

Tecnologías emergentes para la evaluación de la profundidad de las quemaduras: una revisión integral

Emerging technologies for burn depth assessment: a comprehensive review

Olga Rodríguez Sánchez¹ <https://orcid.org/0000-0001-5042-3851>

Alicia María Tamayo Carbón^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-5006-266X>

Luz Marina Miquet Romero¹ <https://orcid.org/0000-0002-1924-7092>

Diana Katherine Cuastumal Figueroa¹ <https://orcid.org/0000-0001-5277-281X>

¹Hospital Clínico Quirúrgico "Hermanos Ameijeiras." La Habana, Cuba.

*Autor para la correspondencia: aliciatamayo67@gmail.com

RESUMEN

Introducción: En la práctica médica rutinaria, el diagnóstico de la profundidad de las quemaduras es subjetivo, basado solo en tres grados, según las capas de la piel, pero estas presentan varios estratos, cuyos límites de afectación por la quemadura resultan difíciles de establecer y constituyen una limitación en el pronóstico de la lesión, que pudiera diferenciarse mejor con el uso de la tecnología. Al tener en cuenta hasta dónde se puede conocer, no está descrito método objetivo certero y no invasivo para diagnosticar la profundidad de las quemaduras, monitorizar la evolución y el pronóstico.

Objetivo: Exponer las tecnologías emergentes para el diagnóstico de la profundidad de las quemaduras.

Métodos: Revisión bibliográfica en PubMed, Elsevier, Google Académico, Research y SciELO de los artículos, tanto en inglés como en español. De las 165 fuentes

encontradas, se seleccionaron 41 y se tuvo en cuenta, como criterio de inclusión, los artículos completos, los originales, las revisiones bibliográficas, los metaanálisis, los ensayos clínicos, desde 2006 hasta 2025. Se excluyeron 124, que no cumplieron el criterio de selección por tratarse de comunicaciones breves, resúmenes de congresos, cartas al editor y artículos *in-press*.

Resultados: Proporciona una visión integral y actualizada desde las técnicas clínicas establecidas hasta las herramientas como la IA, y se destaca el potencial de estas innovaciones para lograr un diagnóstico más objetivo y predictivo. Evidencia las limitaciones de muchas herramientas que carecen de estandarización, debido a la falta de estudios comparativos, consenso y barreras prácticas de implementación. Aboga por la integración de estas nuevas tecnologías a la clínica para individualizar el diagnóstico y el tratamiento.

Conclusiones: El futuro del diagnóstico de las quemaduras apunta hacia sistemas integrados de apoyo clínico, que, mediante la fusión de datos multimodales e inteligencia artificial, generan modelos predictivos y personalizados de la herida, los cuales no reemplazan, sino que potencian la experiencia del cirujano, al permitir un tratamiento más preciso y mejorar radicalmente los resultados.

Palabras clave: quemaduras; diagnóstico por imágenes; nanotecnología; realidad virtual; inteligencia artificial.

ABSTRACT

Introduction: In routine medical practice, the diagnosis of burn depth is subjective, based solely on three degrees according to skin layers. However, skin has several layers, and the extent of burn involvement is difficult to establish, limiting the prognosis of the injury. This could be better differentiated with the use of technology. Given that, to our knowledge, no objective, accurate, and non-invasive method has been described for diagnosing burn depth and monitoring its evolution and prognosis, this literature review was conducted.

Objective: To expose emerging technologies for diagnosing burn depth.

Methods: A literature review was conducted in PubMed, Elsevier, Google Scholar, Google Research, and SciELO, including articles in both English and Spanish. Of the 655 sources found, 41 were selected. Inclusion criteria included full-text articles, original research, literature reviews, meta-analyses, clinical trials, and publication dates from 2006 to 2025. 124 sources were excluded because they did not meet the selection criteria, being brief communications, conference abstracts, letters to the editor, and in-press articles.

Results: This study provides a comprehensive and up-to-date overview, from established clinical techniques to tools such as AI, highlighting the potential of these innovations to achieve more objective and predictive diagnoses. It demonstrates the limitations of many tools that lack standardization due to a lack of comparative studies, consensus, and practical implementation barriers. It advocates for the integration of these new technologies into clinical practice to personalize diagnosis and treatment.

Conclusions: The future of burn diagnosis points toward integrated clinical support systems that, through the fusion of multimodal data and artificial intelligence, generate predictive and personalized wound models. These models do not replace, but rather enhance, the surgeon's expertise, enabling more precise treatment and radically improving outcomes.

Keywords: burns; diagnostic imaging; nanotechnology; virtual reality; artificial intelligence.

Recibido: 26/12/2025

Aceptado: 18/08/2026

Introducción

Las quemaduras constituyen una de las lesiones traumáticas más devastadoras, capaces de provocar necrosis tisular de extensión y profundidad variables. Su

etiología diversa (térmica, química, eléctrica) genera, no solo alteraciones locales, sino también respuestas sistémicas, que pueden comprometer la vida del paciente, al resultar con frecuencia en la discapacidad permanente, el deterioro de la calidad de vida y una significativa carga para los sistemas de salud.⁽¹⁾

La magnitud del problema resulta global. Según la Organización Mundial de la Salud, las quemaduras causan aproximadamente 265 000 muertes anuales, además de un número incalculable de secuelas físicas y psicológicas. La gravedad y el pronóstico dependen de factores críticos como la profundidad y la extensión de la lesión, la localización anatómica y las condiciones basales del paciente.⁽²⁾

En contextos nacionales, como el de Cuba, representan un importante problema de salud pública. Aunque se reportan mejoras en las últimas décadas, con alrededor de 3000 casos anuales, la mayoría (80 %) de carácter menor, su incidencia afecta, predominantemente, a poblaciones vulnerables como niños y adultos mayores, al ser los líquidos calientes, las llamas y los agentes químicos las causas principales.⁽³⁾

El pilar del manejo inicial y la planificación terapéutica consisten en una evaluación precisa de la profundidad de la lesión. Tradicionalmente, esta valoración se basa en la inspección visual y el examen táctil de características como el color, la textura y la sensibilidad. Sin embargo, la evidencia demuestra que este método clínico, incluso en manos expertas, tiene una precisión que oscila entre un 60 % y un 75 %, con una tasa de error que puede alcanzar el 30-70 %.⁽⁴⁾

Esta subjetividad inherente conlleva el riesgo de subestimar o sobrestimar la lesión, lo que repercute, directamente, en decisiones cruciales como el tiempo de realizar la escarectomía, la necesidad de injerto y, en última instancia, el resultado funcional y estético.

