

Design and Development of a Podiatric Station Prototype for the Diagnosis of Diabetic Foot

Diseño y desarrollo de un prototipo de estación podológica para el diagnóstico del pie diabético

Jhon Richard Montaña Jiménez¹  , Rodrigo Martínez Severich²  , Eynar Calle Viles³  , Rommer Alex Ortega Martinez⁴  

¹Estudiante de la Carrera de Ingeniería Biomédica, Universidad Privada del Valle. Cochabamba, Bolivia.

²Ingeniero Biomédico, Docente Investigador, Universidad Privada del Valle. Cochabamba, Bolivia.

³Ingeniero en Telecomunicaciones, Coordinador de Investigación UMA, Universidad Privada del Valle. Cochabamba, Bolivia.

⁴Coordinador de publicación y difusión científica literaria. Universidad Privada del Valle. Cochabamba, Bolivia.

Cite as

Montaña Jiménez JR, Martínez Severich R, Calle Viles E, Ortega Martinez RA. Design and Development of a Podiatric Station Prototype for the Diagnosis of Diabetic Foot. SAP Biomedical & Chemical Engineering Innovation. 2024; 3:165. <https://doi.org/10.56294/evk2025165>

Publication History

Submitted: 09-04-2024

Revised: 15-06-2024

Accepted: 24-08-2024

Published: 25-08-2024

Corresponding Author

Jhon Richard Montaña Jiménez 

ABSTRACT

Diabetic foot is one of the most frequent complications of type 2 diabetes mellitus, characterized by the development of ulcers, infections, and a high risk of amputation. In Bolivia, approximately 6,5 % of the adult population lives with this condition, and progressive foot injuries are common. In response to this problem, a functional prototype of a podiatric station—named PODIATECH—was designed and developed to support early diagnosis through structural and thermal foot analysis. The system comprises two main modules: a structural module that uses a flatbed scanner to capture the plantar footprint and applies the Hernández-Corvo index; and a thermal module that uses infrared imaging to detect temperature differences associated with circulatory alterations. The entire system is managed through a web-based platform that enables patient registration, clinical record consultation, and automated report generation. During preliminary validation, ten participants were evaluated, five of whom had a confirmed diagnosis of diabetes. In four of these cases, temperature differences greater than 2 °C were detected, corresponding to clinically relevant risk zones. No significant alterations were found in healthy participants. These results suggest that the system may serve as an effective tool for early diabetic foot screening. Further clinical trials with a larger sample size are recommended to assess the system's performance and reliability in real-world settings.

Keywords: Diabetic Foot; Thermography; Plantar Footprint; Early Diagnosis; Health Technology.

RESUMEN

El pie diabético es una de las complicaciones más frecuentes de la diabetes mellitus tipo 2, caracterizada por la aparición de úlceras, infecciones y riesgo elevado de amputación. En Bolivia, aproximadamente el 6,5 % de la población adulta convive con esta enfermedad, siendo común el desarrollo progresivo de lesiones en los pies. Ante esta problemática, se diseñó y desarrolló un prototipo funcional de estación podológica denominado PODIATECH, orientado a apoyar el diagnóstico temprano mediante el análisis estructural y térmico del pie. El sistema cuenta con dos módulos principales: uno estructural, que emplea un escáner plano para capturar la huella plantar y aplicar el índice de Hernández-Corvo; y otro térmico, que utiliza imágenes infrarrojas para identificar zonas con diferencias de temperatura asociadas a alteraciones circulatorias. La gestión integral del sistema se realiza a través de una plataforma web, que permite registrar pacientes, consultar historiales clínicos y generar reportes automatizados. Durante la validación preliminar, se evaluó a diez personas, cinco de ellas con diagnóstico confirmado de diabetes. En cuatro de estos casos, se detectaron diferencias térmicas superiores a 2 °C, coincidiendo con regiones clínicas de riesgo. En los participantes sin diagnóstico, no se identificaron alteraciones significativas. Los resultados sugieren que el sistema podría constituir una herramienta eficaz para el cribado temprano del pie diabético. Se recomienda ampliar el número de pacientes y escenarios clínicos para validar su aplicabilidad en contextos reales.

Palabras clave: Pie Diabético; Termografía; Huella Plantar; Diagnóstico Temprano; Tecnología en Salud.

INTRODUCCIÓN

El pie diabético es una complicación crónica de la diabetes mellitus tipo 2 que afecta a millones de personas en todo el mundo y se considera una de las principales causas de hospitalización, infecciones graves y amputaciones no traumáticas. Se estima que entre el 15 % y el 25 % de los pacientes diabéticos desarrollarán úlceras plantares en algún momento de su vida.⁽¹⁾ En Bolivia, aproximadamente el 6,5 % de la población adulta presenta esta patología,⁽²⁾ y un porcentaje significativo de los casos evoluciona hacia lesiones en los pies que, si no son tratadas oportunamente, pueden derivar en complicaciones irreversibles.

