



IMPACTO SOCIAL DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN BIOSENSORES ELECTROQUÍMICOS PARA DIAGNÓSTICO Y MONITOREO

SOCIAL IMPACT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON ELECTROCHEMICAL BIOSENSORS FOR DIAGNOSIS AND MONITORING

Ariadna Yaneli Resendiz Jaramillo ¹

E-mail: aresendiz72@alumnos.uaq.mx

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1149-5429>

Luis Angel Iturralde Carrera ^{1*}

E-mail: liturralde28@alumnos.uaq.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5595-9329>

Daniel Resendiz Jaramillo ¹

E-mail: danielrj169@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4035-6427>

Luis Ángel Chávez Espínola ¹

E-mail: luisangelgb9732@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3817-7570>

Juvenal Rodríguez-Reséndiz ¹

E-mail: juvenal@uaq.edu.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8598-5600>

¹Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, México.

*Autor para correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Resendiz Jaramillo, A. Y., Iturralde Carrera, L. A., Resendiz Jaramillo, D., Chávez Espínola, L. A., & Rodríguez-Reséndiz, J. (2026). Impacto Social de la Inteligencia Artificial en Biosensores Electroquímicos para Diagnóstico y Monitoreo. *Universidad y Sociedad*, 18(5). e6162.

RESUMEN:

La integración de inteligencia artificial (IA) en biosensores electroquímicos transforma el diagnóstico biomédico. Mediante una revisión sistemática (directrices PRISMA) y análisis bibliométrico (VOSviewer) de la literatura Scopus (2020-2024), se seleccionaron 120 documentos de 5,610 iniciales. Los resultados evidencian un crecimiento sostenido de investigaciones en *Machine Learning*, *Deep Learning* y análisis predictivo para optimizar señales electroquímicas y detectar biomarcadores. Se identifica una tendencia hacia biosensores portátiles, sistemas *Point-of-Care* e integración con Internet de las Cosas Médicas para monitoreo remoto y medicina personalizada. Desde una perspectiva social, estos avances representan una oportunidad para democratizar el acceso al diagnóstico temprano en comunidades rurales y regiones con infraestructura sanitaria limitada, al tiempo que plantean desafíos éticos relacionados con la equidad, la privacidad de datos y la brecha digital en salud. Se concluye que la convergencia IA-biosensores constituye una estrategia con alto potencial para fortalecer sistemas de salud, promover diagnóstico temprano y ampliar acceso a servicios médicos de calidad, siempre que se implementen políticas que garanticen su adopción equitativa y culturalmente adecuada.

Palabras clave: Inteligencia Artificial, Biosensores Electroquímicos, Aprendizaje Automático, Diagnóstico Biomédico, Salud Digital.

ABSTRACT:

The integration of artificial intelligence (AI) into electrochemical biosensors is transforming biomedical diagnostics. Through a systematic review (PRISMA guidelines) and bibliometric analysis (VOSviewer) of Scopus literature (2020-2024), 120 documents were selected from 5,610 initial records. Results show sustained growth in Machine Learning, Deep Learning, and predictive analytics for optimizing electrochemical signals and biomarker detection. A trend toward wearable biosensors, Point-of-Care systems, and Internet of Medical Things integration for remote monitoring and personalized medicine was identified. From a social perspective, these advances represent an opportunity to democratize access to early diagnosis in rural communities and regions with limited healthcare infrastructure, while also raising ethical challenges related to equity, data privacy, and the digital health divide. We conclude that the AI-biosensor convergence represents a high-potential strategy to strengthen healthcare systems, promote early diagnosis, and expand access to quality medical services, provided that policies are implemented



to ensure their equitable and culturally appropriate adoption.

