

**UNIVERSIDA HISPANOAMERICANA**

**CARRERA DE MEDICINA Y CIRUGÍA**

*Tesis para optar por el grado académico de  
Licenciatura en Medicina y Cirugía*

**APLICACIÓN DE IA EN EL DIAGNÓSTICO  
PRECOZ DE INFECCIONES CUTÁNEAS  
POR STAPHYLOCOCCUS AUREUS  
RESISTENTE A METICILINA ANÁLISIS  
CRÍTICO Y VIABILIDAD EN ENTORNOS  
LATINOAMERICANOS**

**ANA TERESA ÁLVAREZ HERNÁNDEZ**

**MAYO, 2025**

## TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO .....	2
ÍNDICES DE TABLAS .....	4
ÍNDICES DE FIGURAS .....	5
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>6</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>7</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>8</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>11</b>
1.1.1 Antecedentes del problema .....	11
1.1.2 Delimitación del problema .....	14
1.1.3 Justificación .....	15
<b>1.2 REDACCIÓN DEL PROBLEMA CENTRAL:</b> .....	<b>17</b>
<b>1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>17</b>
1.3.1 Objetivo general .....	17
1.3.2 Objetivos específicos.....	17
<b>1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES</b> .....	<b>18</b>
1.4.1 Alcances de la investigación .....	18
1.4.2 Limitaciones de la investigación .....	19
<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1 CONTEXTO TEÓRICO-CONCEPTUAL</b> .....	<b>22</b>
2.2.1 Staphylococcus aureus: morfología, colonización y comportamiento oportunista.....	23
2.2.2 Mecanismos de resistencia y definición del SARM.....	24
2.2.3 Epidemiología y carga de enfermedad .....	24
2.2.4 Manifestaciones clínicas y complicaciones.....	25
<b>CAPITULO III MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>41</b>
<b>3.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>41</b>
<b>3.3 UNIDADES DE ANALISIS U OBJETOS DE ESTUDIO</b> .....	<b>42</b>
3.3.1 Área de estudio.....	42
3.3.2 Fuentes de información .....	43
3.3.3 Población .....	43
3.3.4 Muestra.....	43
<b>3.4 INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN</b> .....	<b>45</b>
<b>3.5 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>46</b>
<b>3.6 PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCION DE DATOS</b> .....	<b>47</b>
<b>3.7 ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS</b> .....	<b>51</b>

3.8 ANÁLISIS DE DATOS .....	52
<b>CAPÍTULO IV PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>53</b>
4.1 GENERALIDADES.....	54
4.2 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTUDIOS INCLUIDOS .....	54
4.3 LISTADO DE ESTUDIOS INCLUIDOS EN LA INVESTIGACIÓN Y SUS DESCRIPCIONES .	54
4.3.1 Disbiosis y úlcera de pie diabético: una perspectiva metabólica de la infección por Staphylococcus aureus.....	54
4.3.2 Evaluación de la farmacocinética y la farmacodinamia para respaldar los regímenes de dosificación de omadacilina en el tratamiento de pacientes con infecciones bacterianas agudas de la piel y sus estructuras.....	58
4.3.3 Detección automatizada de Staphylococcus aureus resistente a la meticilina con la aplicación de imágenes MRSA CHROM en el sistema de automatización total de laboratorio BD Kiestra.....	59
4.3.4 Identificación de Staphylococcus aureus, Enterococcus faecium, Klebsiella pneumoniae, Pseudomonas aeruginosa y Acinetobacter baumannii a partir de espectros Raman mediante el Sistema de Detención e Identificación Raman con Inteligencia Artificial (AIRDIS) con aprendizaje automático.....	60
4.3.5 Evaluación del impacto de la inteligencia artificial en la gestión de antimicrobianos: un metaanálisis comparativo con los sistemas tradicionales de puntuación de riesgos.....	62
4.3.7 Integración de inteligencia artificial y oncología de precisión en América Latina .....	66
4.3.8 Análisis del modelo de atención médica virtual en América Latina: una revisión sistemática de los desafíos y barreras actuales.....	69
4.3.9 Modelo de aprendizaje profundo para la predicción personalizada de cultivos positivos de SARM mediante registros médicos electrónicos de series temporales.....	71
4.3.10 El impacto de una herramienta visual de apoyo a la toma de decisiones clínicas en el punto de atención en los ingresos por celulitis en el sistema médico de la Universidad de Maryland .....	73
<b>CAPÍTULO V DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS.....</b>	<b>75</b>
5.1 DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	76
5.1.1 Características y comportamiento clínico de las infecciones cutáneas por SARM (2019-2024)	76
5.1.2 Complicaciones del manejo tardío del SARM en piel .....	78
5.1.3. Aplicaciones actuales de inteligencia artificial en el diagnóstico precoz de infecciones resistentes.....	79
5.1.4 Viabilidad para implementar IA en atención primaria latinoamericana para el diagnóstico temprano de SARM en piel.....	81
<b>CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>85</b>
CONCLUSIONES.....	86
RECOMENDACIONES.....	87
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>101</b>
ANEXO 1. CARTA DEL TUTOR .....	102
ANEXO 2. CARTA DEL LECTOR .....	103
ANEXO 3. DECLARACIÓN JURADA .....	104
ANEXOS 4. AUTORIZACIÓN DEL CENIT.....	105

## ÍNDICES DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> .....	45
<b>Tabla 2</b> .....	49
<b>Tabla 3</b> .....	50
<b>Tabla 4</b> .....	50
<b>Tabla 5</b> .....	51
<b>Tabla 6</b> .....	51
<b>Tabla 7</b> .....	63
<b>Tabla 8</b> .....	64
<b>Tabla 9</b> .....	70
<b>Tabla 10</b> .....	71
<b>Tabla 11</b> .....	72
<b>Tabla 13</b> .....	73

## ÍNDICES DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> .....	44
-----------------------	----

## **DEDICATORIA**

A todos los doctores con vocación, que además de enseñarme medicina, me han inculcado valores y me han inspirado a ser una mejor persona.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi madre, por ser mi guía, mi sostén y el mayor ejemplo a seguir.

A mi familia, por su amor, apoyo incondicional y fe en mi camino.

A mi tío, que en paz descansa, que me ha cuidado en cada paso que he dado.

Y a ti también, Celia, por acompañarme con tanto cariño a lo largo de esta carrera.

## RESUMEN

**Introducción:** el *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina (SARM) representa una amenaza creciente para la salud pública global debido a su resistencia antimicrobiana y a su elevada morbilidad, particularmente en infecciones cutáneas. En Costa Rica y otros países latinoamericanos, persisten desafíos para el diagnóstico temprano de estas infecciones, especialmente en entornos rurales. La inteligencia artificial (IA), aplicada mediante herramientas móviles (apps mHealth), surge como una posible solución para apoyar el diagnóstico precoz, mejorar la vigilancia epidemiológica y optimizar el uso de antibióticos. **Objetivo general:** evaluar la viabilidad clínica, técnica y operativa del uso de una aplicación mHealth basada en IA para el diagnóstico precoz de infecciones cutáneas por SARM en contextos latinoamericanos, con énfasis en Costa Rica. **Metodología:** Se realizó una revisión crítica de literatura científica reciente relacionada con el diagnóstico precoz de las infecciones cutáneas por SARM mediante herramientas basadas en inteligencia artificial o aplicaciones clínicas el objetivo fue cuantificar y comparar variables clave reportadas en los estudios tales como la usabilidad, efectividad diagnóstica, confiabilidad algorítmica y costo-efectividad. Se utilizaron matrices de extracción y categorización de datos diseñadas para identificar y organizar las variables de interés.

**Palabras clave:** *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina, inteligencia artificial, diagnóstico precoz, mHealth, infecciones cutáneas, salud pública.

## **ABSTRACT**

**Introduction:** Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) is a growing global health concern due to its antibiotic resistance and high morbidity, especially in skin infections. In Costa Rica and other Latin American countries, early diagnosis remains a challenge, particularly in rural areas. Artificial intelligence (AI), integrated into mobile health (mHealth) tools, emerges as a promising solution to support early diagnosis, improve epidemiological surveillance, and promote rational antibiotic use. **General Objective:** to assess the clinical, technical, and operational feasibility of using an AI-powered mHealth application for the early diagnosis of MRSA-related skin infections in Latin American settings, with a focus on Costa Rica. **Methodology:** a critical review of recent scientific literature was conducted on the early diagnosis of skin infections caused by MRSA using artificial intelligence–based tools or clinical applications. The objective was to quantify and compare key variables reported in the studies, such as usability, diagnostic effectiveness, algorithmic reliability, and cost-effectiveness. Data extraction and categorization matrices were used, designed to identify and organize the variables of interest.

**Keywords:** Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*, artificial intelligence, early diagnosis, mHealth, skin infections, public health.

# **CAPÍTULO I PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1.1 Antecedentes del problema**

En un mundo donde las bacterias evolucionan más rápido que las soluciones médicas, SARM se ha consolidado como uno de los principales desafíos sanitarios del siglo XXI. Su capacidad para diseminarse en la comunidad y en los entornos hospitalarios, combinada con su resistencia a múltiples antibióticos, lo convierte en una amenaza latente, particularmente en países con sistemas de salud fragmentados o con acceso limitado a tecnologías diagnósticas.

Aunque en países como Estados Unidos la incidencia de infecciones invasivas por SARM mostró una tendencia descendente desde 2005, esta reducción se ha desacelerado significativamente en los últimos años. En 2016, la tasa nacional fue de 17,5 casos por cada 100 000 habitantes, con especial incidencia en niños menores de un año y adultos mayores de 50 (Jackson et al., 2020). A nivel global, la situación es aún más alarmante: la proporción de infecciones del torrente sanguíneo causadas por SARM aumentó del 20,6% en 2016 al 32,2% en 2022, alcanzando un pico del 34,7% en 2020 (OMS, 2025). Además, las infecciones por SARM presentan una tasa de mortalidad hasta un 64% mayor en comparación con cepas sensibles (OPS, 2024), generando un fuerte impacto no solo clínico, sino también económico y social.

En América Latina, la resistencia antimicrobiana (RAM) ha crecido de forma sostenida, pese a los esfuerzos de vigilancia. Si bien países como Colombia, Brasil y Argentina cuentan con mayor cobertura de pruebas de susceptibilidad (WHO, 2024), regiones como Centroamérica, incluida Costa Rica, siguen enfrentando barreras significativas en cuanto a infraestructura diagnóstica, formación médica y acceso a herramientas de detección rápida. Costa Rica, aunque

participa activamente en iniciativas como ReLAVRA+ y GLASS (ReLAVRA+ - OPS/OMS, 2025), carece de guías clínicas específicas para la detección temprana de infecciones cutáneas por SARM en atención primaria, lo que limita la posibilidad de intervenir de forma oportuna en casos con riesgo de evolución grave.

A pesar de estas limitaciones en la detección y manejo del SARM, en Latinoamérica se han desarrollado iniciativas digitales que sientan las bases para una futura integración de herramientas de IA en salud. En el sector privado, plataformas como HuliHealth en Costa Rica, que incluye soluciones como HuliPractice, HuliHealth y HuliVida, han digitalizado procesos clínicos y administrativos, permitiendo a médicos y clínicas gestionar historiales clínicos electrónicos, agendas, directorios de especialistas y registros personales de pacientes, beneficiando a más de dos millones de usuarios (dystrick, 2019). De forma paralela, Alephoo, desarrollado en Argentina, ofrece módulos de historia clínica electrónica, farmacia, facturación, agenda médica y componentes de IA, y actualmente está presente en centros de salud de más de diez países latinoamericanos (Noticias de Salud Digital e Innovación Hospitalaria | Alephoo, 2025).

En el sector público, el Expediente Digital Único de Salud (EDUS) implementado por la Caja Costarricense de Seguro Social ha alcanzado una cobertura cercana al 92 % de la población de Costa Rica, con más de 63 millones de acciones clínicas registradas y más de cinco millones de descargas de su aplicación móvil (*Expediente digital único en salud | Publications, 2025*). Este sistema ha consolidado la interoperabilidad clínica, estandarizado los registros electrónicos y generado una masa crítica de datos de alta calidad, factores esenciales para el entrenamiento de modelos de IA.

Estas experiencias previas evidencian que ya existe una infraestructura digital sanitaria en la región capaz de generar y gestionar datos clínicos estructurados, condición indispensable para el desarrollo de herramientas de IA aplicadas a la salud pública.

El problema se agrava cuando se considera que muchas de estas infecciones se presentan en heridas abiertas, úlceras diabéticas, lesiones quirúrgicas o traumatismos. A nivel mundial, se estima que las heridas afectan al 2% de la población en EE. UU., al 1,04% en Alemania, y en China, el 67,48% de las heridas traumáticas se complican con infección (Wang et al., 2025). El manejo clínico de estas lesiones es especialmente complejo ante la presencia de bacterias multirresistentes como *S. aureus*, *A. baumannii* o *K. pneumoniae*, dificultando el uso racional de antibióticos y comprometiendo la recuperación del paciente.

En este escenario, la IA emerge como una herramienta innovadora y necesaria. Diversos planes estratégicos, como el *Pan-Canadian Action Plan on Antimicrobial Resistance (2023–2027)*, destacan su potencial en el diagnóstico temprano, especialmente desde un enfoque integral *One Health* (Pan-Canadian Action Plan on AMR, 2023). Revisiones recientes también han validado la eficacia de algoritmos de aprendizaje automático para identificar patrones clínicos y microbiológicos de infecciones resistentes (Charani et al., 2021; Lwigale et al., 2024), reduciendo así los tiempos diagnósticos y favoreciendo una intervención más precisa.

En países de renta media como India, estudios han demostrado la aceptación del personal médico hacia herramientas de IA, siempre que estén contextualizadas cultural, técnica y operativamente (Huang et al., 2023). Esta evidencia sugiere que en Costa Rica, donde ya existe infraestructura digital como el EDUS y capacidad técnica en algunos centros hospitalarios, la

incorporación de IA en atención primaria no solo es posible, sino estratégica para frenar la expansión del SARM.

Por tanto, este estudio se propone explorar la viabilidad y el impacto potencial de una aplicación móvil basada en inteligencia artificial para el diagnóstico precoz de infecciones cutáneas por SARM en entornos latinoamericanos. Con ello, se busca cerrar la brecha diagnóstica existente, reducir la carga clínica y económica, y abrir un camino hacia modelos de atención más predictivos, accesibles y sostenibles.

### **1.1.2 Delimitación del problema**

Esta investigación se delimita metodológicamente como una revisión crítica de la literatura científica, de tipo narrativa, orientada a evaluar la utilidad y aplicabilidad de herramientas de inteligencia artificial en el diagnóstico precoz de infecciones cutáneas por SARM. Al tratarse de una revisión de alcance secundario, no se utilizará una muestra de sujetos ni se realizará recolección de datos.

La delimitación demográfica se centrará en estudios que incluyan a la población general, tanto adultos como niños, sin distinción de género, con énfasis en contextos clínicos que reflejen escenarios latinoamericanos o condiciones comparables en términos de recursos.

Desde el punto de vista temporal, se considerará literatura publicada desde el año 2019 hasta el 2025, abarcando un periodo de aproximadamente cinco años, lo cual permite incluir estudios recientes y tecnologías emergentes.

En cuanto a la delimitación geográfica, se incluirán estudios internacionales en los que se haya aplicado inteligencia artificial en entornos médicos, con especial interés en aquellos que puedan ofrecer lecciones transferibles a países latinoamericanos con recursos limitados.

Las fuentes seleccionadas incluirán estudios clínicos, revisiones sistemáticas, ensayos controlados, artículos originales y reportes de organismos internacionales relevantes (como la OMS, OPS o CDC), siempre que aporten evidencia sobre el uso de inteligencia artificial en el diagnóstico de infecciones cutáneas.

El objetivo final es analizar críticamente si estas tecnologías podrían ser adaptadas e implementadas localmente para mejorar el diagnóstico temprano de infecciones por SARM. Con ello, se busca contribuir a la reducción de la resistencia antimicrobiana mediante intervenciones clínicas más oportunas y costo-efectivas.

### **1.1.3 Justificación**

Una simple herida en la piel puede desencadenar una cadena de eventos que termine en una hospitalización prolongada, complicaciones graves o incluso la muerte. Esta es la realidad silenciosa que enfrentan miles de personas afectadas por infecciones cutáneas causadas por SARM, una amenaza creciente en América Latina y el mundo (OPS, 2024; OMS, 2025). Esta investigación nace de una urgencia real: mejorar el diagnóstico precoz de estas infecciones antes de que sea demasiado tarde.

En Costa Rica, como en muchos países de la región, el diagnóstico oportuno sigue siendo una deuda pendiente. La limitada disponibilidad de pruebas moleculares fuera de los grandes hospitales y la falta de guías clínicas específicas para atención primaria generan retrasos

significativos en la identificación y tratamiento de casos sospechosos (INCIENSA, 2023; ReLAVRA+ - OPS/OMS, 2025). Ante esta carencia, los profesionales de salud se ven obligados a iniciar tratamientos empíricos con antibióticos de amplio espectro, lo que no solo incrementa el costo del tratamiento, sino que también contribuye al desarrollo y propagación de la resistencia antimicrobiana (Singh et al., 2022; Charani et al., 2021).

Frente a este panorama, la IA emerge como una herramienta transformadora. Experiencias internacionales en países como Corea, Taiwán o India han demostrado que los sistemas de IA pueden apoyar el diagnóstico clínico mediante el análisis de imágenes cutáneas o patrones epidemiológicos, incluso en contextos de recursos limitados, siempre que estén contextualizados técnica y culturalmente (Huang et al., 2025; Wang et al., 2025; “Artificial Intelligence in Bacterial Infections Control”, 2025). El Pan-Canadian Action Plan on AMR (2023–2027) incluso la reconoce como un eje estratégico clave para combatir la resistencia antimicrobiana desde un enfoque integral One Health.

