

Visualización de datos RECAP: Alicia Liliana Rodríguez-Cerda.

Desarrollo y validación de un algoritmo para predecir la modalidad de tratamiento de quemaduras mediante escaneos termográficos. **RECAP**

Mario Aurelio Martínez Jiménez, José Luis Ramírez GarcíaLuna, Samuel Kolosovas Machuca, et al.

Citation: Martínez-Jiménez MA, Ramírez GarciaLuna JL, Kolosovas-Machuca ES, Drager J, González FJ (2018) Development and validation of an algorithm to predict the treatment modality of burn wounds using thermographic scans: Prospective cohort study. PLoS ONE 13(11): e0206477. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206477>.

1 Department of Surgery, Faculty of Medicine, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, SLP, Mexico, 2 Burn Unit, Hospital Central Dr. Ignacio Morones Prieto, San Luis Potosí, SLP, México, 3 Doctorado Institucional en Ingeniería y Ciencia de Materiales (DICIM-UASLP), Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, SLP, México, 4 Division of Experimental Surgery, Faculty of Medicine, McGill University. Montreal, QC, Canada, 5 Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y la Tecnología, Universidad Autónoma San Luis Potosí, San Luis Potosí, SLP, México.

BREVE RESEÑA.

La evaluación clínica de una quemadura no es suficiente para predecir la gravedad de la lesión ni para guiar la toma de decisiones clínicas. La termografía infrarroja proporciona información sobre la viabilidad de los tejidos blandos y se ha utilizado para predecir la modalidad de tratamiento de curación mediante la re-epitelización, que requiere injertos de piel y amputaciones, y hacer valido el algoritmo de predicción clínica en una **cohorte independiente**.

La diferencia de temperatura entre la piel lesionada y sana se registró dentro de los primeros tres días después de la lesión en pacientes quemados previamente sanos.

Los probables factores de confusión se evaluaron mediante múltiples modelos de regresión lineal y se desarrolló un algoritmo de predicción basado en la diferencia de temperatura.

Se comparó la precisión de la predicción del algoritmo en la cohorte que se desarrolló y una cohorte de validación independiente. Por lo que se encontraron diferencias significativas en el valor de la diferencia de temperatura entre los grupos de modalidad de tratamiento. **El algoritmo desarrollado predice correctamente en qué categoría de tratamiento que tendrá el paciente con una precisión de 85,35%.** La concordancia entre el tratamiento previsto el real para ambas cohortes se ponderó kappa al 90%.

Introducción.

Los termogramas infrarrojos que se obtienen de primer contacto del paciente herido, pueden ser utilizados para racionalizar el tratamiento y agilizar el cierre temprano de la herida.

Las lesiones por quemadura son el cuarto tipo de traumatismo más común en todo el mundo y se estima que anualmente se producen 300,000 muertes como consecuencia de estas lesiones. Para los sobrevivientes, las quemaduras pueden provocar una morbilidad significativa y una discapacidad permanente con un gran impacto de su calidad de vida.

Para moderar estas consecuencias, lo principal es realizar una evaluación completa de la herida para predecir los resultados de la curación, y guiar la toma de decisiones clínicas óptimas. Sin embargo, incluso para los médicos más experimentados, la evaluación subjetiva de las características visuales y táctiles del tejido predice la gravedad de la lesión solo en el 50 al 70% de los casos.

Además, la precisión también depende de la disponibilidad de personal capacitado, su experiencia clínica y de la conversión de quemaduras, un fenómeno por el cual algunas quemaduras superficiales de espesor parcial se convierten espontáneamente en heridas profundas de espesor parcial o incluso de espesor total. Con el tiempo, la conversión de quemaduras aumenta la extensión del daño tisular de una manera que puede no ser inmediatamente evidente, confundiendo así la evaluación inicial de la herida.

Una medición más objetiva de la gravedad de las quemaduras podría brindar a los médicos una herramienta secundaria para evaluar con mayor precisión y rapidez la gravedad

de las quemaduras y optimizar el tratamiento definitivo para acelerar la recuperación y rehabilitación del paciente.

Las imágenes de termografía infrarroja digital se pueden utilizar para evaluar la gravedad de las quemaduras de forma no invasiva.

Esta modalidad de imagen puede proporcionar más información sobre el grado de daño tisular que la inspección clínica sola durante las distintas fases de la cicatrización de la herida y puede evaluar cuantitativamente la profundidad de la quemadura basándose en las imágenes digitales adquiridas.

Estudios anteriores han demostrado que la destrucción de los vasos sanguíneos en el momento de la lesión de la piel conduce a una reducción de la perfusión local y a una disminución secundaria de la temperatura de la piel en esa zona.

Esta cantidad de interrupción del flujo sanguíneo se correlaciona con la extensión de la lesión y se muestra como un mapa en color de la herida después de obtener imágenes con termografía infrarroja. Luego, los mapas de color se utilizan para medir la temperatura de la piel en varias áreas y permiten calcular un delta-T (ΔT), que representa la diferencia de temperatura entre el sitio de la herida y una región de piel sana adyacente.