Ante esta limitación diagnóstica, resulta imperativa la incorporación de tecnologías de imagen complementarias y objetivas. Estas herramientas, que evalúan parámetros fisiopatológicos como la perfusión microvascular, la elasticidad tisular, la estructura anatómica microscópica y la composición bioquímica, ofrecen mediciones cuantitativas que pueden aumentar la precisión del diagnóstico. No

existe una tecnología única e ideal; su valor potencial reside en la integración multimodal, donde la información complementaria de distintas técnicas permitiría una caracterización integral del daño tisular.

Actualmente, tecnologías como la termografía infrarroja, la elastografía por ultrasonido, la tomografía de coherencia óptica (OCT), la imagen hiperespectral y los sistemas asistidos por inteligencia artificial, se encuentran en avanzadas fases de investigación y validación clínica inicial. No obstante, aún no constituyen un estándar de oro ampliamente establecido en la práctica rutinaria, y su implementación requiere de mayor estandarización y evidencia de eficacia.

Considerando que persiste la necesidad de un método objetivo, certero y no invasivo para diagnosticar la profundidad de las quemaduras y monitorear su evolución, se realiza la presente revisión bibliográfica con el objetivo de exponer las tecnologías emergentes en el diagnóstico de la profundidad de las quemaduras.

Métodos

Revisión bibliográfica en PubMed, Elsevier, Google Académico, Research y SciELO de los artículos, tanto en inglés como en español. Se utilizaron las siguientes estrategias de búsqueda, mediante la combinación de descriptores con operadores booleanos, al limitar el "AND" para términos diferentes y el "OR" para términos también homólogos:

- Quemaduras AND, nanotecnología, OR nanopartículas
- Diagnóstico por imágenes AND quemaduras
- Quemaduras AND, realidad virtual, OR realidad aumentada
- Inteligencia artificial, AND por quemaduras

De las 165 fuentes encontradas, se seleccionaron 41 y se tuvo en cuenta como criterios de inclusión los artículos completos, los originales, las revisiones

bibliográficas, los metaanálisis, los ensayos clínicos, desde 2006 hasta 2025. Se excluyeron 124 que no cumplieron el criterio de selección por tratarse de comunicaciones breves, resúmenes de congresos, cartas al editor y artículos *in press*.

Consideraciones éticas

El presente estudio fue aprobado por el consejo científico de la institución. La investigación se realizó conforme a los principios de la ética médica, a las normas éticas institucionales y nacionales vigentes, y a los principios de la Declaración de Helsinki 2024.⁽⁵⁾

Desarrollo

La piel se divide en tres estratos. La epidermis actúa como escudo contra factores externos, y facilita su hidratación y renovación. Contiene corneocitos, queratinocitos, melanocitos y células de Langerhans; estas últimas esenciales como células presentadoras de antígenos en el sistema inmunológico.

La dermis es una estructura fibrosa compuesta por colágeno, elastina y elementos nerviosos, que proporciona soporte y funciones glandulares. Mientras tanto, la hipodermis está compuesta por adipocitos, macrófagos y fibroblastos, lo que ofrece soporte a las capas superiores.⁽⁶⁾

En las lesiones por quemadura la extensión se mide como un porcentaje del área corporal total afectada. En cuanto a la profundidad, las de primer grado solo afectan la epidermis, mientras que las de segundo grado dañan la epidermis y la capa superior de la dermis. Las de tercer grado comprometen toda la piel, y las de cuarto grado afectan tejidos más profundos, como músculos y huesos. Tras la lesión, se desencadena una respuesta vasomotora en los tejidos afectados, que empieza con vasoconstricción y seguida por vasodilatación.⁽⁷⁾ Esto lleva a un

fenómeno de isquemia/reperfusión, que da lugar a tres zonas concéntricas en el área quemada, identificadas por Jackson, en 1947.

Estas zonas comprenden: una central de coagulación, donde se produce necrosis tisular; una intermedia con estasis venoso, crucial en el momento del tratamiento; y una periférica con hiperemia arterial.

La interacción de estos factores determina la gravedad de la quemadura, e influye en su pronóstico y enfoque terapéutico con la finalidad de minimizar las secuelas funcionales y estéticas.⁽⁸⁾

En el análisis del pronóstico, resulta esencial considerar las cinco capas que conforman la epidermis y valorar la relevancia de la zona de estasis de Jackson, ya que esta influye en la progresión de las lesiones.

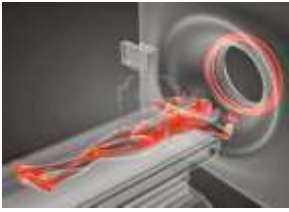
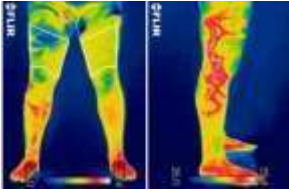
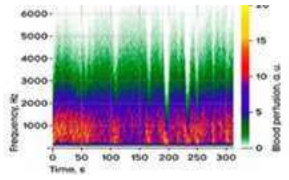
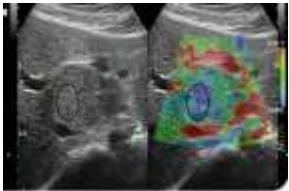
Aunque se puede realizar una evaluación subjetiva de estos componentes, no siempre se obtiene un diagnóstico definitivo sobre la profundidad de la lesión. Por ello, resulta crucial emplear tecnologías que faciliten un diagnóstico preciso y objetivo del grado de afectación de la quemadura.

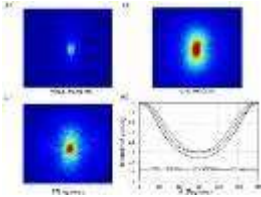
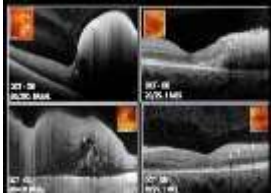
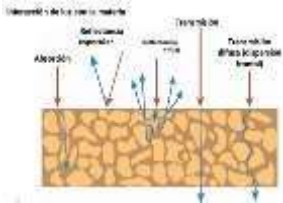
Tecnologías

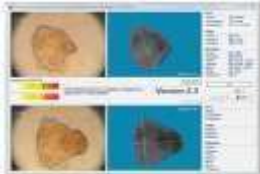
Varios estudios han evidenciado que, en ocasiones, un cirujano experimentado puede errar en la evaluación de la profundidad de una lesión entre un 30 % y 70 % de las veces.^(9,10,11)

Además, para los nuevos cirujanos, esta tarea puede representar un desafío considerable, donde la evaluación temprana y precisa de la profundidad resulta importante para determinar el tratamiento óptimo, lo que hace necesario la profundización en las diferentes tecnologías para facilitar un diagnóstico certero, y que ayude a un mejor tratamiento y pronóstico de las quemaduras (tabla. 1).