Desde el punto de vista fisiopatológico, el desarrollo del pie diabético está asociado a factores como la neuropatía periférica, la isquemia por enfermedad vascular periférica y deformaciones estructurales del pie que incrementan la presión plantar. Estos elementos provocan una disminución en la sensibilidad y en el retorno venoso, lo que impide la identificación de lesiones por parte del paciente y retarda el inicio del tratamiento.⁽³⁾ A esto se suma la alteración de la morfología de la bóveda plantar, especialmente en pacientes con pie plano o pie cavo, que favorece la aparición de puntos de presión anómala, generando áreas propensas a ulceración.

En la actualidad, el diagnóstico clínico del pie diabético se basa en técnicas tradicionales como la inspección visual, el uso del monofilamento de Semmes-Weinstein, el índice tobillo-brazo (ITB) y la palpación de pulsos periféricos. Sin embargo, estas pruebas requieren personal especializado y pueden ser insuficientes para la detección precoz de alteraciones incipientes. Frente a estas limitaciones, investigaciones recientes han explorado tecnologías complementarias no invasivas como el análisis digital de la huella plantar para evaluar la morfología del pie⁽⁴⁾, así como sistemas de registro y visualización clínica automatizada.

En este contexto, el desarrollo de soluciones integradas que combinen análisis estructural y térmico, adaptadas a entornos de atención primaria y poblaciones de riesgo, se vuelve esencial para la prevención de complicaciones. Este trabajo tiene como objetivo principal el diseño y desarrollo de un prototipo funcional de estación podológica automatizada, denominado PODIATECH, orientado al diagnóstico temprano del pie diabético. El sistema integra dos módulos: uno para la evaluación de la huella plantar mediante escaneo y análisis morfométrico basado en el índice de Hernández-Corvo, y otro para el análisis térmico por medio de imágenes infrarrojas procesadas digitalmente. La información obtenida es gestionada en una plataforma web que permite el registro de pacientes, el almacenamiento de historiales clínicos y la generación de reportes automatizados. El propósito de esta investigación es validar la utilidad técnica y clínica del sistema desarrollado como herramienta de apoyo al diagnóstico temprano en pacientes con diabetes.

En Bolivia, tecnologías como la termografía infrarroja o el análisis estático de la huella plantar aún no han sido incorporadas sistemáticamente en centros públicos de salud de Bolivia, a pesar de que su aplicación en otros países ha demostrado ser útil para detectar signos tempranos de ulceración. La evaluación convencional suele implicar procedimientos prolongados que combinan palpación de pulsos, pruebas de sensibilidad y estudios de imagen como doppler o radiografía, los cuales requieren entre 30 y 40 minutos por paciente y dependen del criterio de personal altamente capacitado. Ante esta realidad, se identificó la necesidad de diseñar un sistema alternativo que permita optimizar los tiempos de evaluación, generar datos cuantificables, y apoyar la toma de decisiones clínicas a través de herramientas accesibles y automatizadas. El proyecto no pretende reemplazar los métodos clínicos tradicionales, sino funcionar como una herramienta de cribado inicial que permita identificar pacientes en riesgo y facilitar su derivación oportuna a los especialistas correspondientes para la realización de estudios diagnósticos más profundos.

MÉTODO

Diseño del estudio

Se empleó un diseño mixto secuencial con enfoque exploratorio y validación funcional. La fase cualitativa del estudio inició con una revisión sistemática de literatura, entrada en tres componentes clave: a) análisis de la morfología plantar mediante escaneo y procesamiento digital, b) fundamentos fisiopatológicos y clínicos de la termografía aplicada al pie diabético, y c) desarrollos de estaciones podológicas digitales. Esta revisión permitió establecer los parámetros de diseño, sensibilidad térmica, resolución de imagen requerida, y características estructurales necesarias para el desarrollo del prototipo.

La fase cuantitativa se enfocó en la construcción del sistema PODIATECH, su integración con una plataforma web y la validación mediante pruebas estructuradas en pacientes voluntarios. Este enfoque permitió comparar los resultados obtenidos por el sistema con hallazgos clínicos esperados, priorizando la recolección de datos termográficos y morfológicos bajo condiciones controladas.

Diseño del sistema

Diseño del hardware

El sistema PODIATECH fue concebido como una estación modular que combina adquisición estructural y análisis térmico del pie. Su diseño físico priorizó estabilidad, facilidad de montaje y precisión diagnóstica.

La estructura general del sistema, así como la distribución de módulos y comunicación con el software, se muestra en la figura 1.

La estructura principal se construyó con tubos metálicos de 1,5 cm de lado y 1,5 mm de espesor, soldados para formar un bastidor robusto y cubiertos con planchas metálicas de 0,7 mm. En la parte superior se instaló un vidrio templado de 10 mm de espesor (26,5 × 44,5 cm), que permitió capturar huellas plantares desde un escáner plano Canon LiDE 100 montado en la parte inferior. Alrededor del vidrio se integró una tira LED verde para mejorar el contraste durante el escaneo.

