

María Pilar Camarero Gómez^{1,*}
 Pedro V. Munuera Martínez²
 José M. Jerez Aragonés³
 David Pérez Barreno⁴
 Laura González Ávila⁵
 Joaquín Páez Moguer⁶

1. Doctorando por la Universidad de Sevilla. Enfermera de Práctica Avanzada en Heridas Crónicas Complejas y Pie Diabético. Distrito Sanitario Málaga-Valle del Guadalhorce. Podóloga en Clínica Podológica Dr. Páez. Málaga, España.
2. Doctor en Ciencias de la Salud. Profesor Titular. Departamento de Podología. Universidad de Sevilla. Sevilla, España.
3. Catedrático. Departamento Lenguaje y Ciencias de la Computación. Universidad de Málaga. Málaga, España.
4. Enfermera de Práctica Avanzada en Heridas Crónicas Complejas y Pie Diabético. Distrito Sanitario Málaga-Valle del Guadalhorce. Málaga, España.
5. Podóloga en Clínica Podológica Dr. Páez. Málaga, España.
6. Doctor en Ciencias de la Salud. Profesor Contratado. Universidad de Málaga. Málaga, España.

*Autora para correspondencia.
 Correo electrónico: pcamarero@gmail.com (María Pilar Camarero Gómez).

Recibido el 2 de noviembre de 2025; aceptado el 24 de noviembre de 2025.

Este trabajo obtuvo el Premio Cátedra GNEAUPP de Estudios Avanzados en Heridas a la mejor comunicación oral en el Congreso Conjunto EWMA-GNEAUPP. Barcelona. Marzo 2025.

Evaluación de la termografía infrarroja móvil como herramienta en el cribado en pie diabético: estudio descriptivo en atención primaria[◇]

Evaluation of mobile infrared thermography as a screening tool for diabetic foot: a descriptive study in primary care

DOI: S1134-928X2026000200008

RESUMEN

Objetivos: Evaluar la utilidad de la termografía infrarroja móvil como herramienta complementaria en el cribado del pie diabético, analizando su asociación con factores de riesgo vascular (ausencia de pulso, índice tobillo-brazo), neuropáticos y conductuales (autocuidados) en pacientes con diabetes mellitus de atención primaria. **Metodología:** Estudio observacional transversal en 92 pacientes con diabetes mellitus tipo 2. Se aplicó un protocolo dinámico basado en el consenso TISEM, capturando 5 imágenes térmicas plantares por sujeto con cámara FLIR One Edge Pro[®]. Las imágenes fueron procesadas con ThermoHuman[®] para obtener el índice de riesgo térmico y la asimetría térmica media. Se emplearon pruebas estadísticas de comparación de grupos, correlaciones y modelos lineales mixtos. **Resultados:** Se observaron interacciones significativas entre el índice de riesgo térmico y el nivel de autocuidados ($p < 0,001$), así como con la presencia de pulso pedio izquierdo ($p = 0,021$) y derecho ($p = 0,047$). Los pacientes con mayor conocimiento mostraron una recuperación térmica más rápida y estable, mientras que la ausencia de pulsos se asoció a mayor desequilibrio térmico. No se hallaron asociaciones significativas con el índice tobillo-brazo ni con la presencia de neuropatía. **Conclusiones:** La termografía infrarroja móvil permitió detectar diferencias en la evolución térmica plantar según el estado vascular y conductual del paciente, aportando información complementaria para el cribado precoz del pie diabético en atención primaria.

PALABRAS CLAVE: Atención primaria de salud, autocuidado, diagnóstico precoz, enfermedad vascular periférica, pie diabético, termografía.

ABSTRACT

Objectives: To evaluate the utility of mobile infrared thermography as a complementary tool in diabetic foot screening, analysing its association with vascular (absence of pulse, ankle-brachial index), neuropathic, and behavioural (self-care) risk factors in primary care patients with diabetes mellitus. **Methodology:** A cross-sectional observational study was conducted in 92 patients with type 2 diabetes. A dynamic protocol based on the TISEM consensus was applied, capturing 5 plantar thermal images per subject using a FLIR One Edge Pro[®] camera. Images were processed with ThermoHuman[®] software to obtain the thermal risk index (TRI) and the mean thermal asymmetry (ASYMMETRY RL-AVG). Statistical analyses included group comparison tests, correlations, and mixed linear models. **Results:** Significant interactions were observed between TRI and self-care level ($p < 0.001$), as well as with the presence of left ($p = 0.021$) and right ($p = 0.047$) pedal pulses. Patients with higher self-care knowledge showed faster and more stable thermal recovery, while absence of pulses was associated with greater thermal imbalance. No significant associations were found with the ankle-brachial index or the presence of neuropathy. **Conclusions:** Mobile infrared thermography enabled the detection of differences in plantar thermal evolution according to the patient's vascular and behavioural status, providing complementary information for early diabetic foot screening in primary care.

KEYWORDS: Diabetic foot, early diagnosis, peripheral vascular diseases, primary health care, self-care, thermography.

INTRODUCCIÓN

La diabetes mellitus (DM) representa una de las principales amenazas para la salud global del siglo XXI debido a su elevada prevalencia, morbimortalidad y carga económica. Según la 11.ª edición del *IDF Diabetes Atlas*, en 2024 más de 643 millones de adultos viven con esta enfermedad, cifra que podría superar los 850 millones en 2050¹. Entre las complicaciones más devastadoras de la diabetes se encuentra el pie diabético (PD), un síndrome definido por el International Working Group on the Diabetic Foot (IWGDF) como la “infección, ulceración o destrucción de tejidos del pie asociada a neuropatía y/o enfermedad arterial periférica”². Este síndrome se asocia a altas tasas de hospitalización, amputación y mortalidad, con importantes consecuencias sobre la calidad de vida de los pacientes y generando un alto coste para los sistemas sanitarios^{2,3}.

El cribado en atención primaria (AP) es la piedra angular para la prevención. Sin embargo, las herramientas de cribado estándar presentan limitaciones críticas. La palpación de pulsos y el test de monofilamento de 10 g son subjetivos y tienen una sensibilidad limitada para detectar daño tisular incipiente⁴. Más preocupante aún es que el índice tobillo-brazo (ITB), nuestra piedra angular para el diagnóstico vascular, pierde fiabilidad en la población diabética debido a la calcificación arterial (arterioesclerosis de Mönckeberg) y puede arrojar falsos negativos⁵, esta brecha diagnóstica nos obliga a buscar herramientas objetivas y no invasivas que puedan detectar la disfunción fisiopatológica antes de que aparezcan las lesiones.