Este estudio propone el diseño y evaluación crítica de una aplicación móvil basada en IA para el diagnóstico temprano de infecciones cutáneas por SARM. Lejos de ser una idea futurista, se trata de una solución viable, construida con tecnologías accesibles, entrenada con datos locales, y alineada con la infraestructura sanitaria ya existente en Costa Rica, como el Expediente Digital Único en Salud (EDUS) (Duarte et al., 2024; Giralt-Zúñiga et al., 2023). Esta herramienta tiene el potencial de reducir la morbilidad, evitar internamientos innecesarios, mejorar el uso de antibióticos y disminuir los costos hospitalarios derivados de complicaciones como abscesos profundos, celulitis diseminada o sepsis.

No actuar ahora implica seguir perdiendo vidas, recursos y oportunidades de innovación. La presente investigación llena una brecha crítica en la evidencia local, al proponer una estrategia adaptada, escalable y centrada en la realidad costarricense. Así, los objetivos de esta tesis no son meramente teóricos: son un llamado urgente a transformar el diagnóstico clínico desde sus cimientos, utilizando las herramientas del presente para evitar las crisis del futuro.

## **1.2 REDACCIÓN DEL PROBLEMA CENTRAL:**

¿Cómo podría implementarse la inteligencia artificial en entornos con recursos limitados de Latinoamérica para detectar infecciones cutáneas por SARM?

## **1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar la viabilidad clínica, tecnológica y operativa de implementar en Costa Rica una aplicación móvil basada en inteligencia artificial para el diagnóstico precoz de infecciones cutáneas por SARM.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Características y comportamiento clínico de las infecciones cutáneas por SARM (2019-2024)
2. Describir las complicaciones asociadas al manejo tardío del SARM en piel, incluyendo la progresión a formas graves o sistémicas y su impacto en la salud pública.
3. Examinar las aplicaciones actuales de inteligencia artificial para el diagnóstico precoz de infecciones bacterianas resistentes, con énfasis en contextos clínicos internacionales.

4. Evaluar la viabilidad y condiciones necesarias para implementar y validar modelos de inteligencia artificial en entornos de atención primaria en Latinoamérica para el diagnóstico temprano de infecciones cutáneas por SARM.

## **1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **1.4.1 Alcances de la investigación**

La presente investigación ofrece un análisis crítico y actualizado sobre la viabilidad clínica, técnica y operativa de incorporar una aplicación móvil basada en inteligencia artificial (DermAI-SARM) para el diagnóstico precoz de infecciones cutáneas por SARM en entornos latinoamericanos, con énfasis en Costa Rica. El estudio integra dos fuentes complementarias: una revisión sistemática de alcance que sintetiza la evidencia científica publicada entre 2019 y 2025, y un análisis documental crítico basado en guías, marcos regulatorios y estrategias internacionales de vigilancia y control de la resistencia antimicrobiana.

Estos alcances permiten:

- Identificar tendencias epidemiológicas y clínicas relevantes sobre SARM, así como los avances más recientes en diagnóstico asistido por IA.
- Describir tecnologías emergentes, su rendimiento y su potencial aplicabilidad en contextos de recursos limitados.
- Explorar percepciones, barreras y facilitadores para la adopción de herramientas digitales en la atención primaria costarricense.

- Proponer lineamientos preliminares para el diseño y validación futura de DermAI-SARM, basados en evidencia científica y en las necesidades expresadas por profesionales de la salud.
- Generar un marco conceptual y metodológico que sirva como base para investigaciones posteriores, pruebas piloto o desarrollos tecnológicos más avanzados.

Al ser una revisión sistemática de alcance complementada con análisis cualitativo, el estudio no pretende establecer relaciones causales ni evaluar la eficacia directa de un modelo algorítmico específico, sino mapear el estado actual del conocimiento y la factibilidad de implementación

#### **1.4.2 Limitaciones de la investigación**

La investigación presenta varias limitaciones inherentes a su diseño y a las características de las fuentes utilizadas:

##### Dependencia de la literatura disponible:

La calidad, heterogeneidad y profundidad del análisis están condicionadas por los estudios publicados entre 2019 y 2025. La evidencia sobre IA en infecciones cutáneas aún es limitada, especialmente en países latinoamericanos.

##### Acceso restringido a algunos documentos:

Se excluyeron artículos cuyo texto completo no estaba disponible, lo que pudo reducir el número de estudios elegibles y limitar la comparación de resultados.

#### Variabilidad metodológica y tecnológica entre estudios incluidos:

Los modelos de IA analizados utilizan algoritmos, bases de datos, métricas y contextos clínicos muy distintos, dificultando la estandarización de los hallazgos.

#### Escasa evidencia proveniente de Costa Rica y Centroamérica:

La mayoría de estudios analizados proceden de Norteamérica, Asia o Europa. Esto limita la extrapolación directa a la realidad epidemiológica, social y tecnológica costarricense.

#### Ausencia de validación algorítmica local:

El estudio no desarrolla ni prueba un modelo de IA, por lo que no es posible medir sensibilidad, especificidad ni desempeño real de una herramienta como DermAI-SARM en población costarricense.

#### Limitaciones técnicas y operativas del contexto regional:

Factores como conectividad variable, calidad desigual de registros clínicos, interoperabilidad limitada y disponibilidad heterogénea de datos microbiológicos pueden afectar la futura implementación del sistema.

## **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

## 2.1 CONTEXTO TEÓRICO-CONCEPTUAL

### 2.2 Introducción general al SARM y su relevancia en salud pública

*Staphylococcus aureus* es un coco Gram positivo que forma racimos y que produce catalasa y coagulasa (Sakr et al., 2018). Coloniza de forma transitoria o permanente la piel y las mucosas de personas sanas; el principal reservorio es el vestíbulo nasal, aunque también se detecta en la orofaringe, axila y zona perineal. Se calcula que entre el 20 % y el 80 % de la población mundial está colonizada de manera asintomática (Sakr et al., 2018). Aunque la mayoría de las veces actúa como comensal, en condiciones de inmunodepresión, diabetes, traumatismos cutáneos o presencia de dispositivos invasivos puede comportarse como patógeno oportunista responsable de infecciones cutáneas, respiratorias, osteoarticulares y sistémicas (Sakr et al., 2018).

La introducción de betalactámicos en la década de 1960 condujo a la aparición de SARM. Estas cepas poseen un elemento cromosómico móvil (SCCmec) que porta el gen *mecA*; dicho gen codifica una proteína de unión a penicilinas (PBP2a) con baja afinidad por los antibióticos betalactámicos (Taylor & Unakal, 2025). La rápida diseminación de diferentes tipos de SCCmec en hospitales y comunidades dio origen a múltiples clones de SARM y a un grave problema de salud pública a escala global. En 2019 el SARM fue el patógeno resistente que más muertes causó: se estimaron más de 100 000 decesos atribuibles en todo el mundo (University of Oxford, 2022).

Las tasas de resistencia muestran marcada variación geográfica: la prevalencia de SARM supera el 50 % en regiones de Asia y Oriente Medio según datos de la OMS (Subramanian et al., 2025) y en América Latina estudios multicéntricos sitúan la resistencia entre el 30 % y el 60 %

(CIDRAP, 2025). En contraste, en Europa Occidental las tasas de SARM oscilan entre el 10 % y el 30 % (Subramanian et al., 2025). Un estudio pediátrico en Costa Rica encontró que el 61 % de los aislamientos de infecciones cutáneas eran SARM y que la mayoría de estas cepas portaban SCCmec tipo IV (Jimenez-Truque et al., 2014). Debido a su impacto sanitario y económico, aumenta la estancia hospitalaria y los costes del tratamiento, el SARM se considera una prioridad en los programas de vigilancia epidemiológica y de uso prudente de antibióticos.

En América Latina, tanto la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2024), como la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2025) han alertado sobre el incremento sostenido de estas infecciones, particularmente en poblaciones vulnerables, consolidándose como un problema creciente de salud pública.

### **2.2.1 Staphylococcus aureus: morfología, colonización y comportamiento oportunista**

*S. aureus* se observa microscópicamente como cocos Gram positivos dispuestos en racimos; presenta catalasa y coagulasa positivas y puede fermentar manitol (Taylor & Unakal, 2025). Coloniza la piel, el vestíbulo nasal y otras mucosas. El principal reservorio y vía de transmisión es la nariz, con portación intermitente o persistente en hasta un tercio de la población (Sakr et al., 2018). Se ha detectado colonización en la piel, recto, vagina, tracto gastrointestinal y axila (Sakr et al., 2018). La transición de colonización a infección se facilita por la ruptura de barreras (heridas traumáticas, quemaduras o úlceras), el uso de dispositivos intravasculares o la disminución de la inmunidad (diabetes, obesidad, consumo de drogas intravenosas o tratamientos inmunosupresores). Los factores de riesgo para desarrollar infecciones cutáneas por SARM incluyen la colonización nasal previa, la convivencia o contacto cercano con portadores, la práctica de deportes de contacto, vivir en residencias o prisiones, el uso de drogas

inyectables, la presencia de enfermedades crónicas como diabetes o insuficiencia renal, y estados de inmunosupresión (*How Serious Is MRSA (Methicillin-Resistant Staphylococcus Aureus)?*, 2025).

### **2.2.2 Mecanismos de resistencia y definición del SARM**

La resistencia a meticilina surge por la adquisición del gen *mecA* integrado en el cassette cromosómico estafilocócico (SCC*mec*). Este gen produce una proteína de unión a penicilinas (PBP2a) que tiene baja afinidad por los antibióticos betalactámicos, confiriendo resistencia a todos los fármacos de esta familia (Taylor & Unakal, 2025). Se han descrito más de 14 tipos de SCC*mec*; los tipos I, II y III son de mayor tamaño y se asocian a SARM hospitalario (HA-MRSA), mientras que los tipos IV y V son más pequeños y característicos del SARM comunitario (CA-MRSA) (Moroney et al., 2007). Las cepas de CA-MRSA suelen portar genes de virulencia como la leucocidina de Panton–Valentine (PVL) y presentan menos resistencias adicionales, mientras que las cepas hospitalarias son a menudo multirresistentes y carecen del gen PVL (Moroney et al., 2007). Existe también una variante intermedia denominada SARM asociado a la atención sanitaria (HCA-MRSA), que combina características de ambos y se observa en pacientes con contacto reciente con servicios de salud.

### **2.2.3 Epidemiología y carga de enfermedad**

El SARM es una de las principales causas de infecciones nosocomiales y comunitarias. A escala mundial, se le atribuyen más de 100 000 muertes anuales (*University of Oxford*, 2022). y genera prolongación de la estancia hospitalaria, incremento de costes y uso de antibióticos de última línea. La incidencia varía sustancialmente entre regiones. Estudios realizados en 2024–2025

indican que la prevalencia de SARM en los países del Golfo y Asia supera el 50 %, mientras que en el norte de Europa oscila entre el 20 % y el 30 % (Subramanian et al., 2025). Una revisión de colonización en países de ingresos medios y bajos encontró que el 15 % de las cepas colonizadoras de *S. aureus* eran resistentes a meticilina, con una prevalencia más alta en África (22,5 %) que en Asia (13,1 %) y Sudamérica (5,4 %) (CIDRAP, 2025). En Costa Rica, el 61 % de los aislamientos de un hospital pediátrico correspondieron a SARM (Jimenez-Truque et al., 2014).

Los factores de riesgo para adquirir infecciones cutáneas por SARM incluyen la colonización previa, heridas, quemaduras, presencia de dispositivos intravasculares, diabetes, insuficiencia venosa o linfática, obesidad, inmunosupresión, uso de drogas intravenosas y extremos de la edad (MRSA: Causes, Symptoms, Diagnosis, Treatment & Prevention, 2025). La convivencia con personas infectadas o la práctica de deportes de contacto aumenta la probabilidad de adquirir cepas comunitarias.

#### **2.2.4 Manifestaciones clínicas y complicaciones**

Las infecciones de piel y tejidos blandos (IPTB) asociadas al SARM abarcan forúnculos y abscesos (colecciones de pus en folículos pilosos y glándulas sudoríparas), celulitis (inflamación difusa de dermis y tejido subcutáneo) e impétigo (infección vesiculopustular superficial). También pueden presentarse formas graves como la fascitis necrosante. En una cohorte hospitalaria estadounidense, las SSTI representaron el 24,8 % de los casos con SARM frente al 5,6 % en pacientes sin SARM (Nigo et al., 2024). En la base MIMIC-IV (Medical Information Mart for Intensive Care IV), las IPTB fueron 13,2 % en casos de SARM versus 2,6 % en los controles (Nigo et al., 2024). Estos datos confirman que las infecciones cutáneas

son una de las manifestaciones más frecuentes del SARM. La rápida progresión a bacteriemia y sepsis es otra característica; en la cohorte de Nigo et al., los pacientes con SARM tuvieron tasas de bacteriemia significativamente superiores (6,7 % frente a 2,1 % en MHHS (Memorial Hermann Health System) y 8,6 % frente a 1,9 % en MIMIC-IV) (Nigo et al., 2024).

Las complicaciones incluyen bacteriemia, sepsis, endocarditis y osteomielitis. La presencia de biopelículas y fenotipos persistentes favorece la cronicidad y explica la elevada tasa de recurrencias: hasta el 70 % de las infecciones cutáneas por SARM reaparecen tras el tratamiento inicial (*MRSA: Causes, Symptoms, Diagnosis, Treatment & Prevention*, 2025). Los pacientes con diabetes, enfermedad vascular o inmunosupresión tienen mayor riesgo de evolución grave, necrosis tisular, necesidad de amputaciones y mortalidad .

## **2.3 Diagnóstico de SARM**

### **2.3.1 Métodos convencionales y sus limitaciones**

El diagnóstico estándar se basa en el cultivo microbiológico de muestras clínicas y pruebas fenotípicas de susceptibilidad. Los cultivos en agar selectivo y las pruebas de difusión en disco requieren entre 24 y 48 h para identificar la bacteria y su perfil de resistencia (Luo et al., 2025). Esta demora retrasa la instauración de terapias dirigidas y favorece el uso indiscriminado de antibióticos de amplio espectro. Además, el rendimiento del cultivo depende de la adecuada obtención de la muestra y puede verse afectado por la administración previa de antibióticos.

### **2.3.2 Avances en diagnóstico molecular**

Las técnicas moleculares han acortado significativamente los tiempos diagnósticos. El ensayo Xpert MRSA/SA combina extracción automática de ADN, amplificación por PCR en tiempo

real y detección en un cartucho único; puede proporcionar resultados en aproximadamente 1 hora (Wolk et al., 2009). En una evaluación clínica, la sensibilidad del Xpert para detectar SARM en muestras de heridas y sangre fue del 97,1 % y 98,3 %, respectivamente (Wolk et al., 2009). Otros métodos, como la PCR cuantitativa (qPCR) y la PCR digital en gotas (ddPCR), permiten detectar el gen *mecA* directamente a partir de la muestra con límites de detección de 800 UFC/mL en unos 115 minutos; no obstante, no diferencian entre bacterias vivas y muertas, lo que puede generar falsos positivos (Luo et al., 2025). La espectrometría de masas MALDI-TOF ha revolucionado la identificación bacteriana; su combinación con algoritmos de aprendizaje automático ha permitido discriminar cepas de SARM y SASM con altas tasas de exactitud. Una revisión sistemática encontró que más de la mitad de los estudios utilizaron modelos de inteligencia artificial (árboles de decisión, LightGBM, máquinas de soporte vectorial) para extraer biomarcadores de SARM a partir de espectros MALDI-TOF (Santos et al., 2025).

### **2.3.3 Conceptos de farmacocinética/farmacodinámica**

La correcta selección y dosificación de antibióticos requiere comprender parámetros farmacocinéticos y farmacodinámicos. El MIC (concentración mínima inhibitoria) es la concentración más baja de un fármaco que inhibe visiblemente el crecimiento bacteriano *in vitro* (Men et al., 2016). La relación entre exposición al antibiótico y eficacia clínica se expresa mediante el cociente AUC/MIC. Para fármacos dependientes de la concentración, como fluoroquinolonas, se busca un pico de concentración elevado en relación con el MIC; para fármacos dependientes del tiempo (betalactámicos), la clave es mantener concentraciones por encima del MIC durante la mayor parte del intervalo de dosificación (Men et al., 2016). En el

caso de la vancomicina, el tratamiento óptimo de infecciones invasivas por SARM exige un AUC de 24 h/MIC  $\geq 400$ ; las guías de la IDSA recomiendan alcanzar un AUC entre 400 y 600 mg·h/L dentro de las primeras 24–48 h (IDSA, 2025).

### **2.3.4 Elementos básicos de evaluación diagnóstica**

La utilidad de una prueba diagnóstica se valora mediante métricas derivadas de la matriz de confusión. La sensibilidad es la proporción de enfermos que obtienen un resultado positivo, mientras que la especificidad es la proporción de sanos con resultado negativo. El valor predictivo positivo (VPP) indica la probabilidad de que un sujeto con prueba positiva esté realmente enfermo, y el valor predictivo negativo (VPN) expresa la probabilidad de estar sano cuando la prueba es negativa (Schoonjans, 2025). La curva ROC (receiver operating characteristic) representa la sensibilidad frente a 1 – especificidad; el área bajo la curva (AUC) varía de 0,5 (diagnóstico sin discriminación) a 1 (diagnóstico perfecto) (Schoonjans, 2025). Estos parámetros se aplican tanto a métodos diagnósticos como a modelos predictivos de inteligencia artificial.