Para el análisis del retropié, se implementó un sistema de desplazamiento lineal compuesto por varillas lisas, tornillo sin fin y un soporte móvil impreso en 3D que alojó una cámara web y un puntero láser. Este mecanismo fue accionado por un motor NEMA 17 controlado por driver DRV8825, con instrucciones enviadas desde la interfaz web. Su diseño y disposición se presentan en la figura 2.

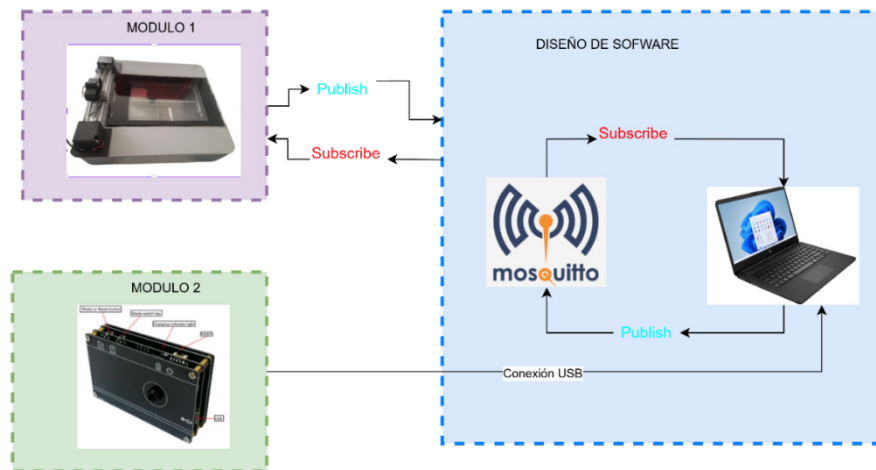


Figura 1. estructura general del sistema

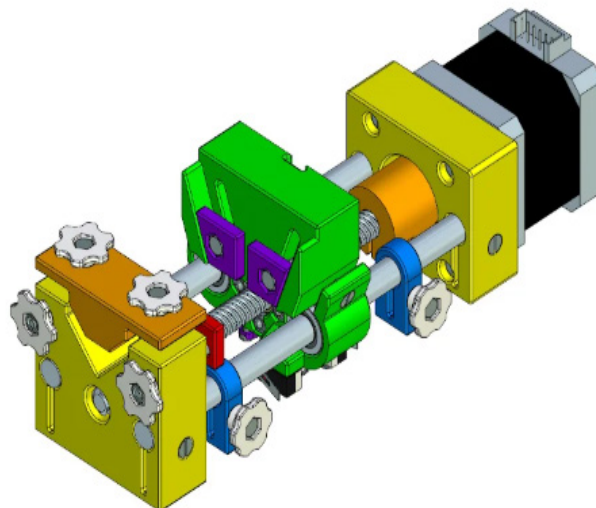


Figura 2. Mecanismo de movimiento del motor

El módulo térmico funcionó de manera independiente y empleó una cámara MLX90640, manipulada manualmente a 30 cm del pie. Se utilizó una placa de acrílico negro con delimitaciones físicas para estandarizar la colocación del pie y mejorar la repetibilidad de las mediciones.

Todo el sistema fue gestionado por un microcontrolador ESP32 DevKit v1, que controló los actuadores mediante protocolo MQTT. Se utilizaron transistores MOSFET IRFZ44N para conmutar dispositivos de potencia y un regulador LM2596 para derivar tensiones de 5 V a partir de una fuente de 12 V. Para integrar estos elementos, se diseñó una PCB personalizada que consolidó todos los componentes en una única placa compacta. El diseño del circuito puede observarse en la figura 3.

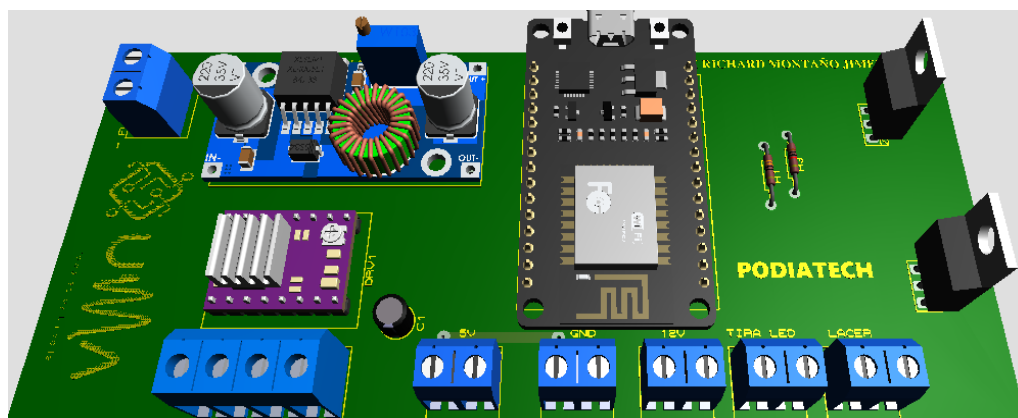


Figura 3. Modelado 3D de placa PCB

Diseño del software

El diseño de software del sistema PODIATECH respondió a la necesidad de integrar, en una misma plataforma, la gestión clínica de pacientes, el control de dispositivos físicos, el procesamiento digital de imágenes estructurales y térmicas, así como el almacenamiento y consulta de resultados. La aplicación fue concebida como un entorno web de acceso multiplataforma, desarrollado bajo una arquitectura cliente-servidor que permitió ejecutar los análisis en tiempo real y acceder a la información clínica desde cualquier equipo conectado a la red local o remota.