En este contexto, la termografía infrarroja (TI) ha emergido durante la última década como una tecnología prometedora. Se trata de una técnica no invasiva que permite detectar cambios sutiles en la temperatura cutánea (TsK) invisibles al ojo humano, revelando procesos inflamatorios subclínicos (hipertermia) o de compromiso vascular o neurológico (hipotermia)^{4,5}. Su principio es sólido, la TI permite identificar patrones térmicos que reflejan alteraciones fisiológicas subyacentes, proporcionando información complementaria a la exploración física⁴.

La evidencia más reciente refuerza su potencial clínico. Faus Camarena et al. destacan que la TI puede detectar cambios térmicos precoces asociados a neuropatía y enfermedad arterial periférica, permitiendo la identificación de pie de riesgo incluso antes de la aparición de signos clínicos visibles⁴. Del mismo modo, una revisión sistemática con metaanálisis demostró que la monitorización de la temperatura plantar mediante TI reduce significativamente la incidencia de nuevas úlceras frente a la atención estándar (RR = 0,53; IC95%: 0,29-0,96; $p = 0,03$), con un nivel de evidencia moderado⁶. Estos resultados consolidan el papel de la evaluación térmica como estrategia eficaz, reproducible y aplicable a entornos clínicos para la prevención de la ulceración de los pacientes con diabetes.

La estandarización del procedimiento de captura de imagen resulta esencial para garantizar su fiabilidad, tal como recomiendan los consensos internacionales como el Thermographic Imaging in Sports and Exercise Medicine (TISEM)⁷. Sin embargo, la evidencia más reciente sugiere que el verdadero potencial de la termografía podría no residir únicamente en una medición estática, sino en la evaluación de la respuesta térmica dinámica a un estímulo, como la deambulación^{8,9}. Analizar como la TsK plantar cambia durante la marcha y la recuperación podría ofrecer información más precisa sobre la capacidad de termorregulación y la salud vascular del paciente.

Estudios recientes están aplicando con éxito algoritmos de inteligencia artificial (IA) y Deep Learning para analizar termogramas plantares, alcanzando una alta precisión en la clasificación automática del riesgo de ulceración^{5,9}. Gracias al desarrollo de dispositivos portátiles y económicos, como las cámaras térmicas acopladas a *smartphones*, su uso se ha

extendido más allá del ámbito hospitalario, llegando a entornos de AP y comunitaria. Esta accesibilidad convierte a la termografía en una opción viable para el cribado del PD en fases tempranas, incluso en contextos de alta carga asistencial^{4,8,10}.

El avance de los modelos de inteligencia basados en IA ha permitido automatizar la detección del riesgo de ulceración mediante el análisis de termogramas plantares^{5,11}. No obstante, en la práctica clínica requiere ir más allá de la clasificación del riesgo y profundizar en la comprensión de los procesos fisiológicos que la generan. En este contexto, la TI puede aportar un valor añadido al permitir la evaluación de la respuesta térmica dinámica, analizando como el pie reacciona ante estímulos fisiológicos como son la marcha y la recuperación⁹. Este enfoque posibilita integrar la información térmica con parámetros clínicos relevantes, como el estado vascular, neurológico y los hábitos de autocuidado.

OBJETIVOS

- **Objetivo principal.** Evaluar la utilidad de la TI móvil como herramienta complementaria en el cribado del PD, analizando su asociación con factores de riesgo clave —vasculares (ausencia de pulsos, ITB), neuropáticos (neuropatía sensitiva) y conductuales (autocuidados)— en pacientes de AP.
- **Objetivos secundarios.**
 - Investigar la asociación entre los patrones termográficos y los indicadores de enfermedad arterial periférica, específicamente la ausencia de pulsos pedios y los valores del ITB.
 - Analizar la relación entre los hallazgos termográficos y la presencia de neuropatía sensitiva, evaluada mediante monofilamento y diapason.
 - Explorar la correlación entre la asimetría térmica y el nivel de autoconocimiento y autocuidados del paciente, medido a través del cuestionario DSFQ-UMA.
 - Caracterizar la respuesta térmica plantar de los pacientes tras un estímulo de marcha estandarizado para identificar patrones de recuperación vascular.

METODOLOGÍA

Se realizó un estudio observacional, descriptivo y transversal, orientado a analizar los patrones térmicos plantares en distintas condiciones fisiológicas controladas (reposo, exploración clínica, deambulación y recuperación) en personas con DM2 atendidas en el ámbito de la AP.

La población diana estuvo constituida por personas con DM2 atendidas en varios centros de salud del Distrito Sanitario Málaga-Valle del Guadalhorce (Servicio Andaluz de Salud), en el marco del programa de cribado y prevención de PD.

- **Criterios de inclusión:**
 - Edad ≥ 18 años.
 - Diagnóstico confirmado de DM2.
 - Capacidad de caminar sin ayuda.
 - Capacidad de comprensión de las instrucciones.
- **Criterios de exclusión:**
 - Amputaciones previas en miembros inferiores.
 - Fiebre o procesos infecciosos activos.
 - Deterioro cognitivo que impida la colaboración.
 - Incumplimiento de las condiciones del protocolo (recogidas en el consenso TISEM).

Se empleó un muestreo consecutivo no probabilístico incorporando de manera secuencial a todos los pacientes con DM2 derivados desde los distintos cupos de medicina y enfermería a la agenda específica para el estudio, siempre que cumplieran los criterios de inclusión. Este método es adecuado para estudios descriptivos realizados en AP, ya que refleja el flujo real del programa de cribado y minimiza el sesgo de selección.

El tamaño muestral se calculó mediante la fórmula clásica para estimar una media con precisión determinada:

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \times S}{d} \right)^2$$

$Z_{\alpha/2} = 1,96$ (nivel de confianza del 95%); $S = 1,2$ (desviación estándar estimada del índice de riesgo térmico); $d = 0,25$ (precisión deseada);

$$n = \left(\frac{1,96 \times 1,2}{0,25} \right)^2 \approx 88,5$$

Se estimó un tamaño muestral mínimo de 89 sujetos. Finalmente se incluyeron 92 participantes para compensar posibles pérdidas de datos y asegurar robustez en el análisis. Este rango está respaldado por estudios recientes que han empleado muestras similares en investigación de termografía plantar en diabetes^{5,12}, así como por el estudio de Requena-Bueno et al.¹³, que validó el *software* ThermoHuman® con 30 sujetos y 120 imágenes térmicas en un contexto deportivo, demostrando la alta fiabilidad y eficacia en la segmentación automática de regiones plantares.