## **2.4 Tratamiento y manejo clínico de infecciones cutáneas por SARM**

### **2.4.1 Estrategias terapéuticas generales**

El manejo terapéutico de las infecciones cutáneas por SARM converge, en líneas generales, en dos principios: incisión y drenaje (I&D) como base del tratamiento de los abscesos y antibióticos dirigidos cuando hay criterios sistémicos, fracaso a I&D o comorbilidad. Las guías europeas (Bassetti et al., 2014) y (NICE, 2014) y las latinoamericanas coinciden en: priorizar I&D en abscesos no complicados; obtener cultivo cuando hay pus; ajustar al perfil local de

resistencia; y limitar la duración a 5–10 días (extensible según evolución). Para terapia oral ambulatoria en purulento leve–moderado, ambas proponen TMP-SMX, doxiciclina/minociclina y clindamicina (siempre con prueba de inducción cuando sea posible), evitando macrólidos por resistencias. En no purulento con alto riesgo de SARM o en moderado–severo, la primera línea intravenosa en ambos entornos es vancomicina; como alternativas se aceptan linezolid y daptomicina, y, en Europa más que en LATAM, ceftarolina. En infección necrosante o choque, se recomienda cobertura amplia (vancomicina +  $\beta$ -lactámico anti-Gram negativos  $\pm$  clindamicina para supresión de toxinas) y cirugía urgente. Las discrepancias aparecen sobre todo por acceso y costo: en Europa es más frecuente el uso precoz de linezolid/ceftarolina en hospitalizados y el empleo de fosfomicina IV como coadyuvante; en Latinoamérica se prioriza vancomicina y orales coste-efectivos (TMP-SMX/doxiciclina), reservando oxazolidinonas y lipopeptidos por disponibilidad. Además, algunas guías latinoamericanas recomiendan cobertura empírica de SARM más amplia en comunidad por mayor prevalencia. En pediatría se evitan tetraciclinas y se privilegia clindamicina o TMP-SMX; en embarazo se evitan tetraciclinas y TMP-SMX tardío. En recurrencias, ambas regiones contemplan descolonización (mupirocina nasal + baños de clorhexidina) en casos seleccionados. En síntesis: coincidencia en principios y escalamiento; diferencias en umbral de cobertura empírica y elección de fármacos de alto costo según contexto.

#### **2.4.2 Estrategias de prevención y control**

Las estrategias de prevención frente al SARM combinan medidas individuales, comunitarias y hospitalarias. Las guías de la IDSA (IDSA, 2014) y la actualización conjunta de

SHEA/IDSA/APIC (Popovich et al., 2020) ofrecen enfoques complementarios en este ámbito. Ambas coinciden en que la higiene de manos, la limpieza y desinfección ambiental, así como el aislamiento por contacto en pacientes infectados o colonizados, son pilares básicos en el control de transmisión. La IDSA (2014) limita la recomendación de decolonización a situaciones específicas, como brotes o recurrencias frecuentes, mientras que la guía de 2020 promueve la decolonización universal en unidades de cuidados intensivos, respaldada por evidencia de reducción significativa en bacteriemias asociadas a SARM. Otra diferencia clave es el rol de la vigilancia: mientras que la IDSA la reserva para escenarios de brote, SHEA/IDSA/APIC (2020) la amplían a la detección activa en pacientes de alto riesgo, integrando métodos rápidos de cribado. Asimismo, la actualización de 2020 refuerza el papel de los programas de antibiotic stewardship como eje estructural del control hospitalario, destacando la necesidad de racionalizar el uso de antibióticos para prevenir la selección de cepas resistentes. En conjunto, estas estrategias permiten abordar la problemática desde una doble perspectiva: la protección del paciente individual y la reducción de la transmisión en sistemas de salud.

## **2.5 Salud digital, mHealth e inteligencia artificial en infecciones bacterianas**

### **2.5.1 Salud digital y mHealth**

El término eHealth hace referencia al uso de procesos electrónicos (historiales médicos electrónicos, sistemas de gestión hospitalaria, plataformas de teleconsulta) para apoyar la atención sanitaria (mHealth, eHealth, Telehealth, and Telemedicine - SBMA Benefits, 2025). Dentro de eHealth, el mobile health (mHealth) describe la utilización de dispositivos móviles

como teléfonos y tabletas para registrar, almacenar y compartir información de salud y para realizar seguimientos o autocuidados (mHealth, eHealth, Telehealth, and Telemedicine - SBMA Benefits, 2025). La telemedicina se refiere a la prestación de servicios clínicos a distancia mediante tecnologías de telecomunicación, mientras que el término más amplio telehealth abarca servicios no clínicos como educación sanitaria, formación y administración. Estas modalidades permiten superar barreras geográficas y mejorar el acceso a especialistas, pero plantean retos de privacidad, seguridad y equidad.

En América Latina, la transformación digital de la salud se encuentra en una etapa intermedia. Un informe del Instituto de Efectividad Clínica y Sanitaria señala que la región presenta una infraestructura digital emergente, pero enfrenta barreras como los altos costes, la limitada interoperabilidad de los sistemas de información, la calidad desigual de los datos y la escasa alfabetización digital del personal sanitario (CLIAS et al., 2023). Sólo dos tercios de la población tienen acceso a Internet y los costos de conectividad siguen siendo altos, lo que limita la adopción de eHealth y mHealth (CLIAS et al., 2023). Pese a ello, existen oportunidades: Chile y Uruguay lideran la digitalización con índices de adopción >90 %, seguidos de Argentina, Brasil, Colombia y Costa Rica (considerados “muy avanzados”) (CLIAS et al., 2023). La gobernanza y regulación es otro pilar clave; Colombia y Uruguay destacan por contar con marcos regulatorios y estrategias nacionales de inteligencia artificial (CLIAS et al., 2023).

### **2.5.2 Madurez digital en Latinoamérica**

La madurez de la salud digital en Latinoamérica es heterogénea. Según el IECS, los países se agrupan en cuatro niveles: líderes (Chile y Uruguay), muy avanzados (Argentina, Brasil, Colombia y Costa Rica), avanzados (México, Perú, Trinidad y Tobago) y semiavanzados

(Ecuador, Paraguay y República Dominicana) (CLIAS et al., 2023). A pesar de estos progresos, persisten brechas estructurales: la conectividad sigue siendo insuficiente, la interoperabilidad entre sistemas es limitada, la calidad de los datos es desigual y la alfabetización digital de usuarios y profesionales continúa siendo baja. La brecha digital es particularmente relevante, ya que solo alrededor del 66 % de la población latinoamericana tiene acceso a Internet y los costos de conectividad permanecen elevados (CLIAS et al., 2023). No obstante, el crecimiento de startups tecnológicas, el interés gubernamental y las alianzas público-privadas representan oportunidades significativas para acelerar la digitalización del sector salud y facilitar la futura adopción de sistemas basados en inteligencia artificial.

### **2.5.3 Barreras y oportunidades**

La implementación de herramientas de inteligencia artificial en salud enfrenta barreras técnicas, sociales y operativas. Entre ellas destacan la falta de formación profesional en tecnologías emergentes, la limitada confianza en los algoritmos y la ausencia de datos locales suficientes para entrenar modelos robustos, tal como señalan estudios como *Are physicians ready?* (2023). Además, iniciativas internacionales como *Roadmap India* (2022) subrayan que la infraestructura digital adecuada y marcos regulatorios claros son condiciones esenciales para una adopción efectiva en países de recursos limitados.

En Costa Rica, las experiencias del INCIENSA (Instituto Costarricense de Investigación y Enseñanza en Nutrición y Salud) durante la pandemia de COVID-19 y los proyectos de vigilancia genómica bacteriana han fortalecido la base técnica y científica del país. Estos avances muestran que ya existen condiciones iniciales para avanzar hacia la integración

progresiva de IA en el diagnóstico de infecciones bacterianas, aunque aún se requiere inversión en formación, estandarización de datos y desarrollo normativo.

#### **2.5.4 Condiciones para la adopción de IA en IPTB por SARM**

La integración sostenible de modelos de IA en la atención primaria latinoamericana requiere una infraestructura digital robusta, con conectividad estable en zonas urbanas y rurales y sistemas de historia clínica interoperables. Es indispensable invertir en alfabetización digital del personal sanitario y de los pacientes. Además, los modelos deben entrenarse y validarse con datos locales para reflejar la epidemiología y las prácticas clínicas de cada región. Los estudios de coste-efectividad ayudarán a determinar si la mayor precisión diagnóstica compensa los costos de implementación. Finalmente, la adopción de IA debe regirse por políticas de ética y gobernanza que garanticen transparencia, privacidad y equidad.

#### **2.5.5 Importancia de la adaptación epidemiológica y sociocultural**

Los modelos desarrollados en países de ingresos altos no son necesariamente transferibles a contextos de ingresos medios y bajos debido a diferencias en epidemiología, patrones de resistencia, comorbilidades y disponibilidad de recursos. La validación externa y la participación de profesionales y pacientes locales son indispensables para adaptar los algoritmos. Asimismo, las interfaces de las aplicaciones y las recomendaciones deben ser culturalmente apropiadas y comprensibles para los usuarios. Sólo a través de una implementación ética, participativa y contextualizada se podrán obtener los beneficios prometidos por la inteligencia artificial en la detección precoz y el manejo de las infecciones cutáneas por SARM en Latinoamérica.

## **2.6 Inteligencia artificial en salud**

### **2.6.1 Bases de la inteligencia artificial**

La IA engloba métodos que permiten a los sistemas informáticos realizar tareas que requieren inteligencia humana. El aprendizaje automático (machine learning) es su rama más utilizada en salud; aprende patrones a partir de datos y mejora su rendimiento con nuevas observaciones. Modelos clásicos como la regresión logística ajustan la probabilidad de un desenlace binario mediante una función logística que transforma la combinación lineal de predictores en una probabilidad. Los algoritmos de árboles de decisión potenciados, como LightGBM, construyen múltiples árboles de forma secuencial para optimizar la precisión y están diseñados para ser eficientes y escalables en conjuntos de datos grandes. En el aprendizaje profundo (deep learning) destacan las redes neuronales convolucionales (CNN) para análisis de imágenes y las redes neuronales recurrentes (RNN) con variantes como LSTM o GRU para procesar series temporales, como las historias clínicas electrónicas. La interpretabilidad de los modelos y la equidad en su aplicación son consideraciones centrales en salud. (Rajkomar et al., 2019)

### **2.6.2 IA aplicada al diagnóstico de infecciones bacterianas**

La IA se ha aplicado con éxito al diagnóstico y vigilancia de infecciones bacterianas. En dermatología, aplicaciones móviles utilizan algoritmos de visión por computador para analizar imágenes de lesiones cutáneas y diferenciar infecciones de otras patologías. En microbiología, la combinación de espectrometría MALDI-TOF con algoritmos de aprendizaje automático permite identificar SARM de forma automática; más de la mitad de los estudios revisados usan modelos de IA para extraer biomarcadores de los espectros (Santos et al., 2025). La espectroscopía Raman acoplada a redes neuronales profundas ha logrado una exactitud del

98,73 % para diferenciar SARM de SASM, con un área bajo la curva cercana a 0,99 (McElvania et al., 2024) . La app MRSA App interpreta imágenes de cultivos cromogénicos y consiguió una sensibilidad del 98,15 % y especificidad del 96,69 %, reproducible con la lectura manual de un microbiólogo. Los modelos de aprendizaje profundo basados en historias clínicas electrónicas, como PyTorch\_EHR, alcanzaron un AUROC de 0,911 en la cohorte del Memorial Hermann Hospital System y 0,859 en MIMIC-IV, superando a la regresión logística y a LightGBM (Nigo et al., 2024). Estos modelos permiten estratificar a los pacientes en grupos de riesgo y priorizar cultivos: en el grupo de alto riesgo, el 31,8 % tenía bacteriemia por SARM frente al 0,5 % en el grupo de bajo riesgo (Nigo et al., 2024).

### **2.6.3 IA para triaje y decisiones tempranas en infecciones de piel según los criterios IDSA**

La inteligencia artificial puede desempeñar un papel clave en el triaje inicial y en la toma de decisiones clínicas en IPTB, particularmente si se alinean sus algoritmos con los lineamientos establecidos por la Infectious Diseases Society of America (IDSA). En primer lugar, una herramienta de IA puede estratificar la severidad desde el ingreso, identificando de manera automatizada los criterios de respuesta inflamatoria sistémica (SIRS), como fiebre, taquicardia, taquipnea o leucocitosis, que definen los cuadros moderados o graves. Esto permitiría priorizar a los pacientes con mayor riesgo, incluyendo aquellos con sospecha de infecciones necrotizantes, que requieren una intervención quirúrgica inmediata y antibióticos intravenosos de amplio espectro (Stevens et al., 2014).

En segundo lugar, un sistema de IA podría diferenciar entre infecciones purulentas y no purulentas a partir del análisis de imágenes clínicas y notas médicas, sugiriendo cuándo una

I&D constituye el tratamiento de elección, como ocurre en abscesos, forúnculos y carbúnculos. Esto resulta particularmente útil en entornos de alta demanda, donde la decisión entre drenaje quirúrgico o terapia antibiótica empírica puede retrasarse o depender de la experiencia subjetiva del médico.

Asimismo, la IA puede sugerir de manera temprana cuándo es necesario realizar un cultivo, siguiendo las recomendaciones de la IDSA. Por ejemplo, en abscesos purulentos el cultivo del pus es recomendado, mientras que en celulitis no purulentas no se considera rutinario, salvo en pacientes inmunocomprometidos, con mordeduras o lesiones relacionadas con inmersión en agua. La capacidad de una aplicación de IA para reconocer estas condiciones y generar alertas automáticas ayudaría a optimizar el uso de recursos diagnósticos y mejorar la precisión terapéutica (Stevens et al., 2014).

Otro aspecto central es la capacidad de estas herramientas para calcular el riesgo individual de infección por SARM. A partir de variables clínicas y epidemiológicas como trauma penetrante, colonización previa por SARM, uso de drogas intravenosas, hospitalizaciones recientes o la presencia de SIRS, la IA podría recomendar esquemas de cobertura antibiótica más adecuados. Esto permitiría mejorar la selección inicial del tratamiento empírico y reducir tanto el fracaso terapéutico como el uso innecesario de antibióticos de amplio espectro.

Finalmente, una aplicación de IA bien diseñada podría detectar de manera temprana signos sugestivos de infección necrotizante, como dolor desproporcionado, toxemia o hipotensión, generando alertas críticas que obliguen a la consulta quirúrgica inmediata y a la instauración de cobertura antibiótica amplia. Este tipo de soporte en tiempo real contribuiría a disminuir la

mortalidad asociada a estas infecciones, que a menudo depende de minutos y de la rapidez en el diagnóstico y la intervención quirúrgica.

En conjunto, la incorporación de la inteligencia artificial al triaje y a las decisiones tempranas en IPTB representa una oportunidad significativa para estandarizar la aplicación de los criterios IDSA, reducir la variabilidad clínica y mejorar los resultados en salud, particularmente en entornos de alta carga asistencial o con limitaciones en el acceso a especialistas.

## **2.7 Gobernanza e datos y marcos regionales para IA en salud pública**

La gobernanza de datos constituye una pieza clave para garantizar que los desarrollos en IA se implementen de manera ética, equitativa y responsable en Latinoamérica y el Caribe. El documento *Challenges and Recommendations in Data Governance for the Development of Artificial Intelligence in Health in Latin America and the Caribbean*, elaborado por la coalición Transform Health Coalition, (2024), resalta la necesidad de establecer principios sólidos de gobernanza que aseguren la calidad de los datos, con insumos confiables y representativos para el entrenamiento de algoritmos, promuevan un acceso ético y transparente a la información clínica, y garanticen la protección de la privacidad y de los derechos individuales y colectivos. Estos aspectos son fundamentales para generar confianza pública, facilitar la innovación colaborativa y salvaguardar la autonomía de los pacientes.

El mismo informe identifica los principales desafíos que enfrenta la región: marcos regulatorios insuficientes, baja calidad y sesgos en los repositorios de datos, infraestructura digital desigual y capacidades estatales limitadas para gestionar la información. Como respuesta, propone la

creación de leyes claras que equilibren la innovación con la protección de datos, el fortalecimiento de instituciones especializadas en salud digital, el desarrollo de infraestructura tecnológica segura y el impulso de mecanismos de participación multisectorial que permitan una gobernanza inclusiva y contextualizada a las necesidades locales.

De forma complementaria, la Iniciativa Interamericana de la OEA para la Gobernanza de Datos e Inteligencia Artificial (MIGDIA) ofrece un marco regional con lineamientos en doce áreas temáticas y un modelo de política pública que los países pueden adaptar a sus propios contextos. Este instrumento busca armonizar esfuerzos nacionales bajo un enfoque coordinado, reconociendo la importancia de la cooperación regional para enfrentar los retos comunes de la digitalización en salud.

Por otra parte, el informe del Centro de Inteligencia Artificial y Salud para Latinoamérica y el Caribe (Instituto de Efectividad Clínica y Sanitaria (IECS), 2023) aporta un diagnóstico específico sobre el grado de madurez de la IA en la región. Este documento evalúa seis pilares fundamentales: personas y fuerza laboral, datos y tecnología, gobernanza y regulación, diseño y procesos, asociaciones y partes interesadas, y modelos de negocio. Según sus conclusiones, todos estos ámbitos se encuentran aún en fase exploratoria, lo que evidencia un camino incipiente. No obstante, destaca que los pilares de datos y tecnología, junto con la gobernanza y la regulación, presentan un desarrollo relativamente más avanzado en comparación con los demás. Esta evaluación confirma que la región cuenta con un ecosistema emergente, aunque todavía frágil, que requiere inversiones sostenidas y políticas coherentes para consolidar sus avances.

En conjunto, estos documentos funcionan como referentes metodológicos para la implementación responsable de IA en salud pública. En el caso de Costa Rica y de América Latina en general, el éxito de herramientas innovadoras, como una aplicación de diagnóstico precoz de infecciones cutáneas por SARM, dependerá no solo de la validación técnica de los algoritmos, sino también de la existencia de marcos regulatorios sólidos, estructuras institucionales robustas, sistemas de información interoperables y una gobernanza inclusiva. Solo mediante la articulación de estos elementos será posible garantizar la sostenibilidad, la equidad y la aceptación social de las soluciones basadas en inteligencia artificial en la región.

## **2.8 Perspectivas**

El desarrollo de una aplicación de diagnóstico de infecciones cutáneas por SARM basada en IA representa una alternativa viable y estratégica para el sistema de salud costarricense. Su implementación en la atención primaria, particularmente en los EBAIS, podría reducir complicaciones clínicas, optimizar el uso de antibióticos y contribuir a la contención de la resistencia bacteriana. Además, la combinación de datos clínicos, imágenes dermatológicas y variables epidemiológicas permitiría un abordaje integral y adaptado al contexto local. En este sentido, la IA no solo ofrece un valor clínico, sino también un impacto en salud pública, al fortalecer la capacidad de respuesta frente a uno de los patógenos más relevantes de la actualidad.