El software fue implementado principalmente en el lenguaje Python, haciendo uso del microframework Flask para la lógica del backend. Para el desarrollo del frontend se emplearon tecnologías web estándar como HTML5, CSS3 y JavaScript, mientras que la base de datos relacional fue gestionada mediante MySQL. Adicionalmente, se utilizó el protocolo de mensajería MQTT para establecer una comunicación eficiente entre la aplicación web y el microcontrolador ESP32 encargado del control físico del sistema.

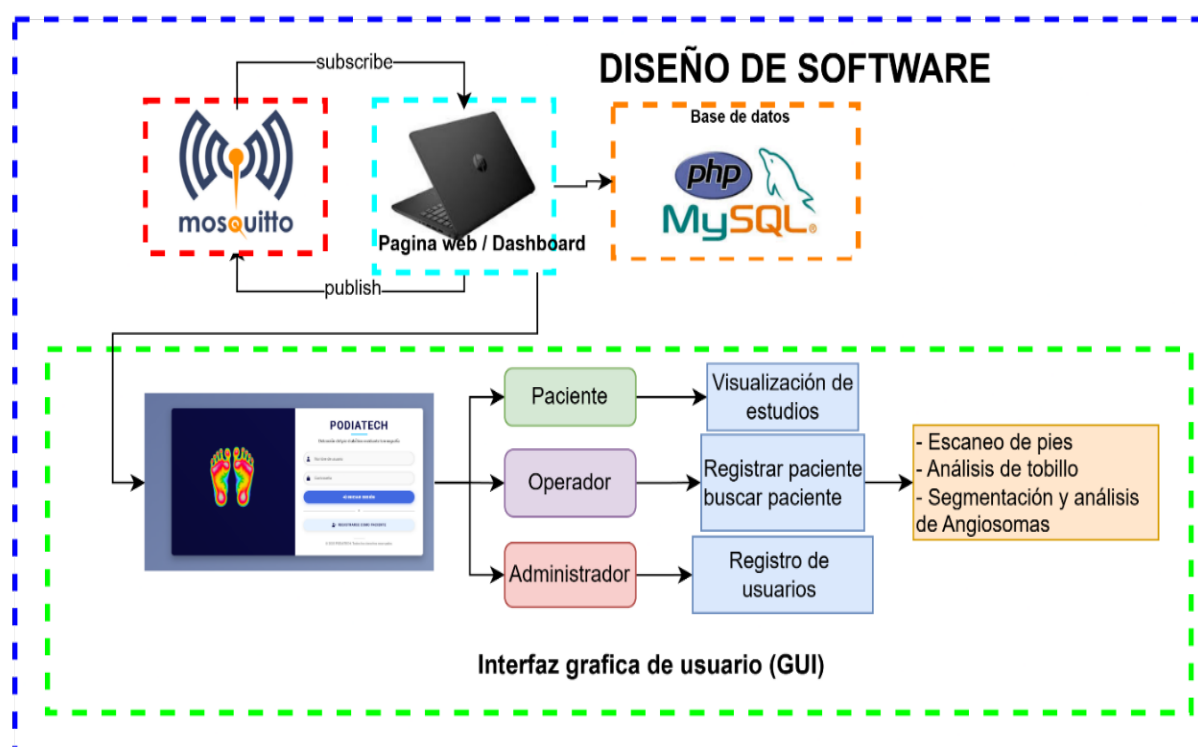


Figura 4. Esquema de diseño de Software PODIATECH

Algoritmos de procesamiento digital de imagen de la huella del pie

La plataforma también automatizó el flujo de adquisición y análisis de imágenes. Para el módulo estructural, las huellas plantares fueron obtenidas mediante el escáner Canon LiDE 100, controlado desde scripts en Python que utilizaron la librería comtypes. Se configuraron parámetros como resolución de 100 DPI, escala de grises y formato JPEG para optimizar el análisis. Las imágenes fueron convertidas a escala de grises, binarizadas y tratadas con filtros morfológicos (erosión, dilatación, eliminación de ruido y suavizado gaussiano). Posteriormente, el operador colocaba cuatro marcadores anatómicos mediante una interfaz gráfica, conforme a la metodología de Hernández Corvo, lo que permitía calcular las distancias X (ancho del metatarso) e Y (superficie del mediopié). A partir de estas distancias se calculaba el índice morfológico con la fórmula:

$$I = \frac{X-Y}{X} * 100 \quad (1)$$

Donde:

X es el ancho del metatarso.