Todos los participantes fueron avisados previamente, en el momento de la citación telefónica, sobre las condiciones necesarias para cumplir el protocolo del consenso TISEM, incluyendo la abstención del ejercicio intenso, exposición térmica, aplicaciones de lociones sobre la piel y el consumo de estimulantes como caféína el día de la prueba⁷. Estas recomendaciones buscan minimizar la influencia de los factores individuales sobre la TsK, garantizando la fiabilidad de los datos termográficos.

Tras la explicación del estudio y la firma del consentimiento informado, los participantes permanecieron 15 min en reposo para alcanzar la estabilización térmica cutánea previa a la captura de las imágenes térmicas. Durante este período se llevó a cabo la recogida basal de las siguientes variables (tabla 1): edad, sexo, índice de masa corporal, hemoglobina glucosilada, años de evolución de la diabetes, comorbilidades asociadas (hipertensión arterial, retinopatía, nefropatía), hábito tabáquico, nivel de actividad física y conocimientos sobre el autocuidado del pie, evaluados mediante el cuestionario autoadministrado DSFQ-UMA.

Este instrumento, validado en población española, consta de 16 preguntas distribuidas en 3 dimensiones: autocuidado general, autoexploración y cuidado del calzado y calcetines. Cada ítem se responde mediante una escala tipo Likert de 5 opciones (0-4), y una puntuación que oscila entre 16 y 80 puntos. En esta versión, los valores más altos reflejan mayor conocimiento y mejores prácticas preventivas en el manejo del pie de personas con diabetes¹⁴.

El cribado del pie se llevó a cabo conforme al cribado del PD del SAS, descrito en el *Documento de Apoyo al Pie Diabético*¹⁵, basado a su vez en las guías internacionales del IWGDF. La exploración incluyó la evaluación neurológica mediante monofilamento de 10 g (en 3 puntos) y diapasón de 128 Hz. La valoración vascular se realizó mediante la palpación de pulsos pedios y tibial posterior y con el cálculo del ITB y la inspección estructural, donde se registró la presencia de deformidades, la limitación de la movilidad articular, la hiperqueratosis, los signos tróficos y los signos compatibles con pie de Charcot.

Posteriormente, cada paciente se estratificó según el riesgo de ulceración empleando de forma paralela los sistemas de clasificación del SAS

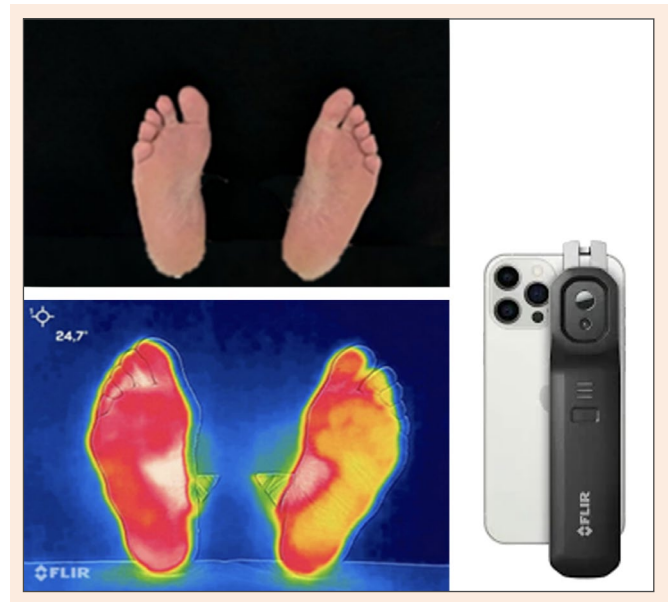


Figura 1. Captura térmica plantar bilateral obtenida con cámara FLIR One Edge Pro®. Se observa la distribución térmica en escala cromática (azul: frío; rojo: caliente) sobre fondo negro para mejorar el contraste radiométrico según protocolo TISEM.

(bajo, moderado o alto) y de la IWGDF (categorías 0 a 3) registrando los hallazgos en la historia de Diraya.

La toma de imágenes termográficas se realizó conforme a las recomendaciones TISEM, que establece los criterios de control ambiental y técnico necesarios para la fiabilidad de la adquisición de los datos térmicos⁷.

Las exploraciones se llevaron a cabo en una sala cerrada, con temperatura controlada entre 20 y 22 °C y humedad relativa del 40 al 70%, evitando corrientes de aire, radiación directa o fuentes de calor. La cámara térmica fue encendida al menos 20 min antes de la medición para estabilizar el sensor, tal como recomienda el protocolo TISEM.

Los pacientes se colocaron en decúbito supino, con los pies descalzos extendidos más allá del borde de la camilla, y se utilizó un fondo negro para mejorar el contraste radiométrico. Las imágenes se obtuvieron mediante una cámara Flir One Edge Pro® (FLIR Systems Inc., EE. UU.) acoplada a *smartphone* mediante conexión *bluetooth*. La cámara cuenta con una resolución de 160 × 120 píxeles, sensibilidad térmica ≤ 70 mK y emisividad 0,98. Se mantuvo una distancia de 1 m y un ángulo perpendicular de 90° respecto a la planta de los pies (fig. 1).

El protocolo de medición incluyó 5 fases: una imagen basal tras la aclimatación y el reposo de 15 min, otra imagen inmediatamente después de la deambulación de 100 m a ritmo habitual y las siguientes a los 5, 10 y 15 min de recuperación. Las imágenes fueron procesadas con el *software* ThermoHuman® validado para el análisis automatizado de termogramas plantares¹³. Este sistema segmenta cada pie en 8 regiones anatómicas bilaterales y calcula 2 métricas principales:

- *Índice de riesgo térmico (TRI)*. Expresa las regiones con asimetría térmica superiores a 0,3 °C. Se presenta en una escala de 0 a 100, en la que valores más altos indican mayor desequilibrio térmico (fig. 2).
- *Asimetría térmica media (ASYMMETRY RL-AVG)*. Representa la diferencia promedio de temperatura entre ambos pies. Valores positivos indican mayor temperatura en el pie derecho; negativos, en el izquierdo. Esta métrica permite detectar alteraciones térmicas laterales sutiles.