Este valor, que representa la diferencia de temperatura entre las dos áreas del cuerpo adquirida mediante imágenes estáticas, se ha correlacionado con la viabilidad del tejido, el potencial de curación de la herida y se ha descubierto que posee una excelente confiabilidad entre observadores.

Como tal, la termografía tiene el potencial de usarse como herramienta de diagnóstico de cabecera para predecir la modalidad de tratamiento necesaria para lograr el cierre temprano de la herida. Sin embargo, esta estrategia aún no ha sido validada.

En este estudio, desarrollamos un modelo para predecir la modalidad de tratamiento necesaria para promover el cierre de las quemaduras cutáneas en las extremidades basándose en imágenes termográficas de la herida obtenidas durante los primeros tres días de tratamiento.

Nuestra hipótesis es que la diferencia de temperatura entre la piel sana y la piel herida se correlaciona con el tratamiento definitivo requerido en una cohorte de pacientes quemados.

Categorizamos el tratamiento como "reepitelización" si la herida cicatrizó espontáneamente, "injerto de piel" si la lesión cicatrizó después de recibir un injerto, o "amputación" si el paciente requirió extirpación de parte de un apéndice por falta de viabilidad del tejido.

Posteriormente, utilizando los valores de ΔT , creamos un modelo de predicción basado en los límites de diferencia de temperatura para

Finalmente, probamos y validamos el modelo de predicción en una cohorte independiente de pacientes con quemaduras similares.

Pacientes y métodos.

Diseño del estudio.

Este fue un estudio observacional prospectivo. Fue aprobado por el **Comité de Ética** del Hospital Central "Dr. Ignacio Morones Prieto" en San Luis Potosí, México (registro16-17). Todas las investigaciones clínicas se llevaron a cabo de acuerdo con los principios expresados en la **Declaración de Helsinki**. Todos los pacientes aceptaron participar y dieron su consentimiento informado. En el caso de los niños, se obtuvo el consentimiento de sus padres o tutores, quienes dieron su **asentimiento** para participar.

Tipo de pacientes

Todos los pacientes del estudio recibieron tratamiento en la unidad de atención de quemados del Hospital Central "Dr. Ignacio Morones Prieto", un importante centro de referencia para lesiones por quemaduras en el centro de México.

Los criterios de inclusión fueron pacientes que habían sufrido quemaduras de espesor parcial o total en extremidades que cubrían >25 cm² de la superficie corporal total y que fueron admitidos en la unidad de atención de quemaduras dentro de las 24 horas posteriores a la lesión.

cada modalidad de tratamiento.



Recap, PLOS ONE 2018. Martínez-Jiménez MA, Ramírez-García Luna JL, Kolosovas-Machuca ES, Drager J, González FJ (2018) Development and validation of an algorithm to predict the treatment modality of burn wound using thermographic scans: Prospective cohort study. PLoS ONE 13(11): e0206477

Los criterios de exclusión fueron la presencia de cualquier comorbilidad previa, un índice de masa corporal basal $<19,9$ para adultos o inferior al percentil 5 para su edad en niños, la presencia de cuerpos extraños incrustados en el tejido, edema macroscópico, causas sistémicas de dolor distal, hipoperfusión o presencia de infección local.

Ningún paciente fue eliminado del estudio después de la inscripción.

Para este estudio se utilizaron dos cohortes prospectivas independientes: una cohorte utilizada para desarrollar el algoritmo de predicción y una cohorte utilizada para probar su rendimiento. Independientemente de la cohorte, todas las imágenes y el tratamiento inicial se realizaron de manera idéntica a todos los pacientes, como se describe a continuación.

Imágenes infrarrojas

La termografía infrarroja se realizó una vez dentro de los primeros tres días después de la lesión, ya que este período es el más informativo para evaluar las características de la herida. Las imágenes se realizaron junto a la cama, ya que la unidad de quemados se considera un área hospitalaria estéril.

Antes de la obtención de imágenes, se retiró el apósito y se limpió la herida con una solución de clorhexidina al 5%, se enjuagó con solución salina al 0,9% y se secó con una gasa estéril. Luego se eliminó la piel suelta, junto con las ampollas presentes y se dejó que la herida alcanzara temperatura ambiente durante 3 minutos.

Todas las mediciones de temperatura se tomaron siguiendo la lista de verificación de Imágenes Termográficas en Medicina del Deporte y el Ejercicio (TISEM) a una distancia de 0,5 o 1,5 m, la distancia que fuera mejor para capturar toda la extensión del tejido quemado, en un ángulo de 90° respecto al cuerpo, en un ambiente cerrado, en condiciones controladas de exposición a la luz y a la radiación externa, a temperatura ambiente controlada (22 C) y humedad atmosférica del 40%.

Seguimos el protocolo de Glamorgan, que define las regiones de interés que deben medirse mediante termografía en un cuerpo humano para garantizar la repetibilidad. Brevemente, este protocolo consiste en un atlas de distribución de la temperatura de la piel en 90 regiones corporales de interés que se utiliza como patrón para reproducir las vistas de las posiciones corporales para aumentar la repetibilidad de las imágenes térmicas.