Tabla 1 - Resumen de tecnologías modernas aplicadas a la atención del paciente quemado

Técnica	Imagen	Mecanismo de acción	Interpretación y aplicaciones
Resonancia nuclear magnética		Utiliza campos magnéticos y ondas de radiofrecuencia para obtener imágenes detalladas de los tejidos del cuerpo	Visualiza estructuras para determinar la profundidad de las quemaduras
Termografía infrarroja		Utiliza cámaras térmicas para detectar y medir la radiación infrarroja emitida por los tejidos debido a su temperatura	Quemaduras superficiales: leve disminución de la temperatura Quemaduras profundas: Anomalías térmicas en el área afectada
Láser Doppler		Emisión de haz de luz láser transportada por una sonda de fibra óptica. Se basa en el cambio de frecuencia de onda cuando se refleja en un objeto en movimiento (glóbulos rojos)	Quemaduras superficiales: buen flujo sanguíneo Quemaduras profundas: perfusión sanguínea comprometida
Elastografía por ultrasonido		Aplicar ultrasonido sobre área afectada para estudio de cambios en la elasticidad de los tejidos subyacentes	Quemadura superficial: Disminución temporal de la elasticidad de la piel. Quemadura profunda: cambios más significativos y permanentes.

Láser speckle		Fenómeno óptico que ocurre al iluminar una superficie con luz láser, lo que genera un patón granulado de luz en la superficie.	Quemaduras superficiales: sin afectación de la perfusión sanguínea Quemaduras profundas: con afectación de la perfusión sanguínea
Tomografía de coherencia óptica		Utiliza luz infrarroja para obtener imágenes de alta resolución de estructuras microscópicas dentro de los tejidos	Quemaduras superficiales: afección de la epidermis sin compromiso de vascularización Quemaduras profundas: afección de la dermis y estructuras subyacentes con compromiso de vascularización
Fluorescencia con verde de indocianina		Inyección de verde de indocianina por vía intravenosa que a medida que circula se ilumina bajo luz infrarroja lo que proporciona información sobre perfusión sanguínea	Buena fluorescencia: Buena perfusión sanguínea Ausencia de fluorescencia: perfusión comprometida Patrones irregulares: tejido viable e inviable
Espectroscopia de reflectancia		Explora las propiedades de los tejidos mediante la absorción, emisión o dispersión de radiación electromagnética en función de la frecuencia o energía	Los cambios en la reflectancia en diferentes longitudes de onda indican alteraciones en la vascularización, hidratación, estructura de

			colágeno y presencia de tejido necrótico
Dermatoscopía		Se realiza visualización de la piel mediante iluminación polarizada y magnificación	Quemaduras superficiales: afección de la epidermis Quemaduras profundas: afección de la dermis y estructuras subyacentes
Biomarcadores		Se centra en identificar sustancias indicativas de gravedad y profundidad de las quemaduras	Marcadores inflamatorios: TNF- α e IL-6, indican la severidad de las quemaduras. Marcadores de daño celular: CK y troponina. Lesiones tisulares profundas
Técnicas de imagen molecular		Implica el uso de sondas o trazadores moleculares específicos que se dirijan a procesos o biomarcadores particulares asociados con la respuesta a las quemaduras	Quemaduras superficiales: sin afectación de la perfusión sanguínea Quemaduras profundas: con afectación de la perfusión sanguínea
Inteligencia artificial		Emulación de la capacidad humana al utilizar algoritmos y modelos matemáticos	Identifica características específicas en las imágenes y fotografías para proporcionar una evaluación precisa de la lesión

Nanotecnología		Se centra en el estudio, diseño, producción y aplicación de estructuras y sistemas a escala nanométrica	Materiales de curación Liberación controlada de medicamentos Biomarcadores y matrices celulares Diagnóstico y monitorización Prevención de infecciones
Realidad aumentada y realidad virtual		Superpone información digital, gráficos, imágenes y otros elementos virtuales en el mundo real, a través de dispositivos	Educación y formación Simulación de escenarios clínicos Terapia y rehabilitación Gestión del dolor y ansiedad

Imagen por resonancia magnética

Útil para evaluar la profundidad de la lesión y la extensión del daño tisular, y detectar complicaciones como infecciones profundas o afectación de estructuras subyacentes en tejidos blandos; también ayuda a planificar el tratamiento y evaluar la recuperación. Visualiza estructuras profundas como músculos, huesos y órganos internos. Evalúa la perfusión sanguínea y presencia de edema, de tejido necrótico, extensión de la inflamación y otros cambios tisulares.⁽¹²⁾ Ofrece información valiosa, pero no es la técnica de elección para la evaluación de quemaduras superficiales, debido a su limitada resolución en la piel.

Termografía infrarroja (IRT)

Utiliza cámaras térmicas para detectar y medir la radiación infrarroja emitida por un objeto o una superficie. Proporciona datos sobre la temperatura superficial de la piel y muestra áreas con cambios térmicos; no determina directamente la profundidad de las quemaduras, pero puede ser útil en aspectos relacionados con

la evaluación de estas. Sus beneficios incluyen la identificación de áreas de inflamación o daño térmico antes de que sean visibles, con una determinación indirecta de la profundidad, ya que diferentes grados de quemaduras emiten diferentes niveles de radiación térmica, y puede mostrar patrones de temperatura, que indican la presencia de inflamación; también ayuda a identificar áreas críticas que podrían requerir una atención más detallada y el seguimiento no invasivo del progreso de la curación.^(13,14)

La literatura actual confirma que la IRT es una herramienta no invasiva y objetiva para evaluar la profundidad de las quemaduras. Un metaanálisis publicado en 2024 reporta una precisión global del 84,8 % (sensibilidad 63 %, especificidad 81,9 %) para IRT en la identificación de la profundidad y el potencial de curación de quemaduras, aunque se recomienda precaución en su interpretación clínica, debido a su precisión moderada, comparada con las tecnologías más avanzadas.⁽¹⁵⁾ Además, una revisión exhaustiva publicada, en 2025, destaca el uso de dispositivos de IRT en el punto de atención para la evaluación de quemaduras, al subrayar su utilidad en la predicción de trayectorias de curación, aunque señala limitaciones como el tamaño reducido de las muestras y la necesidad de estudios prospectivos más amplios para validar su utilidad clínica.⁽¹⁶⁾

Láser Doppler

Tecnología no invasiva, que emplea un haz de luz láser para evaluar el flujo sanguíneo y la perfusión tisular. No determina directamente la profundidad de las quemaduras; su aplicación en este campo ha demostrado ser valiosa para determinar indirectamente la profundidad y extensión de la lesión, lo que ayuda en la planificación del tratamiento y en la predicción del pronóstico. Permite la evaluación temprana y rápida de la viabilidad tisular, que puede guiar las decisiones clínicas sobre el manejo inicial de la quemadura, al proporcionar información sobre la profundidad. Se reduce la necesidad de biopsias invasivas, al minimizar el riesgo de complicaciones y de cicatrices adicionales.