Tabla 1. Variables de estudio, tipo, escala y codificación

Bloque	Variable	Tipo	Escala	Unidad/codificación
Sociodemográficas	Edad	Cuantitativa	Continua	Años
	Sexo	Cualitativa	Nominal	0 = masculino; 1 = femenino
	Peso	Cuantitativa	Continua	Kg
	Talla	Cuantitativa	Continua	cm
	IMC	Cuantitativa	Continua	Kg/m ²
Clínicas	HbA1c	Cuantitativa	Continua	% (≥ 6,5% patológico)
	Tipo de DM	Cualitativa	Binaria	1 = DM1; 2 = DM2
	Años evolución DM	Cuantitativa	Continua	Años
	HTA	Cualitativa	Binaria	0 = no; 1 = sí
	Retinopatía	Cualitativa	Binaria	0 = no; 1 = sí
	ERC	Cualitativa	Binaria	0 = no; 1 = sí
	Fumador	Cualitativa	Nominal	0 = no; 1 = sí; 2 = exfumador
Conductuales	Actividad física	Cualitativa	Ordinal	0 = no; 1 = baja; 2 = moderada; 3 = alta
	DSFQ-UMA	Cuantitativa	Discreta	16-80 puntos
Exploración vascular	Pulso pedio D/I	Cualitativa	Binaria	0 = ausente; 1 = presente
	Pulso tibial post D/I	Cualitativa	Binaria	0 = ausente; 1 = presente
	ITB MID/MII	Cuantitativa	Continua	Ratio (normal: 0,9-1)
Exploración neurológica	Monofilamento D/I	Cualitativa	Binaria	0 = patológico; 1 = normal
	Diapasón D/I	Cualitativa	Binaria	0 = patológico; 1 = normal
Exploración estructural	Deformidades pie	Cualitativa	Binaria	0 = no; 1 = sí
	Primera articulación MTF D/I	Cualitativa	Ordinal	0 = limitus; 1 = rigidus; 2 = normal
	Limitación TPA D/I	Cualitativa	Binaria	0 = no; 1 = sí
Estratificación	IWGDF	Cualitativa	Ordinal	0 = muy bajo; 1 = bajo; 2 = moderado; 3 = alto
	SAS	Cualitativa	Ordinal	0 = bajo; 1 = moderado; 2 = alto
Ambientales	Temperatura sala	Cuantitativa	Continua	°C
	Humedad relativa	Cuantitativa	Continua	%
Termográficas	Momento	Cualitativa	Ordinal	0 = reposo; 1 = poscaminar; 2-4 = recuperación
	TRI	Cuantitativa	Continua	0-100
	ASYMMETRY RL-AVG	Cuantitativa	Continua	°C (positivo = pie derecho más caliente)

ASYMMETRY RL-AVG: asimetría térmica media; D/I: derecho/izquierdo; DM: diabetes mellitus; ERC: enfermedad renal crónica; HbA1c: hemoglobina glucosilada; HTA: hipertensión arterial; IMC: índice de masa corporal; ITB: índice tobillo-brazo; IWGDF: International Working Group on the Diabetic Foot; MID: miembro inferior derecho; MII: miembro inferior izquierdo; MTF: metatarsofalángica; SAS: Sistema Andaluz de Salud; TPA: tibioperoneoastragalina; TRI: índice de riesgo térmico.

Ambas variables se fundamentan en el análisis radiométrico cuantitativo y en algoritmos de visión artificial desarrollados por Thermohuman®, con una fiabilidad superior al 88% y una reducción del tiempo de análisis del 86% respecto al método manual (fig. 3)^{7,13}.

El análisis estadístico se realizó mediante el programa R (versión 4.3.1; R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria). La normalidad de las variables cuantitativas se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, seleccionada por su mayor sensibilidad frente a desviaciones de la normalidad en muestras clínicas, incluso cuando el tamaño muestral supera los 50 participantes. Aunque la prueba de Kolmogorov-Smirnov es común en muestras grandes, diversos estudios metodológicos recomiendan

la prueba Shapiro-Wilk por su mayor potencia estadística en contextos biomédicos con datos fisiológicos.

Las variables con distribución normal se expresaron como media ± desviación estándar (DE), y aquellas con distribución no normal como mediana (rango intercuartílico). Para comparar las fases del protocolo termográfico (reposo, posdeambulación y recuperación), se aplicó la prueba de la t de Student para muestras relacionadas en las variables con distribución normal, y la prueba de Wilcoxon para muestras relacionadas en las que no cumplían el criterio de normalidad. Este análisis por tramos permitió evaluar los cambios térmicos intraindividuales entre cada momento del protocolo.



Figura 2. Segmentación anatómica plantar generada por el *software* ThermoHuman®, utilizada para el análisis radiométrico automatizado. Las regiones se identifican mediante códigos FI (foot indicator), que corresponden a las distintas áreas plantares segmentadas automáticamente. Se identifican 8 regiones funcionales: primer dedo o hallux, dedos segundo a quinto, cabezas metatarsianas (primera, segunda a cuarta, y quinta), arco longitudinal medial y lateral, y talón (interno y externo). Esta segmentación permite calcular el índice de riesgo térmico (TRI) y la asimetría térmica media (ASYMMETRY RL-AVG), facilitando la detección de desequilibrios térmicos asociados a riesgo ulcerativo