Y es el ancho del mediopié.

Este valor clasificaba el pie como plano, normal o cavo, y toda la información generada (imágenes procesadas, valores diagnósticos, parámetros técnicos) era almacenada en el historial clínico digital del paciente.

El sistema también generaba visualizaciones con líneas guía, diagnóstico textual y gráficas, asegurando una presentación clara de los resultados. Estas funciones fueron integradas de forma nativa en la interfaz web, facilitando la revisión por parte de los operadores y profesionales clínicos.

El flujo completo del procesamiento de imágenes estructurales del pie se resume visualmente en la figura 5.

1. Posicionamiento del paciente sobre la superficie de vidrio templado con iluminación LED activada.

- Configuración del escáner desde la interfaz web para definir resolución, formato y área de escaneo.
- Captura y preprocesamiento de la imagen, que incluye conversión a escala de grises, umbralización y limpieza morfológica.
- Colocación manual de los marcadores anatómicos interactivos sobre la huella, siguiendo los pasos del índice de Hernández Corvo.
- Obtención y visualización de resultados, incluyendo el cálculo automático de las distancias X e Y, el valor del índice y la clasificación del tipo de pie (plano, normal, cavo).

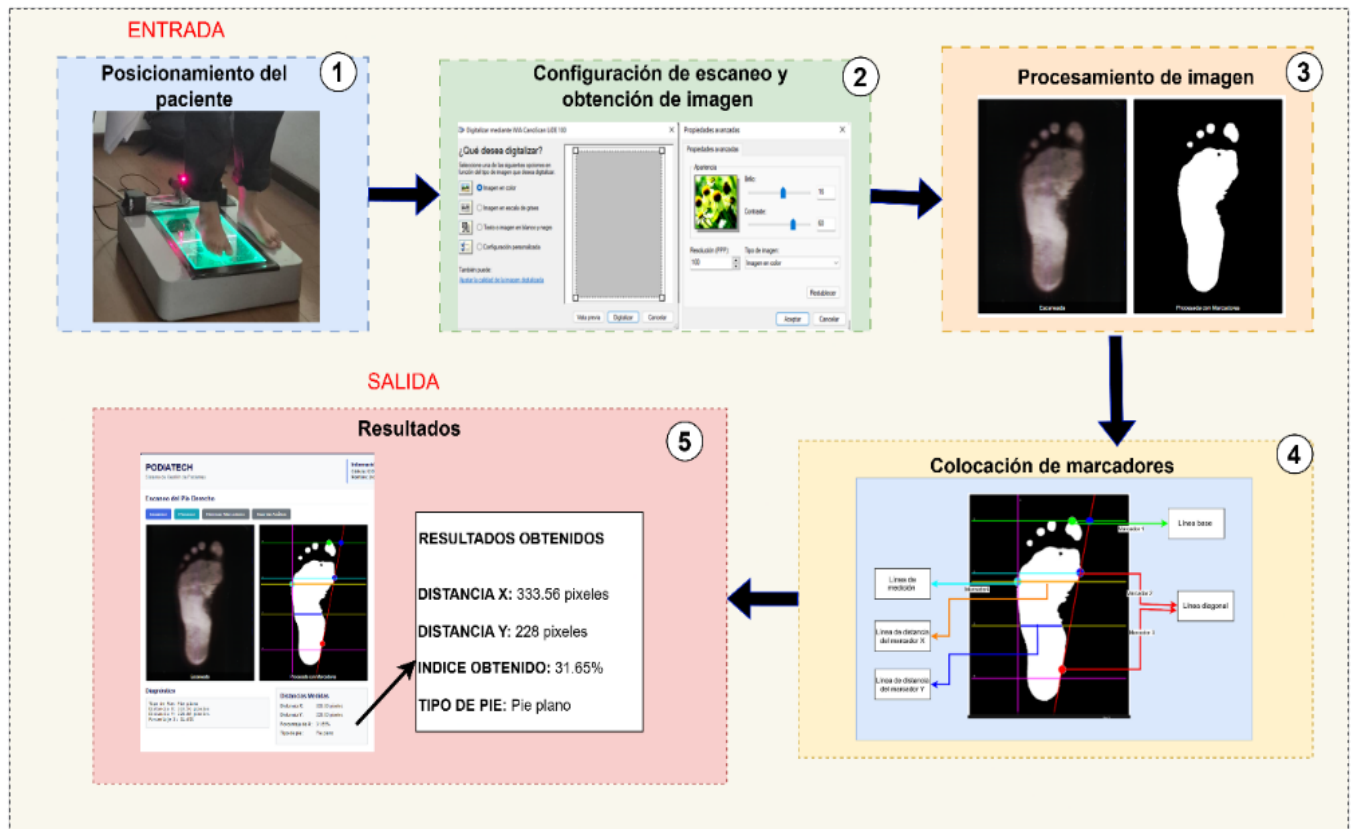


Figura 5. Flujo del análisis estructural de la huella plantar

Procesamiento digital imágenes térmicas

Las imágenes térmicas fueron obtenidas con la cámara MLX90640 y cargadas manualmente en el sistema en formato BMP. Estas capturas se realizaron bajo condiciones de luz controlada, con una emisividad configurada en 0,98 (valor estándar para tejido humano), y un rango térmico establecido entre 20 °C y 50 °C.

