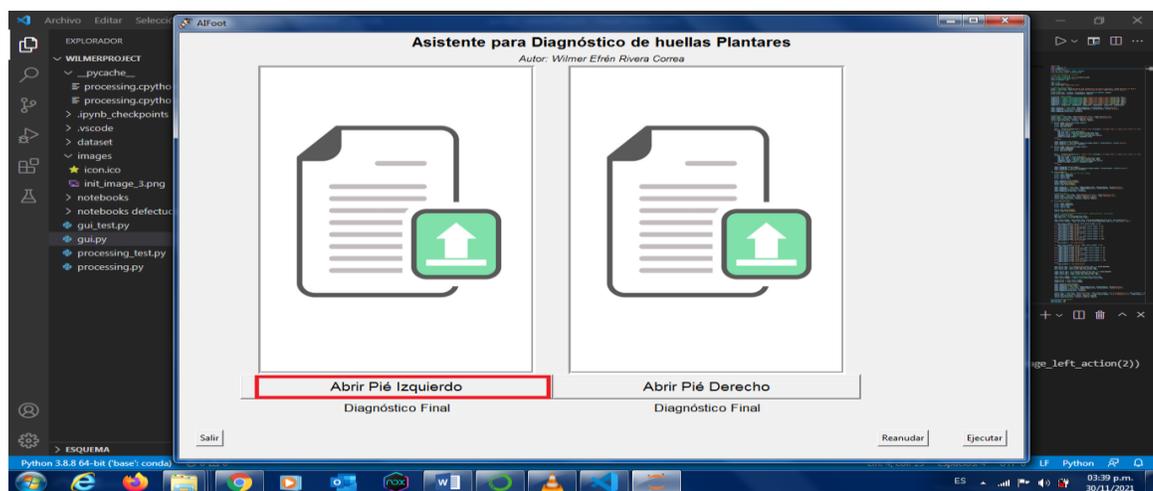
Figura 64. Carpeta compuesta por las muestras analizar.



Fuente Autor.

PASO No 3: Con la ayuda de la interfaz gráfica del programa, nos dirigimos a cargar la primera huella plantar con la ayuda del botón **“Abrir Pie Izquierdo”**, tal y como se muestra en la Figura 65

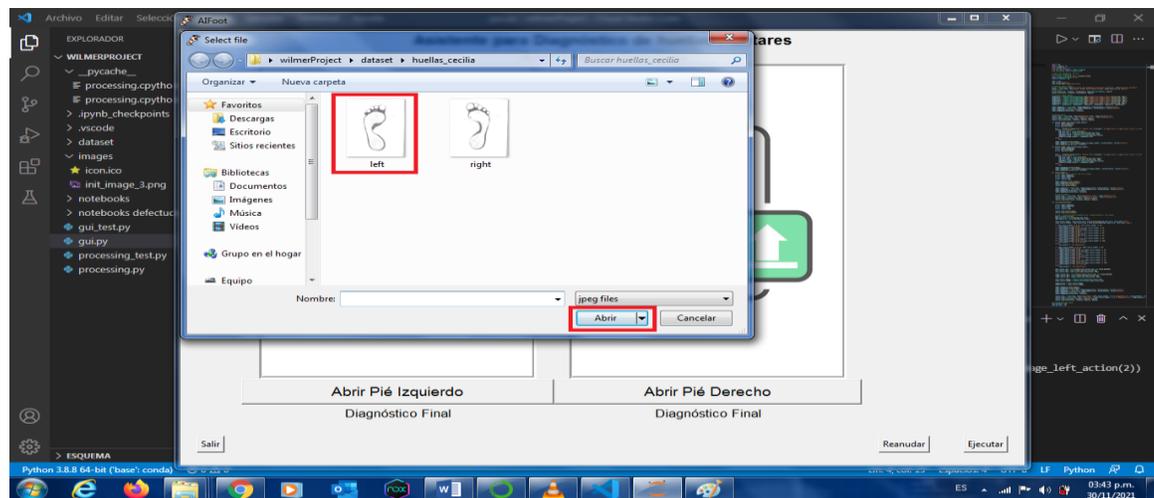
Figura 65. Redireccionamiento a la primera huella plantar con ayuda de la interfaz gráfica.



Fuente Autor.

PASO No 4: Automáticamente nos redirecciona a la carpeta donde están guardadas las muestras a analizar. Seleccionamos la huella correspondiente a cargar. En este caso la huella del pie Izquierdo y por ultimo de damos clic al botón “Abrir”.

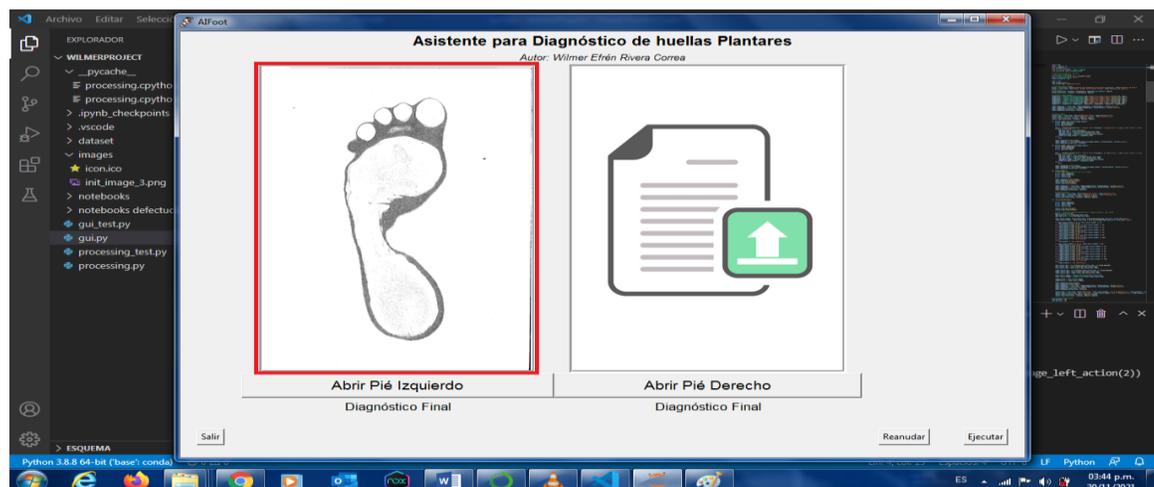
Figura 66. Selección de la primera huella plantar con ayuda de la interfaz gráfica.



Fuente Autor.

Como podemos ver, la huella plantar del pie izquierdo fue cargada de manera exitosa.

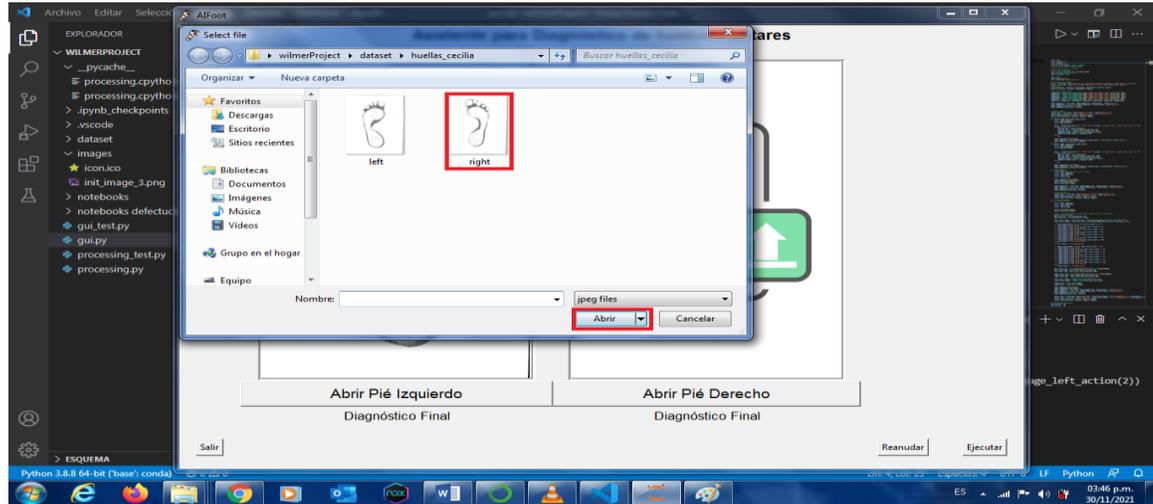
Figura 67. Primera huella planta cargada a la interfaz gráfica.