## **CAPITULO III MARCO METODOLÓGICO**

### **3.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN**

La presente investigación corresponde a una revisión sistemática de alcance con análisis documental que combina métodos cualitativos y cuantitativos de manera complementaria (Creswell & Plano Clark, 2018). En una primera fase, se aplicará el enfoque cualitativo mediante entrevistas semiestructuradas a profesionales de la salud, con el fin de explorar percepciones, barreras y facilitadores relacionados con la implementación de una aplicación móvil basada en inteligencia artificial para el diagnóstico precoz de infecciones cutáneas por SARM en el contexto costarricense. En una segunda fase, se utilizará el enfoque cuantitativo para analizar datos epidemiológicos, tecnológicos y económicos vinculados a estas infecciones y al posible impacto de dicha aplicación.

Este diseño mixto secuencial permite una comprensión integral del fenómeno, integrando la evidencia empírica con la experiencia de los actores del sistema de salud, lo cual enriquece el análisis e incrementa la validez del estudio (Creswell & Plano Clark, 2018).

### **3.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

La presente investigación es de carácter descriptivo, debido a que se recopilan datos, se analizan y se interpretan. Los estudios descriptivos tienen como finalidad establecer las propiedades importantes del fenómeno que está siendo sometido a un análisis. Por lo tanto, en un estudio de carácter descriptivo se realiza una elección de una serie de cuestiones, se miden de manera independiente y así se describe lo que se investiga (Sampieri, 2006).

El tipo de investigación corresponde a una revisión sistemática. En esta se realiza un análisis sistematizado de un conjunto de evidencias, mediante un proceso exhaustivo, para identificar,

evaluar y realizar una síntesis de estudios. La finalidad es responder la pregunta de investigación y obtener conclusiones de los datos recopilados. Se utiliza una metodología explícita, precisa y se sigue un protocolo establecido, estandarizado y replicable, por lo tanto, se asegura la calidad, consistencia y transparencia del proceso de revisión. Además, muestra el proceso a través del cual se establecen los artículos elegibles que fueron incluidos (Guirao, 2015).

El presente trabajo consiste en una revisión sistemática de alcance, ya que realiza una síntesis de evidencias partiendo de un objetivo de revisión amplio y general, y de un tema poco estudiado. Este tipo de revisión usa una metodología sistematizada y se puede incluir todo tipo de información (López et al, 2022).

Por otro lado, es una revisión sistemática de intervención, debido a que busca información la cual determine el diagnóstico de infecciones cutáneas por SARM mediante la IA y la viabilidad en Latinoamérica.

### **3. 3 UNIDADES DE ANALISIS U OBJETOS DE ESTUDIO**

La unidad de análisis del estudio corresponde a la búsqueda bibliográfica, sobre la cual se aplican una serie de criterios de inclusión y exclusión, con el fin de seleccionar los estudios con mayor relevancia y siempre con el objetivo de brindar una respuesta a la pregunta de investigación planteada.

#### **3.3.1 Área de estudio**

Por la naturaleza de la siguiente investigación este apartado no se ejecuta.

### **3.3.2 Fuentes de información**

La investigación se realiza tomando en cuenta información proveniente de fuentes tanto primarias como secundarias como lo son artículos científicos, revisiones sistemáticas, guías de práctica clínica, manuales, investigaciones científicas, ensayos clínicos y tesis realizadas por otros profesionales. Para lo anterior se usa la base de datos de Pubmed. Esta información se utiliza para la redacción de los distintos apartados que conforman la presente revisión sistemática.

### **3.3.3 Población**

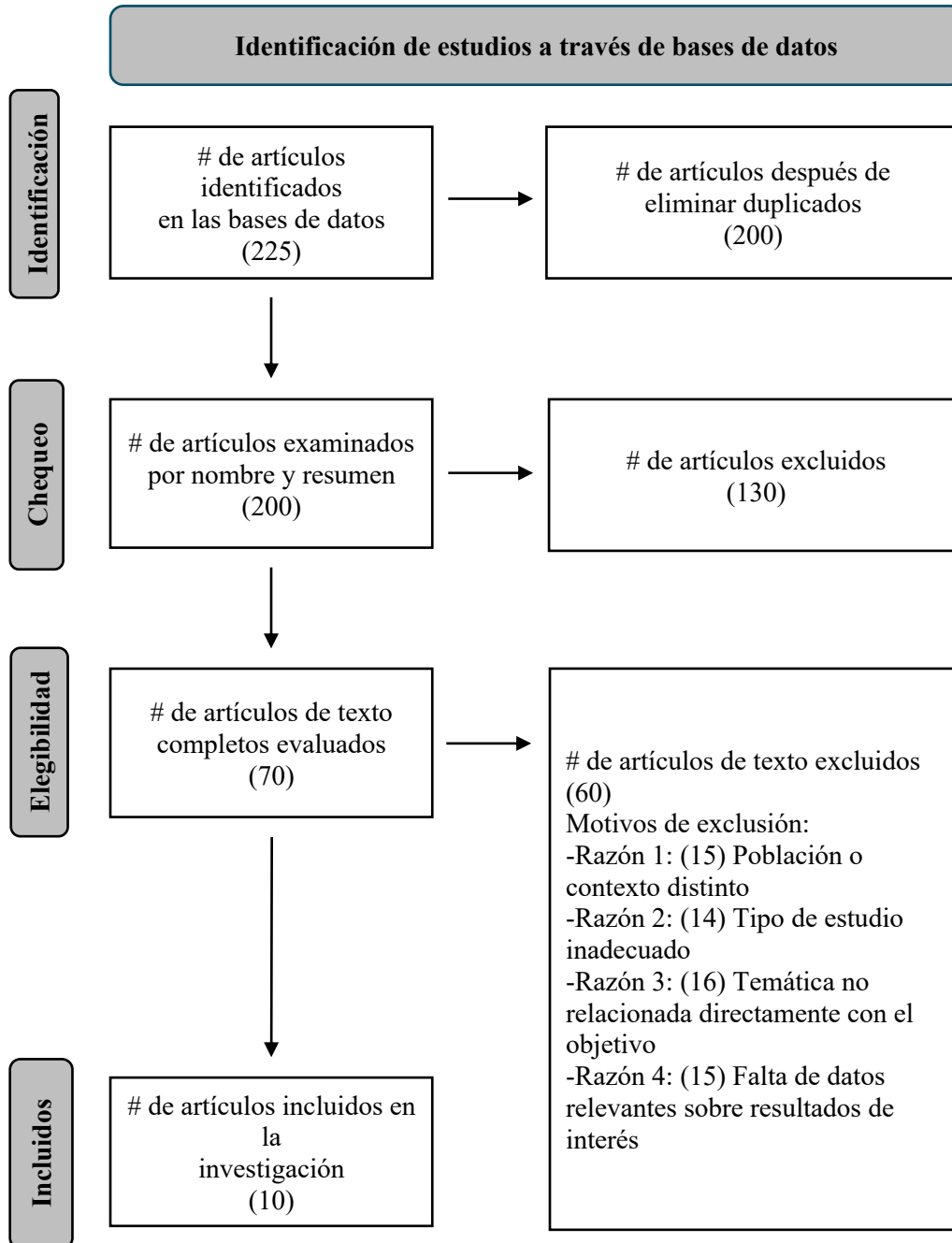
La población de estudio se conformó por dos dimensiones complementarias, la primera fue la documental, integrada por artículos científicos y documentos oficiales publicados entre los años 2020 y 2025 relacionados con SARM, la aplicación de inteligencia artificial en salud y las tecnologías móviles de salud mHealth, considerando como fuentes revistas indexadas, informes de organismos internacionales como la OMS, OPS y CDC, además de literatura científica disponible en PubMed y guías clínicas sobre infecciones de piel y tejidos blandos publicadas en Estados Unidos y Europa.

### **3.3.4 Muestra**

La muestra de esta investigación consta del total de 10 artículos científicos, los cuales son clasificados como elegibles para formar parte de esta investigación.

**Figura 1**

*Diagrama de flujo PRISMA*



**Fuente:** elaboración propia, 2024.

### 3.3.5 Criterios de inclusión y exclusión

**Tabla 1**

*Criterios de inclusión y exclusión*

CRITERIOS DE INCLUSION	CRITERIOS DE EXCLUSIÓN
Estudios en pacientes humanos con SARM o infecciones bacterianas relevantes.	Estudios en animales, in vitro o sin aplicación clínica.
Investigaciones sobre diagnóstico, predicción, tratamiento o control de infecciones (ej Machine learning, IA, vigilancia epidemiológica).	Publicaciones sin datos primarios o metodologías clara (editoriales, cartas, opiniones, resúmenes de congreso).
Tipos de estudio: ensayo clínicos, estudios observacionales, revisiones sistemáticas, metaanálisis o scoping review.	Temática no relacionada con SARM, infecciones cutáneas, resistencia antimicrobiana o IA aplicada a la salud.
Periodo: 2019-2025.	Artículos que no reportan resultados clínicos relevantes (prevalencia, mortalidad, resistencia, diagnóstico).
Idioma: Inglés o español.	Estudios a los que no se pueda acceder al texto completo.
	Opinión de expertos, comentarios, cartas al editor, editoriales y estudios de opinión.

**Fuente:** elaboración propia, 2024.

### 3.4 INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

La recolección de información sigue la Declaración PRISMA 2020 y el instrumento para la recolección de información corresponde a una base de datos en Excel. Para su elaboración, se toma en cuenta los criterios de inclusión y exclusión, el objetivo general y los específicos del presente trabajo, lo anterior, permite definir la información relevante y necesaria que deberá ser

extraída de los estudios para completar la investigación. Además, permite sistematizar la recolección de datos y hacerlo de manera más ordenada, para un mejor análisis de la evidencia

Los resultados de la búsqueda bibliográfica se filtran mediante la aplicación sistematizada de una serie de 3 fases. La primera fase consiste en la eliminación de los estudios duplicados, posteriormente se aplica una segunda fase en la cual las investigaciones son incluidas o excluidas en base al título y/o el resumen, tomando en cuenta los criterios de inclusión, exclusión y los objetivos de la investigación. La fase 3 corresponde a la lectura del texto completo de las investigaciones. Las fases permiten hacer un filtrado de la información de una forma estructurada para finalizar con los estudios que serán incluidos en la revisión sistemática.

### **3.5 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

La metodología PICO se usa en el desarrollo de la investigación y corresponde a P (Problema), I (Intervención), C (Comparación) y O (Outcome), donde en este caso problema corresponde a los pacientes con infecciones bacterianas, en especial SARM, en infecciones cutáneas, la intervención son las estrategias diagnósticas y terapéuticas, incluyendo el uso de inteligencia artificial, espectroscopía Raman, sistemas automatizados de detección y farmacocinética-farmacodinámica, la comparación hace referencia a los diferentes enfoques diagnósticos y clínicos tradicionales frente a métodos basados en IA y nuevas tecnologías, y el outcome es la precisión diagnóstica, predicción del riesgo, optimización terapéutica, control de infecciones y mejora en los resultados clínicos.

El proceso de la investigación comienza cuando se establece la pregunta de investigación, posteriormente se plantea una estrategia que permita la búsqueda de la información en las

diferentes bases de datos, en este paso es importante mencionar que se aplica una serie de filtros, los cuales permiten hacer una mejor selección de los estudios.

Una vez aplicada la estrategia de búsqueda en las diferentes plataformas, se obtienen los resultados y se desarrolla una base de datos, a esta se le aplica una primera revisión, para de esta manera eliminar los estudios duplicados, posteriormente se revisa por título y resumen y se seleccionan aplicando los criterios de inclusión y exclusión. Por último, se realiza una lectura completa del texto y se eligen aquellos estudios, que cumplan con los criterios de inclusión, estén relacionados con los objetivos del estudio y que además permitan responder la pregunta de investigación establecida.

La información se analiza y se presenta los diferentes datos integrados que fueron resultado de todo este proceso. Todo lo anterior permite la recolección de los resultados de los diferentes estudios seleccionados, para generar una discusión sobre los datos obtenidos, y así, al final, brindar las conclusiones y recomendaciones para la presente revisión sistemática.

### **3.6 PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCION DE DATOS**

La revisión sistemática se lleva a cabo considerando la bases de datos PubMed. La búsqueda se realiza mediante el uso de palabras claves acompañadas del operador boleano “AND” y haciendo uso de diferentes filtros que presentan las bases de datos, como el año de publicación, el idioma y texto completo. La recolección de datos se realiza mediante la herramienta de búsqueda avanzada de las diferentes bases de datos. Aquí se utilizan una serie de estrategias de búsqueda haciendo uso de variables planteadas para el estudio. Estas búsquedas son iguales o

equivalentes, para así permitir una comparación de resultados adecuada. A continuación, se explica las estrategias de búsqueda aplicadas en las diferentes bases de datos.

En Pubmed se utiliza la estrategia de búsqueda MRSA skin infections [Title/Abstract] AND (incidence OR epidemiology OR clinical features) AND (“2019”[DP] : “2024”[DP]).

*Staphylococcus aureus* [Title/Abstract] AND *methicillin resistant* [Title/Abstract] AND (skin infection OR cutaneous infection)

MRSA [Title/Abstract] AND (skin and soft tissue infection OR SSTI) AND (“Latin America” [Affiliation])

MRSA [Title/Abstract] AND (skin and soft tissue infection OR SSTI) AND (“Latin America” [Affiliation])

“artificial intelligence” AND (“bacterial infection” OR “antimicrobial resistance” OR MRSA) AND (diagnosis OR “early detection”)

“machine learning” AND “skin and soft tissue infection” AND diagnosis

**Tabla 2***Estrategia de búsqueda en la base de datos Pubmed*

<b><u>Fecha de búsqueda</u></b>	<b><u>Terminología completa de búsqueda</u></b>	<b><u>Filtros</u></b>
27/07/2025	MRSA skin infections [Title/Abstract] AND (incidence OR epidemiology OR clinical features) AND (“2019”[DP] : “2024”[DP])	Publication year: 2019–2025; Full text; English/Spanish
27/07/2025	<i>Staphylococcus aureus</i> [Title/Abstract] AND <i>methicillin resistant</i> [Title/Abstract] AND (skin infection OR cutaneous infection)	Publication year: 2019–2025; Full text; English/Spanish
28/07/2025	MRSA [Title/Abstract] AND (skin and soft tissue infection OR SSTI) AND (“Latin America” [Affiliation])	Publication year: 2019–2025; Full text; English/Spanish
28/07/2025	“artificial intelligence” AND (“bacterial infection” OR “antimicrobial resistance” OR MRSA) AND (diagnosis OR “early detection”)	Publication year: 2019–2025; Full text; English/Spanish
27/08/2025	“machine learning” AND “skin and soft tissue infection” AND diagnosis	Publication year: 2019–2025; Full text; English/Spanish

**Fuente:** elaboración propia, 2025.

La búsqueda se realiza los días 27 y 28 de julio y 27 de agosto en la plataforma Pubmed. Inicialmente se obtienen un total de 225 estudios, los cuales pasan por un primer filtrado, quedando con 200 estudios posterior a la eliminación de los duplicados. Estos pasan por segundo filtrado donde se extrajeron 70 artículos tomando en cuenta el título y el resumen de los distintos estudios, por último, se aplica un tercer filtrado donde se lee el texto completo, lo cual permitió eliminar un total de 58 artículos y se toman los últimos 12 estudios, los cuales son usados para elaborar la presente revisión sistemática.

**Tabla 3**

*Resultados de la búsqueda en las distintas bases de datos*

<u>Base de datos</u>	<u>Número de resultados</u>
Pubmed	225
Total	225

**Fuente:** elaboración propia, 2025.

**Tabla 4**

*Resultados posteriores al primer filtrado*

<u>Base de datos</u>	<u>Número de resultados</u>
Pubmed	200
Total	200

**Fuente:** elaboración propia, 2025.

**Tabla 5***Resultados posteriores al primer filtrado*

<u>Base de datos</u>	<u>Número de resultados</u>
Pubmed	70
Total	70

**Fuente:** elaboración propia, 2025.**Tabla 6***Resultados posteriores al tercer filtrado*

<u>Base de datos</u>	<u>Número de resultados</u>
Pubmed	10
Total	10

**Fuente:** elaboración propia, 2025.

### **3.7 ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS**

La organización de los datos comienza estableciendo los objetivos y la pregunta de investigación, para posteriormente definir los criterios de inclusión y exclusión. Después se desarrolla una estrategia de búsqueda, la cual es implementada en las bases de datos seleccionadas. Los resultados de las búsquedas son organizados en una base de datos haciendo uso de una hoja de Excel. Los resultados pasan por una serie de filtros que permiten obtener al final del proceso un total de 10 estudios.

Los estudios seleccionados cumplen con los criterios de inclusión y estos serán organizados en tablas, donde se busca recopilar los datos, para sintetizar y analizar la información de una manera más sencilla. Esto último permite hacer una presentación de resultados de una manera eficiente y fácil de entender.

### **3.8 ANÁLISIS DE DATOS**

Los datos extraídos son analizados e interpretados de manera sistemática, en todo momento en relación con la pregunta de investigación y los objetivos definidos, valorando su relevancia clínica en el contexto latinoamericano. El trabajo culmina con las conclusiones y recomendaciones acerca de la aplicación de la inteligencia artificial en el diagnóstico precoz de infecciones cutáneas por SARM destacando su potencial para mejorar la precisión diagnóstica, optimizar estrategias terapéuticas y reducir la morbilidad asociada en entornos de recursos limitados.

## **CAPÍTULO IV PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

## **4.1 GENERALIDADES**

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos de la búsqueda en la base de datos ya anteriormente mencionadas, aplicando la metodología PRISMA. Los estudios seleccionados constituyen una respuesta a la pregunta de investigación y dan cumplimiento a los objetivos planteados para la presente revisión sistemática.

## **4.2 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTUDIOS INCLUIDOS**

En el proceso de selección se revisaron un total de 225 artículos, de los cuales se lograron extraer 10 estudios, de la plataforma de Pubmed, basándose en los criterios de inclusión y exclusión descritos en la metodología. Entre los tipos de diseño de estudio se encuentran estudios experimentales y desarrollo tecnológico (2), revisiones narrativas (2), revisiones sistemáticas de alcance (1), metaanálisis (1) y estudios observacionales (4).