El procesamiento térmico comenzó con la conversión de la imagen a escala de grises. Luego, se aplicó segmentación mediante el método de Hamadani⁽⁵⁾, basado en el umbral estadístico:

$$Topt = k1 \cdot \mu + k2 \cdot \sigma \quad (2)$$

Una vez generada la máscara binaria, se reconstruyó la matriz térmica aplicando la fórmula de Chou et al.⁽⁶⁾:

$$T_{REAL} = T_{min} + \left[\frac{T_{gray-level}}{255} \right] * (T_{max} - T_{min}) \quad (3)$$

Donde:

$T_{gray-level}$: es el valor de intensidad en escala de grises del píxel.

T_{max} y T_{min} : representan el rango térmico definido por el operador (en este estudio, entre 20 °C y 50 °C)

T_{REAL} : corresponde a la temperatura estimada del píxel en °C.

La planta del pie fue dividida en cuatro regiones angiosomales: MPA, LPA, MCA y LCA como se observa en la figura 6. Para cada región, se calcularon:

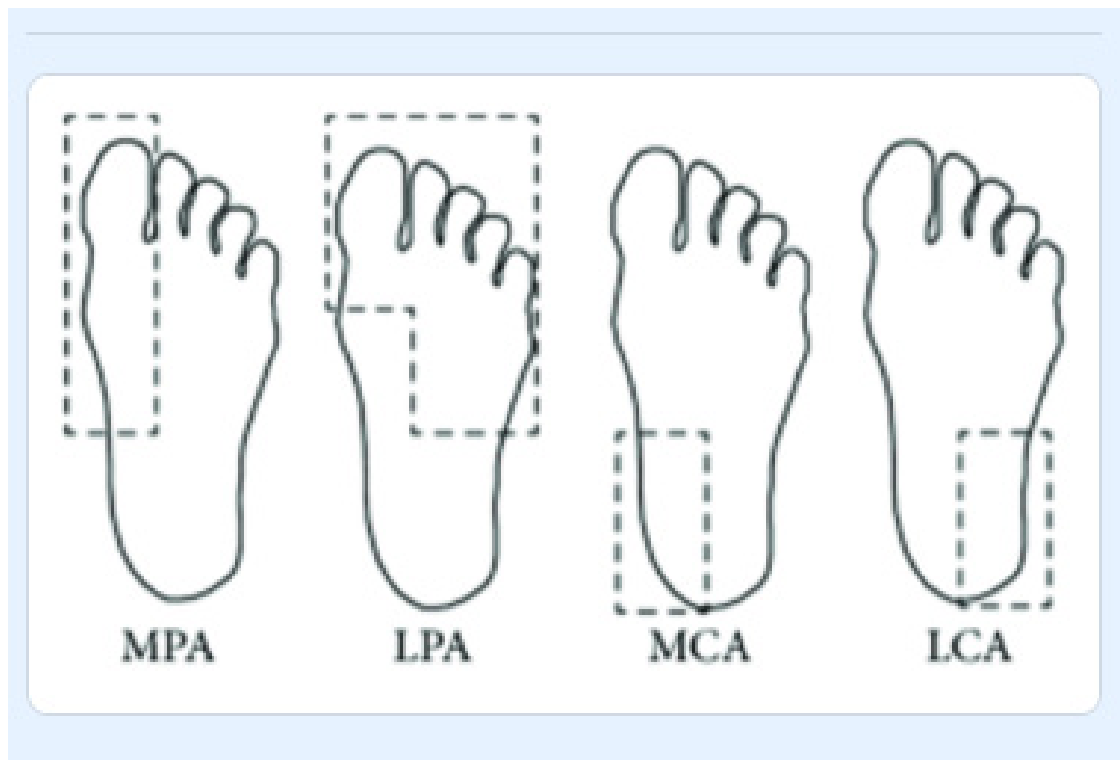


Figura 5. Segmentación de angiosomas

Temperatura estimada (ET):

$$ET = \frac{a_{j-1}C_{j-1} + a_jC_j + a_{j+1}C_{j+1}}{a_{j-1} + a_j + a_{j+1}} \quad (4)$$

Diferencia térmica bilateral (ETD):

$$ETD = |ET_{izquierda} - ET_{derecha}| \quad (5)$$

Hot Spot Estimator (HSE):

$$HSE = |C_l - ET| \quad (6)$$

Donde:

C_l es el valor máximo de temperatura registrado. De acuerdo con Gatt et al.⁽⁷⁾ una diferencia térmica superior a 2,2 °C se considera clínicamente relevante.