Fuente Autor.

PASO No 5: Seguidamente hacemos el mismo procedimiento con el botón “**Abrir Pie Derecho**”, donde se redireccionará a la carpeta donde tiene la base de datos a analizar. Seleccionamos la muestra del pie derecho en este caso, y le damos clic al botón “**Abrir**”.

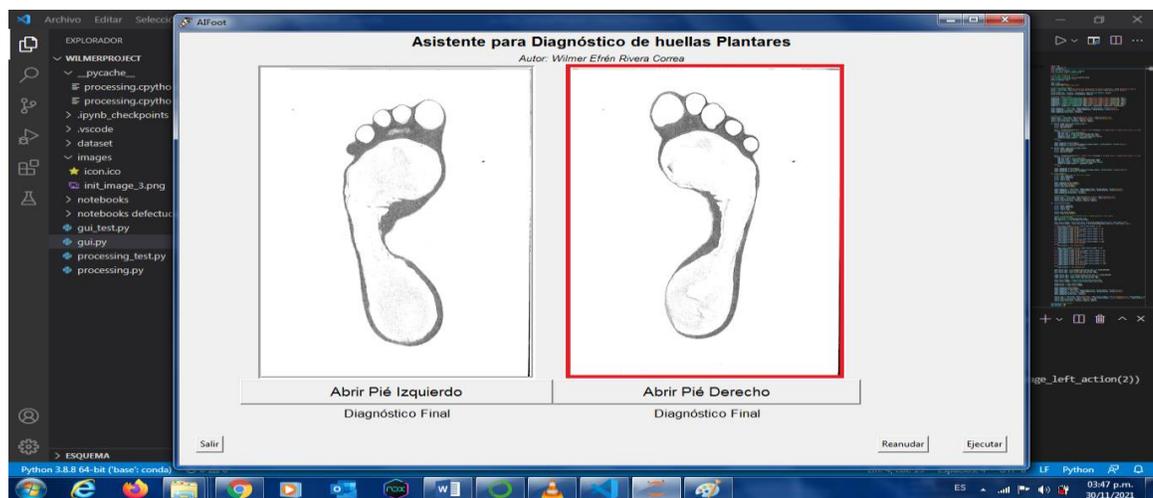
Figura 68. Selección de la segunda huella plantar con ayuda de la interfaz gráfica.



Fuente Autor.

Vemos claramente que la segunda huella plantar se cargó de manera exitosa.

Figura 69. Segunda huella planta cargada a la interfaz gráfica.



Fuente Autor.

Cabe resaltar que cada huella plantar debe de estar bautizada con el nombre de “**Pie Izquierdo**” ó “**Pie Derecho**”, según corresponda.

NOTA: Dado el caso de que se haya cargado la huella plantar en la ventana incorrecta, simplemente se dirige al botón “**Reanudar**” para borrar las muestras y se repite los pasos del 3 al 5.

PASO No 6: Ya cargada la muestra completa de manera correcta, se procede a correr el programa, dándole click al botono “**Ejecutar**”, para que internamente haga los cálculos correspondientes.

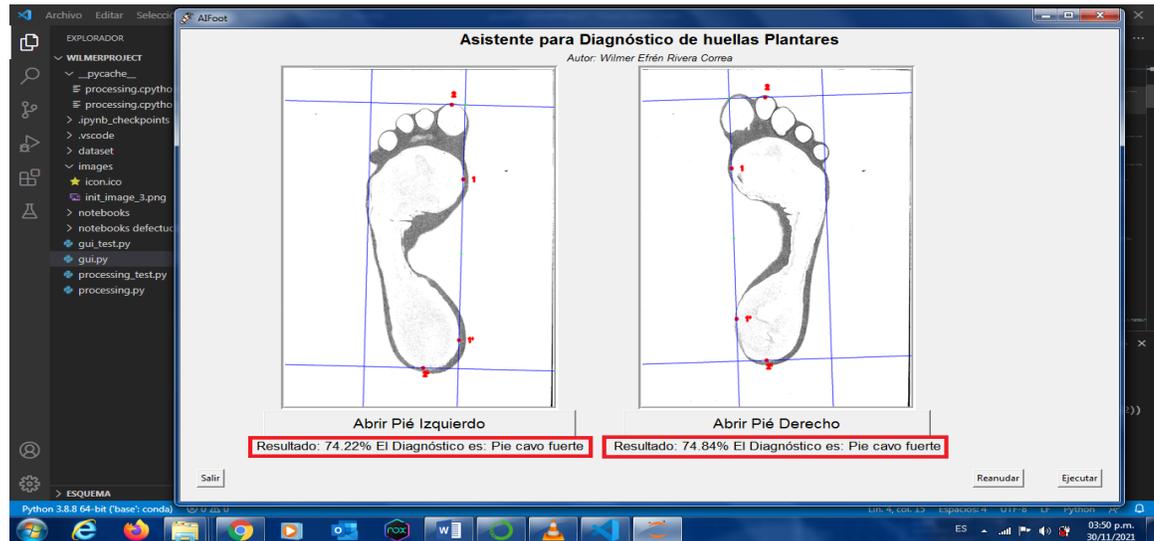
Figura 70. Primera muestra lista para ejecutar.



Fuente Autor.

PASO No 7: Al terminar de analizar la muestra, el programa arrojará un diagnóstico completo dividido por un resultado porcentual y posteriormente el tipo de pie que se le presenta al paciente en ambas huellas plantares.

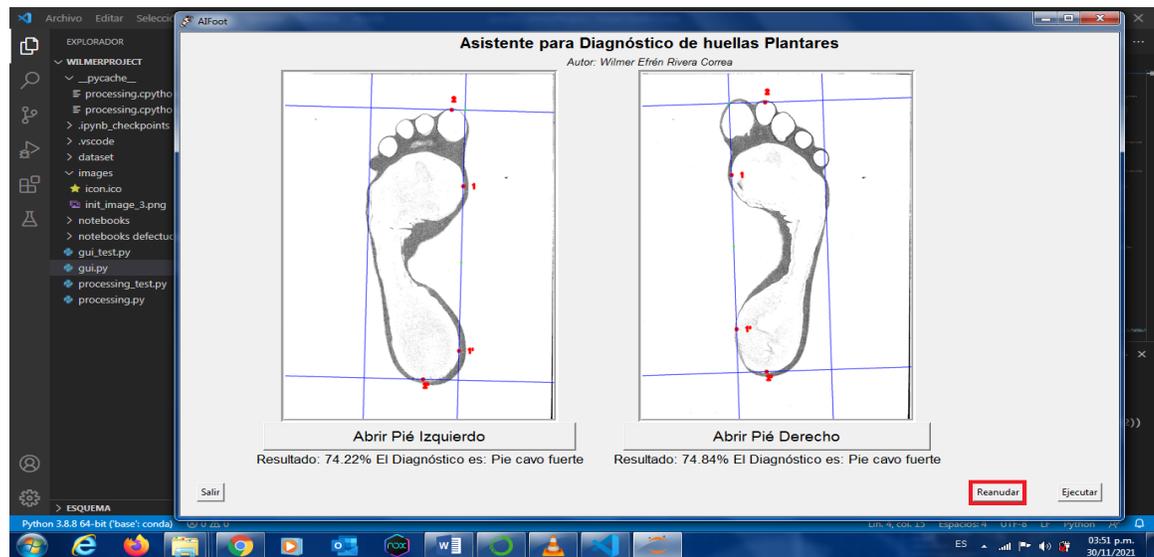
Figura 71. Diagnostico resuelto por el asistente de programa.