Las imágenes termográficas infrarrojas digitales estáticas se adquirieron con una cámara infrarroja FLIR T400 (FLIR System, Wilsonville, OR, 2013) con una matriz de plano focal de 320×240 de microbolómetros no refrigerados, un rango espectral de 7,5 a $13 \mu\text{m}$ y una sensibilidad térmica de 50 mK a 30 C. La cámara se dejó encendida durante 5 minutos antes de adquirir las imágenes para permitir la estabilización del sensor. La **emisividad de la piel** se fijó en 0,98 para todas las mediciones adquiridas. Después de las imágenes, las heridas se volvieron a vendar y recibieron la atención estándar.

El análisis termográfico de las imágenes se realizó utilizando el software FLIR Tools Quick-Report v.1.2 (FLIR Systems, versión 5.70, 2016), que incluye una herramienta para obtener la temperatura máxima, mínima y promedio de un área definida por el usuario.

Un investigador que desconocía las características clínicas de la herida delineó una región de interés (ROI) correspondiente al área de la quemadura utilizando un fantasma de la imagen clínica y el termograma, y luego se utilizó el software para obtener el máximo, el mínimo y el temperatura promedio del ROI. Se delineó una región de 25 cm² sobre la piel sana adyacente a la herida y se realizaron las mismas mediciones. Se registraron ambas temperaturas medias, así como la diferencia entre ellas, que es el ΔT .

Modalidad de tratamiento de heridas

Todas las heridas fueron estratificadas de forma independiente por dos cirujanos experimentados inmediatamente después del ingreso en una de tres categorías: espesor parcial superficial, espesor parcial profundo y espesor total, que también incluía quemaduras en el tejido subyacente (quemaduras de cuarto grado).

No se encontraron discrepancias entre sus valoraciones. Todas las quemaduras recibieron el tratamiento estándar según las directrices de la Sociedad Internacional de Lesiones por Quemaduras (ISBI) por parte de un equipo quirúrgico que desconocía los termogramas y los

limpieza de la herida cada 72 horas, escisión temprana del tejido necrótico, cobertura de la herida con sulfadiazina de plata y sin profilaxis antibiótica. Todas las heridas fueron seguidas durante 15 días, tras lo cual la decisión de injertar o no se tomó en función de las características clínicas de la herida. En el caso de las amputaciones, la decisión de amputar y los procedimientos se tomaron dentro de los 5 a 7 días posteriores al ingreso del paciente en la unidad de quemados, según las pautas del ISBI.

La modalidad de tratamiento de la herida se definió como “reepitelización” si la herida se reepitelizaba por sí sola antes de los 15 días de atención; “injerto de piel” si la herida sanó después de recibir uno o más injertos de piel (todos los pacientes recibieron autoinjertos), o “amputación”.

Análisis estadístico

Los datos se expresan como media y **desviación estándar** o proporciones, según corresponda.

El análisis estadístico se realizó utilizando el paquete estadístico R v.3.3.2 (R Core Team, Viena, Austria, 2016) y RStudio (RStudio Team, Boston, MA, 2016). Se realizó un análisis de potencia basado en los resultados de un estudio anterior.

Determinamos que se necesitaba un mínimo de 10 pacientes por grupo de resultados para detectar una diferencia de $2,0 \pm 1,5$ C entre los grupos de tratamiento con un nivel alfa de 0,05 y un poder estadístico del 80%. Se utilizó análisis de varianza (ANOVA) y regresión lineal para comparar la diferencia de temperatura

datos de predicción:

ΔT e identificar factores potencialmente confusos (edad, sexo, etiología de la quemadura, lugar de



Recap, PLOS ONE 2018. Martínez-Jiménez MA, Ramirez-GarciaLuna JL, Kolosovas-Machuca ES, Drager J, González FJ (2018) Development and validation of an algorithm to predict the treatment modality of burn wound using thermographic scans: Prospective cohort study. [PLOS ONE 13\(11\): e0206477](#)

lugar de la lesión, profundidad de la lesión, área quemada y momento de la medición de ΔT). Se utilizaron modelos de regresión lineal múltiple para ajustar los factores de confusión significativos identificados en el análisis de regresión bivariado. En todos los casos requeridos, se utilizaron pruebas post-hoc de Tukey para realizar comparaciones múltiples. Para el desarrollo del modelo de predicción se utilizaron curvas receptor-operador característico (ROC), así como modelado predictivo de aprendizaje automático mediante algoritmos de partición recursiva Random Forest y agrupamiento de k-medias no supervisado. Finalmente, para probar la tasa de concordancia entre el modelo de predicción y la modalidad de tratamiento utilizamos el análisis kappa ponderado.

Resultados

Características del paciente

En este estudio se utilizaron dos cohortes de pacientes independientes, una para entrenar el sistema predictivo.