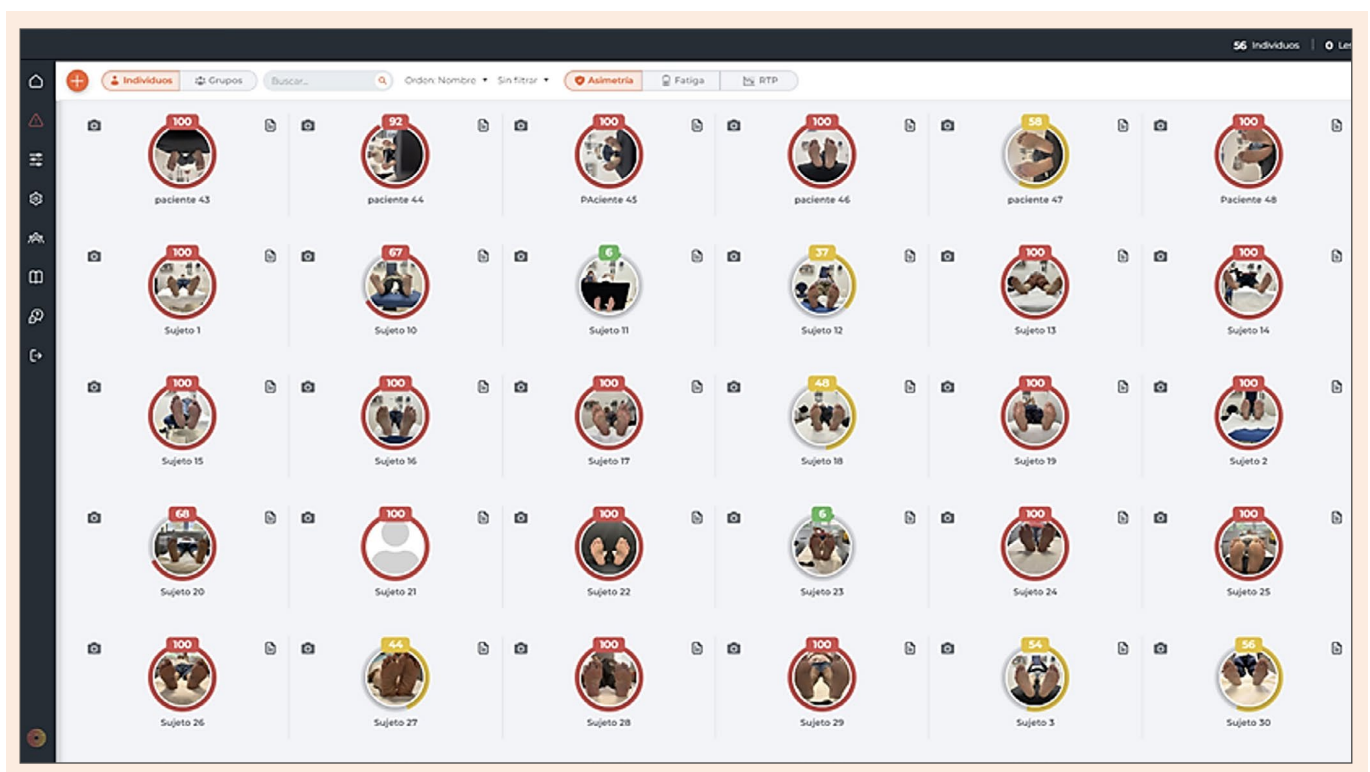


Figura 3. Interfaz del *software* ThermoHuman® durante el proceso de análisis de imágenes térmicas plantares. Se muestra la clasificación automatizada del índice de riesgo térmico (TRI) en una escala de 0 a 100, donde valores más altos indican mayor desequilibrio térmico y, por tanto, mayor riesgo. La codificación por colores (verde, amarillo, rojo) facilita la interpretación visual del riesgo entre distintos pacientes.

Las asociaciones entre las variables térmicas (TRI y ASYMMETRY RL-AVG) y los parámetros clínicos (presencia de pulsos, ITB, neuropatía y nivel de autocuidado) se analizaron mediante el coeficiente de correlación de Spearman, dada la naturaleza ordinal o no paramétrica de varias de estas variables.

Para examinar la evolución térmica a lo largo de las 5 fases del protocolo, se aplicaron modelos lineales mixtos de efectos aleatorios, que permitieron considerar la variabilidad intraindividual y el efecto del tiempo como factor repetido. Se consideró estadísticamente significativo un valor de $p < 0,05$.

El estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la Investigación del Distrito Sanitario Málaga-Valle del Guadalhorce (código CEI-DS-MVG/2025-02). Se cumplieron los principios éticos de la Declaración de Helsinki (2013) y la Ley Orgánica 3/2018, de Protección de Datos Personales y Garantía de los Derechos Digitales, así como el reglamento (UE) 2016/679(RGPD).

Todos los participantes firmaron el consentimiento informado antes de su inclusión, tras recibir información detallada sobre los objetivos del estudio, los procedimientos implicados y el tratamiento de sus datos personales. Se garantizó la confidencialidad de la información mediante codificación alfanumérica.

Los pacientes fueron informados de sus derechos ARCO (acceso, rectificación, cancelación y oposición), así como los derechos ampliados de limitación del tratamiento, portabilidad y supresión, pudiendo ejercerlos en cualquier momento mediante solicitud dirigida al equipo investigador. La participación fue voluntaria y no conllevó compensación económica.

RESULTADOS

Perfil de la muestra

Se incluyeron en el estudio 92 pacientes con DM2 atendidos en el ámbito de la AP. La edad media fue de 67,2 años ($DE \pm 8,9$), con un 44,6% de hombres. La muestra presentó un perfil metabólico de riesgo, con un índice de masa corporal medio de 31,1 Kg/m^2 ($DE \pm 4,3$) y una media de 10,9 años ($DE \pm 7,0$) de evolución de la enfermedad. La hemoglobina glicosilada media fue del 7,27% ($DE \pm 1,34$). Las comorbilidades más frecuentes fueron la hipertensión arterial (73,9%), la retinopatía (40,2%) y la nefropatía (7,6%).

El 72,8% de los participantes presentaba alguna deformidad estructural del pie, y el 70,7% limitación articular de la primera metatarsal, reflejando una alta prevalencia de alteraciones biomecánicas.

Exploración neurosensorial y vascular

En la exploración neurosensorial, un 31,5% de los participantes presentó signos de neuropatía periférica, mientras que el 83% conservaba pulsos pedios o tibiales posteriores palpables.

Nivel de autocuidados

El nivel de conocimientos y prácticas de autocuidado se evaluó mediante el cuestionario DSFQ-UMA con una puntuación media de 58,8 ($DE \pm 11,5$), reflejando un nivel intermedio de autoconocimiento y adherencia preventiva.

Estratificación del riesgo del pie diabético

- Según el Protocolo Andaluz de Estratificación (SAS)¹⁵.
 - Riesgo alto (2 o más factores de riesgo o antecedentes de úlcera/amputación): 68,5%.