Fuente Autor.

PASO No 8: Por ultimo para seleccionar la siguiente muestra, pulsamos el botón “Reanudar” para borrar la muestra analizada anterior y se repite los pasos del 3 en adelante.

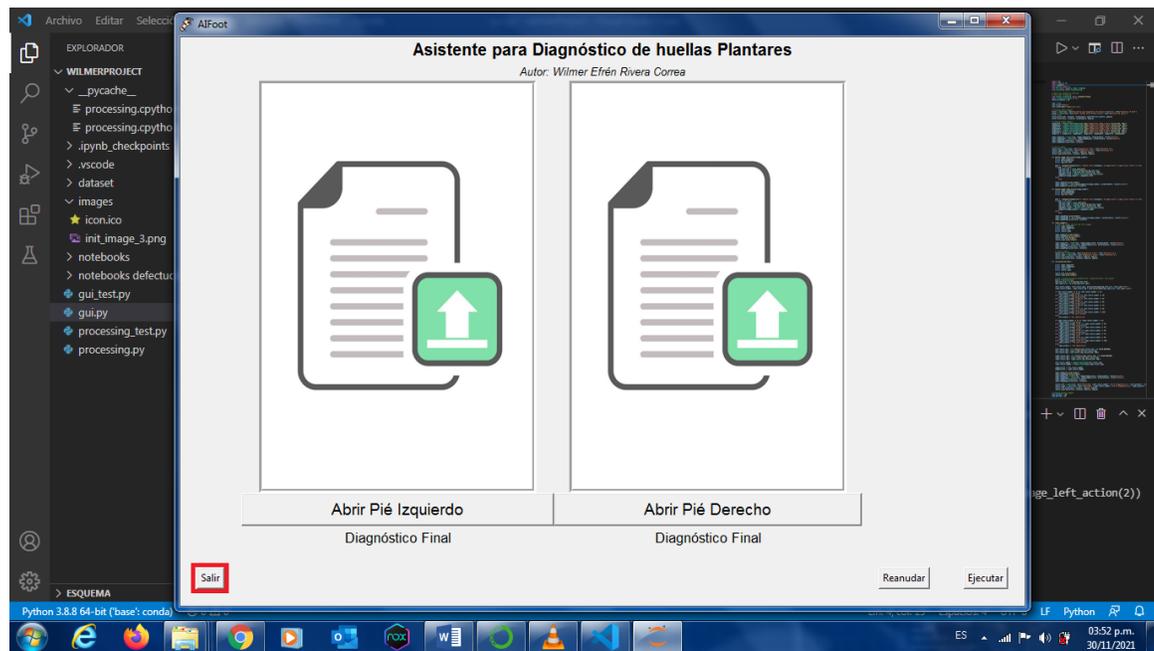
Figura 72. Selección del botón “Reanudar” para llevar el asistente a su estado inicial.



Fuente Autor.

PASO No 9: Ya completado el análisis de todas las muestras, se dirige al botón de “Salir”, para finalizar el programa.

Figura 73. Finalización de la ejecución del programa.



Fuente Autor.



CAPÍTULO III

RESULTADOS

En éste capítulo se esboza la toma de huellas plantares para la construcción de la base de datos, selección de las técnicas de procesamiento de las mismas y funcionamiento del software desarrollado

3. RESULTADOS DEL PROYECTO.....	94
CONCLUSIONES	115
RECOMENDACIONES	117
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS E INFOGRÁFICAS	118

3. RESULTADOS DEL PROYECTO.

Se estimaron sacar las muestras por recomendación de la especialista otorgando una serie de criterios a seguir teniendo en cuenta el papel fax y alcohol etílico para humedecer la planta de los pies. Al sacar las muestras con estos materiales, se ve una clara huella la cual se aprueba para el proceso respectivo.

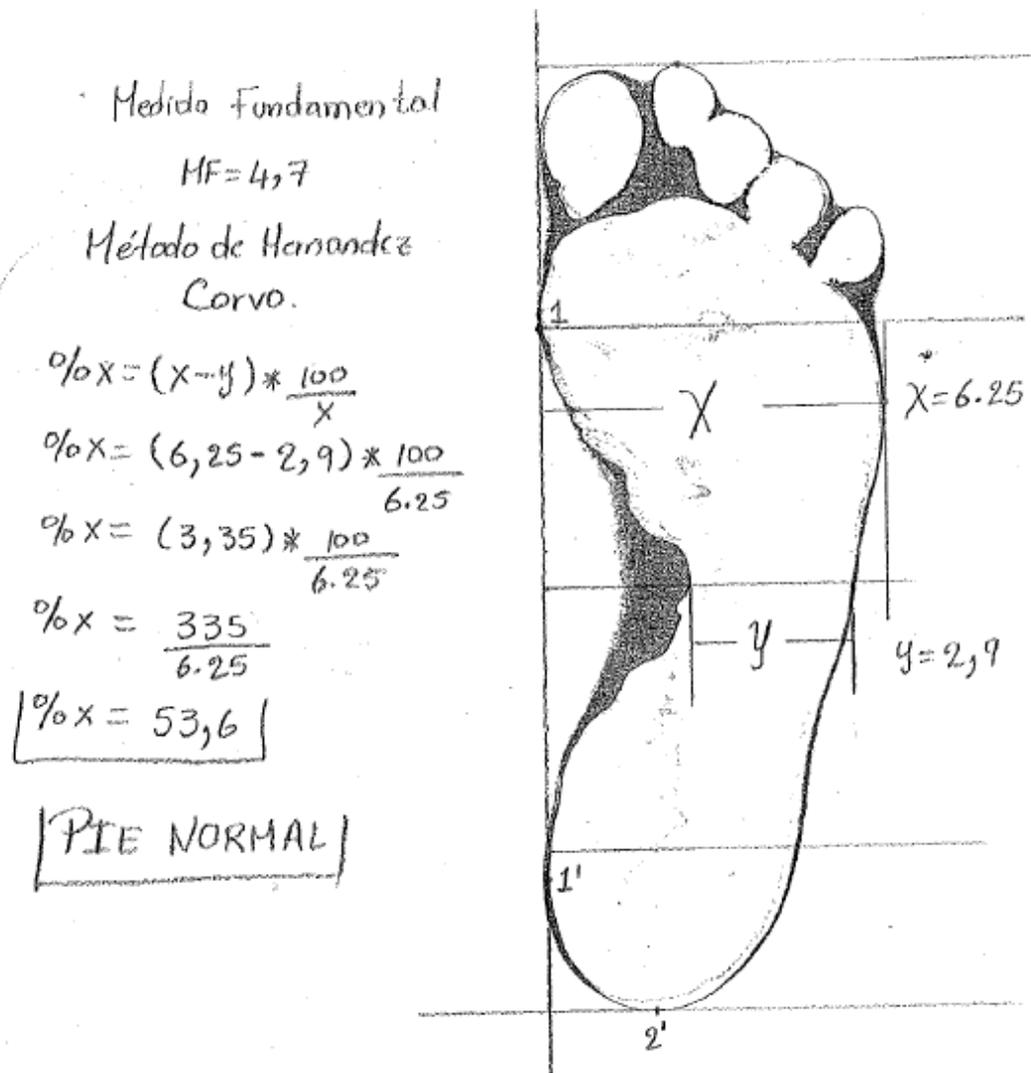
Figura 74. Recopilación de muestras.



Fuente Autor.