Determinar si ΔT se correlaciona con el tratamiento definitivo de la quemadura

Se utilizó un total de 34 pacientes (edad media $26,5 \pm 19,4$ años, mín. 1, máx. 68) para desarrollar el modelo de predicción (cohorte de desarrollo).

De ellos, 14 (41%) eran niños. De la cohorte completa, 13 (39%) tuvieron quemaduras de espesor parcial y 21 (61%) tuvieron quemaduras de espesor total. Quince (45%) quemaduras fueron causadas por fuego, 12 (35%) fueron escaldaduras y 7 (20%) fueron causadas por electricidad.

Los pacientes fueron seguidos hasta el alta y se registró su resultado. Trece pacientes (37%) sanaron mediante re-epitelización, 10 (30%) recibieron injertos de piel y 11 (33%) requirieron una amputación.

El ΔT en pacientes que recibieron tratamiento conservador fue de $1,75 \pm 0,89$ C $3,28 \pm 0,68$ C en pacientes que recibieron injertos de piel y $7,71 \pm 1,89$ C en pacientes sometidos a amputación.

Se detectaron diferencias significativas entre todos los grupos.

Para caracterizar los posibles factores de confusión que podrían estar asociados con ΔT (variable dependiente), se realizaron modelos de regresión lineal bivariados para las siguientes variables independientes: edad, sexo, etiología de la quemadura, lugar de la lesión, profundidad de la lesión, área quemada y tiempo de medición ΔT .

Posteriormente, las variables que se encontraron significativamente asociadas con ΔT se ingresaron en un análisis de modelo lineal múltiple. Se decidió este enfoque estadístico debido al tamaño de la muestra de la cohorte de desarrollo para evitar un sobreajuste del modelo lineal múltiple.

Los factores asociados significativamente con ΔT fueron la edad (aumento de 0,06 C por aumento de 1 año, $p = 0,026$), la etiología de las quemaduras (ΔT en quemaduras por escaldaduras $1,84 \pm 0,86$, $6,22 \pm 2,76$ en quemaduras por incendio y $3,59 \pm 2,06$ en quemaduras eléctricas; escaldaduras versus quemaduras por fuego $p < 0,001$, NS para otras

Los factores asociados significativamente con ΔT fueron la edad (aumento de 0,06 C por aumento de 1 año, $p = 0,026$), la etiología de las quemaduras (ΔT en quemaduras por escaldaduras $1,84 \pm 0,86$, $6,22 \pm 2,76$ en quemaduras por incendio y $3,59 \pm 2,06$ en quemaduras eléctricas; escaldaduras versus quemaduras por fuego $p < 0,001$, NS para otras comparaciones), profundidad de la lesión (ΔT en quemaduras de espesor parcial superficial $1,77 \pm 0,92$ grados, $2,76 \pm 1,05$ en quemaduras de espesor parcial profundas y $5,45 \pm 2,86$ en quemaduras de espesor total, quemaduras superficiales de segundo grado versus quemaduras profundas de segundo grado $p = 0,791$, $p < 0,001$ para quemaduras superficiales de segundo grado versus quemaduras de tercer grado, y $p = 0,170$ para quemaduras profundas de segundo grado versus quemaduras de tercer grado) y área de quemadura (aumento de 0,01 C por 1 aumento de cm^2 , $p < 0,001$).

Posteriormente, todas las variables que se encontraron asociadas significativamente con ΔT se ingresaron en el **análisis de regresión lineal múltiple**

$\Delta T \sim \text{modalidad de tratamiento} + \text{edad} +$

comparaciones), profundidad de la lesión (ΔT en quemaduras de espesor parcial superficial $1,77 \pm 0,92$ grados, $2,76 \pm 1,05$ en quemaduras de espesor parcial profundas y $5,45 \pm 2,86$ en quemaduras de espesor total).

etiología de la quemadura + profundidad de la lesión + área de la quemadura.



Recap, PLOS ONE 2018. Martínez-Jiménez MA, Ramírez-García Luna JL, Kolosovas-Machuca ES, Drager J, González FJ (2018) Development and validation of an algorithm to predict the treatment modality of burn wound using thermographic scans: Prospective cohort study. PLoS ONE 13(11): e0206477

Se realizaron una serie de pruebas de probabilidad, descartando la variable que tenía menos probabilidades de ser significativa hasta que todas las variables fueran significativas. El modelo final fue el tratamiento $\Delta T \sim (R^2 = 0,807, p < 0,001)$.

Por lo tanto, llegamos a la conclusión de que sólo el tratamiento definitivo se asoció significativamente con ΔT después del ajuste de múltiples variables.

Desarrollo de un **algoritmo de predicción** utilizando ΔT .

Los valores de corte óptimos de ΔT para la predicción del tratamiento basándose en resultados binarios se calcularon utilizando curvas ROC. Los valores de corte y su sensibilidad, especificidad, valores predictivos y área bajo la curva asociados.