## **4.3 LISTADO DE ESTUDIOS INCLUIDOS EN LA INVESTIGACIÓN Y SUS DESCRIPCIONES**

### **4.3.1 Disbiosis y úlcera de pie diabético: una perspectiva metabólica de la infección por *Staphylococcus aureus*.**

Este estudio corresponde a una revisión de la literatura, publicada en la revista *Biomedicine & Pharmacotherapy* en 2024 por R. Liu y colaboradores, especialistas en microbiología e infectología. Su objetivo fue identificar los factores metabólicos que favorecen la persistencia de *S. aureus* y explicar por qué el fracaso terapéutico en estas infecciones no depende

únicamente de la resistencia antimicrobiana, sino de un círculo vicioso entre la disfunción metabólica del paciente y la plasticidad metabólica de la bacteria.

Los resultados evidenciaron que *S. aureus* fue el principal microorganismo aislado en las úlceras de pie diabético, presente en el 70-80% de las muestras analizadas, con una elevada capacidad de formación de biopelículas y resistencia antimicrobiana. La hiperglucemia crónica fue identificada como un factor determinante en la transición del microorganismo desde un estado comensal a un fenotipo altamente virulento. Este cambio se acompañó de una sobreexpresión de toxinas, entre ellas la  $\alpha$ -hemolisina, la leucocidina y la toxina del síndrome de shock tóxico (TSST-1), las cuales favorecen la destrucción tisular y la evasión del sistema inmunitario.

A nivel clínico, el estudio reportó que entre el 40 y el 60% de las infecciones por *S. aureus* recidivan tras el tratamiento antibiótico convencional, mientras que las infecciones causadas por SARM presentan una mortalidad un 60% superior respecto a las cepas sensibles.

Desde el punto de vista metabólico, se observó que la inactivación del ciclo del ácido tricarbónico (TCA) en *S. aureus* aumenta la persistencia bacteriana y la tolerancia frente a múltiples antibióticos. Este fenómeno se relaciona con la formación incrementada de biopelículas y la aparición de células persistentes con metabolismo ralentizado.

Asimismo, concentraciones elevadas de glucosa-6-fosfato (G6P) se asociaron con una mayor expresión de citotoxinas y adhesinas, potenciando la invasividad del microorganismo. En ambientes ricos en glucosa, *S. aureus* activa rutas fermentativas y lipogénicas que promueven

la producción de toxinas; mientras que, bajo condiciones de restricción energética, utiliza aminoácidos como arginina, prolina o histidina como fuente alternativa de carbono y nitrógeno.

Esta plasticidad metabólica garantiza su supervivencia en el microambiente hipóxico y ácido de las heridas crónicas.

En los pacientes con diabetes tipo 2, se documentó una reducción significativa en los niveles séricos de IgG específicas contra *S. aureus*, acompañada de un aumento de IgM, lo que refleja una respuesta humoral inmadura y una menor capacidad de neutralización bacteriana. Además, condiciones locales como hipoxia tisular, pH alcalino (7–9) y envejecimiento celular se correlacionaron con un incremento de la carga bacteriana y una disminución en la velocidad de cicatrización.

Por otra parte, los autores señalaron que la resistencia a la insulina y la hiperglucemia sostenida no solo alteran la respuesta inmunometabólica del huésped, sino que la propia infección por *S. aureus* interfiere con la señalización insulínica, mediante la liberación de citoquinas proinflamatorias (TNF- $\alpha$ , IL-6) que inhiben la fosforilación de IRS-1 y la captación de glucosa mediada por GLUT4. Este proceso agrava la resistencia a la insulina existente, incrementando la disponibilidad de glucosa y creando un circuito metabólico autoperpetuante que favorece la persistencia bacteriana y la cronicidad de la herida.

El estudio revisa diversas aproximaciones experimentales dirigidas tanto a la modulación del metabolismo bacteriano como a la corrección de las disfunciones metabólicas del huésped:

- Modulación metabólica bacteriana: La activación de CcpA, la inhibición de la glucólisis mediante 2-deoxiglucosa y la manipulación del regulador global CodY mostraron reducciones significativas en la virulencia y la formación de biopelículas en modelos in vitro y animales.
- Terapias génicas y de ARN: Se identificaron microRNAs (miR-15b-5p, miR-142, miR-24, miR-128) implicados en la regulación de la inflamación y la proliferación celular, proponiéndose como blancos terapéuticos potenciales.
- Nanotecnología diagnóstica y terapéutica: El uso de nanoprobos (SiO<sub>2</sub>-Cy-Van, HF-D-Ala NPs, AuNS-Apt-Cy) permitió la detección en tiempo real de SARM y la activación de fototerapia localizada. Paralelamente, hidrogeles inteligentes sensibles a pH y glucosa (Janus membrane, PCB hydrogel) demostraron utilidad para monitorizar el microambiente de la herida y liberar fármacos de forma controlada.
- Modelos de inteligencia artificial: Se aplicaron redes neuronales para predecir combinaciones antibióticas efectivas y descubrir nuevos compuestos activos frente a SARM, optimizando la respuesta terapéutica y reduciendo la tasa de resistencia.

Los hallazgos confirman que el fracaso en la curación de las úlceras del pie diabético no depende exclusivamente de la resistencia antimicrobiana, sino del desequilibrio metabólico entre huésped y patógeno. *S. aureus* aprovecha el exceso de glucosa del entorno diabético y, a su vez, contribuye a la disfunción metabólica del huésped al interferir en la señalización de la insulina, perpetuando la hiperglucemia y la inflamación.

Por tanto, los antibióticos convencionales resultan insuficientes. Las estrategias terapéuticas futuras deben integrar intervenciones metabólicas, inmunológicas y tecnológicas, orientadas a restaurar la homeostasis tisular, modular la virulencia bacteriana y mejorar la sensibilidad a la insulina del paciente.

#### **4.3.2 Evaluación de la farmacocinética y la farmacodinamia para respaldar los regímenes de dosificación de omadacilina en el tratamiento de pacientes con infecciones bacterianas agudas de la piel y sus estructuras.**

Este estudio corresponde a un análisis farmacocinético-farmacodinámico, publicado en la revista *Antimicrobial Agents and Chemotherapy* en septiembre de 2024 por S. M. Bhavnani y colaboradores, investigadores del Institute for Clinical Pharmacodynamics (Nueva York, Estados Unidos) y de Paratek Pharmaceuticals. Su objetivo es analizar la relación entre la exposición al antibiótico omadaciclina y la respuesta clínica en pacientes con infecciones bacterianas agudas de piel y estructuras cutáneas, muchas de ellas causadas por *Staphylococcus aureus*, incluyendo cepas resistentes a meticilina.

El estudio analizó la relación farmacocinética-farmacodinámica (PK-PD) de la omadaciclina en 182 pacientes con datos completos y concentraciones inhibitorias mínimas (MIC) disponibles, de los cuales 128 presentaban *Staphylococcus aureus* al inicio del tratamiento. Los pacientes que alcanzaron una relación  $AUC:MIC \geq 12,5$  mostraron una tasa de mejoría clínica del 96 %, en comparación con el 80 % en aquellos con valores inferiores ( $p = 0,016$ ). Esta diferencia confirma que la exposición óptima al antibiótico, posible solo mediante un diagnóstico precoz y tratamiento oportuno, se asocia a una resolución más rápida de la infección.

La respuesta clínica temprana se observó entre las 48 y 72 horas en el 92,8 % de los casos, mientras que la curación al final del tratamiento y en la evaluación posterior alcanzó tasas cercanas al 99 %. En los días 3, 5 y 7, el 30 %, 83,9 % y 84,1 % de los pacientes, respectivamente, mostraron reducciones de  $\geq 30$  %,  $\geq 50$  % y  $\geq 70$  % del área de la lesión.

Las simulaciones PK-PD evidenciaron que, para cepas con MIC  $\leq 0,25$   $\mu\text{g/mL}$ , los regímenes intravenoso-oral (IV $\rightarrow$ VO) lograron una probabilidad de éxito del 91,3–96,8 %, mientras que los exclusivamente orales mantuvieron una eficacia de 60,8–95,2 %. Sin embargo, al aumentar la MIC a 0,5  $\mu\text{g/mL}$ , la probabilidad de alcanzar los objetivos PK-PD cayó a 35,1 % (IV $\rightarrow$ VO) y 15,7 % (VO solo), reflejando la importancia de detectar y tratar las infecciones antes de que la carga bacteriana o la resistencia aumenten.

#### **4.3.3 Detección automatizada de *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina con la aplicación de imágenes MRSA CHROM en el sistema de automatización total de laboratorio BD Kiestra.**

Este estudio corresponde a una investigación multicéntrica de validación diagnóstica, publicada en la revista *Journal of Clinical Microbiology* en mayo de 2024 por Erin McElvania y colaboradores, especialistas en microbiología clínica y diagnóstico automatizado. Su objetivo fue evaluar la utilidad de la aplicación MRSA CHROM App, un software basado en inteligencia artificial diseñado para integrarse al sistema de automatización de laboratorio BD Kiestra Total Lab Automation (TLA), con el fin de detectar de manera automática colonias de SARM en medios cromogénicos.

El estudio analizó 1.593 muestras de hisopados nasales obtenidas en tres laboratorios de Estados Unidos y Canadá. La aplicación de IA procesó las imágenes digitales de las placas incubadas y clasificó la presencia o ausencia de colonias compatibles con SARM.

Los resultados mostraron una concordancia total del 96,98 % entre la lectura automatizada y la interpretación manual. La sensibilidad global fue del 98,15 %, mientras que la especificidad alcanzó el 96,69 %. El valor predictivo positivo fue de 88,11 % y el valor predictivo negativo de 99,52 %, indicando una capacidad muy alta para descartar falsos negativos.

Se registraron 48 discrepancias (3 % del total): 42 falsos positivos y 6 falsos negativos. En la mayoría de los casos, las discrepancias se relacionaron con colonias con coloración atípica o escaso crecimiento bacteriano, condiciones que dificultaron la clasificación tanto para la IA como para los observadores humanos.

El rendimiento del sistema se mantuvo constante entre los tres centros participantes, sin variaciones significativas por tipo de muestra o tiempo de incubación.

El análisis global confirmó que la MRSA App logró una detección automática precisa y reproducible del crecimiento de SARM en medios cromogénicos, alcanzando un desempeño diagnóstico comparable al del personal de laboratorio.

**4.3.4 Identificación de *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecium*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Acinetobacter baumannii* a partir de espectros Raman mediante el Sistema de Detención e Identificación Raman con Inteligencia Artificial (AIRDIS) con aprendizaje automático.**

Este estudio corresponde a un estudio experimental aplicado al desarrollo tecnológico, publicado en el *Journal of Microbiology, Immunology and Infection* en 2025 por Lin y colaboradores.

En este estudio se analizaron un total de 5.554 aislados bacterianos clínicos, obtenidos a partir de dos fuentes: el hospital CMUH (2.516 aislados) y la red internacional SMART (3.038 aislados). Cada aislado fue identificado inicialmente mediante MALDI-TOF MS, utilizado como referencia, y posteriormente se adquirieron al menos 20 espectros Raman por muestra para el análisis mediante el sistema AIRDIS.

El primer modelo desarrollado permitió distinguir entre bacterias Gram positivas y Gram negativas, alcanzando un AUC de 0.99. En la matriz de confusión, las bacterias Gram positivas mostraron una exactitud del 97.64 %, con valores de recall de 97.64 %, precisión de 98.36 % y F1-score de 98.00 %. Para las Gram negativas, la exactitud fue de 98.86 %, con recall de 98.86 %, precisión de 98.36 % y F1-score de 98.61 %.

En el análisis de especies, el modelo alcanzó un AUC de 0.99 para todas las bacterias evaluadas. Para *Staphylococcus aureus* (1.015 aislados), la exactitud fue del 96.85 %, con precisión de 98.10 %, recall de 96.85 % y F1-score de 97.47 %. Para *Enterococcus faecium* (764 aislados), la exactitud fue del 96.60 % con valores coincidentes en precisión, recall y F1-score (96.60 %).

Entre las bacterias Gram negativas, *Klebsiella pneumoniae* (1.092 aislados) alcanzó una exactitud del 96.61 %, con precisión del 95.05 % y F1-score del 95.82 %. *Pseudomonas aeruginosa* (820 aislados) obtuvo una exactitud del 94.76 %, con precisión del 98.11 % y F1-

score del 96.40 %. *Acinetobacter baumannii* (642 aislados) mostró una exactitud del 96.88 %, con precisión del 93.53 % y F1-score del 95.18 %.

El análisis de espectros Raman identificó regiones con diferencias marcadas entre bacterias Gram positivas y Gram negativas, particularmente en los rangos 902–907  $\text{cm}^{-1}$ , 779–783  $\text{cm}^{-1}$  y 1004–1005  $\text{cm}^{-1}$ , según el análisis SHAP. Para la discriminación entre especies Gram positivas, se identificaron como más relevantes los intervalos 717–734  $\text{cm}^{-1}$ , 1131–1140  $\text{cm}^{-1}$  y 1077–1079  $\text{cm}^{-1}$ . Entre las Gram negativas, las características más influyentes se localizaron en los rangos 1128–1138  $\text{cm}^{-1}$ , 678–682  $\text{cm}^{-1}$  y 713–738  $\text{cm}^{-1}$ , con patrones específicos diferenciadores para cada especie.

#### **4.3.5 Evaluación del impacto de la inteligencia artificial en la gestión de antimicrobianos: un metaanálisis comparativo con los sistemas tradicionales de puntuación de riesgos.**

Este estudio corresponde a un metaanálisis, publicado en la revista *Infectious Diseases Now* en 2025 por Pinto, Pennisi, Ricciardi, Signorelli y Gianfredi, titulado *Evaluating the impact of artificial intelligence in antimicrobial stewardship: a comparative meta-analysis with traditional risk scoring systems*. El objetivo se centra en la creciente amenaza que representa la resistencia antimicrobiana (AMR), responsable de más de un millón de muertes en 2021 y considerada una de las principales emergencias sanitarias hacia el año 2050. En este contexto, los programas de optimización del uso de antibióticos (antimicrobial stewardship, AMS) constituyen una estrategia esencial para reducir el uso inadecuado de antimicrobianos, que aún se mantiene en cifras superiores al 50% en muchos entornos hospitalarios.

La revisión del artículo permitió identificar hallazgos cuantitativos relevantes para el análisis del diagnóstico precoz de infecciones resistentes. El metaanálisis incluyó 27 estudios con un total aproximado de 550 000 pacientes, evaluando el desempeño de diferentes modelos de inteligencia artificial en comparación con sistemas tradicionales de predicción.

**Tabla 7**

*Barreras identificadas para la implementación de la IA en países de ingresos bajos y medios.*

<b>CATEGORÍA</b>	<b>BARRERAS REPORTADAS</b>
Infraestructura tecnológica	Conectividad limitada, baja interoperabilidad, ausencia de sistemas integrados de datos, infraestructura digital insuficiente.
Calidad y disponibilidad de datos	Falta de estandarización en historiales clínicos, registros incompletos, datos fragmentados, escasa disponibilidad de datos locales.
Validación y generalización	Ausencia de validación externa, dificultad para reproducir modelos en poblaciones distintas, brechas entre diseño y uso real.
Capacidades humanas	Falta de capacitación del personal, baja alfabetización digital en entornos rurales.
Aspectos éticos y de gobernanza	Modelos poco transparentes (“caja negra”), falta de marco regulatorio claro, desconfianza del personal de salud.

Fuente: elaboración propia, 2025.

**Tabla 8**

*Facilitadores para la adopción efectiva de IA en sistemas de salud de LMICs.*

<b>CATEGORÍA</b>	<b>FACILITADORES IDENTIFICADOS</b>
Diseño del modelo	Algoritmos explicables, modelos adaptados al contexto, transparencia en la toma de decisiones.
Implementación operativa	Evaluaciones en terreno, estudios multicéntricos, integración con flujos reales de trabajo.
Capacidades humanas	Capacitación continua, alfabetización digital, participación activa del personal sanitario en el diseño.
Sostenibilidad	Supervisión gubernamental, apoyo institucional, alianzas intersectoriales para infraestructura y financiamiento.

Fuente: elaboración propia, 2025.

Las investigaciones abarcaron poblaciones desde 12 participantes en entornos clínicos hasta 45 000 usuarios dentro de plataformas de salud móvil. Las tecnologías examinadas se aplicaron en distintos ámbitos: tres estudios abordaron enfermedades transmisibles, cuatro se centraron en enfermedades no transmisibles y tres se aplicaron en atención primaria. Tres tecnologías se utilizaron para triaje, cuatro para cribado o diagnóstico y tres para planificación o provisión de cuidados. Dos estudios evaluaron chatbots comunitarios para autodiagnóstico o apoyo social, mientras que otros dos valoraron sistemas para difusión de información nutricional o cuidados prenatales.

En cuanto a transparencia, ninguno de los estudios proporcionó acceso público a los conjuntos de datos. Cinco ofrecieron referencias a los datos utilizados y cinco detallaron los algoritmos empleados. Siete herramientas funcionaban como sistemas de “caja negra”, sin mecanismos de

explicabilidad. Solo dos sistemas basados en radiografías proporcionaron mapas de calor o áreas de interés, y uno de planificación oncológica incluyó referencias bibliográficas asociadas a las recomendaciones.

Cuatro estudios reportaron concordancia entre las recomendaciones del algoritmo y profesionales de la salud, incluyendo coincidencias completas en ecografía mamaria y planificación radioterápica. También se documentaron discrepancias debidas a recomendaciones inapropiadas o incompatibles con los recursos locales. Se observaron limitaciones relacionadas con interoperabilidad insuficiente, datos incompletos y falta de adaptación al contexto epidemiológico.

Se identificaron mejoras como reducción del tiempo dedicado a tareas de imagen, implementación de triaje automatizado y disminución en los tiempos de diagnóstico. En dos estudios se documentó reducción del tiempo hasta el inicio del tratamiento. Algunos centros reportaron aumentos en la carga laboral debido a limitaciones de infraestructura o dificultades para integrar los sistemas.

Los estudios mostraron valoraciones mixtas sobre la facilidad de uso. Algunos sistemas fueron percibidos como demandantes en información, con baja integración y problemas de conectividad. Los chatbots fueron usados principalmente por personas jóvenes; sus opiniones variaron entre satisfacción y percepción de insuficiencia. También se registraron problemas de confianza por opacidad de los sistemas y diagnósticos imprecisos.