- Riesgo moderado (presencia de un factor de riesgo: neuropatía, EAP o deformidad): 29,3%.
- Riesgo bajo (sin neuropatía ni EAP): 2,2%.
- Según la clasificación IWGDF.
 - Riesgo 0 (sin neuropatía ni EAP): 10,9%
 - Riesgo 1 (neuropatía sin EAP): 15,2%
 - Riesgo 2 (neuropatía + EAP o deformidades): 73,9%
 - Riesgo 3 (historia de úlcera/amputación/pie de Charcot/enfermedad renal crónica): 0%

Estos datos evidencian una cohorte predominantemente con alto riesgo de ulceración.

Análisis de la respuesta térmica

El análisis de la respuesta térmica plantar mostró variaciones significativas del TRI a lo largo de las fases del protocolo (reposo-deambulación-recuperación). En promedio, el TRI aumentó tras la deambulación, seguido de una recuperación parcial de los valores basales, lo que evidencia la sensibilidad del indicador frente al estímulo mecánico.

El modelo lineal mixto identificó interacciones estadísticamente significativas entre el momento del protocolo de evaluación (reposo, posdeambulación y recuperación) y:

- El nivel de conocimientos sobre autocuidados ($F[8,352.04] = 3,96$; $p < 0,001$),
- La presencia de pulsos derechos ($F[4,360.02] = 2,43$; $p = 0,047$),
- La presencia de pulsos izquierdos ($F[4,359.99] = 2,92$; $p = 0,021$).

No se observan diferencias significativas con la presencia de neuropatía ni con el ITB.

Influencia del autocuidado en la respuesta térmica

La respuesta térmica fue dependiente del nivel de conocimientos y conductas de autocuidado. Los pacientes con mayor nivel de conocimientos y conductas de autocuidado presentaron una curva más estable a lo largo del protocolo, con menor incremento posdeambulación y una recuperación más rápida hacia la temperatura basal. En cambio, los pacientes con puntuaciones más bajas mostraron un perfil térmico más irregular, con picos térmicos más pronunciados y recuperación más lenta, lo que sugiere una termorregulación menos eficiente y mayor vulnerabilidad tisular (fig. 4).

Influencia del estado vascular

La presencia de pulsos pedios se asoció significativamente con la trayectoria térmica. Los pacientes con pulsos presentaron una respuesta fisiológica más adaptativa, con incremento térmico moderado tras la marcha y recuperación progresiva durante el reposo. En cambio, aquellos sin pulsos evidenciaron una recuperación incompleta de la temperatura, lo que podría sugerir un patrón térmico de hipoperfusión o alteraciones vasculares subyacentes (figs. 5 y 6).

En conjunto, los hallazgos confirman que la respuesta térmica plantar dinámica, evaluada mediante TRI y procesada con análisis radiométrico automatizado, constituye un marcador sensible a variaciones clínicas y conductuales relevantes, particularmente al estado vascular y al nivel de autocuidado del paciente. Esta herramienta permitió identificar patrones térmicos diferenciados que no se evidencian mediante la exploración clínica convencional.

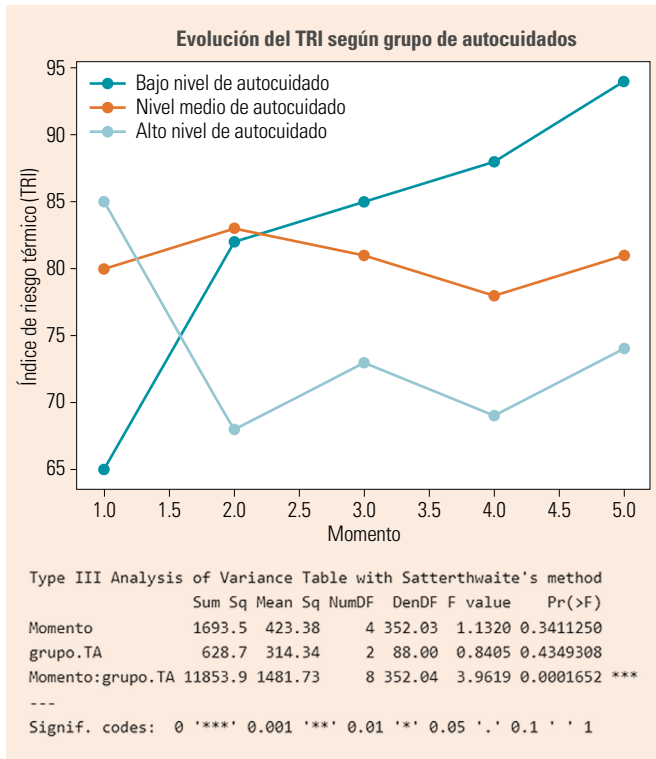


Figura 4. Evolución de la media del índice de riesgo térmico (TRI) en los 5 momentos del protocolo, según el nivel de conocimientos sobre autocuidados.

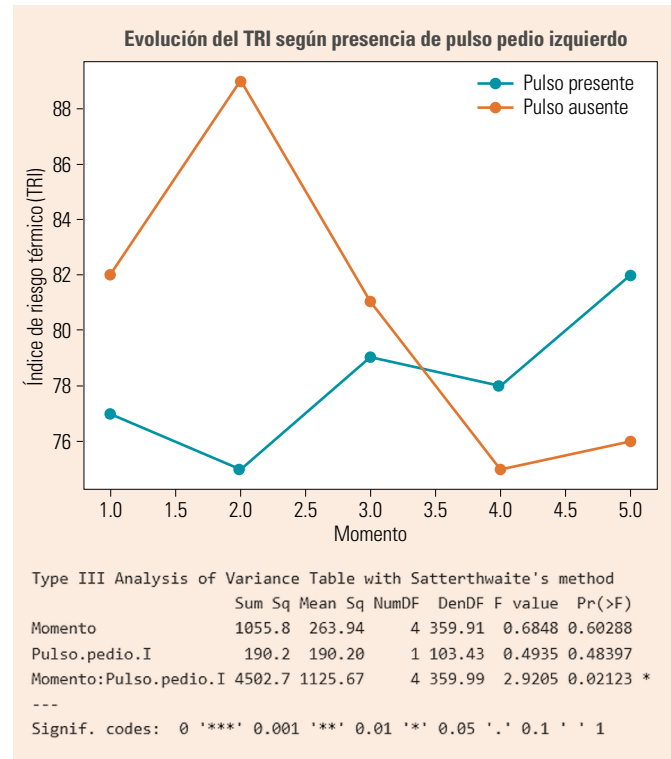


Figura 5. Evolución de la media del índice de riesgo térmico (TRI) en los 5 momentos del protocolo, según la presencia o ausencia de pulso pedio izquierdo.