Al tomar las muestras, la especialista dio el proceso de análisis para cada muestra a procesar con el método más conocido en ese campo denominado Hernández Corvo, tal y como se muestra en la siguiente figura.

Figura 75. Proceso de análisis por la especialista a mano alzada



Fuente Autor.

Gracias a las pruebas pertinentes, se dio a conocer la efectividad del programa, notando algunas deficiencias para varias muestras que efectivamente no se pudieron leer debido a un notorio color negro en toda la huella plantar. Debido a eso el programa es imposible hacer los cálculos respectivos por su alta concentración de ruido denominado sal y pimienta. La tabla que se mostrará a continuación, refleja las pruebas realizadas por el programa.



Tabla 4. Pruebas hechas por el asistente de programa.

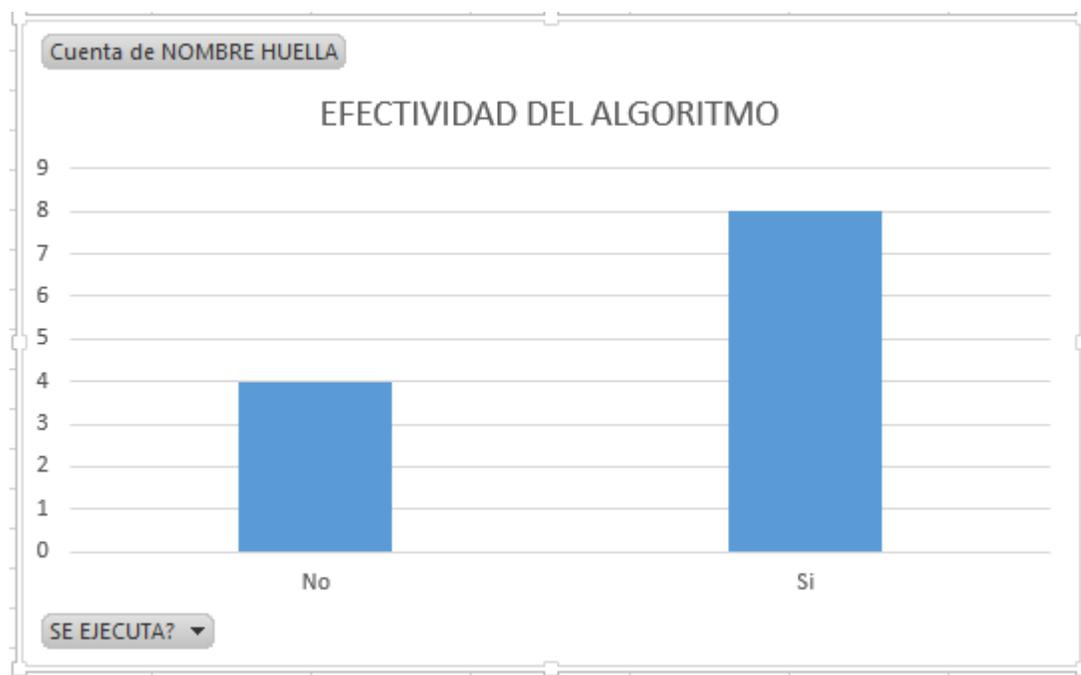
NOMBRE HUELLA	PROCESADA	SE EJECUTA?	MEDIDA POR ALGORITMO O IZQUIERDO (%)	MEDIDA POR ALGORITMO DERECHO (%)	MEDIDA POR ESPECIALISTA IZQUIERDO (%)	MEDIDA POR ESPECIALISTA DERECHO (%)
PACIENTE 1 (FEMENIDO)	Si	Si	74.22	74.64	71.7	74.05
PACIENTE 2 (FEMENINO)	Si	No				
PACIENTE 3 (FEMENIDO)	Si	No				
PACIENTE 4 (FEMENIDO)	Si	Si	99.43	48.68	46.25	52.9
PACIENTE 5 (MASCULINO)	Si	No				
PACIENTE 6 (FEMENIDO)	Si	Si	60.38	61.17	68.75	55.8
PACIENTE 7 (FEMENIDO)	Si	Si	78.8	71.65	71.52	73.41
PACIENTE 8 (FEMENIDO)	Si	No				
PACIENTE 9 (FEMENIDO)	Si	Si	16.6	54.22	62.87	50.58
PACIENTE 10	Si	Si	63.86	66.21	62.2	55.5

(MASCULINO)						
PACIENTE 11 (MASCULINO)	Si	Si	34.66	43.06	52.38	54.01
PACIENTE 12 (FEMENINO)	Si	Si	87.80	59.28	54.44	58.8

Fuente Autor.

Dando una ponderación de la efectividad del algoritmo al momento de ejecutarse, se estimó para la mayoría de las muestras que si es eficiente al momento de su funcionamiento, tal y como se muestra en la figura 74.

Figura 76. Avance de efectividad del algoritmo.

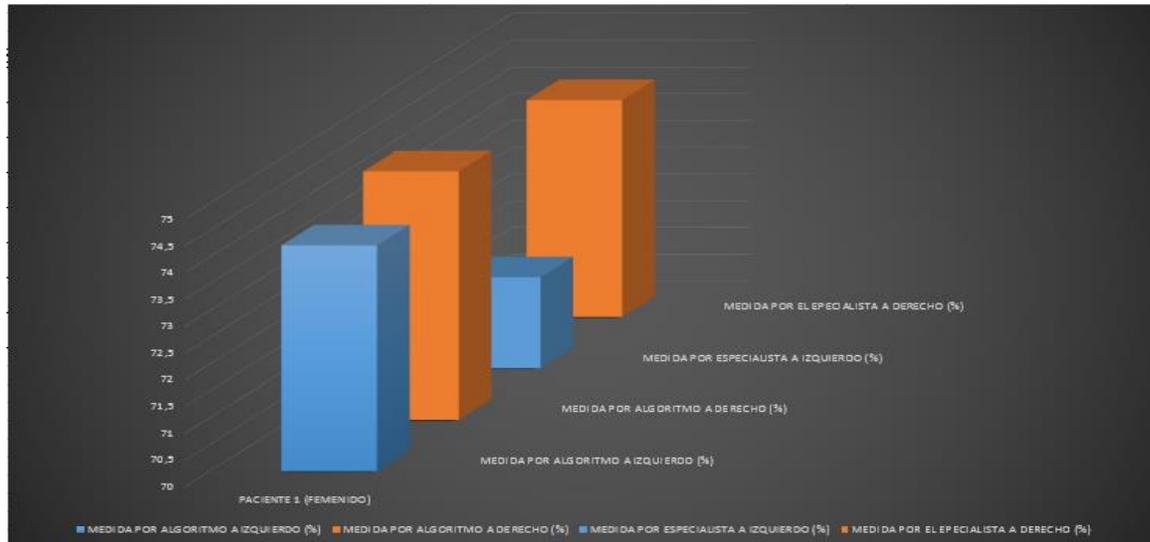


Fuente Autor.