Los factores asociados significativamente con ΔT fueron la edad (aumento de $0,06$ C por aumento de 1 año, $p = 0,026$), la etiología de las quemaduras (ΔT en quemaduras por escaldaduras $1,84 \pm 0,86$, $6,22 \pm 2,76$ en quemaduras por incendio y $3,59 \pm 2,06$ en quemaduras eléctricas; escaldaduras versus quemaduras por fuego $p < 0,001$, NS para otras comparaciones), profundidad de la lesión (ΔT en quemaduras de espesor parcial superficial $1,77 \pm 0,92$ grados, $2,76 \pm 1,05$ en quemaduras de espesor parcial profundas y $5,45 \pm 2,86$ en quemaduras de espesor total; quemaduras superficiales de segundo grado versus quemaduras profundas de segundo grado $p = 0,791$, $p < 0,001$ para quemaduras superficiales de segundo grado versus quemaduras de tercer grado, y $p = 0,170$ para quemaduras profundas de segundo grado versus quemaduras de tercer grado) y área de quemadura (aumento de $0,01$ C por 1 aumento de cm^2 , $p < 0,001$).

Posteriormente, todas las variables que se encontraron asociadas significativamente con ΔT se ingresaron en el análisis de regresión lineal múltiple $\Delta T \sim \text{modalidad de tratamiento} + \text{edad} +$

etiología de la quemadura + profundidad de la lesión + área de la quemadura.

Se realizaron una serie de pruebas de probabilidad, descartando la variable que tenía menos probabilidades de ser significativa hasta que todas las variables fueran significativas.

El modelo final fue el tratamiento $\Delta T \sim (R^2 = 0,807, p < 0,001)$.

Por lo tanto, llegamos a la conclusión de que sólo el tratamiento definitivo se asoció significativamente con ΔT después del ajuste de múltiples variables.

Desarrollo de un algoritmo de predicción utilizando ΔT .

Los valores de corte óptimos de ΔT para la predicción del tratamiento basándose en resultados binarios se calcularon utilizando curvas ROC. Los valores de corte y su sensibilidad, especificidad, valores predictivos y área bajo la curva asociados. Finalmente, para crear el modelo completo de toma de decisiones que incluyera los 3 resultados posibles (reepitelización, injerto de piel o amputación), utilizamos el paquete de entrenamiento de clasificación y regresión (caret) para R [19]

El modelo tenía tres clases (reepitelización, injerto de piel o amputación) y cinco predictores (ΔT , edad, etiología de la quemadura, profundidad de la lesión y área de la quemadura).

El modelo final, que tiene el valor de parámetro de complejidad más bajo.

Probamos la precisión diagnóstica del modelo con 100 remuestreos de arranque y encontramos una precisión del 85,35% (IC del 95%: 72,2 a 98,5%). para la clasificación diagnóstica.

El algoritmo clasificó erróneamente al 13,0% de los pacientes en tratamiento conservador, al 13,0% en injerto de piel y al 0% en amputación.

Para controlar el hecho de que los algoritmos de Random Forest son un tipo de técnica de aprendizaje automático supervisado, lo que significa que el método fue entrenado para categorizar a los pacientes de manera similar a lo que habría hecho el equipo quirúrgico, y para confirmar los resultados iniciales del

para crear y validar un modelo predictivo. utilizando algoritmos de bosque aleatorio de partición recursiva para asignar un tratamiento a los pacientes en función de su ΔT .

algoritmo, realizamos un segundo análisis utilizando agrupamiento de k-medias no supervisado de los valores de ΔT .



Recap, PLOS ONE 2018. Martínez-Jiménez MA, Ramirez-GarciaLuna JL, Kolosovas-Machuca ES, Drager J, González FJ (2018) Development and validation of an algorithm to predict the treatment modality of burn wound using thermographic scans: Prospective cohort study. [PLOS ONE 13\(11\): e0206477](#)

Mediante esta técnica, los puntos de datos se agrupan independientemente de la decisión del cirujano de tal manera que los objetos de un mismo grupo sean más similares entre sí que a los objetos de otros grupos. Los resultados de la agrupación, que respaldan los valores de corte del algoritmo.

Tasa de acuerdo entre el resultado previsto y la modalidad de tratamiento Para probar la precisión de la predicción del modelo en la cohorte de desarrollo, obtuvimos el coeficiente kappa ponderado por acuerdo entre evaluadores. El algoritmo predijo que 14 pacientes sanarían mediante reepitelización, 9 mediante injertos de piel y 11 requerirían una amputación. La modalidad de tratamiento utilizada en los pacientes fue tratamiento conservador y reepitelización en 13, injerto de piel en 10 y amputación en 11. Así, el algoritmo clasificó erróneamente a tres pacientes (uno en el grupo de reepitelización y dos en el grupo de injerto de piel). La tasa de concordancia entre la predicción y el resultado del paciente fue ponderada kappa = 0,904 (p <0,001).

Validación del algoritmo de predicción.

Inscribimos prospectivamente a 22 nuevos pacientes con características similares para desarrollar una cohorte de validación. Las características clínicas y su comparación con la cohorte de desarrollo.