Solo un estudio evaluó coste-efectividad y reportó mejoras en años de vida ajustados por calidad, aunque con costes superiores al umbral aceptado. Tres estudios describieron dificultades para adaptar modelos desarrollados en países de altos ingresos a contextos de bajos recursos, señalando problemas de conectividad, equipamiento limitado y falta de familiaridad con herramientas digitales.

#### **4.3.7 Integración de inteligencia artificial y oncología de precisión en América Latina**

Este estudio corresponde a una revisión narrativa publicada en la revista *Frontiers in Medical Technology* el 13 de octubre de 2022 por Liliana Sussman, Juan Esteban García-Robledo, Camila Ordóñez-Reyes, Yency Forero, Andrés F. Mosquera, Alejandro Ruíz-Patiño, Diego F. Chamorro y Andrés F. Cardona, investigadores vinculados a instituciones de Colombia, Estados Unidos y la Fundación para la Investigación Clínica y Aplicada en Cáncer, titulado *Integration of artificial intelligence and precision oncology in Latin America*.

Su propósito fue analizar la integración de la IA en la oncología de precisión en América Latina y el Caribe, examinando tanto las oportunidades como las limitaciones de implementación en sistemas de salud con grandes desigualdades socioeconómicas. El artículo revisa los principales avances en áreas como el perfilado molecular, la identificación de variantes germinales, la radiogenómica, la patología digital y el descubrimiento de biomarcadores, resaltando cómo la IA puede apoyar en el diagnóstico temprano, la predicción pronóstica y la personalización terapéutica en cáncer.

Asimismo, los autores destacan los desafíos específicos de América Latina, incluyendo la falta de estandarización de datos, la ausencia de marcos regulatorios claros, las barreras de infraestructura tecnológica, las limitaciones en validación clínica y los sesgos derivados de desigualdades en el acceso a servicios de salud. Subrayan que, aunque existen resultados prometedores, particularmente en aplicaciones de IA para la detección de cáncer cervicouterino mediante imágenes y microscopía con más del 90% de precisión, la sostenibilidad de estos modelos requiere inversión en datos locales, formación de profesionales y colaboración multinacional.

El artículo reporta que la integración de la inteligencia artificial en los sistemas de salud ha generado mejoras significativas en la eficiencia operativa, evidenciadas en la reducción de tiempos de espera, la automatización de procesos administrativos y la optimización de los flujos de trabajo. En el ámbito clínico, la IA ha mostrado capacidad para identificar patrones complejos en grandes volúmenes de datos médicos, permitiendo un diagnóstico más temprano, una mejor estratificación de riesgo y una mayor personalización del tratamiento. Entre las aplicaciones documentadas se encuentran los sistemas de apoyo a la decisión clínica basados en análisis predictivos, herramientas de diagnóstico automatizado en imágenes médicas y pruebas de laboratorio, así como soluciones destinadas a la monitorización continua de pacientes. También se señala el uso de chatbots y asistentes virtuales para funciones de triaje, orientación básica y seguimiento remoto, además de aplicaciones en la gestión hospitalaria, como la asignación de recursos y la predicción de la demanda asistencial.

El artículo también identifica diversas limitaciones. Entre ellas, la falta de interoperabilidad entre las herramientas de IA y los sistemas de información sanitarios existentes, junto con la escasez de datos estandarizados y de calidad suficiente para entrenar modelos robustos. Se describen además problemas asociados al sesgo algorítmico, especialmente en poblaciones poco representadas, así como limitaciones relacionadas con la transparencia y la dificultad para comprender los mecanismos internos de los modelos. A estas barreras se suman las dificultades derivadas de infraestructuras tecnológicas insuficientes.

Asimismo, el estudio recoge varios retos para la adopción efectiva de estas tecnologías. Entre los más destacados se encuentran la falta de capacitación del personal sanitario para el uso de herramientas basadas en IA, la desconfianza en los sistemas automatizados y los desafíos regulatorios asociados a la privacidad, seguridad y responsabilidad clínica. También se mencionan barreras económicas para su implementación, sobre todo en sistemas de salud con recursos limitados.

Finalmente, el artículo señala los factores necesarios para lograr una implementación exitosa. Entre ellos se incluyen la recolección de datos locales de alta calidad para el entrenamiento y validación de los modelos, la alineación entre las herramientas de IA y las necesidades clínicas reales, y la necesidad de invertir en infraestructura digital, conectividad y modernización tecnológica. También se destaca la importancia de contar con procesos de validación clínica rigurosos y con mecanismos de supervisión adecuados, así como la implementación de programas de formación continua orientados a fortalecer las competencias digitales del personal sanitario.

#### **4.3.8 Análisis del modelo de atención médica virtual en América Latina: una revisión sistemática de los desafíos y barreras actuales**

Este estudio corresponde a una revisión sistemática cualitativa publicada en la revista *mHealth* en marzo de 2024 por Alejandro De La Torre, Peter Díaz y Rafael Perdomo, investigadores vinculados a la Clínica Imbanaco Grupo QuirónSalud en Colombia y a Vitae Health en Panamá, titulado *Analysis of virtual healthcare model in Latin America: a systematic review of current challenges and barriers*. Su objetivo fue analizar, mediante la metodología PRISMA, los principales retos y barreras que enfrenta la implementación de la salud virtual en América Latina, un modelo que se consolidó durante la pandemia de COVID-19, pero cuya sostenibilidad sigue siendo un desafío en la región.

La revisión sistemática identificó inicialmente diversos estudios publicados entre 2020 y 2023, de los cuales 19 cumplieron los criterios de inclusión establecidos por los autores. La mayor parte de las investigaciones procedían de Brasil y Argentina, y los diseños metodológicos más frecuentes fueron estudios transversales y cualitativos, centrados en evaluar la percepción, uso y barreras de la atención médica virtual en diferentes poblaciones de la región.

Los resultados evidenciaron que las barreras para la implementación de la atención médica virtual en América Latina se agrupan en cinco categorías principales: problemas tecnológicos, ausencia de examen físico, percepciones y limitaciones de los pacientes, barreras relacionadas con los profesionales de la salud y restricciones estructurales de los sistemas sanitarios.

**Tabla 9***Barreras para la implementación en telemedicina*

<b>Categoría</b>	<b>Barreras identificadas</b>
<b>Infraestructura tecnológica</b>	Conectividad limitada, baja interoperabilidad entre sistemas, falta de infraestructura digital y escasa capacitación en tecnologías.
<b>Limitaciones clínicas</b>	Imposibilidad de realizar examen físico, especialmente en áreas como neurología, ginecología y rehabilitación.
<b>Percepción del paciente</b>	Dudas sobre la eficacia de las consultas virtuales, preocupación por la privacidad y costos asociados al uso de internet o dispositivos.
<b>Profesionales de la salud</b>	Temor a mala praxis, sobrecarga laboral, falta de formación formal en telemedicina.
<b>Barreras estructurales</b>	Ausencia de regulaciones claras, problemas de reembolso por aseguradoras, altos costos de implementación.

Fuente: elaboración propia, 2025.

Además de las barreras identificadas, los estudios incluidos reportaron ciertos beneficios asociados al uso de la atención médica virtual, especialmente en entornos con restricciones de desplazamiento o acceso. Los resultados señalan que la telemedicina ha mostrado ser una modalidad segura y costo-efectiva, además de mejorar la accesibilidad a servicios de salud y reducir el riesgo de infecciones adquiridas en entornos hospitalarios.

Finalmente, el análisis de los estudios identificó diversas condiciones necesarias para la consolidación de modelos de atención médica virtual en la región. Entre ellas destacan la necesidad de invertir en infraestructura tecnológica, establecer marcos regulatorios claros, mejorar la interoperabilidad entre sistemas, ofrecer capacitación continua tanto a pacientes como a profesionales y garantizar estándares adecuados de seguridad digital.

**Tabla 10***Barreras para la implementación en telemedicina*

<b>Categoría</b>	<b>Condiciones identificadas</b>
<b>Infraestructura</b>	Ampliación de conectividad, fortalecimiento de sistemas digitales, mejora de interoperabilidad.
<b>Marco regulatorio</b>	Directrices legales y protocolos estandarizados para prestación de servicios virtuales.
<b>Capacitación</b>	Programas de formación en telemedicina para profesionales y alfabetización digital para usuarios.
<b>Ciberseguridad</b>	Protocolos para protección de datos y privacidad del paciente.
<b>Sostenibilidad</b>	Estrategias de financiamiento, participación institucional y modelos operativos estables.

Fuente: elaboración propia, 2025.

#### **4.3.9 Modelo de aprendizaje profundo para la predicción personalizada de cultivos positivos de SARM mediante registros médicos electrónicos de series temporales**

Este estudio corresponde a un análisis retrospectivo publicado en Nature Communications en 2024 por Nigo y colaboradores, titulado Deep learning model for personalized prediction of positive MRSA culture using time-series electronic health records. El objetivo fue desarrollar y validar un modelo de deep learning (PyTorch\_EHR) capaz de predecir cultivos positivos de SARM a partir de datos de historias clínicas electrónicas (EHR) en series temporales, anticipándose hasta dos semanas antes del resultado microbiológico. El modelo incluyó 26 233 pacientes del sistema Memorial Hermann Hospital System (MHHS) y 152 979 pacientes del conjunto MIMIC-IV. En total, se analizaron 56 233 eventos clínicos en MHHS y 393 713 eventos en MIMIC-IV. El objetivo fue anticipar la positividad del cultivo hasta con dos semanas de antelación respecto al resultado microbiológico real.

El modelo propuesto, denominado PyTorch\_EHR, mostró un desempeño superior al de los modelos comparativos tradicionales. En la cohorte MHHS alcanzó un AUROC de 0.911 (IC 95 %: 0.900–0.916), mientras que en MIMIC-IV obtuvo 0.859 (IC 95 %: 0.849–0.869). En comparación, la regresión logística presentó valores de 0.857 y 0.816, y LightGBM alcanzó 0.892 y 0.838 en MHHS y MIMIC-IV, respectivamente.

**Tabla 11**

*Desempeño de los modelos predictivos para cultivos de SARM*

<b>Modelo</b>	<b>AUROC MHHS</b>	<b>AUROC MIMIC-IV</b>
PyTorch_EHR	0.911	0.859
Regresión logística	0.857	0.816
LightGBM	0.892	0.838

Fuente: Datos extraídos del estudio. El modelo PyTorch\_EHR mostró el mejor desempeño en ambas cohortes.

En el análisis de grupos diagnósticos, las IPTB representaron una proporción considerable entre los pacientes con SARM: 24.8 % frente a 5.6 % en el grupo no-SARM dentro de MHHS, y 13.2 % frente a 2.6 % en MIMIC-IV. Asimismo, las tasas de bacteriemia fueron notablemente mayores en los pacientes con SARM, con un 6.7 % frente a 2.1 % en MHHS y 8.6 % frente a 1.9 % en MIMIC-IV.

Los análisis estratificados por riesgo evidenciaron que el modelo presentó una sensibilidad elevada en los grupos de bajo riesgo, junto con valores predictivos negativos muy altos, lo que resulta útil para descartar infección. En cambio, los grupos de alto riesgo mostraron una especificidad superior al 95 %, así como una mayor concentración de casos de bacteriemia

asociada a SARM. En MHHS, el 31.8 % de los pacientes clasificados como alto riesgo presentó bacteriemia, mientras que en MIMIC-IV este valor fue del 7.3 %. En contraste, en los grupos de bajo riesgo la bacteriemia fue prácticamente residual: 0.5 % y 0.04 %, respectivamente.

**Tabla 12**

*Desempeño del modelo PyTorch\_EHR según estratos de riesgo en MHHS y MIMIC-IV*

<b>Estrato</b>	<b>Cohorte</b>	<b>Sensibilidad</b>	<b>Especificidad</b>	<b>NPV</b>	<b>PPV</b>	<b>Bacteriemia (%)</b>
Bajo riesgo	MHHS	95.0 %	62.9 %	98.6 %	–	0.5 %
Bajo riesgo	MIMIC-IV	90.0 %	58.7 %	99.8 %	–	0.04 %
Alto riesgo	MHHS	48.1 %	95.0 %	–	65.6 %	31.8 %
Alto riesgo	MIMIC-IV	19.3 %	99.0 %	–	22.4 %	7.3 %

Fuente. Los valores provienen del estudio. NPV: valor predictivo negativo; PPV: valor predictivo positivo. La bacteriemia corresponde a la proporción de casos confirmados de SARM dentro de cada estrato.

#### **4.3.10 El impacto de una herramienta visual de apoyo a la toma de decisiones clínicas en el punto de atención en los ingresos por celulitis en el sistema médico de la Universidad de Maryland**

Este estudio corresponde a un análisis retrospectivo con intervención, publicado en Open Forum Infectious Diseases por Dezman y colaboradores (2023), realizado en el University of Maryland Medical System, titulado The impact of a point-of-care visual clinical decision support tool on admissions for cellulitis in the University of Maryland Medical System. Su objetivo fue evaluar el impacto de una herramienta de soporte clínico digital basada en imágenes, VisualDx, diseñada para integrarse en el punto de atención a través de la historia clínica electrónica. El estudio analizó 1269 episodios de pacientes adultos atendidos en los servicios de urgencias del University of Maryland Medical System entre septiembre de 2019 y febrero de 2020, todos con

sospecha diagnóstica de celulitis. La herramienta de soporte clínico visual integrada al punto de atención, VisualDx, fue utilizada en el 24.1 % de los encuentros registrados.

Los resultados mostraron que el uso de VisualDx se asoció con una reducción significativa en la probabilidad de hospitalización. El modelo ajustado indicó un odds ratio (OR) de 0.62 (IC 95 %: 0.40–0.97), lo que refleja una disminución sustancial respecto a los encuentros en los que no se utilizó la herramienta. De manera paralela, también se observó una reducción significativa en la administración de antibióticos sistémicos, con un OR ajustado de 0.63 (IC 95 %: 0.41–0.99).

Los autores señalan que aproximadamente un tercio de las hospitalizaciones clasificadas inicialmente como “celulitis” corresponden en realidad a diagnósticos incorrectos; este hallazgo contextualiza la magnitud del impacto observado, al evidenciar que la herramienta contribuyó a evitar ingresos innecesarios y la exposición a antibióticos de amplio espectro.

En conjunto, los resultados cuantitativos del estudio indican que la integración de VisualDx en el punto de atención permitió mejorar la precisión diagnóstica y reducir tanto hospitalizaciones como prescripción antibiótica en el manejo de pacientes con sospecha de celulitis.

## **CAPÍTULO V DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS**

## **5.1 DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS**

En este capítulo se presenta el análisis interpretativo de los estudios incluidos en esta revisión sistemática. Cada artículo se discute considerando sus aportes y limitaciones, citándolos adecuadamente para reconocer su autoría. La discusión se organiza según los objetivos específicos planteados al inicio del trabajo, con el fin de integrar de forma coherente la evidencia disponible y los hallazgos obtenidos.

### **5.1.1 Características y comportamiento clínico de las infecciones cutáneas por SARM (2019-2024)**

La evidencia científica publicada entre 2019 y 2024 indica que las infecciones cutáneas por SARM constituyen uno de los cuadros más frecuentes, persistentes y clínicamente complejos asociados a este patógeno. Los estudios coinciden en que la piel es una puerta de entrada habitual tanto en la comunidad como en los hospitales, con un comportamiento clínico influido por mecanismos de alta virulencia, capacidad de persistencia y progresión acelerada.

Según Liu et al. (2024), *S. aureus* es uno de los microorganismos predominantes en heridas crónicas y úlceras del pie diabético, detectándose en el 70–80 % de las muestras. Este predominio se asocia a la formación de biopelículas, células persistentes y alteraciones metabólicas, incluida la inactivación del ciclo TCA, que favorecen la tolerancia antibiótica. Como consecuencia, entre el 40 % y el 60 % de las infecciones por *S. aureus* presentan recurrencia tras el tratamiento convencional, mientras que el SARM se relaciona con una mortalidad un 60 % mayor respecto a cepas sensibles.

Clínicamente, estas adaptaciones se manifiestan como lesiones de evolución lenta, supuración persistente, inflamación marcada, dificultad para cicatrizar y tendencia a la cronicidad. La disbiosis cutánea y el pH alcalino de las heridas complejas facilitan la colonización polimicrobiana, lo que complica el diagnóstico temprano y aumenta el riesgo de progresión profunda. La expresión de toxinas como la PVL o la toxina del síndrome de choque tóxico se asocia a fiebre, dolor intenso y necrosis rápida.

Los datos cuantitativos de Nigo et al. (2024) destacan que las IPTB representaron el 24,8 % de los casos positivos para SARM en la cohorte MHHS y el 13,2 % en MIMIC-IV, en contraste con proporciones mucho menores en pacientes sin SARM. También demostraron mayor riesgo de progresión a bacteriemia (6,7 % y 8,6 % frente a 2,1 % y 1,9 %). La mayoría de los cultivos positivos se obtuvieron el mismo día del evento clínico, lo que sugiere una progresión acelerada.

En conjunto, los estudios describen un patrón clínico caracterizado por:

- Alta prevalencia en heridas crónicas (hasta 80 %).
- Recurrencia frecuente (40–60 %).
- Mayor virulencia y mortalidad (60 % más que cepas sensibles).
- Mayor prevalencia de IPTB en pacientes con SARM (hasta cinco veces más).
- Rápida progresión hacia complicaciones sistémicas.
- Manifestaciones típicas: abscesos, forúnculos, celulitis purulenta.
- Influencia decisiva del uso previo de antibióticos.

Estos hallazgos justifican la necesidad de herramientas de diagnóstico precoz que permitan intervenir antes de la progresión hacia formas graves o sistémicas.

### **5.1.2 Complicaciones del manejo tardío del SARM en piel**

La literatura coincide en que el manejo tardío de las infecciones cutáneas por SARM favorece su progresión hacia cuadros invasivos, complicaciones sistémicas y desenlaces adversos. El retraso permite que el microorganismo despliegue mecanismos que aumentan su persistencia, virulencia y resistencia.