El monitoreo de la perfusión tisular permite ajustes rápidos en el tratamiento si resultara necesario; y mejora el pronóstico al guiar las intervenciones terapéuticas.⁽¹⁷⁾ Su aplicación en las quemaduras examina la perfusión sanguínea en la región afectada, donde una reducción en el flujo sanguíneo puede indicar lesiones vasculares, y proporcionar información relevante para discernir la gravedad y la profundidad de la quemadura. El seguimiento continuo permite evaluar cambios en el flujo sanguíneo con el tiempo, o información dinámica que constituye vital para comprender la evolución del paciente y cómo responde al tratamiento, al ser especialmente valiosa en el manejo integral de las quemaduras.⁽¹⁸⁾

Elastografía por ultrasonido

Técnica de imagen que mide la elasticidad y rigidez de los tejidos de manera no invasiva. En el contexto de las quemaduras, se utiliza para evaluar la profundidad y extensión de la lesión, ya que el tejido dañado y cicatricial presenta una mayor rigidez en comparación con la piel sana. Esta evaluación objetiva ayuda a determinar la gravedad de la quemadura, y facilita una mejor planificación del tratamiento, ya sea conservador o quirúrgico.⁽¹⁹⁾ Es una herramienta valiosa para el seguimiento dinámico de la cicatrización. Al monitorizar los cambios en la elasticidad a lo largo del tiempo, los clínicos pueden evaluar la eficacia de las terapias aplicadas y detectar precozmente complicaciones como la fibrosis. Si bien su potencial resulta significativo, es crucial destacar que esta técnica no constituye un estándar diagnóstico en la práctica clínica actual para las quemaduras, y su aplicación específica permanece en fase de investigación.⁽²⁰⁾

Láser *speckle*

Técnica que se utiliza para evaluar la perfusión sanguínea en áreas de tejido quemado. Permite visualizar y cuantificar cambios al medir la variación de la luz, dispersada por la superficie de la piel. Al iluminar el área con un láser y analizar el patrón de *speckle*, que se forma, debido a la dispersión de la luz por los

movimientos microscópicos de las células sanguíneas, es posible obtener información sobre la perfusión sanguínea. Una reducción en la perfusión podría indicar un daño más severo en el tejido quemado.⁽²¹⁾ Es una técnica no invasiva, que permite evaluaciones rápidas y ofrece datos cuantitativos sobre la perfusión del tejido afectado; sin embargo, aunque resulta prometedora, aún se encuentra en etapas de investigación y desarrollo para su aplicación en el diagnóstico de las quemaduras.

Tomografía de coherencia óptica

Técnica no invasiva que utiliza luz infrarroja para obtener imágenes de alta resolución de estructuras microscópicas dentro de los tejidos. En las quemaduras, ofrece ventajas específicas, al proporcionar imágenes detalladas de las capas superficiales de la piel, lo que permite determinar la profundidad exacta y evaluar el daño a estructuras como el epitelio, la dermis y la hipodermis. Puede visualizar cambios microscópicos en los tejidos, como la presencia de tejido necrótico, inflamación y regeneración celular, que accede a evaluar el grado de lesión y planificar el tratamiento adecuado.⁽²²⁾ Permite una valoración precisa de la evolución de la cicatrización, mediante la respuesta del tejido al tratamiento y la identificación temprana de complicaciones, como infecciones o formación de cicatrices anómalas. Ofrece la capacidad de examinar las estructuras vasculares cutáneas, y lo que resulta fundamental para analizar la perfusión en áreas lesionadas, lo que ayuda a un diagnóstico preciso. La eficacia de esta técnica para analizar quemaduras puede verse influenciada por la profundidad y la ubicación de la lesión.⁽²³⁾

Imágenes de fluorescencia con verde de indocianina

Herramienta emergente que proporciona información sobre la perfusión y la viabilidad del tejido quemado. Tradicionalmente, se ha aplicado en la oftalmología y la cirugía vascular; su potencial se ha extendido a la evaluación de quemaduras. Consiste en un tinte fluorescente que, al administrarlo por vía intravenosa, se une

a las proteínas plasmáticas y permite la visualización de la circulación sanguínea en tiempo real a través de un equipo de imágenes especiales. Al aplicar esta técnica en los pacientes quemados, se puede evaluar la perfusión sanguínea del tejido afectado. Una disminución en la fluorescencia podría indicar áreas de tejido que no están recibiendo suficiente flujo sanguíneo, lo que podría ser un signo de tejido no viable o en riesgo de necrosis.⁽²⁴⁾ En quemaduras, puede ayudar a tomar decisiones más certeras sobre su extensión, determinar áreas que requieran tratamiento quirúrgico, y evaluar la eficacia de las intervenciones terapéuticas para mejorar la perfusión. La interpretación de las imágenes requiere experiencia y puede variar la interpretación de los resultados.⁽²⁵⁾ Estas imágenes representan una innovadora herramienta complementaria para evaluar la perfusión tisular en áreas afectadas.

Espectroscopia de reflectancia

Mide la cantidad de luz reflejada por un tejido, en este caso, la piel. Proporciona datos sobre las propiedades ópticas del tejido, como la absorción y la dispersión de la luz, lo que puede revelar información sobre la composición y la estructura de la piel lesionada. En las quemaduras permite la evaluación de la gravedad, al analizar cómo la luz interactúa con los diferentes niveles de tejido afectado. Permite seguir la evolución de la cicatrización a lo largo del tiempo, según la respuesta al tratamiento y las intervenciones, según sea necesario; por otro lado, la capacidad de examinar las propiedades ópticas de la piel puede ayudar a diferenciar entre tipos de quemaduras o lesiones cutáneas, y admite un diagnóstico más preciso. Analiza la oxigenación en los tejidos quemados, al ofrecer pistas sobre la salud celular en la zona afectada, y brinda detalles sobre el colágeno y la elastina presentes en la dermis, para evaluar la cicatrización y la profundidad de las quemaduras.⁽²⁶⁾

Dermatoscopía

Originalmente se utilizaba para evaluar lesiones cutáneas pigmentadas, pero ha mostrado utilidad en ciertas condiciones cutáneas, aunque no es típicamente la

herramienta principal para evaluar quemaduras; sin embargo, en ciertos contextos, como las lesiones superficiales, podría ayudar a evaluar el grado de afectación de la piel y determinar si se requiere una intervención más profunda. Su uso data de 1655, pero su aplicación en el diagnóstico de la profundidad de las quemaduras es reciente. Proporciona una visión ampliada de la superficie cutánea e identificar áreas de piel viable en comparación con áreas necróticas.⁽²⁷⁾ Puede ofrecer información adicional en ciertas situaciones, pero no resulta la herramienta principal para su evaluación y tratamiento. Se deben seguir los protocolos médicos estándar para evaluar y tratar las quemaduras adecuadamente.