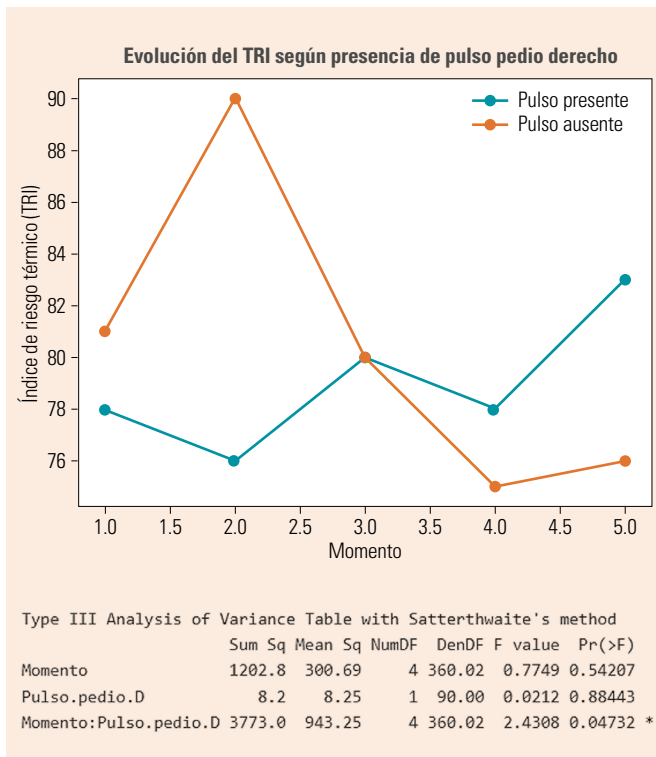


Figura 6. Evolución de la media del índice de riesgo térmico (TRI) en los 5 momentos del protocolo, según la presencia o ausencia de pulso pedio derecho.

DISCUSIÓN

Este estudio aporta evidencia sobre la sensibilidad de la TI móvil aplicada mediante protocolo dinámico en la detección de variaciones térmicas plantares asociadas a factores clínicos y conductuales en pacientes con DM2. La evolución del TRI mostró una respuesta más eficiente en pacientes con pulsos palpables y mayor nivel de autocuidados, lo que sugiere una mejor autorregulación vascular y menor vulnerabilidad tisular.

La asociación entre respuesta térmica (TRI) y nivel de autoconocimientos (DSFQ-UMA) sugiere que los pacientes con mayor conocimiento y mejores prácticas preventivas presentaron una termorregulación más eficiente y menor variabilidad clínica tras el estímulo de la deambulación, lo que refleja mayor competencia vascular y funcional. En cambio, los pacientes con menor autocuidado mostraron una recuperación más lenta y picos térmicos más pronunciados, vinculados con una mayor vulnerabilidad tisular. Estos resultados coinciden con los descritos por Faus Camarena et al.⁴, quienes destacan la capacidad de la TI para identificar cambios sutiles asociados a procesos inflamatorios subclínicos asociados al riesgo ulcerativo.

Asimismo, la correlación entre la respuesta térmica y la palpación de pulsos pedios concuerda con lo descrito por Renero et al.¹⁶ y Siré Langa et al.⁵, quienes demostraron la relación entre patrones térmicos y la perfusión arterial periférica detectadas mediante técnicas de imagen e IA. En nuestro estudio, la respuesta térmica dependiente de los pulsos pedios aporta un indicador funcional complementario al ITB, especialmente útil en pacientes con arterioesclerosis calcificada, donde las pruebas hemodinámicas pueden perder fiabilidad.

A diferencia de estudios previos centrados en imágenes estáticas o en algoritmos de clasificación automática^{5,12,17}, el presente trabajo propone un

enfoque interpretativo, basado en un protocolo dinámico reposo-deambulación-recuperación, adaptado al consenso TISEM, que permite evaluar la respuesta adaptativa térmica como reflejo de la perfusión y la regulación tisular.

Además, como advierten Faus Camarena et al.⁴, uno de los principales desafíos de la aplicación clínica de la TI es la falta de estandarización metodológica. La literatura muestra una alta variabilidad en los dispositivos utilizados (con diferencias en sensibilidad térmica, resolución y calibración) en el control de las condiciones ambientales durante la captura, y en la calidad y homogeneidad de las bases de datos empleadas. Esta dispersión limita la reproducibilidad de los resultados y dificulta la consolidación de criterios clínicos uniformes. Para minimizar este sesgo, nuestro estudio aplicó un protocolo consensuado de expertos TISEM, que permitió estandarizar las condiciones ambientales y la interpretación clínica, reforzando la validez interna del análisis.

En comparación con el metaanálisis de Araujo et al.⁷ sobre termometría plantar, que demostró una reducción significativa de ulceración (RR = 0,53; IC95%: 0,29-0,96; $p = 0,02$) mediante mediciones estáticas domiciliarias, este estudio amplía el conocimiento al incorporar un componente dinámico y a la vez conductual, vinculando las variaciones térmicas con factores educativos y clínicos de la práctica enfermera.

Limitaciones

Este estudio presenta diversas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, el diseño descriptivo y transversal impide establecer relaciones causales entre los parámetros térmicos observados y los desenlaces clínicos, así como la aparición de lesiones o úlceras. Serían necesarios estudios longitudinales para evaluar el valor predictivo del TRI y su utilidad en el seguimiento evolutivo del PD.

En segundo lugar, aunque se aplicó un protocolo dinámico estandarizado, el tamaño muestral moderado puede limitar la potencia estadística para detectar asociaciones clínicas menos evidentes. La inclusión de una muestra más amplia y diversa permitiría validar los hallazgos en distintos contextos asistenciales.

Como advierte Faus Camarena et al.⁴, la aplicación clínica de la termografía presenta limitaciones metodológicas relevantes como la variabilidad entre dispositivos, el control ambiental inconsistente y la heterogeneidad de las bases de datos. Para mitigar estos factores, este

estudio adoptó un protocolo dinámico estandarizado, consensuado por el grupo TISEM, que permitió homogeneizar las condiciones de captura, el procesamiento radiométrico y la interpretación clínica. Aunque esta estrategia mejora la reproducibilidad interna, sigue siendo necesario contrastar su aplicabilidad en otros contextos asistenciales y con poblaciones más amplias.