Después del ingreso a la unidad de atención de quemados y la inscripción en el estudio, un miembro independiente del equipo de investigación adquirió y analizó los termogramas. El equipo quirúrgico se mantuvo cegado a los resultados de la predicción hasta el alta de los pacientes, cuando se registró su modalidad de tratamiento. El algoritmo predijo que 9 pacientes sanarían mediante reepitelización con tratamiento conservador, 6 mediante injertos de piel y 7 requerirían una amputación. El verdadero resultado de los pacientes fue la re-epitelización en 9 casos (se predijo erróneamente que 1 sanaría mediante injerto), el injerto de piel en 6 (se predijo erróneamente que 1 sanaría mediante re-epitelización) y la amputación en 7; por tanto, el algoritmo clasificó erróneamente a dos pacientes. La tasa de concordancia entre la predicción y el resultado del paciente fue ponderada kappa = 0,901 (p <0,001).

Discusión

La cicatrización de heridas es un proceso biológico dinámico y complejo en el que comúnmente se acepta que la profundidad original de la herida no es estática. Esto es especialmente cierto en el caso de las quemaduras, donde una variedad de mecanismos fisiopatológicos pueden hacer que una herida progrese hacia un daño tisular más profundo durante los primeros días después de la lesión [20]. Una de las causas más comunes de conversión de heridas es la falta de un suministro sanguíneo adecuado, lo que conduce a isquemia y autofagia del tejido circundante [20, 21]. Como estos fenómenos pueden no ser evidentes durante la evaluación inicial de la herida, su detección temprana sigue siendo un importante desafío aún no resuelto. En este artículo, demostramos que la termografía infrarroja digital es una herramienta que se puede utilizar para discriminar la gravedad de las quemaduras, al detectar cambios de temperatura en la superficie de la piel que posiblemente actúe como un sustituto de diversos grados de suministro de sangre en la herida. Esta capacidad de discriminación se puede utilizar desde la primera vez que se evalúa al paciente para guiar el proceso de toma de decisiones clínicas.

También demostramos que la capacidad de predicción de los termogramas es muy precisa y consistente, lo que sugiere que puede incorporarse fácilmente a la práctica clínica para establecer un protocolo de tratamiento más eficiente. De esta manera, el parámetro ΔT tiene el potencial de convertirse en una técnica complementaria para el análisis táctil y visual en la evaluación de heridas de tejidos blandos.

La tecnología de imagen térmica registra la radiación emitida por un objeto. La radiación de calor de la piel o de los tejidos lesionados subyacentes se origina en su suministro de sangre, que si se ve comprometida provocará una caída de temperatura. Estudios anteriores han determinado que este método de obtención de imágenes mide el calor emitido desde una profundidad de 1 a 3 mm.

Nuestros resultados y el modelo de predicción que desarrollamos se basan en la diferencia de temperatura entre la piel lesionada y la piel sana adyacente. Por lo tanto, el valor ΔT ofrece información sobre el alcance de la lesión tisular y la grado de déficit de suministro de sangre. Este enfoque también se ha utilizado para evaluar la profundidad de la quemadura y se ha descubierto que a medida que la herida se vuelve más profunda, también se enfría [22].

Un estudio más reciente informó que las imágenes térmicas infrarrojas podían predecir la profundidad de las quemaduras mejor que el examen clínico solo a través de cambios dinámicos de la temperatura de la herida entre los días uno y dos después de la lesión. Como este cambio de temperatura durante dos días probablemente represente la conversión de la herida, la termografía puede ser un método ideal para detectarlo .

Los autores concluyeron que la precisión general de la termografía infrarroja digital para predecir la profundidad de la herida era mayor que la evaluación clínica sola, y que la disminución de la temperatura predecía una herida más profunda [23].

Además, dado que es muy probable que esta caída de temperatura represente una conversión de la herida, la termografía puede ser un método ideal para detectarla. Otras ventajas de la termografía digital es que no es invasiva, indolora y no requiere contacto, evitando así el riesgo de contaminación y aplicación de presiones sobre la herida que puedan afectar la microcirculación.

Los termogramas son rápidos de adquirir, fáciles de interpretar ya que se basan en mapas de calor y la formación necesaria para adquirirlos es mínima.

Por estas razones, podrían convertirse en una herramienta útil para la evaluación temprana de los pacientes en el servicio de urgencias, así como en las últimas etapas de la atención del paciente para identificar necrosis superficial, distinguir entre quemaduras parciales y totales y detectar complicaciones [6, 24, 25]. Sin embargo, en nuestra opinión, la contribución más relevante de la termografía para el cuidado de heridas podría ser permitir que el equipo clínico determine rápida y objetivamente la modalidad de tratamiento que se necesita, evitando así procedimientos innecesarios o retrasos en la cirugía.

Actualmente, el único complemento basado en evidencia para la evaluación clínica de la profundidad de la herida y la evaluación del tratamiento es la imagenología láser Doppler (LDI) [26]. Numerosos estudios han evaluado la utilidad de la LDI y han llegado a la conclusión de que discrimina de forma fiable entre heridas que sanarán o no mediante reepitelización en la tercera semana.