Biomarcadores

Identifican sustancias indicativas de gravedad y profundidad de las quemaduras. Se puede realizar la evaluación, mediante los marcadores inflamatorios como TNF- α e IL-6, que pueden indicar su severidad; y marcadores de daño celular como CK y la troponina, que reflejan lesiones tisulares más profundas. El estrés oxidativo en tejidos quemados se evalúa mediante biomarcadores como malondialdehído (MDA), y el factor de crecimiento endotelial vascular (VEGF) (*vascular endothelial growth factor*, por sus siglas en inglés), que puede relacionarse con la formación de nuevos vasos sanguíneos y regeneración tisular; además, los cambios en la coagulación indicados por el dímero D, pueden reflejar la profundidad de la lesión.⁽²⁸⁾ Se considera que, aunque se exploran estos biomarcadores, la práctica clínica aún se basa, principalmente, en la observación visual y las técnicas de imagen avanzada.

Técnicas de imagen molecular

Métodos avanzados de visualización que permiten valorar la profundidad y la extensión de las lesiones cutáneas, así como la progresión de la cicatrización. Podrían implicar el uso de sondas o trazadores moleculares específicos, que se dirijan a procesos o biomarcadores particulares, asociados con la respuesta a las quemaduras. Consegirían incluir marcadores de inflamación, angiogénesis,

apoptosis, o cambios en la expresión génica; microscopía con focal láser, que permiten obtener imágenes en tiempo real de las capas superficiales de la piel, lo que la hace útil para evaluar la viabilidad celular y la profundidad de las lesiones; la tomografía por emisión de positrones, aunque, menos común, en el contexto de quemaduras cutáneas, puede utilizarse para evaluar la inflamación y la actividad metabólica en áreas afectadas; y las imágenes de fluorescencia molecular, que podrían emplear marcadores fluorescentes para visualizar moléculas específicas en los tejidos. Esto lograría incluir la detección de moléculas relacionadas con la inflamación, la reparación tisular y otros procesos moleculares.⁽²⁹⁾ Se encuentra en una etapa de investigación y desarrollo. Su aplicabilidad puede variar al depender del tipo específico de quemadura y de la disponibilidad tecnológica en determinados entornos clínicos.

Inteligencia artificial

La IA desempeña un papel crucial en la evaluación y el manejo de las quemaduras. Su aplicación principal reside en el análisis automatizado de imágenes médicas para determinar con rapidez y precisión la profundidad, la gravedad y la extensión de la lesión, y apoya decisiones terapéuticas inmediatas. Más allá del diagnóstico, los algoritmos de IA predicen el pronóstico y personalizan los planes de tratamiento, al considerar los factores individuales como la localización de la quemadura y las condiciones del paciente.⁽³⁰⁾ Durante la fase de seguimiento, monitoriza el proceso de cicatrización, analiza tendencias y predice complicaciones, lo que permite ajustes preventivos en el cuidado. Técnicamente, es capaz de segmentar automáticamente las imágenes para resaltar el tejido dañado e integrar datos heterogéneos (clínicos, de laboratorio e imágenes) para ofrecer una visión integral del caso. Además, sirve como herramienta educativa en simulaciones para la formación de profesionales.⁽³¹⁾ En resumen, la IA mejora sustancialmente el diagnóstico, el tratamiento, el seguimiento y la educación en quemaduras, y optimiza los resultados clínicos. No obstante, es fundamental

validar rigurosamente estos modelos con datos clínicos reales para garantizar su confiabilidad y seguridad en la práctica médica.

Nanotecnología

Ofrece herramientas innovadoras para el tratamiento y diagnóstico de quemaduras, aunque su uso específico para determinar la profundidad de la lesión se encuentra en fase de desarrollo. Actualmente, su aplicación se centra en mejorar la cicatrización y prevenir infecciones. Los hidrogeles de nanofibras crean un ambiente húmedo y protector, y liberan fármacos de manera controlada. Los vendajes con nanopartículas, como las de plata, combaten infecciones y pueden detectar cambios tempranos en la herida para liberar tratamientos específicos.⁽³²⁾ A futuro, se investigan sensores nanotecnológicos, integrados en apósitos para medir en tiempo real de los biomarcadores o la temperatura, lo que ayudaría a evaluar la gravedad. También se exploran nanopartículas como agentes de contraste para mejorar la visualización de las capas de la piel en estudios de imagen, al facilitar una medición más precisa de la profundidad. Además, se están desarrollando nanomateriales para regenerar tejidos, y promover una curación más rápida y con menos cicatrices.⁽³³⁾ En conjunto, estas aplicaciones prometen tratamientos más efectivos y personalizados. Sin embargo, resulta imprescindible validar rigurosamente su seguridad y su eficacia en estudios clínicos, mediante la colaboración interdisciplinaria entre profesionales de la salud e ingenieros, antes de su implementación generalizada.

Realidad aumentada y realidad virtual

Son tecnologías inmersivas que tienen el potencial de ser utilizadas en la evaluación de quemaduras. Pueden crear modelos 3D de las lesiones, que permiten una visualización más detallada y facilitan la planificación del tratamiento. Al utilizar la realidad aumentada, se podrían superponer las imágenes tridimensionales directamente sobre el área afectada, lo que permitiría una visualización más detallada de la extensión y la profundidad de la quemadura. La

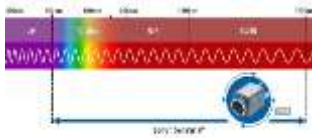
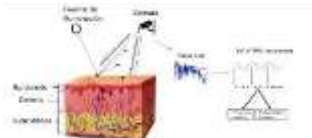
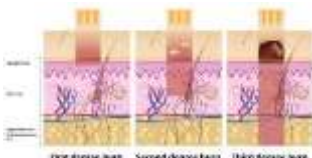
realidad virtual puede ser empleada para simular visualmente la profundidad y ayudar a interactuar con modelos virtuales, que representen diferentes niveles de quemaduras, al familiarizar la comprensión y la capacitación en la evaluación de la gravedad de las lesiones.⁽³⁴⁾ Valiosas para el entrenamiento de profesionales de la salud, mediante simuladores virtuales que pueden proporcionar escenarios realistas, lo cuales permitan practicar la determinación de la profundidad y mejorar sus habilidades clínicas; además, visualizar los datos médicos en tiempo real durante la evaluación; asimismo, para el seguimiento y la documentación de la cicatrización de las lesiones a lo largo del tiempo.⁽³⁵⁾ Su implementación específica puede depender de factores como la disponibilidad de la tecnología, la formación de profesionales de la salud y la validación de la precisión clínica.

Tecnologías emergentes en el diagnóstico de la profundidad de las quemaduras 2024-2025

Las tecnologías más recientes empleadas en el diagnóstico de la profundidad de las quemaduras incluyen avances en imagen espectral, inteligencia artificial y técnicas ópticas no invasivas. En publicaciones de 2024-2025, se destacan los siguientes desarrollos (tabla 2).