A continuación se especifica los resultados que se sacó con el algoritmo, al comparar con los resultados de la especialista sacados a mano alzada. Cabe destacar que para algunas muestras hay un error porcentual considerable y eso se debe a que las muestras todavía se tornan con ruido de sal y pimienta donde al momento de su ejecución con el asistente

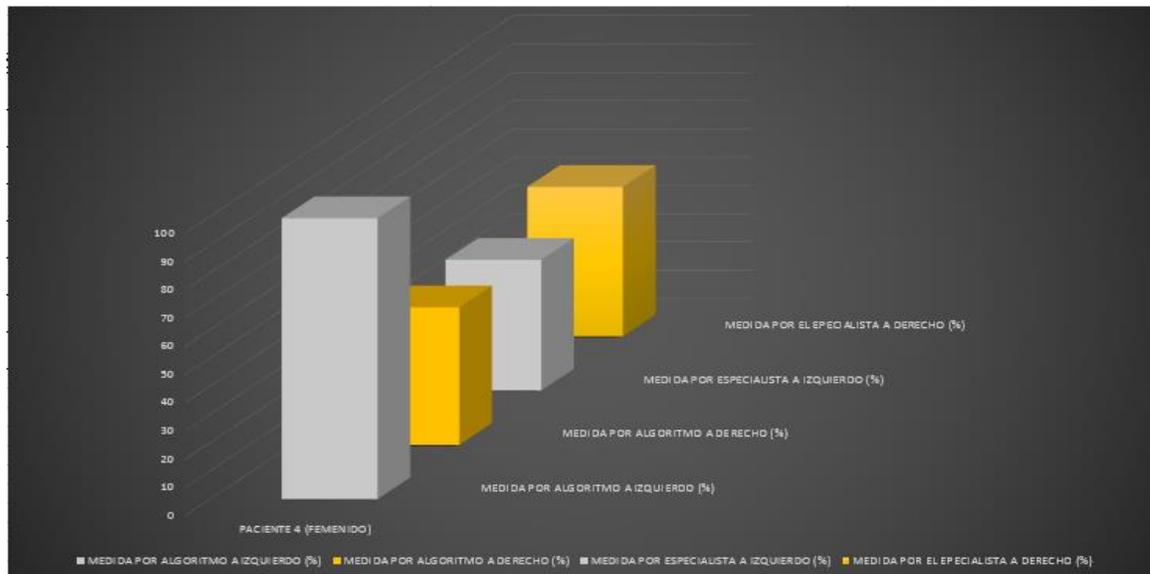
algorítmico en su toma de puntos específicos en su modalidad automática, no los toma y argumenta puntos al azar. Este error se resuelve al tomar los puntos de manera manual en donde el especialista los selecciona y el algoritmo ejecuta los cálculos geométricos correspondientes para su diagnóstico final.

Figura 77. Diagnóstico porcentual con algoritmo y especialista paciente 1.



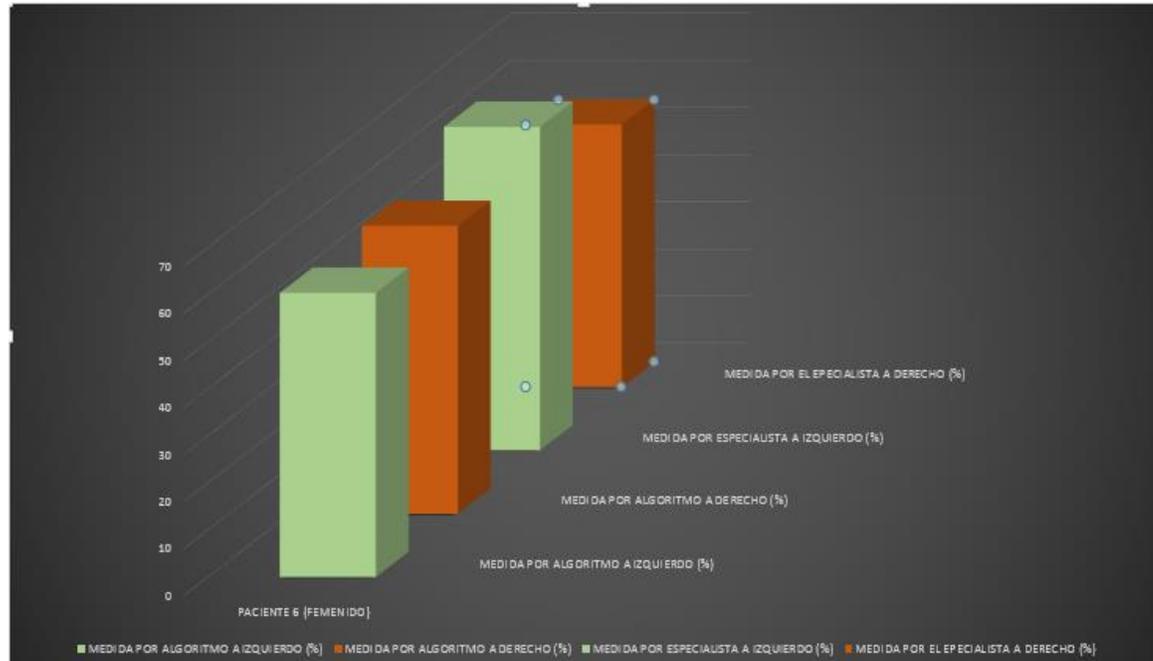
Fuente Autor.

Figura 78. Diagnóstico porcentual con algoritmo y especialista paciente 4.



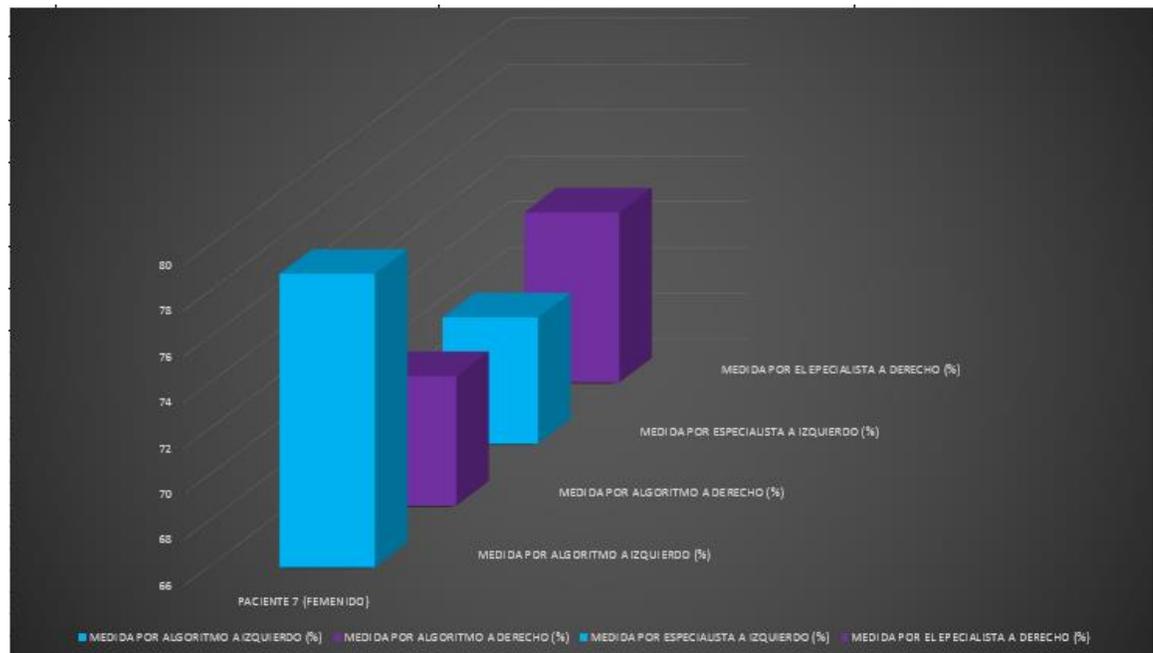
Fuente Autor.

Figura 79. Diagnóstico porcentual con algoritmo y especialista paciente 6.