CONCLUSIONES

- La TI móvil aplicada mediante un protocolo dinámico mostró utilidad como herramienta complementaria en el cribado del PD, al asociarse con factores vasculares y conductuales relevantes y aportar información funcional adicional en AP.
- La respuesta térmica mostró una asociación significativa con la presencia de pulsos pedios, reforzando su utilidad para identificar posibles alteraciones vasculares. En cambio, no se observó relación con los valores ITB.
- No se observaron diferencias térmicas significativas según la presencia de neuropatía sensitiva evaluada mediante monofilamento y diapasón, lo que podría relacionarse con la limitada sensibilidad de estas pruebas para detectar alteraciones neurosensoriales en fases iniciales.
- Los pacientes con mayor nivel de conocimientos y prácticas de autocuidado mostraron una curva térmica más estable, con menor incremento posdeambulación y recuperación más rápida, lo que sugiere una mejor autorregulación vascular y adaptación tisular al estímulo mecánico.
- La evolución del TRI evidenció un patrón fisiológico de incremento tras la deambulación seguido de recuperación parcial, siendo esta dinámica más eficiente en pacientes con pulsos presentes y mejores prácticas de autocuidado.
- Los resultados respaldan el valor de la termografía como herramienta objetiva, accesible y no invasiva, capaz de complementar la exploración clínica tradicional. Su aplicación en AP permite ampliar el enfoque del cribado del PD, integrando dimensiones funcionales, educativas y tecnológicas que favorecen una valoración más integral y personalizada del riesgo ■

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

BIBLIOGRAFÍA

1. International Diabetes Federation. IDF Diabetes Atlas 2025. 11th ed. Brussels: IDF; 2025. Disponible en: <https://diabetesatlas.org/resources/idf-diabetes-atlas-2025/>
2. Schaper NC, van Netten JJ, Apelqvist J, Bus SA, Fitridge R, Game F, et al, editors. IWGDF guidelines on the prevention and management of diabetes-related foot disease. The Hague: IWGDF; 2023. Disponible en: <https://iwgdfguidelines.org/wp-content/uploads/2023/07/IWGDF-Guidelines-2023.pdf>
3. Armstrong DG, Tan TW, Boulton AJM, Bus SA. Diabetic foot ulcers: a review. *JAMA*. 2023;330:62-75.
4. Faus Camarena M, Izquierdo-Renau M, Julian-Rochina I, Arrébola M, Miralles M. Update on the use of infrared thermography in the early detection of diabetic foot complications: a bibliographic review. *Sensors (Basel)*. 2023;24:252.
5. Siré Langa A, Lázaro-Martínez JL, Tardáguila-García A, Sanz-Corbalaín I, Grau-Carrión S, Uribe-Elorrieta I, et al. Advanced AI-driven thermographic analysis for diagnosing diabetic peripheral neuropathy and peripheral arterial disease. *Appl Sci*. 2025;15:5886.
6. Kurkela O, Lahtela J, Arffman M, Forma L. Infrared thermography compared to standard care in the prevention and care of diabetic foot: a cost analysis utilizing real-world data and an expert panel. *Clinicoecon Outcomes Res*. 2023;15:111-23.
7. Araujo AL, Negreiros FDdS, Florêncio RS, Oliveira SKP, Silva ARVd, Moreira TMM. Effect of thermometry on the prevention of diabetic foot ulcers: a systematic review with meta-analysis. *Rev Lat Am Enfermagem*. 2022;30:e3567.
8. Moreira DG, Costello JT, Brito CJ, Adamczyk JG, Ammer K, Bach AJE, et al. Thermographic imaging in sports and exercise medicine: a Delphi study and consensus statement on the measurement of human skin temperature. *J Therm Biol*. 2017;69:155-62.
9. van Doremalen RFM, van Netten JJ, van Baal JG, Vollenbroek-Hutten MMR, van der Heijden F. Validation of low-cost smartphone-based thermal camera for diabetic foot assessment. *Diabetes Res Clin Pract*. 2019;149:132-9.
10. Haron A, Li L, Shuang J, Lin C, Mansoubi M, Shi X, et al. In-shoe plantar temperature, normal and shear stress relationships during gait and rest periods for people living with and without diabetes. *Sci Rep*. 2025;15:8804.
11. Qin Q, Nakagami G, Ohashi Y, Dai M, Sanada H, Oe M. Development of a self-monitoring tool for diabetic foot prevention using smartphone-based thermography: plantar thermal pattern changes and usability in the home environment. *Drug Discov Ther*. 2022;16:169-76.
12. Evangeline NC, Srinivasan S, Suresh E. Development of AI classification model for angiosome-wise interpretive substantiation of plantar feet thermal asymmetry in type 2 diabetic subjects using infrared thermograms. *J Therm Biol*. 2022;110:103370.
13. Requena-Bueno L, Priego-Quesada JL, Jiménez-Pérez I, Gil-Calvo M, Pérez-Soriano P. Validation of ThermoHuman automatic thermographic software for assessing foot temperature before and after running. *J Therm Biol*. 2020;92:102639.
14. Ruiz-Muñoz M, Fernández-Torres R, Formosa C, Gatt A, Gijón-Noguerón G, Navarro-Flores E, et al. Validity and reliability of the English version of the Diabetic Foot Self-Care Questionnaire: a cross-cultural adaptation. *Front Public Health*. 2024;11:1326439.
15. Aguilar Diosdado M, Almaraz Almaraz MC, Castro Campos JL, Contreras Rubio JR, Doiz Artacoiz E, Forcada Falcon M, et al. Pie diabético: documento de apoyo. Sevilla: Consejería de Salud y Consumo; 2023. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10668/23279>
16. Renero-C FJ, Ziga-Martínez A, Silva-González M, Carbajal-Robles V. The peripheral artery disease through the thermogram and the photoplethysmogram before and after a revascularization surgery. *J Diabetes Sci Technol*. 2021;15(5):1200-1.
17. Carabott M, Formosa C, Mizzi A, Papanas N, Gatt A. Thermographic characteristics of the diabetic foot with peripheral arterial disease using the angiosome concept. *Exp Clin Endocrinol Diabetes*. 2021;129:93-8.