Tabla 2 - Resumen de tecnologías emergentes aplicadas a la atención del paciente quemado

Técnica	Imagen	Mecanismo de acción	Interpretación y aplicaciones
Imagen espectral multiespectral e hiperespectral		Captura la reflectancia de la luz en cientos de longitudes de onda que genera un "cubo de datos" espectral por cada píxel de la imagen	Revela la composición bioquímica del tejido. Permite la diferenciación automática entre quemaduras superficiales y profundas y la evaluación cuantitativa de la viabilidad tisular.

			Integración con IA para alcanzar > 95 % de precisión diagnóstica
Imágenes en el infrarrojo de onda corta (SWIR)		Utiliza luz infrarroja de onda corta que penetra en el tejido, al analizar su reflectancia diferencial según la composición química.	Revela contenido de agua en el tejido, estructura del colágeno. Distingue entre quemaduras superficiales, de espesores parcial y total. Elabora mapas de viabilidad tisular, basados en perfusión sanguínea
Fotopletismografía por imagen multispectral		Combina imágenes multispectrales con la detección de pulsos cardíacos, lo que utiliza múltiples longitudes de onda	Permite mapear la perfusión sanguínea real, la oxigenación. Monitoreo en tiempo real de la evolución de la cicatrización, detección precoz de complicaciones, evaluación a los tratamientos y al pronóstico de la recuperación, basado en la perfusión dinámica
Modelos predictivos basados IA (BURNAID)		Integra datos multimodales (imágenes hiperespectrales, SWIR, THz.) mediante redes neuronales que identifican patrones complejos	Clasifica automáticamente la profundidad y extensión de las quemaduras. Genera pronósticos personalizados de cicatrización. Cuantifica el riesgo de complicaciones. Diagnostica

			objetivamente con > 93 % de la precisión de las quemaduras. Garantiza la planificación quirúrgica, basada en la predicción de curación
Espectroscopía del teraherzio (THzTDS)		Utiliza radiación no ionizante que interactúa con las moléculas de agua y la estructura molecular de los tejidos, lo que mide retardos temporales y absorción.	Refleja el contenido hídrico y la integridad estructural del tejido. Permite reconstruir imágenes 3D de la profundidad de la quemadura. Permite la evaluación precisa de la profundidad de la necrosis. Predicción de cicatrización con > 93 % de precisión (con IA). Monitoreo no invasivo de la evolución de la herida

Imagen espectral (multiespectral e hiperespectral)

Permiten una evaluación no invasiva y precisa de la profundidad de las quemaduras, al superar la precisión de la valoración clínica tradicional. La integración de algoritmos de aprendizaje automático, como las redes neuronales y los modelos de clasificación avanzados, ha mejorado la sensibilidad y la especificidad diagnóstica, al alcanzar valores superiores al 95 % en algunos estudios. La imagen hiperespectral, en particular, permite diferenciar cambios estructurales y microvasculares en la piel quemada, y facilita la clasificación entre quemaduras superficiales y profundas.^(36,37,38) Representa una tecnología de vanguardia para el diagnóstico de quemaduras. Capturan datos en numerosas longitudes de onda, y crean un cubo espectral de información para cada píxel de la imagen. Permiten detectar cambios bioquímicos y microvasculares invisibles al ojo humano. Analizan parámetros cruciales como la oxigenación tisular y la

concentración de hemoglobina. Su implementación facilitaría un diagnóstico rápido, no invasivo y extremadamente preciso.

Imágenes en el infrarrojo de onda corta (SWIR)

Las imágenes en el infrarrojo de onda corta (SWIR) son una tecnología diagnóstica, basada en la reflectancia de la luz en longitudes de onda entre 1000 y 2500 nm. Esta luz penetra varios milímetros en la piel e interactúa con componentes como la hemoglobina, el agua y el colágeno. Los patrones de reflectancia capturados permiten distinguir entre quemaduras superficiales, de espesor parcial y de espesor total. La técnica genera un mapa visual que refleja la viabilidad del tejido, según su vascularización y su contenido hídrico. Su precisión ha sido validada mediante correlación histológica y evaluación quirúrgica directa. Esto confirma que los hallazgos de las imágenes SWIR coinciden con el daño tisular real, observado en biopsias o durante el desbridamiento. Ofrece un diagnóstico objetivo que complementa otras técnicas emergentes como la espectroscopía de teraherzios. Su implementación mejora la precisión en la evaluación inicial de quemaduras, al facilitar una planificación terapéutica más adecuada y oportuna.⁽³⁹⁾

Fotopletismografía por imagen multiespectral MSI-PPG

Es una técnica óptica avanzada, no invasiva y sin contacto, que combina imágenes multiespectrales con la detección de pulsos cardíacos. Utiliza múltiples longitudes de onda para penetrar el tejido y capturar las variaciones sutiles de luz causadas por el flujo sanguíneo pulsátil. Permite mapear cuantitativamente la perfusión tisular y la microcirculación en la zona quemada. Monitorea en tiempo real el proceso de curación, al proporcionar datos dinámicos sobre la recuperación vascular. Muestra la evolución temporal de la vascularización y la oxigenación del tejido. Permite evaluar objetivamente la eficacia de los tratamientos aplicados y detectar precozmente complicaciones. Identifica signos tempranos de isquemia o infección, mediante cambios característicos en la perfusión. Cuantifica la recuperación microvascular y la convierte en una herramienta valiosa para el

pronóstico y el manejo personalizado de las quemaduras, al permitir el seguimiento en tiempo real del proceso de curación.⁽⁴⁰⁾

Modelos predictivos basados en inteligencia artificial BURN-AID

Los modelos predictivos de inteligencia artificial, como BURN-AID, integran datos de múltiples tecnologías de imagen para crear evaluaciones integrales de quemaduras. Utilizan redes neuronales recurrentes y otros algoritmos avanzados para analizar patrones espaciales y secuencias temporales de datos. Su objetivo principal es estimar con precisión la profundidad y la extensión real de la necrosis tisular. Esto permite una cuantificación objetiva del daño que supera la subjetividad de la evaluación clínica visual convencional. Con esta información, el sistema optimiza la planificación terapéutica de forma completamente personalizada para cada paciente. Genera recomendaciones basadas en evidencia sobre la necesidad de injertos o la probabilidad de curación espontánea. La capacidad de procesar grandes volúmenes de datos mejora continuamente su precisión diagnóstica y pronóstica. Transforman datos complejos en decisiones clínicas accionables, al revolucionar el paradigma tradicional del tratamiento, y optimizar la planificación terapéutica.^(38,41)

Espectroscopía del teraherzio (THz-TDS)