RESULTADOS

Resultados del módulo estructural

Se procesaron las imágenes de huella plantar de 20 pacientes, empleando la fórmula de Hernández Corvo. El sistema permitió la colocación de marcadores interactivos para obtener los valores de X y Y, y calcular automáticamente el índice morfológico. El resultado se clasificó en una de las siguientes categorías: pie plano, pie plano normal, normal, normal cavo, cavo o cavo extremo.

Adicionalmente, se capturaron imágenes del retropié con alineación mediante puntero láser. Se colocaron tres marcadores en el talón para el cálculo automático del ángulo de inclinación. Estos valores fueron almacenados en conjunto con las imágenes procesadas.

Las imágenes térmicas de ambos pies fueron segmentadas automáticamente. El sistema calculó los siguientes indicadores:

- ET (Temperatura estimada) por angiosoma.
- ETD (Diferencia térmica bilateral), en °C.
- HSE (Hot Spot Estimator), detectando la diferencia entre la zona más caliente y la temperatura promedio estimada.

Los resultados se presentaron por paciente, con representación visual de los angiosomas segmentados como se observa en la figura 8.



Figura 7. Evaluación de la huella plantar

Resultados del módulo térmico

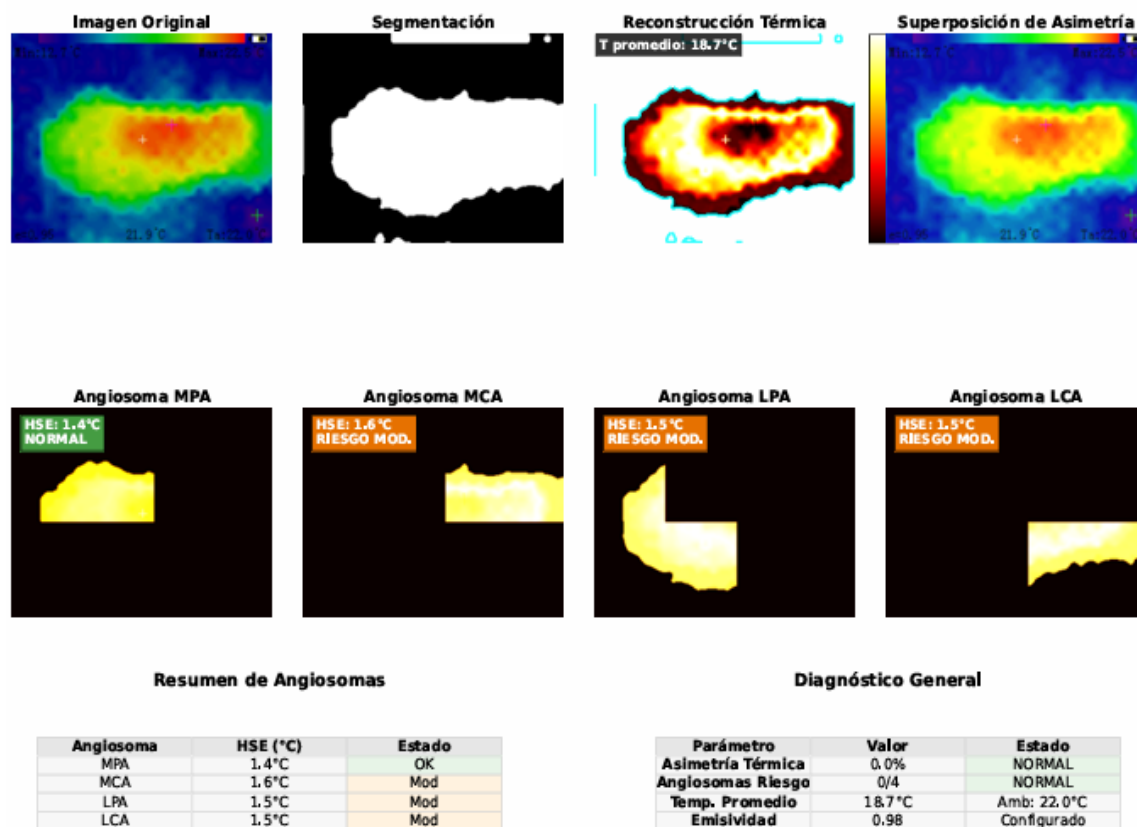


Figura 8. Diagnóstico de angiomas y asimetría

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten contextualizar la utilidad clínica del sistema PODIATECH como herramienta de apoyo en el diagnóstico estático del pie diabético. El módulo estructural mostró una concordancia del 66,7 % con diagnósticos clínicos tradicionales, sugiriendo una adecuada precisión al identificar el tipo de arco plantar mediante el índice de Hernández Corvo.