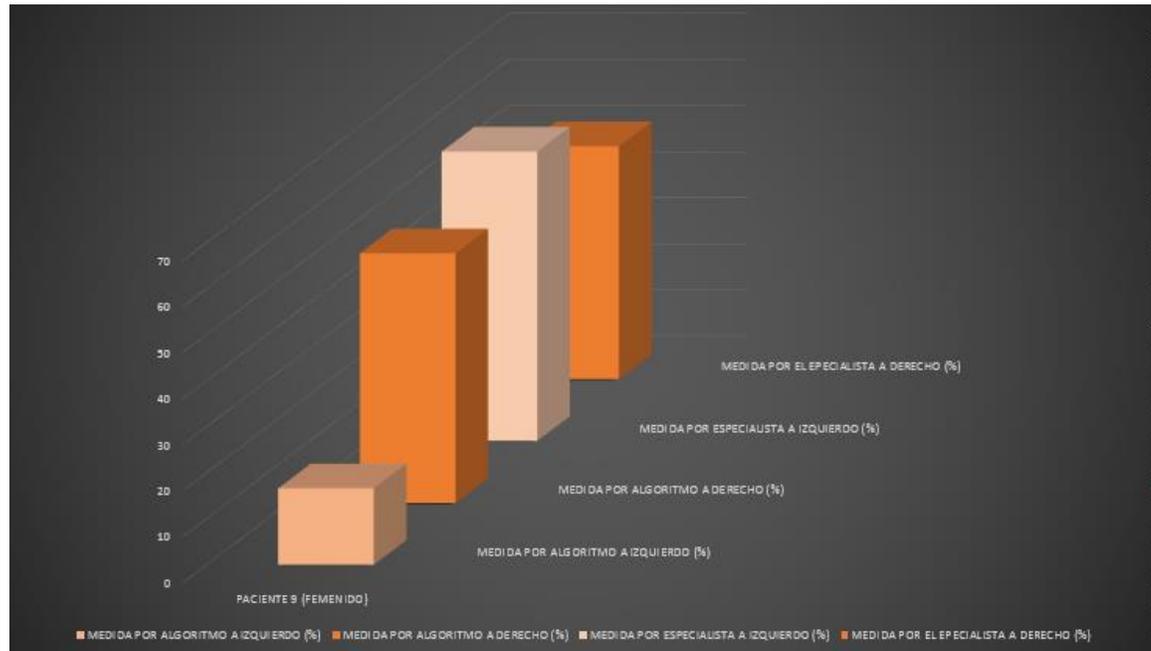
Fuente Autor.

Figura 80. Diagnóstico porcentual con algoritmo y especialista paciente 7.



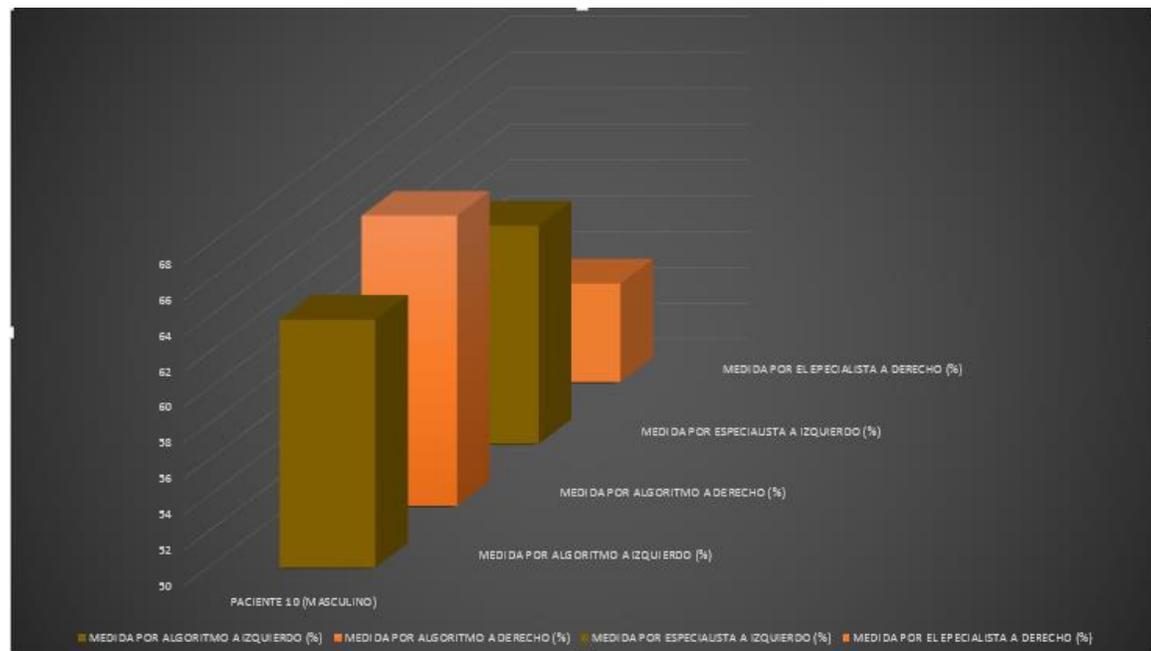
Fuente Autor.

Figura 81. Diagnóstico porcentual con algoritmo y especialista paciente 9.



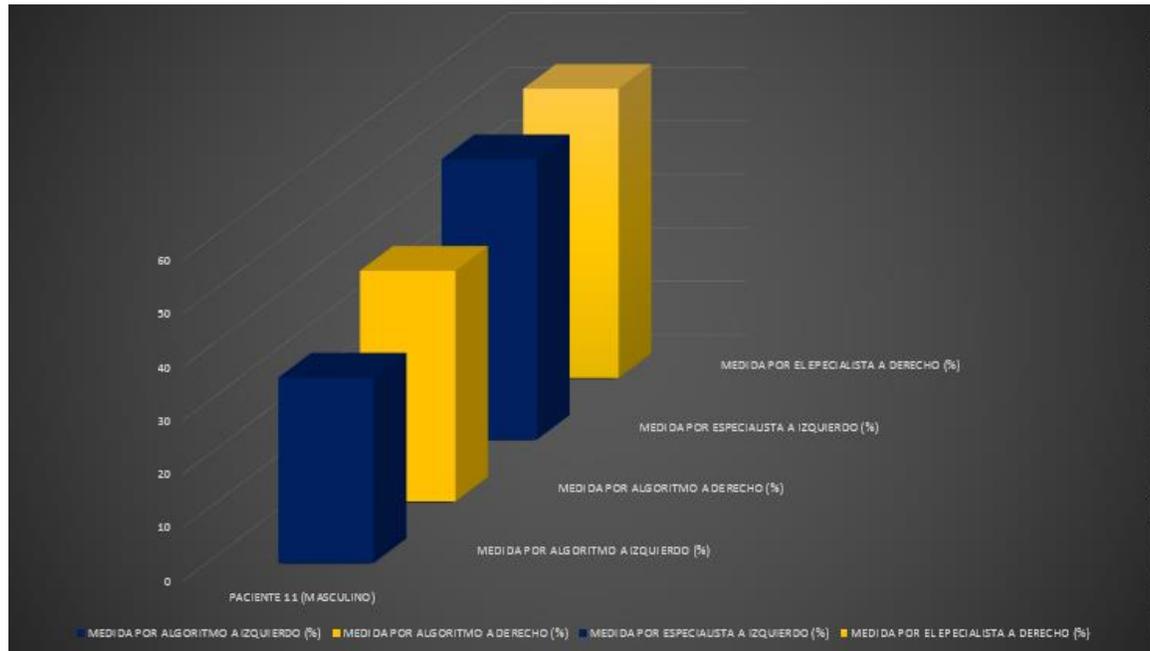
Fuente Autor.

Figura 82. Diagnóstico porcentual con algoritmo y especialista paciente 10.