Esta tecnología emergente utiliza radiación teraherzio para obtener imágenes de alta resolución de los tejidos, y permiten evaluar la profundidad de las quemaduras con alta precisión. Un modelo de red neuronal, basado en THz-TDS, ha demostrado una precisión del 93 % en la predicción de la curación de las quemaduras (óptica). Es una tecnología médica emergente y no invasiva, que utiliza radiación segura para crear imágenes de alta resolución de los tejidos quemados. Permite evaluar la profundidad de la lesión de forma objetiva, al distinguir si una quemadura puede curarse por sí sola o si requiere cirugía. Además, al combinarse con modelos de IA, predice el resultado futuro, y se convierte en una herramienta crucial.⁽⁴²⁾

Esta revisión cumple el papel fundamental de mapear el estado del arte de las nuevas tecnologías en el diagnóstico de la profundidad de las quemaduras y traza la dirección futura, al tiempo que adopta una postura crítica al reconocer las brechas de conocimiento y los desafíos prácticos que deben superarse para que estas innovaciones mejoren consistentemente la atención al paciente quemado.

Aporte: proporciona una visión integral y actualizada de las tecnologías emergentes, y destaca su potencial para hacer el diagnóstico más objetivo y predictivo.

Alcance: resulta amplio, y abarca desde las técnicas de imagen establecidas hasta herramientas en investigación (IA, nanotecnología), al cubrir todo el proceso clínico.

Limitaciones

Muchas herramientas aún no son estándar, debido a la falta de estudios comparativos, consenso y barreras prácticas para su implementación. No todas estas tecnologías son aplicables en todos los contextos.

Conclusiones

El futuro del diagnóstico de las quemaduras apunta hacia sistemas integrados de apoyo clínico, que mediante la fusión de datos multimodales e inteligencia artificial generan modelos predictivos y personalizados de la herida, los cuales no reemplazan, sino que potencian la experiencia del cirujano, y permiten un tratamiento más preciso y mejora radicalmente los resultados.

Referencias bibliográficas

1. Payne R, Glassman E, Turman M, Cancio L. Pathophysiology and Treatment of Burns. *J Spec Oper Med.* 2022;22(2):87-92. DOI: <https://doi.org/10.55460/BGGY-2LFL>
2. Keshri V, Peden M, Singh P, Norton R, Abimbola S, Jagnoor J. Health Systems Research in Burn Care: an Evidence Gap Map. *Inj Prev.* 2023;29(5):446-53. DOI: <https://doi.org/10.1136/ip-2023-044963>
3. Barreiro H, Barreiro A, Viera E, Marrero O. Quemaduras y etiología medicolegal. *Rev. Cubana Med. Gen. Integr.* 2006 [acceso 19/07/2026];22(4). Disponible en: https://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21252006000400007&lng=es
4. Karim A, Shaum K, Gibson A. Indeterminate-Depth Burn Injury-Exploring the Uncertainty. *J Surg Res.* 2020;245:183-97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2019.07.063>
5. Médica Mundial A. Declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial. Principios éticos para las investigaciones médicas en seres humanos. *An Sist Sanit Navar.*; 2009 DOI: <https://doi.org/10.23938/ASSN.0522>
6. Rajkumar J, Chandan N, Lio P, Shi V. The Skin Barrier and Moisturization: Function, Disruption, and Mechanisms of Repair. *Skin Pharmacol Physiol.* 2023;36(4):174-85. DOI: <https://doi.org/10.1159/000534136>
7. Gutowska I, Żwierzeło W, Piorun K, Skórka M, Maciejewska D, Kupnicka P, *et al.* The Extent of Burn Injury Significantly Affects Serum Micro- and Macroelement Concentrations in Patients on the First Day of Hospitalisation. *Nutrients.* 2022;14(20):4248. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu14204248>
8. Ramírez C, Ramírez C, González L, Ramírez N, Vélez K. Fisiopatología del paciente quemado. *Universidad Rev. Ind. Santander.* 2010 [acceso 10/08/2025];42(1):55-65. Disponible en: https://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-08072010000100007&lng=en

9. Savage N, Doherty Z, Singer Y, Menezes H, Cleland H, Goldie S. A Review of Petrol Burns in Australia and New Zealand. *J Burn Care Res.* 2023;44(5):1162-8. DOI: <https://doi.org/10.1093/jbcr/irad008>
10. Toppi J, Cleland H, Gabbe B. Severe burns in Australian and New Zealand adults: Epidemiology and burn centre care. *Burns.* 2019;45(6):1456-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.burns.2019.04.006>
11. Atwell K, Bartley C, Cairns B, Charles A. The Epidemiologic Characteristics and Outcomes Following Intentional Burn Injury at a Regional Burn Center. *Burns.* 2020;46(2):441-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.burns.2019.08.002>
12. Watson R, Tesfaldet M, Warren J, Hoff M. MR Imaging Safety Events: Analysis and Improvement. *Magn Reson Imaging Clin.N. Am.* 2020;28(4):593-600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mric.2020.07.004>
13. Dang J, Lin M, Tan C, Pham C, Huang S, Hulsebos I. Use of Infrared Thermography for Assessment of Burn Depth and Healing Potential: A Systematic Review. *J Burn Care Res.* 2021:108. DOI: <https://doi.org/10.1093/jbcr/irab108>
14. Carrière M, de Haas L, Pijpe A, Meij A, Gardien K, van Zuijlen P, et al. Validity of Thermography for Measuring Burn Wound Healing Potential. *Wound Repair Regen.* 2020;28(3):347-54. DOI: <https://doi.org/10.1111/wrr.12786>
15. Pedrosa R, Souza L, Freire M. Precisión de la evaluación mediante termografía infrarroja en la cicatrización de heridas por quemaduras: una revisión sistemática y un metaanálisis. *J Wound Care.* 2024;33(Sup4a):cxviii-cxxix. DOI: <https://doi.org/10.12968/jowc.2024.33.Sup4a.cxviii>
16. Rahman S, Ogilvie T, Okonski D, et al. Una revisión exhaustiva del uso de dispositivos de termografía infrarroja en el punto de atención para evaluar varios tipos de heridas. *Int Wound J.* 2025;22(8):e70741. DOI: <https://doi.org/10.1111/iwj.70741>
17. Owoso T, Kankam H, Abdulsalam A, Lewis D. The Use of Laser Doppler Imaging in Nitric Acid Burns: A Case Report and Literature Review. *J Burn Care Res.* 2023;44(6):1440-4. DOI: <https://doi.org/10.1093/jbcr/irad044>