La precisión de esta tecnología de imágenes en comparación con el resultado clínico oscila entre el 90 y el 97%, con un valor predictivo positivo de hasta el 98,4% [2, 3, 27].

Si bien estos valores son superiores a los que encontramos, LDI tiene varios inconvenientes importantes que hacen que esta tecnología no sea viable para un uso clínico extensivo, como el alto costo de adquisición y mantenimiento de la tecnología, la necesidad de personal capacitado para operar el equipo y interpretar las imágenes, y se necesita un tiempo relativamente largo para adquirir imágenes (es decir, más de un minuto por exploración), por lo que se requiere sedación de los pacientes pediátricos o que no cumplen para garantizar la calidad de la imagen [28-30]. Como la termografía evita todos estos inconvenientes, creemos que su uso generalizado podría ser factible, especialmente en centros de gran volumen donde existe una necesidad imperiosa de racionalizar la atención al paciente, en sitios sin fácil acceso a un cirujano de quemaduras, donde se puede utilizar la termografía para clasificar a los pacientes y ayudar a priorizar las transferencias, o en entornos de recursos limitados, donde las transferencias pueden ser difíciles de lograr [13, 22, 31]. En las figuras 5 y 6 se presentan dos viñetas clínicas que ilustran el uso clínico del algoritmo para ayudar a decidir el manejo del tratamiento y los niveles de amputación después de quemaduras importantes en dos pacientes independientes de las cohortes del estudio.

Este estudio tiene algunas limitaciones: primero, solo incluimos pacientes con quemaduras en las extremidades, por lo que nuestros resultados no se pueden extrapolar a otras áreas del cuerpo.

Actualmente se está explorando el refinamiento del algoritmo para incluir áreas quemadas en la cabeza o el tronco donde no es factible una amputación, junto con la búsqueda del momento óptimo de la termografía, aunque no encontramos una asociación significativa entre el tiempo de la imagen y los valores de ΔT .

El modelado térmico de tejido lesionado y sano justifica una mayor exploración, ya que podría mejorar nuestro modelo de predicción y ofrecer información sobre el tiempo de recuperación de diferentes tipos de heridas y sobre los cambios dinámicos de la temperatura de la herida, proporcionando así datos adicionales para racionalizar mejor el tratamiento adecuado para el paciente [32]. En segundo lugar, el algoritmo fue entrenado para tomar las mismas decisiones de tratamiento que los cirujanos de quemaduras que trataron a los pacientes, por lo tanto, aunque los resultados mostrados están respaldados por el algoritmo de agrupamiento de k-medias, es posible que solo sean aplicables a nuestro centro de quemados.

Si bien estos valores son superiores a los que encontramos, LDI tiene varios inconvenientes importantes que hacen que esta tecnología no sea viable para un uso clínico extensivo, como el alto costo de adquisición y mantenimiento de la tecnología, la necesidad de personal capacitado para operar el equipo y interpretar las imágenes, y se necesita un tiempo relativamente largo para adquirir imágenes (es decir, más de un minuto por exploración), por lo que se requiere sedación de los pacientes pediátricos o que no cumplen para garantizar la calidad de la imagen [28-30]. Como la termografía evita todos estos inconvenientes, creemos que su uso generalizado podría ser factible, especialmente en centros de gran volumen donde existe una necesidad imperiosa de racionalizar la atención al paciente, en sitios sin fácil acceso a un cirujano de quemaduras, donde se puede utilizar la termografía para clasificar a los pacientes y ayudar a priorizar las transferencias, o en entornos de recursos limitados, donde las transferencias pueden ser difíciles de lograr [13, 22, 31]. En las figuras 5 y 6 se presentan dos viñetas clínicas que ilustran el uso clínico del algoritmo para ayudar a decidir el manejo del tratamiento y los niveles de amputación después de quemaduras importantes en dos pacientes independientes de las cohortes del estudio.

Este estudio tiene algunas limitaciones: primero, solo incluimos pacientes con quemaduras en las extremidades, por lo que nuestros resultados no se pueden extrapolar a otras áreas del cuerpo.

Actualmente se está explorando el refinamiento del algoritmo para incluir áreas quemadas en la cabeza o el tronco donde no es factible una amputación, junto con la búsqueda del momento óptimo de la termografía, aunque no encontramos una asociación significativa entre el tiempo de la imagen y los valores de ΔT .

El modelado térmico de tejido lesionado y sano justifica una mayor exploración, ya que podría mejorar nuestro modelo de predicción y ofrecer información sobre el tiempo de recuperación de diferentes tipos de heridas y sobre los cambios dinámicos de la temperatura de la herida, proporcionando así datos adicionales para racionalizar mejor el tratamiento adecuado para el paciente [32]. En segundo lugar, el algoritmo fue entrenado para tomar las mismas decisiones de tratamiento que los cirujanos de quemaduras que trataron a los pacientes, por lo tanto, aunque los resultados mostrados están respaldados por el algoritmo de agrupamiento de k-medias, es posible que solo sean aplicables a nuestro centro de quemados.