Liu et al. (2024) demostraron que el SARM puede reprogramar su metabolismo en úlceras crónicas, inactivando el ciclo TCA y favoreciendo vías fermentativas asociadas a la formación de células persistentes y biopelículas maduras. Estas condiciones reducen la penetración antibiótica y favorecen recurrencias. La producción intensificada de toxinas (PVL,  $\alpha$ -hemolisina) incrementa el riesgo de sepsis, necrosis y destrucción tisular profunda.

El retraso diagnóstico aumenta también el riesgo de osteomielitis, infecciones necrosantes y amputaciones, especialmente en pacientes con diabetes o comorbilidades.

Desde el punto de vista terapéutico, Bhavnani et al. (2024) demostraron que la eficacia de antimicrobianos como omadaciclina ( $AUC:MIC \geq 12,5$ ) depende de un inicio temprano. Las respuestas favorables a las 48–72 horas fueron significativamente menores cuando el tratamiento se iniciaba tardíamente. El retraso favorece además la emergencia de cepas más resistentes.

Nigo et al. (2024) mostraron tasas de bacteriemia significativamente mayores en pacientes con SARM, lo que indica que el retraso en infecciones cutáneas puede facilitar la progresión hacia cuadros sistémicos.

- En síntesis, el manejo tardío se asocia con:
- Infecciones persistentes por biopelículas y células persistentes.
- Mayor daño tisular por toxinas.
- Riesgo de sepsis, necrosis y osteomielitis.
- Mayor probabilidad de recurrencia e infección invasiva.
- Reducción de la eficacia antibiótica.
- Mayor presión selectiva y desarrollo de multirresistencia.
- Incremento del riesgo de bacteriemia.

Estos hallazgos reafirman el valor del diagnóstico temprano como herramienta para reducir complicaciones graves y mejorar el pronóstico.

### **5.1.3. Aplicaciones actuales de inteligencia artificial en el diagnóstico precoz de infecciones resistentes**

En los últimos años, las aplicaciones de IA orientadas al diagnóstico temprano han avanzado significativamente en distintos entornos clínicos internacionales.

El estudio de McElvania et al. (2024) es un ejemplo representativo: la herramienta MRSA App analizó automáticamente imágenes de cultivos cromogénicos con una concordancia del 96,98 % respecto a la lectura manual. Con sensibilidad del 98,15 % y especificidad del 96,69 %, la IA

demonstró capacidad para reproducir o superar la interpretación humana. Las discrepancias (3 %) se asociaron principalmente a pigmentación atípica, lo que subraya la importancia de supervisión experta.

Nigo et al. (2024) demostraron que modelos basados en series temporales de historias clínicas pueden anticipar cultivos positivos de SARM hasta dos semanas antes del resultado microbiológico, lo que representa una aplicación directa para el diagnóstico precoz.

Otro enfoque prometedor es la espectroscopía Raman combinada con deep learning. Lin et al. (2025) reportaron exactitudes y F1-scores superiores al 94–99 %, con AUC cercanas a 0.99. El uso de SHAP mejoró la interpretabilidad, una necesidad importante en aplicaciones clínicas.

Pinto et al. (2025) mostraron que la IA supera sistemáticamente a los modelos clínicos tradicionales en sensibilidad y valor predictivo negativo, métricas críticas en infecciones resistentes.

En contextos de ingresos limitados, Ciecierski-Holmes et al. (2022) documentaron aplicaciones exitosas en triaje y diagnóstico, aunque con variabilidad en transparencia, infraestructura y rendimiento según el entorno. Sussman et al. (2022) demostraron el uso de IA en análisis masivo de datos, imágenes digitales y sistemas de alerta temprana.

En conjunto, la evidencia demuestra que la IA ya se encuentra en fase de adopción clínica real, con aplicaciones en análisis de imágenes, historias clínicas, espectroscopía, triaje automatizado y soporte multifuente, ofreciendo un marco sólido para el diagnóstico precoz de SARM.

#### **5.1.4 Viabilidad para implementar IA en atención primaria latinoamericana para el diagnóstico temprano de SARM en piel**

Los resultados de Nigo et al. (2024) sugieren que los modelos de aprendizaje profundo pueden mantener un rendimiento diagnóstico adecuado incluso cuando se aplican en regiones distintas a aquellas donde fueron entrenados, siempre que exista un grado mínimo de estandarización en la captura de datos y registros clínicos estructurados. Este hallazgo es especialmente relevante para el primer nivel de atención, donde la identificación temprana de infecciones cutáneas por SARM condiciona el riesgo de progresión clínica, el desarrollo de complicaciones y el uso inadecuado de antibióticos.

Desde una perspectiva aplicada, en entornos de atención primaria latinoamericanos, como los EBAIS en Costa Rica, la inteligencia artificial podría incorporarse como una herramienta de apoyo a la decisión clínica y no como un sistema de autodiagnóstico. Su utilización sería factible en fases tempranas del flujo asistencial, particularmente durante la valoración inicial de lesiones cutáneas sospechosas, tales como abscesos, celulitis, impétigo complicado o heridas que no evolucionan favorablemente. En este contexto, profesionales de enfermería podrían encargarse de la captura estandarizada de imágenes clínicas y del registro de signos locales y generales, mientras que los ATAPS podrían contribuir a la identificación comunitaria temprana de lesiones sospechosas durante visitas domiciliarias, facilitando la referencia oportuna sin realizar interpretación diagnóstica autónoma. El médico general mantendría un rol central en la interpretación del resultado generado por la IA, integrándolo con la evaluación clínica global

del paciente para decidir la necesidad de tratamiento antibiótico empírico, toma de cultivo, seguimiento o referencia a niveles superiores de atención.

Los modelos de IA aplicables en este escenario se basarían principalmente en técnicas de visión computacional entrenadas con imágenes cutáneas, combinadas con variables clínicas simples, generando estimaciones de riesgo o alertas tempranas de probabilidad de infección por SARM. Para garantizar su viabilidad en atención primaria, los datos requeridos deben ser mínimos, accesibles y reproducibles, incluyendo imágenes clínicas obtenidas con dispositivos móviles bajo protocolos básicos de iluminación y distancia, información clínica esencial como edad, sexo, localización de la lesión, presencia de dolor, secreción purulenta, fiebre, recurrencia, comorbilidades relevantes y antecedentes epidemiológicos básicos. La integración de estos datos en sistemas electrónicos de salud consolidados, como el EDUS en Costa Rica, facilitaría la interoperabilidad y el uso clínico real de estas herramientas.

La revisión de Wang et al. (2023) demostró que la IA puede implementarse en entornos con recursos limitados, como China, Perú, Malawi y Ecuador, siempre que existan condiciones mínimas de conectividad, infraestructura digital y adaptación al contexto local. Asimismo, la aceptabilidad del personal sanitario aumenta cuando los modelos son explicables, transparentes y alineados con la práctica clínica habitual. En relación con los costos, experiencias previas como CAD4TB han mostrado limitaciones en países de bajos ingresos; sin embargo, estas no son directamente extrapolables a América Latina, donde los umbrales de costo-efectividad suelen ser mayores y los sistemas públicos de salud cuentan con plataformas de historia clínica

electrónica que permiten la integración de nuevas tecnologías sin requerir inversiones estructurales desproporcionadas.

El metaanálisis de Pinto et al. (2025) evidenció brechas relevantes en la literatura actual, incluyendo una baja validación externa, escasa representación de poblaciones vulnerables y alta heterogeneidad metodológica. Para el contexto latinoamericano, esto resalta la necesidad de desarrollar modelos multicéntricos que incorporen datos del primer nivel de atención y reflejen la epidemiología local del SARM. Adicionalmente, la dependencia de microbiología avanzada constituye una limitación en muchas regiones; por ello, la adaptación de modelos de IA a fuentes factibles como imágenes cutáneas y registros clínicos básicos podría aumentar significativamente la viabilidad de implementación. Ciecierski-Holmes et al. (2022) identificaron como barreras clave la limitada interoperabilidad, la infraestructura insuficiente, la falta de integración en flujos clínicos reales y la necesidad de modelos explicables y contextualizados, mientras que Sussman et al. (2022) enfatizaron que la disponibilidad de datos locales, la capacitación del personal sanitario y la confianza profesional son condiciones esenciales para una adopción exitosa.

En conjunto, la evidencia sugiere que la implementación de herramientas de inteligencia artificial para el diagnóstico temprano de infecciones cutáneas por SARM en atención primaria latinoamericana es viable, siempre que se disponga de datos locales representativos, infraestructura digital funcional, modelos explicables adaptados a la epidemiología regional, validación clínica rigurosa, capacitación del personal sanitario e integración efectiva en los flujos asistenciales del primer nivel de atención. Bajo estas condiciones, la IA podría contribuir

a mejorar la detección temprana, reducir complicaciones, optimizar el uso racional de antibióticos y fortalecer la toma de decisiones clínicas, sin desplazar el rol central del profesional de salud.

## **CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES

- La evidencia científica disponible confirma que el SARM continúa representando un problema relevante de salud pública, con una elevada carga de morbilidad y un impacto significativo en el uso de antibióticos, particularmente en infecciones cutáneas y de tejidos blandos.
- En América Latina, el diagnóstico temprano de infecciones cutáneas por SARM se ve limitado por la escasa disponibilidad de pruebas microbiológicas rápidas, la fragmentación de los sistemas de salud y la ausencia de guías estandarizadas en el primer nivel de atención, lo que favorece el uso empírico de antibióticos y la progresión de cuadros clínicos.
- Las herramientas de inteligencia artificial aplicadas al análisis de imágenes dermatológicas han demostrado, en estudios internacionales, un desempeño diagnóstico prometedor, con sensibilidades y especificidades elevadas, lo que sugiere un potencial relevante como herramientas de apoyo clínico para la identificación temprana de infecciones cutáneas.
- Sin embargo, la revisión evidencia un vacío significativo en la literatura científica específicamente orientada al uso de IA en infecciones cutáneas por SARM, lo que indica que este campo se encuentra en una etapa incipiente y requiere mayor desarrollo investigativo.
- La mayoría de los estudios disponibles se han realizado en contextos con infraestructuras sanitarias avanzadas, lo que limita la extrapolación directa de sus resultados a la realidad epidemiológica, técnica y organizativa de Costa Rica y otros países de América Latina.

- Costa Rica cuenta con una base digital inicial, como el sistema EDUS, que podría facilitar a mediano plazo la integración de herramientas mHealth basadas en IA, siempre que se garantice una adecuada gobernanza de datos, calidad de la información y validación clínica local.
- Los profesionales de salud muestran una actitud generalmente favorable hacia el uso de IA como apoyo diagnóstico; no obstante, persisten barreras relevantes, entre ellas la falta de capacitación, la desconfianza en los algoritmos y la necesidad de validación local para generar credibilidad clínica.
- La inteligencia artificial posee un potencial adicional para fortalecer la vigilancia epidemiológica del SARM mediante el análisis automatizado de patrones clínicos, microbiológicos y geográficos, contribuyendo a una respuesta sanitaria más oportuna y eficiente.
- Es fundamental enfatizar que la inteligencia artificial no constituye un reemplazo del juicio clínico profesional, sino una herramienta complementaria cuyo uso debe integrarse de forma responsable, ética y supervisada dentro del proceso de toma de decisiones médicas.

## **RECOMENDACIONES**

- Desarrollar estudios primarios en población costarricense que permitan la validación algorítmica local de herramientas de inteligencia artificial, utilizando imágenes dermatológicas y datos epidemiológicos representativos del contexto nacional.

- Implementar planes piloto controlados en EBAIS seleccionados, con el objetivo de evaluar el desempeño diagnóstico real, la aceptabilidad clínica, la usabilidad y las limitaciones operativas de aplicaciones como DermAI-SARM en el primer nivel de atención.
- Incorporar de manera obligatoria la participación de comités de ética y bioética en todas las etapas de diseño, validación e implementación de herramientas de IA, asegurando la protección de poblaciones vulnerables, la confidencialidad de los datos y el uso responsable de la tecnología.
- Desarrollar estudios que evalúen el impacto del uso de la inteligencia artificial en la percepción de la calidad de la atención, la confianza del paciente en la valoración clínica y la relación médico-paciente, reconociendo que estos factores influyen directamente en la adherencia terapéutica.
- Generar bases de datos locales de imágenes cutáneas debidamente etiquetadas, bajo estrictos estándares éticos y de privacidad, que permitan entrenar modelos robustos adaptados a la epidemiología y diversidad poblacional del país.
- Capacitar al personal sanitario en competencias digitales y en el uso clínico responsable de la inteligencia artificial, incluyendo sus limitaciones, principios de interpretabilidad y criterios de seguridad diagnóstica.
- Elaborar una guía nacional para el diagnóstico y manejo temprano de infecciones cutáneas por SARM, que incluya recomendaciones claras sobre el uso complementario de herramientas digitales en la práctica clínica.

- Fortalecer los marcos regulatorios y la gobernanza de datos en salud, garantizando interoperabilidad con sistemas como EDUS, calidad de la información y protección de los datos clínicos.
- Promover alianzas estratégicas entre universidades, instituciones de salud pública y desarrolladores tecnológicos para impulsar proyectos de IA con enfoque en enfermedades infecciosas prioritarias.
- Integrar módulos de explicabilidad y transparencia algorítmica en las aplicaciones basadas en IA, con el fin de aumentar la confianza del personal de salud y facilitar la toma de decisiones clínicas fundamentadas.
- Evaluar la costo-efectividad de herramientas como DermAI-SARM, considerando la reducción de complicaciones, hospitalizaciones y uso inadecuado de antibióticos, como insumo para decisiones de implementación a escala nacional.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abu-El-Ruz, R., AbuHaweelah, M. N., Hamdan, A., Rajha, H. E., Sarah, J. M., Barakat, K., & Zughaiier, S. M. (2025). *Artificial Intelligence in Bacterial Infections Control: A Scoping Review*. *Antibiotics*, 14(3), 256. <https://doi.org/10.3390/antibiotics1403>
- An estimated 1.2 million people died in 2019 from antibiotic-resistant bacterial infections | University of Oxford. (2022, enero 20). <https://www.ox.ac.uk/news/2022-01-20-estimated-12-million-people-died-2019-antibiotic-resistant-bacterial-infections>
- Bassetti, M., Baguneid, M., Bouza, E., Dryden, M., Nathwani, D., & Wilcox, M. (2014). *European perspective and update on the management of complicated skin and soft tissue infections due to methicillin-resistant Staphylococcus aureus after more than 10 years of experience with linezolid*. *Clinical Microbiology and Infection*, 20, 3–18. <https://doi.org/10.1111/1469-0691.12463>
- Centro Nacional de Referencia de Bacteriología (CNRB) – INCIENSA. (2025). <https://www.inciensa.sa.cr/cnr-bacteriologia/>
- Charani, E., Cunnington, & Yousif. (2021). *Infections and artificial intelligence: A narrative review on the use of machine learning in antimicrobial resistance surveillance*. 27, 1361–1367. <https://doi.org/10.1016/j.cmi.2021.05.022>
- CLIAS, Saban, M., Esteban, S., Rubinstein, A., Cejas, C., Perez-Acuna, K., & CLIAS. (2023). *The Impact of Artificial Intelligence on Healthcare: Perspectives and Approaches for Latin America and the Caribbean*. <https://doi.org/10.48060/tghn.126>

- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Diseño y desarrollo de investigaciones mixtas*. Editorial Morata.
- Dryden, M., Baguneid, M., Eckmann, C., Corman, S., Stephens, J., Solem, C., Li, J., Charbonneau, C., Baillon-Plot, N., & Haider, S. (2015). *Pathophysiology and burden of infection in patients with diabetes mellitus and peripheral vascular disease: Focus on skin and soft-tissue infections*. *Clinical Microbiology and Infection*, 21, S27–S32. <https://doi.org/10.1016/j.cmi.2015.03.024>
- Duarte, F., Cordero, E., Calderon, M., Godinez, A., Ross, B., Allard, M., & Gonzalez-Escalona, N. (2025). *Closed genomes of four multidrug resistance Salmonella enterica serotype Infantis isolated in Costa Rica*. *Microbiology Resource Announcements*, 13(1), e00257-23. <https://doi.org/10.1128/MRA.00257-23>
- dystnick. (2019, septiembre 18). *Carao Ventures Leads a US\$2m Investment in Costa Rican SaaS Huli*. LAVCA. <https://www.lavca.org/carao-ventures-leads-a-us2m-investment-in-costa-rican-saas-huli/>
- Expediente digital único en salud (EDUS) de Costa Rica: Buenas prácticas, historia e implementación. (2025). <https://publications.iadb.org/...>
- Giralt-Zúñiga, M., Redondo-Solano, M., Moura, A., Tessaud-Rita, N., Bracq-Dieye, H., Vales, G., ... Lecuit, M. (2023). *Genome-Based Characterization of Listeria monocytogenes, Costa Rica*. *Emerging Infectious Diseases*, 29(12), 2566–2569. <https://doi.org/10.3201/eid2912.230774>

Global Antimicrobial Resistance and Use Surveillance System (GLASS). (2025). <https://www.who.int/data/...>

Hasanpour, A. H., Sepidarkish, M., Mollalo, A., Ardekani, A., Almkhtar, M., Mechaal, A., ... Rostami, A. (2023). *The global prevalence of MRSA colonization in elderly care centers: A systematic review and meta-analysis*. *Antimicrobial Resistance and Infection Control*, 12, 4. <https://doi.org/10.1186/s13756-023-01210-6>

How Serious Is MRSA? (2025). Cleveland Clinic. <https://my.clevelandclinic.org/health/diseases/11633...>

Huang, Z., Mohan George, M., Tan, Y.-R., & Natarajan, K. (2023). *Are physicians ready for precision antibiotic prescribing?* 1–10.