18. Goel J, Nizamoglu M, Tan A, Gerrish H, Cranmer K, El-Muttardi N, *et al.* A Prospective Study Comparing the FLIR ONE with Laser Doppler Imaging in the Assessment of Burn Depth by a Tertiary Burns Unit in the United Kingdom. *Scars Burn Heal.* 2020;6:20595131-974261. DOI: <https://doi.org/10.1177/2059513120974261>
19. Mekonnen T, Lin X, Zevallos C, Singh M, Aglyamov S. Longitudinal Assessment of the Effect of Alkali Burns on Corneal Biomechanical Properties Using Optical Coherence Elastography. *J Biophotonics.* 2022;15(8):e202200022. DOI: <https://doi.org/10.1002/jbio.202200022>
20. DeJong H, Abbott S, Zelesco M, Spilsbury K, Ziman M, Kennedy BF, *et al.* Objective Quantification of Burn Scar Stiffness Using Shear-Wave Elastography: Initial Evidence of Validity. *Burns.* 2020;46(8):1787-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.burns.2020.05.009>
21. Dijkstra A, Guven G, van Baar ME, Trommel N, Hofland H, Kuijper T, *et al.* Laser Speckle Contrast Imaging, An Alternative to Laser Doppler Imaging in Clinical Practice of Burn Wound Care Derivation of a Color Code. *Burns.* 2023;49(8):1907-15. DOI: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.burns.2023.04.009>
22. Wang Q, Gong P, Afsharan H, Joo C, Morellini N, Fear M, *et al.* In vivo burn scar assessment with speckle decorrelation and joint spectral and time domain optical coherence tomography. *J Biomed Opt.* 2023;28(12):126001. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.28.12.126001>
23. Liu K, Chen Z, Zhou W, Xing D. Towards quantitative assessment of burn based on photoacoustic and optical coherence tomography. *J Biophotonics.* 2020;13(10):e202000126. DOI: <https://doi.org/10.1002/jbio.202000126>
24. McUmbler H, Dabek R, Bojovic B, Driscoll D. Burn Depth Analysis Using Indocyanine Green Fluorescence: A Review. *J Burn Care Res.* 2019;40(4):513-6. DOI: <https://doi.org/10.1093/jbcr/irz054>
25. Wongkietkachorn A, Surakunprapha P, Jenwitheesuk K, Eua-Angkanakul K, Winaikosol K, Punyavong P, *et al.* Indocyanine Green Angiography Precise Marking for Indeterminate Burn Excision: A Prospective, Multi-centered, Double-blinded

- Study. *Plast Reconstr Surg Glob Open*. 2021;9(4):e3538. DOI: <https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000003538>
26. Kim Y, Paik S, Kim Y, Yoon J, Cho Y, Kym D, *et al*. Clinical Application of Functional Near-Infrared Spectroscopy for Burn Assessment. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023;11:1127563. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1127563>
27. Mihara K, Shindo H, Mihara H, Ohtani M, Nagasaki K, Katoh N. Early depth assessment of local burns by dermoscopy: a new frontier of dermoscopic evaluation. *Arch Dermatol*. 2012:E1. DOI: <https://doi.org/10.1001/archdermatol.2012.418>
28. Li A, Moussa A, Gus E, Paul E, Yii E, Romero L, *et al*. Biomarkers for the Early Diagnosis of Sepsis in Burns: Systematic Review and Meta-analysis. *Ann Surg*. 2022;275(4):654-62. DOI: <https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000005198>
29. Jiang X, Li F, Chi Y, Chen X, Luo Y, Ye Q, *et al*. Application of contrast-enhanced ultrasound in the diagnosis of burn depth. *Ann Transl Med*. 2021;9(16):1315. DOI: <https://doi.org/10.21037/atm-21-3715>
30. Taib B, Karwath A, Wensley K, Minku L, Gkoutos G, Moiemmen N. Artificial Intelligence in the Management and Treatment of Burns: a Systematic Review and Meta-Analyses. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2023;77:133-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2022.11.049>
31. Moura F, Amin K, Ekwobi C. Artificial Intelligence in the Management and Treatment of Burns: A Systematic Review. *Burns Trauma*. 2021;9:022. DOI: <https://doi.org/10.1093/burnst/tkab022>
32. Handa M, Maharana S, Pal K, Shukla R. Biocompatible Nanomaterials for Burns. *Curr Pharm Biotechnol*. 2022;23(12):1514-26. DOI: <https://doi.org/10.2174/1389201023666220413091055>
33. Ujjwal R, Yadav A, Tripathi S, Krishna ST. Polymer-based Nanotherapeutics for Burn Wounds. *Curr Pharm Biotechnol*. 2022;23(12):1460-82. DOI: <https://doi.org/10.2174/1389201022666210927103755>
34. Bermo M, Patterson D, Sharar S, Hoffman H, Lewis D. Virtual Reality to Relieve Pain in Burn Patients Undergoing Imaging and Treatment. *Top Magn Reson*

- Imaging. 2020;29(4):203-8. DOI: <https://doi.org/10.1097/RMR.0000000000000248>
35. Hoffman H, Chambers G, Meyer W, Arceneaux L, Russell W, Seibel E, et al. Virtual Reality as an Adjunctive Non-Pharmacologic Analgesic For Acute Burn Pain During Medical Procedures. *Ann Behav Med.* 2011;41(2):183-91. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12160-010-9248-7>
36. Tan P, Ravulapalli K, Lewis C. Una Revisión Sistemática de los Avances en el uso de imágenes espectrales en la evaluación de la profundidad de las quemaduras. *Burns.* 2025;51(3):107401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.burns.2025.107401>
37. Wang S, Gu M, Zhang M, Tan X. Investigación sobre un método de detección de gravedad de quemaduras basado en imágenes hiperespectrales. *Sensors (Basilea, Suiza).* 2025;25(5):1330. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25051330>
38. Rangaiah P, Kumar B, Huss F, Augustine R. Diagnóstico de precisión de lesiones por quemaduras mediante imágenes y modelos predictivos para aplicaciones clínicas. *Sci Rep.* 2025;15(1):7604. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92096-4>
39. Núñez J, Mironov S, Wan B. Nuevas imágenes infrarrojas de onda corta multiespectrales para la evaluación de la profundidad de las quemaduras humanas. *Wound Repair Regen.* 2024;32(6):979-91. DOI: <https://doi.org/10.1111/wrr.13221>
40. Parque Y, Eom J. Fotopletiografía de imágenes de múltiples longitudes de onda para la evaluación no invasiva y sin contacto de la gravedad de las quemaduras. *Sci Rep.* 2025;15(1):16586. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01707-7>
41. Perusseau-Lambert A, Akram M, Frew Q, Barnes D. Comparación entre imágenes multiespectrales e imágenes láser Doppler para predecir los requisitos de las heridas por quemaduras para cirugía. *Burns.* 2025;51(8):107650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.burns.2025.107650>

42. Chen, Y., Huang, S, Pickwell-MacPherson E. A prospective study of using terahertz pulsed imaging to predict the healing of burns. Optica, 2021;8(9),1155-1158. DOI: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.431511>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.