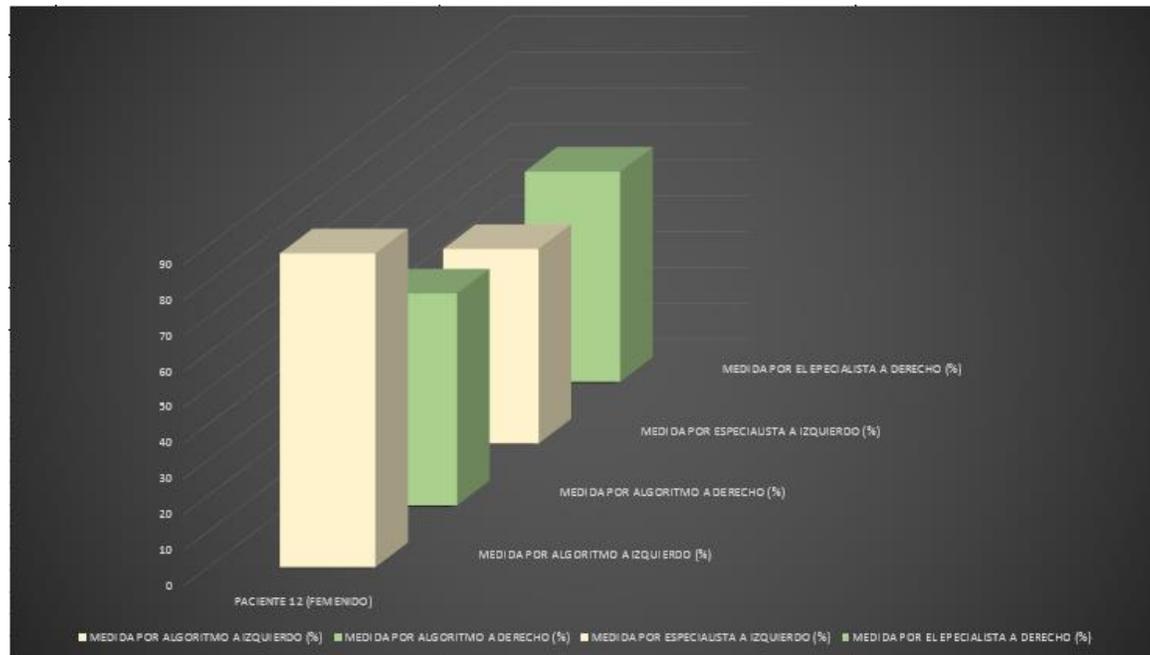
Fuente Autor.

Figura 83. Diagnóstico porcentual con algoritmo y especialista paciente 11.



Fuente Autor.

Figura 84. Diagnóstico porcentual con algoritmo y especialista paciente 12.



Fuente Autor.



CONCLUSIONES.

- ❖ Con el análisis automático se ha destacado un promedio considerable de resultados donde la mayoría de las muestras dan un soporte cercano al método manual que la especialista en podología realizaba a mano alzada.
- ❖ El mayor beneficio que encontré en este trabajo es la versatilidad en cuanto a un ahorro considerable de tiempo y recursos mínimos digitales, donde cualquier equipo lo puede ejecutar.
- ❖ Gracias a la herramienta de Python con su amplia gama de librerías resulta muy atractiva debido a que cualquier algoritmo hecho por esta herramienta resulta compatible con cualquier sistema operativo.
- ❖ La mayoría de la base de datos ha sido un excelente material reunido gracias a la colaboración de la comunidad del barrio Seminario Menor.
- ❖ La técnica de Hernández Corvo ha sido un punto primordial para el proyecto, ya que realiza un análisis más preciso y más confiable para el paciente.
- ❖ Gracias a las recomendaciones dadas por la especialista, se ha seguido un buen proceso de cuidados para los pacientes a la hora de recopilar las muestras.
- ❖ A la hora de interactuar con el programa, resulta muy atractiva, ya que se elaboró un pequeño manual de instrucciones sencillo de interpretar para su buen funcionamiento.



RECOMENDACIONES.

Se recomienda considerar las características de un equipo no más de diez años de uso debido a que cada año los sistemas operativos se van actualizando al tal punto que el programa ya quede obsoleto.

No menos importante, se recomienda leer el manual para su correcto funcionamiento y posteriormente la optimización del mismo.

Se recomienda a trabajos posteriores que se mantenga el continuo mejoramiento del software usando la herramienta de Python por motivos de licencias y por su amplia gama de librerías a pesar de ser una herramienta bastante liviana pero apetecida en el campo laboral.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN INFOGRÁFICAS

- [1] “Huella plantar, biomecánica del pie y del tobillo: propuesta de valoración - Instituto Internacional de Ciencias del Ejercicio Físico y Salud.” <https://g-se.com/huella-plantar-biomecanica-del-pie-y-del-tobillo-propuesta-de-valoracion-bp-b57cfb26db4ec3> (accessed Nov. 24, 2020).
- [2] Rady Childrens, “Trastornos ortopédicos más frecuentes en la infancia,” 2020. <https://www.rchsd.org/health-articles/trastornos-ortopdicos-ms-frecuentes-en-la-infancia/> (accessed Nov. 04, 2020).
- [3] “Durante la pandemia se consolidó la telemedicina en el país.” <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Durante-la-pandemia-se-consolido-la-telemedicina-en-el-pais.aspx> (accessed Nov. 28, 2020).
- [4] S. Lara Diéguez, A. J. Lara Sánchez, M. L. Zagalaz Sánchez, and E. J. Martínez-López, “Análisis de los diferentes métodos de evaluación de la huella plantar (Analysis of different methods to evaluate the footprint),” *Retos*, no. 19, pp. 49–53, 2015, doi: 10.47197/retos.v0i19.34637.
- [5] F. S. B. Díaz, “Diseño e implementación de un sistema de análisis de las presiones plantares en estática basado en procesamiento de imágenes,” Universidad De Talca, 2018.
- [6] J. S. P. L. Luengas, P. Revista, and V. Ciencia, “Plataforma Baropodométrica PIPLAB,” Francisco José De Caldas, 2018.
- [7] N. C. C. Morales, “Desarrollo De Un Sistema Para La Identificación De Alteraciones En La Postura Mediante El Análisis De La Huella Plantar,” Universidad De Cundinamarca, 2019.
- [8] K. L. Moore, A. F. Dailey, and Anne M.R. Argur, *Anatomía con orientación clínica*, 7th ed., vol. 7, no. 2. Barcelona España.
- [9] “pie | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE.” <https://dle.rae.es/pie> (accessed Dec. 03, 2020).
- [10] “semiologia_pierna_tobillo_pie.” https://sisbib.unmsm.edu.pe/Bibvirtual/libros/medicina/cirugia/tomo_ii/semiologia_ptp.htm (accessed Dec. 03, 2020).
- [11] “Pie #Soyvisual.” <https://www.soyvisual.org/fotos/pie> (accessed Dec. 03, 2020).
- [12] D. F. G. Quiróz, *ANATOMIA HUMANA DR FERNANDO QUIROZ*, 5th ed. Editorial Porrúa, 2005.
- [13] “Huesos del pie: ¿Cuántos hay? ¿Cuáles son? | Saber es práctico.” <https://www.saberespractico.com/anatomia/huesos-del-pie-cuantos-hay-cuales-son/> (accessed Dec. 08, 2020).
- [14] “Cuñas o Cuneiformes | Qué son, significado, ubicación, función y lesiones.” <https://www.fisioterapia-online.com/glosario/huesos-cunas-o-cuneiformes>