IDSA. (2025). *Vancomycin*. <https://www.idsociety.org/practice-guideline/vancomycin/>

IECS. (2023). *El impacto de la inteligencia artificial en la atención de la salud*. <https://www.iecs.org.ar/...>

Jackson, K. A., Gokhale, R. H., Nadle, J., Ray, S. M., Dumyati, G., Schaffner, W., ... See, I. (2020). *Public Health Importance of Invasive Methicillin-sensitive Staphylococcus aureus Infections*. *Clinical Infectious Diseases*, 70(6), 1021–1028. <https://doi.org/10.1093/cid/ciz323>

Jimenez-Truque, N., Saye, E. J., Thomsen, I., Herrera, M. L., & Creech, C. B. (2014). *Molecular Epidemiology of MRSA in Costa Rican Children*. *The Pediatric*

- Infectious Disease Journal, 33(7), e180–e182. <https://doi.org/10.1097/INF.0000000000000291>
- Luo, J., Liu, M., Ai, W., Zheng, X., Han, L., Huang, K., ... Luo, C. (2025). *Detection of viable MRSA by PMA-TaqMan qPCR from BAL fluid*. BMC Pulmonary Medicine, 25, 506. <https://doi.org/10.1186/s12890-025-03958-6>
- Lwigale, F., Kibombo, D., Kasango, S. D., Tabajjwa, D., Atuheire, C., Kungu, J., ... Rwego, I. B. (2024). *Prevalence and resistance profiles of SSTIs in Uganda*. PLOS Global Public Health, 4(8), e0003582. <https://doi.org/10.1371/journal.pgph.0003582>
- mHealth, eHealth, Telehealth, and Telemedicine—SBMA Benefits. (2025). <https://sbmabenefits.com/...>
- Men, P., Li, H.-B., Zhai, S.-D., & Zhao, R.-S. (2016). *Association between AUC/MIC of Vancomycin and clinical effectiveness*. PLOS ONE, 11(1), e0146224. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146224>
- Methicillin-resistant Staphylococcus aureus (MRSA)—DynaMed. (2025). <https://www.dynamed.com/...>
- Moroney, S. M., Heller, L. C., Arbuckle, J., Talavera, M., & Widen, R. H. (2007). *SCCmec and PVL characterization of MRSA clones*. Journal of Clinical Microbiology, 45(3), 1019–1021. <https://doi.org/10.1128/JCM.01706-06>

- MRSA: Causes, Symptoms, Diagnosis, Treatment & Prevention. (2025). <https://my.clevelandclinic.org/health/diseases/...>
- National Center for Immunization... (2012). *ABCs Report MRSA 2011*. <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/52522>
- NICE. (2019). *Cellulitis and erysipelas: Antimicrobial prescribing*. <https://www.nice.org.uk/guidance/ng141/...>
- Nigo, M., Rasmy, L., Mao, B., Kannadath, B. S., Xie, Z., & Zhi, D. (2024). *Deep learning model for prediction of positive MRSA culture*. *Nature Communications*, 15, 2036. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46211-0>
- Noticias de Salud Digital — Alephoo. (2025). <https://www.alephoo.com/noticias/>
- OMS. (2021). *Informe TRACSS Costa Rica 2021*. <https://cdn.who.int/...>
- OMS. (2025). *Porcentaje de infecciones del torrente sanguíneo por SARM*. <https://data.who.int/...>
- OPS. (2024, julio 25). *Resistencia a los antimicrobianos*. <https://www.paho.org/...>
- Pan-Canadian Action Plan on AMR. (2023). <https://www.canada.ca/...>
- Popovich, K. J., Aureden, K., Ham, D. C., Harris, A. D., Hessels, A. J., Huang, S. S., ... Calfee, D. P. (2025). *SHEA/IDSA/APIC recommendations to prevent MRSA transmission*.

- Infection Control & Hospital Epidemiology, 44(7), 1039–1067. <https://doi.org/10.1017/ice.2023.102>
- Rajkomar, A., Dean, J., & Kohane, I. (2019). *Machine Learning in Medicine*. NEJM, 380(14), 1347–1358. <https://doi.org/10.1056/NEJMra1814259>
- ReLAVRA+ — OPS/OMS. (2025). <https://www.paho.org/...>
- Sakr, A., Brégeon, F., Mège, J.-L., Rolain, J.-M., & Blin, O. (2018). *Staphylococcus aureus Nasal Colonization*. Frontiers in Microbiology, 9, 2419. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02419>
- Santos, P., Alho, I., & Ribeiro, E. (2025). *MALDI-TOF MS biomarkers for MRSA detection*. Metabolites, 15(8), 540. <https://doi.org/10.3390/metabo15080540>
- Schoonjans, F. (2025). *Diagnostic test evaluation — MedCalc*. [https://www.medcalc.org/en/calc/diagnostic\\_test.php](https://www.medcalc.org/en/calc/diagnostic_test.php)
- Sifuentes, W. Q., & Guerrero, J. I. A. (2021). *La resistencia antimicrobiana en Perú*. Alpha Centauri, 2(3). <https://doi.org/10.47422/ac.v2i3.38>
- Singh, S., Charani, E., Devi, S., Sharma, A., & Edathadathil, F. (2022). *Road-map for AMR in LMICs*. 11, 1–10.

- Smak Gregoor, A. M., Sangers, T. E., Eekhof, J. A. H., Howe, S., Revelman, J., Litjens, R. J. M., ... Wakkee, M. (2023). *AI in mobile health for skin cancer diagnostics*. *eClinicalMedicine*, 60, 102019. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2023.102019>
- Stevens, D. L., Bisno, A. L., Chambers, H. F., Dellinger, E. P., Goldstein, E. J. C., Gorbach, S. L., ... Wade, J. C. (2014). *Practice Guidelines for SSTI*. *Clinical Infectious Diseases*, 59(2), e10–e52. <https://doi.org/10.1093/cid/ciu296>
- Study finds higher prevalence of MRSA strains in low-income countries | CIDRAP. (2025). [https://www.cidrap.umn.edu/...](https://www.cidrap.umn.edu/)
- Subramanian, A., Shabi, Y., Alazraqi, T., Abdelrahim, I. M., Hamid, M. E., Al Bshabshe, A., ... Binkhamis, K. (2025). *MRSA trends in Saudi Arabia*. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 15, 1622647. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2025.1622647>
- Taylor, T. A., & Unakal, C. G. (2025). *Staphylococcus aureus Infection*. StatPearls. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK441868/>
- Transform Health Coalition. (2024). *Challenges and Recommendations in Data Governance for AI in Health in LAC*. [https://transformhealthcoalition.org/...](https://transformhealthcoalition.org/)
- Wang, Z., Feng, C., Chang, G., Liu, H., & Zhang, W. (2025). *Digital PCR for early diagnosis of wound infections*. *BMC Infectious Diseases*, 25, 372. <https://doi.org/10.1186/s12879-025-10761-5>

Wolk, D. M., Struelens, M. J., Pancholi, P., Davis, T., Della-Latta, P., Fuller, D., ... Chapin, K. (2009). *Rapid Detection of S. aureus and MRSA*. *Journal of Clinical Microbiology*, 47(3), 823–826. <https://doi.org/10.1128/JCM.01884-08>

## LISTA DE ABREVIATURAS

Área bajo la curva (AUC)

Aprendizaje automático (machine learning, ML)

Aprendizaje profundo (deep learning, DL)

Cassette cromosómico estafilocócico (sccmec)

Ciclo del ácido tricarboxílico (TCA)

Concentración mínima inhibitoria (MIC)

Criterios de respuesta inflamatoria sistémica (SIRS)

Expediente Digital Único de Salud (EDUS)

Farmacocinética-farmacodinámica (PK-PD)

Glucosa-6-fosfato (G6P)

Gobernanza de Datos e Inteligencia Artificial (MIGDIA)

Historias clínicas electrónicas (EHR)

Incisión y drenaje (I&D)

INCIENSA (Instituto Costarricense de Investigación y Enseñanza en Nutrición y Salud)

Infectious Diseases Society of America (IDSA)

Inteligencia artificial (IA)

Infecciones de piel y tejidos blandos (IPTB)

Medical Information Mart for Intensive Care IV (MIMIC-IV)

Memorial Hermann Health System (MHHS)

Odds ratio (OR)

Panton–Valentine leucocidin (PVL)

PCR cuantitativa (qpcr)

Proteína de unión a penicilinas 2a (PBP2a)

Redes neuronales convolucionales (CNN)

Redes neuronales recurrentes (RNN)

Receiver operating characteristic (ROC)

Resistencia antimicrobiana (AMR)

Resistencia antimicrobiana (RAM)

SARM asociado a la atención sanitaria (HCA-MRSA)

SARM comunitario (CA-MRSA)

SARM hospitalario (HA-MRSA)

Staphylococcus aureus resistente a meticilina (SARM)

Toxina del síndrome de shock tóxico (TSST-1)

Total Lab Automation (TLA)

Valor predictivo negativo (VPN)

Valor predictivo positivo (VPP)

## **ANEXOS**

## ANEXO 1. CARTA DEL TUTOR

San José, 12 de diciembre 2025

Señores

Departamento de Registro

Universidad Hispanoamericana

Estimados señores:

El estudiante Ana Teresa Álvarez Hernández DIMEX número 172400368529 me ha presentado, para efectos de revisión y aprobación el trabajo de “APLICACIÓN DE IA EN EL DIAGNÓSTICO PRECOZ DE INFECCIONES CUTÁNEAS POR STAPHYLOCOCCUS AUREUS RESISTENTE A METICILINA ANÁLISIS CRÍTICO Y VIABILIDAD EN ENTORNOS LATINOAMERICANOS”, el cual ha elaborado para optar por el grado académico de Licenciatura en Medicina y Cirugía. He verificado que se ha incluido las observaciones y hecho las correcciones indicadas durante el proceso de tutoría; y he evaluado los aspectos relativos a la elaboración del problema, objetivos, justificación, antecedentes, marco teórico, marco metodológico, tabulación, análisis de datos, conclusiones y recomendaciones.

Los resultados obtenidos por el postulante implican la siguiente calificación:

A.	ORIGINAL DEL TEMA	10%	10%
B.	CUMPLIMIENTO DE ENTREGA DE AVANCES	20%	16%
C.	COHERENCIA ENTRE LOS OBJETIVOS, LOS INSTRUMENTOS APLICADOS Y LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	30%	30%
D.	RELEVANCIA DE LAS CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	20%	20%
E.	CALIDAD, DETALLE DEL MARCO TEÓRICO	20%	20%
F.	TOTAL		96%

Por consiguiente, se avala el traslado de la tesis al proceso de lectura

Atentamente



Dra. Karen Jara Zúñiga

COD. 13226

## ANEXO 2. CARTA DEL LECTOR



3 de febrero de 2026

Departamento de Servicios Estudiantiles  
Carrera de Medicina y Cirugía  
Universidad Hispanoamericana  
Presente

Estimados señores:

La estudiante **Ana Teresa Álvarez Hernández**, me ha presentado, para efectos de revisión y aprobación, el trabajo de investigación denominado: **“Aplicación de la IA en el diagnóstico precoz de las infecciones cutáneas por Staphylococcus Aureus Resistente a Metilina análisis crítico y viabilidad en entornos latinoamericanos”**. El cual ha elaborado para optar por el grado de Licenciatura en Medicina y Cirugía. He revisado y he hecho las observaciones relativas al contenido analizado, particularmente, lo relativo a la coherencia entre el marco teórico y el análisis de datos; la consistencia de los datos recopilados y, la coherencia entre estos y las conclusiones; asimismo, la aplicabilidad y originalidad de las recomendaciones, en términos de aporte de la investigación. He verificado que se han hecho las modificaciones esenciales correspondientes a las observaciones indicadas.

Por consiguiente, este trabajo cuenta con los requisitos para ser presentado en la defensa pública.

Atentamente,

Dra. Marcela Subiros Rojas  
114300703  
Cód. 13036

### **ANEXO 3. DECLARACIÓN JURADA**

Yo Ana Teresa Álvarez Hernández, mayor de edad, portador de la cédula de identidad número 172400368529 (DIMEX), egresado de la carrera de Medicina y Cirugía de la Universidad Hispanoamericana, hago constar por medio de este acto y debidamente apercibido y entendido de las penas y consecuencias con las que se castiga en el Código Penal el delito de perjurio, ante quienes se constituyen en el Tribunal Examinador de mi trabajo de tesis para optar por el título de Licenciatura en Medicina y Cirugía, juro solemnemente que mi trabajo de investigación titulado: “APLICACIÓN DE IA EN EL DIAGNÓSTICO PRECOZ DE INFECCIONES CUTÁNEAS POR STAPHYLOCOCCUS AUREUS RESISTENTE A METICILINA ANÁLISIS CRÍTICO Y VIABILIDAD EN ENTORNOS LATINOAMERICANOS” es una obra original que ha respetado todo lo preceptuado por las Leyes Penales, así como la Ley de Derecho de Autor y Derechos Conexos número 6683 del 14 de octubre de 1982 y sus reformas, publicada en la Gaceta número 226 del 25 de noviembre de 1982; incluyendo el numeral 70 de dicha ley que advierte, artículo 70. Es permitido citar a un autor, transcribiendo los pasajes pertinentes siempre que éstos no sean tantos y seguidos, que puedan considerarse como una producción simulada y sustancial, que redunde en perjuicio del autor de la obra original. Asimismo, quedo advertido que la Universidad se reserva el derecho de protocolizar este documento ante Notario Público, en fe de lo anterior, firmo en la ciudad de San José, a los doce días del mes de diciembre del año dos mil veinticinco.



**ANA TERESA ÁLVAREZ HERNÁNDEZ**

172400368529

## ANEXOS 4. AUTORIZACIÓN DEL CENIT

### UNIVERSIDAD HISPANOAMERICANA CENTRO DE INFORMACION TECNOLOGICO

#### POLITICA DE ENTREGA DE TRABAJOS FINALES DE GRADUACION (TFG)

El Centro de Información Tecnológico (CENIT), resguardará los TFG y los tendrá a disposición de los usuarios.

El proceso de confección del TFG será dictado por la Dirección de Carrera en conjunto con la Dirección de Registro.

Los criterios para la recepción serán los siguientes:

1. Una vez defendido el trabajo final deberá el estudiante realizar el depósito del TFG en el repositorio institucional, para dicho fin se encuentra a disposición del estudiante una plataforma online. (Para hacerle llegar el procedimiento al estudiante es necesario que el Departamento de Registro nos haga llegar cada cuatrimestre la lista oficial de los estudiantes matriculados en el requisito de graduación)
2. El colaborador de registro verificará el cumplimiento de las disposiciones requeridas, para ello contará con un acceso a la plataforma, realizado esto procederá a darle el visto bueno para que el CENIT realice la última revisión. (Para llevar el control de cuáles TFG cuentan con el VB de Registro, se contará con un formato en Excel que se encontrará ubicado en la carpeta compartida entre Registro y el CENIT)
3. El colaborador de biblioteca deberá verificar que el archivo enviado por el estudiante cuente con los requerimientos establecidos (Formato PDF, carta tutor, lector, filólogo, declaración jurada y licencia de autorización de los autores), una vez realizada la revisión se procederá a dar el visto bueno final.
4. Como parte de las cartas que debe contener el documento se encuentra la licencia de autorización de los autores, con el fin de que el documento quede a disposición de los usuarios en la Biblioteca Digital. (Ver anexo)
5. Una vez que el estudiante cuente con el visto bueno final y siempre y cuando no tenga pendientes en biblioteca, se pondrá a su disposición el Paz y Salvo para que proceda realizar el pago de los derechos de graduación (Los colaboradores del CENIT se encargaran de genera los Paz y Salvo y compartirlos con Registro por medio de la carpeta compartida).

La presente entra en vigor de manera inmediata a su conocimiento y fecha, siendo los \_\_\_ días del mes de \_\_\_ de \_\_\_ en San José, Costa Rica.

---

Dirección de Registro

---

Dirección del CENIT

# ANEXOS

**UNIVERSIDAD HISPANOAMERICANA  
CENTRO DE INFORMACION TECNOLOGICO (CENIT)  
CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA  
REPRODUCCION PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA  
DE LOS TRABAJOS FINALES DE GRADUACION**

San José, 4 de febrero del 2026

Señores:

Universidad Hispanoamericana  
Centro de Información Tecnológico (CENIT)

Estimados Señores:

El suscrito (a) Ana Teresa Álvarez Hernández con número de identificación con) 172400368529 autor (a) del trabajo de graduación titulado "Aplicación de IA en el diagnóstico precoz de infecciones cutáneas por *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina análisis crítico y viabilidad en entornos latinoamericanos" presentado y aprobado en el año 2026 como requisito para optar al título de; (SI / NO) autorizo al Centro de Información Tecnológico (CENIT) para que con fines académicos, muestre a la comunidad universitaria la producción intelectual contenida en este documento.

De conformidad con lo establecido en la Ley sobre Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica.

Cordialmente,

\_\_\_\_\_  
Firma y Documento de Identidad



**ANEXO 1 (Versión en línea dentro del Repositorio)  
LICENCIA Y AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA PUBLICAR Y  
PERMITIR LA CONSULTA Y USO**

**Parte 1. Términos de la licencia general para publicación de obras en el repositorio institucional**

Como titular del derecho de autor, confiero al Centro de Información Tecnológico (CENIT) una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

- a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, el autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad por escrito.
- b) Autoriza al Centro de Información Tecnológico (CENIT) a publicar la obra en digital, los usuarios puedan consultar el contenido de su Trabajo Final de Graduación en la página Web de la Biblioteca Digital de la Universidad Hispanoamericana
- c) Los autores aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.
- d) Los autores manifiestan que se trata de una obra original sobre la que tienen los derechos que autorizan y que son ellos quienes asumen total responsabilidad por el contenido de su obra ante el Centro de Información Tecnológico (CENIT) y ante terceros. En todo caso el Centro de Información Tecnológico (CENIT) se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.
- e) Autorizo al Centro de Información Tecnológica (CENIT) para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.
- f) Acepto que el Centro de Información Tecnológico (CENIT) pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.
- g) Autorizo que la obra sea puesta a disposición de la comunidad universitaria en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en las "Condiciones de uso de estricto cumplimiento" de los recursos publicados en Repositorio Institucional.

SI EL DOCUMENTO SE BASA EN UN TRABAJO QUE HA SIDO PATROCINADO O APOYADO POR UNA AGENCIA O UNA ORGANIZACIÓN, CON EXCEPCIÓN DEL CENTRO DE INFORMACIÓN TECNOLÓGICO (CENIT), EL AUTOR GARANTIZA QUE SE HA CUMPLIDO CON LOS DERECHOS Y OBLIGACIONES REQUERIDOS POR EL RESPECTIVO CONTRATO O ACUERDO.