Generalizar los resultados y la aplicabilidad del algoritmo, es posible que se requieran más estudios en diferentes poblaciones y entornos. En tercer lugar, si bien es ampliamente reconocido que la profundidad de las quemaduras no es completamente estática y que una variedad de factores pueden promover la profundización de una quemadura en los primeros días después de sufrirla, no todas las quemaduras sufren este fenómeno.

Se ha propuesto que la isquemia y la autofagia del tejido son las principales causas de conversión de quemaduras y, como tales, es muy probable que la termografía infrarroja pueda detectarlo en sus primeras etapas. Si esto es cierto, las heridas con valores más altos de ΔT probablemente estarían asociadas con la conversión de quemaduras y la profundización de la lesión. Sin embargo, en el presente estudio, no registramos la conversión de quemaduras ni los cambios dinámicos en los valores de ΔT , que habrían sido necesarios para confirmar la hipótesis. Parece que la termografía es lo suficientemente sensible como para no verse afectada por este factor, pero se necesitan más estudios para aclarar este punto. Finalmente, una advertencia del método es que medimos el ΔT de las heridas como promedio, aunque la mayoría de las heridas tendrán áreas con diferentes valores de temperatura.

De hecho, este enfoque puede brindar más información al equipo clínico y ayudar a optimizar aún más el tratamiento de los pacientes.

Otras técnicas termográficas para la evaluación de quemaduras son la imagen térmica infrarroja dinámica activa (ADT) y la termografía de lapso de tiempo. Estos métodos se basan en la detección infrarroja y muestran propiedades térmicas del tejido en lugar de cambios en la distribución de temperatura. En ambas técnicas, se aplica un estímulo térmico externo seguido de mediciones de transitorios de temperatura en la superficie probada [33-35]. El mayor inconveniente de ambas técnicas es que requieren equipos o intervenciones adicionales para modificar las condiciones del área quemada. La evaluación de ΔT , que se basa en imágenes termográficas infrarrojas estáticas, tiene por lo tanto varias ventajas: no requiere equipos ni intervenciones adicionales, no es invasiva y ofrece la posibilidad de evaluar áreas corporales relativamente grandes. Decidimos utilizar imágenes estáticas por razones de simplicidad y reproducibilidad del método.



Recap, PLOS ONE 2018. Martínez-Jiménez MA, Ramirez-GarciaLuna JL, Kolosovas-Machuca ES, Drager J, González FJ (2018) Development and validation of an algorithm to predict the treatment modality of burn wound using thermographic scans: Prospective cohort study. [PLOS ONE 13\(11\): e0206477](#)

Creemos que al utilizar la técnica menos complicada, la adopción de nuestro algoritmo en la práctica clínica y en diferentes entornos puede ser más fácil de lograr. Las perspectivas para el uso de la termografía infrarroja digital son la evaluación del modelo de predicción en otro tipo de lesiones, como herramienta de triaje para salas de emergencia o situaciones de combate, y como complemento de telemedicina en asociación con una aplicación móvil.

Significados:

- **Cohorte independiente.** El estudio de cohorte es un diseño epidemiológico observacional y analítico. Es el que mayor valor o cercanía tiene en lo referente a la búsqueda de asociaciones causales. La palabra cohorte deriva del latín cohortari, que designa a una unidad táctica de infantería dentro de las legiones romanas.
- **Regresión lineal.** La regresión lineal es una técnica de análisis de datos que predice el valor de datos desconocidos mediante el uso de otro valor de datos relacionado y conocido. Modela matemáticamente la variable desconocida o dependiente y la variable conocida o independiente como una ecuación lineal.
- **Comité de ética.** Todos los estándares éticos recomiendan a los investigadores solicitar el visto bueno de un comité de ética en el momento inicial de la investigación, cuando se acaba de decidir el diseño definitivo que tendrá la investigación.
- **Declaración de Helsinki.** La Declaración de Helsinki se adoptó por primera vez en el año 1964. Con ella, la profesión médica trataba de demostrar que era posible la autorregulación en el control ético de la investigación con seres humanos.
- **Asentimiento.** Asentimiento quiere decir que aceptan participar. También pueden disentir, lo que quiere decir que no aceptan participar en el estudio. A diferencia del consentimiento formal, el proceso de asentimiento no es exigido por ley, pero puede ser requerido por los Consejos Institucionales de Revisión
- **Emisividad de la piel.** La piel humana está cerca de ser un radiador perfecto con una emisividad de 0.98.
- **Desviación estándar.** La desviación estándar mide la dispersión de una distribución de datos. Entre más dispersa está una distribución de datos, más grande es su desviación estándar.
- **Análisis de regresión lineal múltiple.** es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación entre variables en una amplia variedad de situaciones y predecir fenómenos diversos.
- **Algoritmo de predicción.** funcionan al extraer modelos históricos para poder identificar las oportunidades y riesgos para la empresa. Se encargan de identificar las relaciones existentes entre los diversos factores que componen a los procesos, permitiendo valorar las probabilidades o riesgos.