- (accessed Dec. 11, 2020).
- [15] “Metatarsianos | Qué son, significado, ubicación, función y lesiones.” <https://www.fisioterapia-online.com/glosario/huesos-metatarsianos> (accessed Dec. 26, 2020).
- [16] R. V. Universidad De Granada, “Musculo pedio.” <https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/pedio.htm> (accessed Dec. 12, 2020).
- [17] vision medica virtual, “Pie musculoso | Visión Médica Virtual,” 2018. <http://visionmedicavirtual.com/en/galleries/muscular-foot> (accessed Dec. 12, 2020).
- [18] “FLEXOR CORTO DEL DEDO GRUESO,” 2018. [https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/flexor corto comun de los dedos.htm](https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/flexor_corto_comun_de_los_dedos.htm) (accessed Dec. 14, 2020).
- [19] R. V. Universidad De Granada, “Musculo aproximador o abductor del primer dedo,” 2018. [https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/aproximador del primer dedo.htm](https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/aproximador_del_primer_dedo.htm) (accessed Dec. 12, 2020).
- [20] R. V. Universidad De Granada, “Abductor del quinto dedo,” 2018. [https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/separador del quinto dedo.htm](https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/separador_del_quinto_dedo.htm) (accessed Dec. 14, 2020).
- [21] “Músculo Oponente del Quinto Dedo.” <https://www.musculos.org/musculo-oponente-quinto-dedo.html> (accessed Dec. 14, 2020).
- [22] R. V. Universidad De Granada, “Musculo flexor corto comun de los dedos.” [https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/flexor corto comun de los dedos.htm](https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/flexor_corto_comun_de_los_dedos.htm) (accessed Dec. 12, 2020).
- [23] “Musculo cuadrado carnosos de silvio.” [https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/cuadrado carnosos de silvio.htm](https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/cuadrado_carnosos_de_silvio.htm) (accessed Dec. 14, 2020).
- [24] “Musculos interoseos dorsales.” [https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/interoseos dorsales pie.htm](https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/interoseos_dorsales_pie.htm) (accessed Dec. 14, 2020).
- [25] “Musculos lumbricales.” <https://www.ugr.es/~dlcruz/musculos/musculos/lumbricales.htm> (accessed Dec. 14, 2020).
- [26] <https://www.fisioterapia-online.com/>, “El pie, su estructura, sus arcos y los tipos de pies según estos arcos | FisioOnline,” 15/06/2015, Jun. 15, 2105. <https://www.fisioterapia-online.com/articulos/el-pie-su-estructura-sus-arcos-y-los-tipos-de-pies-segun-estos-arcos#Ref.2> (accessed Dec. 27, 2020).
- [27] “Exapuni - Boveda Plantar Kapandji. Anatomía. Medicina. Universidad de Buenos Aires.” [https://www.exapuni.com/carreras/apunte/Universidad de Buenos Aires/Medicina/Anatomía/Boveda Plantar Kapandji/897/0](https://www.exapuni.com/carreras/apunte/Universidad_de_Buenos_Aires/Medicina/Anatomía/Boveda_Plantar_Kapandji/897/0) (accessed



Dec. 29, 2020).

- [28] “ARCOS DEL PIE – Blog de Fisioterapia.” <https://www.blogdefisioterapia.com/arcos-del-pie/> (accessed Dec. 27, 2020).
- [29] “El secreto del paso erguido está en los arcos del pie humano - Biotech Spain.” <http://biotech-spain.com/es/articulos/el-secreto-del-paso-erguido-est-en-los-arcos-del-pie-humano-/> (accessed Dec. 27, 2020).
- [30] “Ortopedia- Dr. Omar Pajares.” <http://dromarpajares.com/ortopedia/> (accessed Dec. 29, 2020).
- [31] M. R. Sánchez, “Introducción A La Biomecánica Del Pie,” *Introducción a la biomecánica del pie*, 2004. <https://www.yumpu.com/es/document/read/25389011/introduccion-a-la-biomecnica-del-pie-plaza-de-deportes> (accessed Jan. 03, 2021).
- [32] “Alteraciones de la bóveda plantar | Revista Española de Reumatología.” <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-espanola-reumatologia-29-articulo-alteraciones-boveda-plantar-13055069> (accessed Dec. 29, 2020).
- [33] “Pie plano y pie cavo: Qué son, cuáles son sus síntomas y cómo podemos tratarlo - Blog Ergodinámica.” <https://www.ergodinamica.com/blog/pie-plano-pie-cavo-que-son-sus-sintomas-y-tratamiento/> (accessed Dec. 27, 2020).
- [34] E. J. M.-L. Silvia Lara Diéguez, Amador Jesús Lara Sánchez, María Luisa Zagalaz Sánchez, “Análisis de los diferentes métodos de evaluación de la huella plantar,” p. 5, 2010, Accessed: Jan. 04, 2021. [Online]. Available: <http://www.mibienestar.es/salud/2-general/2-biomecanica.html>.
- [35] C. Á. Camarena and W. P. Villegas, “Desarrollo Y Biomecánica Del Arco Plantar,” *Medigraphics*, vol. 6, 2010, [Online]. Available: <http://www.medigraphic.com/orthotips>.
- [36] S. L. Diéguez, A. Jesús, L. Sánchez, M. Luisa, Z. Sánchez, and E. J. Martínez-lópez, “Análisis de los diferentes métodos de evaluación de la huella plantar,” *RETOS. Nuevas Tendencias en Educ. Física, Deport. y Recreación*, vol. 2041, no. 19, pp. 49–53, 2011.
- [37] L. A. L. C., M. F. D. H., and J. L. G. M., “Ingenium,” *Determ. tipo pie Median. el Proces. imágenes**, vol. 22, no. 01, pp. 183–189, 2010, doi: 10.22240/sent22.01.183.
- [38] N. Aguirre Dobernack, “Implementación De Un Sistema De Detección De Señales De Tráfico Mediante Visión Artificial Basado En Fpga,” p. 255, 2013.
- [39] Maiti and Bidinger, “ESTUDIO Y ANÁLISIS DE TÉCNICAS PARA PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, p. 66, 2016.
- [40] B. Jähne, *Digital image processing*, vol. 1. 2002., 2002.
- [41] “VI. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.”



- http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/084/htm/sec_9.htm (accessed Mar. 06, 2021).
- [42] S. L. E. Rafael C. González, Richard E. Woods, *Digital Image Processing Using MATLAB.*, vol. 2, no. 9. 2003.
- [43] Y.-M. Patnaik , Srikanta, Yang, *Técnicas de computación blanda en ciencia de la visión.* 2012.
- [44] U. de Oviedo, “Métodos del dominio espacial,” 2010. .
- [45] A. C. Y. Franco, “Programa de segmentacion de regiones en imagenes medicas en MATLAB,” Jan. 2004.
- [46] Universidad de Coruña., “FILTRADO ESPACIAL.” http://www.varpa.org/~mgpenedo/cursos/lp/Tema4/nodo4_2.html (accessed Mar. 09, 2021).
- [47] A. C. VARGAS and L. A. M. PARRA, “IMPLEMENTACIÓN DE FILTROS DETECTORES DE BORDES EN FPGA,” PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, 2011.
- [48] U. de Oviedo, “Filtros De Realce, Filtro Prewitt,” 2014. <http://www6.uniovi.es/vision/intro/node43.html>.
- [49] “Detección de bordes - MATLAB & Simulink - MathWorks España.” <https://es.mathworks.com/help/images/edge-detection.html> (accessed Jun. 22, 2021).
- [50] J. Valverde, “Detección de bordes mediante el algoritmo de Canny,” *ResearchGate*, no. October 2007, p. 8, 2007, [Online]. Available: <http://www.seccperu.org/files/Detecci?ndeBordes-Canny.pdf>.
- [51] nombre Vicente Atienza Vanacloig, “El histograma de una imagen digital.”
- [52] S. L. E. Rafael C. González, Richard E. Woods, *Digital Image Processing Using Matlab.* Gatesmark, 2009.
- [53] “¿Para qué sirve Python? Razones para utilizarlo | ESIC.” <https://www.esic.edu/rethink/tecnologia/para-que-sirve-python> (accessed Jun. 25, 2021).
- [54] “Bienvenido a Python.org.” <https://www.python.org/> (accessed Jun. 25, 2021).
- [55] I. G. Marzal, Andrés, *Introducción A La Programacion Con Python.* Universitat Jaume I.
- [56] Centro De Formación Técnica Para La Industria, “Python: qué es, para qué sirve y cómo se programa | Informática Industrial.” <https://www.cursosaula21.com/que-es-python/> (accessed Jun. 25, 2021).