En cuanto al módulo térmico, se logró diferenciar claramente entre pacientes sanos y con diabetes tipo 2, con diferencias térmicas superiores a 2,2 °C detectadas en el 82 % de los casos con diabetes. La segmentación por angiosomas facilitó la localización de zonas de riesgo sin intervención manual intensiva. Sin embargo, se detectaron falsos positivos térmicos en un 23,1 % del grupo sano, indicando la necesidad de ajustar los rangos fisiológicos de normalidad.

El sistema demostró ventajas en términos de automatización, visualización gráfica y trazabilidad digital, aunque futuras mejoras podrían incluir calibración térmica más precisa y mayor tamaño de muestra para robustecer su validación clínica.

FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiación para el desarrollo de la presente investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Jhon Richard Montaño Jiménez, Rodrigo Martínez Severich, Eynar Calle Viles, Rommer Alex Ortega Martinez.

Curación de datos: Jhon Richard Montaño Jiménez, Rodrigo Martínez Severich, Eynar Calle Viles, Rommer Alex Ortega Martinez.

Análisis formal: Jhon Richard Montaño Jiménez, Rodrigo Martínez Severich, Eynar Calle Viles, Rommer Alex Ortega Martinez.

Redacción – borrador original: Jhon Richard Montaño Jiménez, Rodrigo Martínez Severich, Eynar Calle Viles, Rommer Alex Ortega Martinez.

Redacción – revisión y edición: Jhon Richard Montaño Jiménez, Rodrigo Martínez Severich, Eynar Calle Viles, Rommer Alex Ortega Martinez.

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió validar el desempeño del sistema PODIATECH como una herramienta de apoyo en el diagnóstico estructural y térmico del pie diabético. La integración de módulos automatizados para la adquisición y procesamiento de imágenes posibilitó una evaluación clínica más precisa, sistemática y visualmente enriquecida.

En el análisis estructural, el sistema logró una clasificación confiable del tipo de arco plantar a partir de imágenes digitalizadas, alcanzando un nivel de concordancia del 66,7 % respecto al diagnóstico clínico tradicional. Esta coincidencia evidencia que, a pesar de la diferencia en metodologías (evaluación digital unipodal frente a observación clínica bipodal), el sistema pudo identificar alteraciones relevantes en la bóveda plantar.

Respecto al módulo térmico, se observaron diferencias térmicas significativas (mayores a 2,2 °C) en el 82 % de los pacientes con diabetes tipo 2, en al menos uno de los angiosomas analizados. La segmentación regional permitió ubicar las zonas de mayor riesgo, lo cual representa un valor clínico importante para la detección precoz de posibles focos ulcerativos. No obstante, se identificaron falsos positivos en pacientes sanos (23,1 %), lo que indica la necesidad de ajustes en los umbrales fisiológicos y un mayor número de casos para definir rangos de referencia más robustos.

El sistema demostró una operatividad fluida a través de su interfaz web, facilitando el control del prototipo, la visualización de resultados y el almacenamiento seguro de los registros clínicos. Esta arquitectura permitió un flujo de trabajo eficiente y replicable en diferentes entornos.

Finalmente, si bien se reconoce que la validación fue limitada en tamaño muestral y no se contó con equipos clínicos certificados como referencia, los resultados obtenidos permiten proyectar futuras iteraciones del sistema orientadas a una validación clínica ampliada y a su eventual implementación en escenarios reales de atención podológica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Estévez Perera A, García García Y, Licea Puig ME, Fundora AA, Álvarez Delgado H. Identification of foot deformities in diabetes mellitus patients, a strategy to prevent amputation. Revista Cubana de Endocrinología. 2013;24(2). <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumenI.cgi?IDARTICULO=48532>

2. Gomez PT, Andrews KL, Arthurs JR, Bruce AJ, Wyles SP. Platelet-Rich Plasma in the Treatment of Diabetic Foot Ulcers. Advances in Skin & Wound Care. 2024;37(11-12):608-15. doi:10.1097/ASW.0000000000000229

3. Arias Rodriguez FD, Jimenez Valdiviezo MA. Pie diabético. Actualización en diagnóstico y tratamiento. Angiologia. 2023;75(4):242-58. doi:10.20960/angiologia.00474

4. Adriana Luengas LC, Fernanda Díaz MH, Luis González JM. Determinación de tipo de pie mediante el procesamiento de

imágenes. 2016;17. doi:10.21500/01247492.2744

5. Jiménez M. Sistema de visión artificial basado en termografía infrarroja para el diagnóstico de pie diabético. 2015. <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/526/1/RI003637.pdf>

6. Chou YC, Yao L. Automatic Diagnostic System of Electrical Equipment Using Infrared Thermography. 2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition. 2009:155-60. doi:10.1109/SoCPaR.2009.41

7. Gatt A, Formosa C, Cassar K, Camilleri KP, De Raffaele C, Mizzi A, et al. Thermographic Patterns of the Upper and Lower Limbs: Baseline Data. International Journal of Vascular Medicine. 2015;2015:1-9. doi:10.1155/2015/831369