Keywords: Artificial Intelligence, Electrochemical Biosensors, Machine Learning, Biomedical Diagnosis, Digital Health.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de diagnósticos rápidos, precisos y accesibles, impulsada por el incremento de enfermedades crónicas e infecciosas, el envejecimiento poblacional y la necesidad de optimizar recursos sanitarios, ha motivado la búsqueda de tecnologías innovadoras para mejorar la detección y monitoreo clínico. Sin embargo, el acceso a estas tecnologías sigue siendo profundamente desigual: en regiones como América Latina, África Subsahariana y el Sudeste Asiático, la falta de infraestructura, la escasez de personal calificado y los altos costos de los equipos de diagnóstico tradicionales perpetúan brechas que afectan desproporcionadamente a poblaciones rurales y de bajos ingresos. Los biosensores han surgido como herramientas prometedoras por su capacidad para detectar biomarcadores específicos de manera rápida y eficiente (Krishnan et al., 2023; Leal-Junior et al., 2024). Investigaciones recientes reportan avances en la aplicación de biosensores para diagnosticar enfermedades crónicas e infecciosas, con mejoras en la detección de glucosa, proteínas, ácidos nucleicos y múltiples biomarcadores asociados a patologías cardiovasculares, metabólicas y oncológicas. No obstante, la mera existencia de estas tecnologías no garantiza su impacto social; su verdadero potencial reside en la capacidad de traducir la innovación en soluciones accesibles, asequibles y culturalmente apropiadas para las comunidades más vulnerables. En este sentido, la integración con inteligencia artificial (IA) abre la posibilidad de superar algunas de estas barreras, al permitir el desarrollo de sistemas *Point-of-Care* portátiles, de bajo costo y con capacidad de análisis automatizado, que podrían operar en entornos con recursos limitados. Esta visión se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 3 (Salud y Bienestar) y el ODS 10 (Reducción de las Desigualdades), que promueven el acceso universal a servicios de salud de calidad (Tayfour et al., 2024).

Este estudio aborda dos preguntas: ¿Cuáles son las principales tendencias científicas en la aplicación de IA en biosensores electroquímicos? ¿Qué tecnologías y algoritmos presentan mayor crecimiento en la literatura reciente?

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es realizar una revisión sistemática y un análisis bibliométrico de la literatura científica relacionada con la aplicación de

inteligencia artificial en biosensores electroquímicos durante el período 2020–2024.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada se basó en las directrices establecidas por PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), ampliamente empleadas para garantizar la transparencia, reproducibilidad y calidad metodológica de las revisiones sistemáticas (Page et al., 2021; Susilawati et al., 2025).

Búsqueda de información

La búsqueda bibliográfica fue realizada utilizando la base de datos Scopus debido a su amplia cobertura multidisciplinaria, reconocimiento internacional y compatibilidad con herramientas bibliométricas como VOSviewer.

El período de análisis comprendió los años 2020–2024 con el objetivo de identificar las tendencias más recientes en la integración de técnicas de inteligencia artificial dentro de biosensores electroquímicos.

Criterios de selección y exclusión de los estudios

Para garantizar la calidad y relevancia de los documentos analizados se aplicaron diferentes criterios de exclusión.

Se eliminaron publicaciones sobre agricultura, seguridad alimentaria, microbiología alimentaria, estudios con animales, evaluación de riesgos, resonancia plasmónica superficial, PCR, farmacia, enfermedades neurodegenerativas, monitorización fisiológica no relacionada con biosensores, y áreas temáticas como veterinaria, odontología, artes, humanidades, enfermería, psicología, economía, ciencias sociales, empresa, ciencias ambientales, agricultura, energía y matemáticas. El enfoque se centró en *Computer Science, Medicine, Biochemistry, Chemical Engineering y Materials Science*.

Proceso de selección de PRISMA

La selección siguió cuatro fases: Identificación (búsqueda inicial: n=5,610), Cribado (filtro temporal 2020-2024: n=1,965), Elegibilidad (criterios de inclusión/exclusión: n=120) e Inclusión (n=120 para análisis). La Figura 1 muestra el flujo metodológico.

Guía de análisis para la revisión sistemática

La literatura seleccionada fue agrupada en tres grandes dimensiones de análisis:

A. *Artificial Intelligence Techniques*

La estrategia de búsqueda recuperó documentos relacionados con *Artificial Intelligence, Machine Learning, Deep*

Learning, Neural Networks, Support Vector Machines, Random Forest y Predictive Analytics aplicados a *Biosensors, Electrochemical Biosensors y Electrochemical Sensors*.

B. Electrochemical Biosensor Technologies

Incluye estudios relacionados con Biosensores amperométricos, Biosensores potenciométricos, Biosensores impedi-métricos, Biosensores portátiles y Sistemas Point-of-Care.

C. Biomedical Applications

Incluye investigaciones orientadas al Diagnóstico clínico, Detección temprana de enfermedades, Monitoreo continuo, Detección viral y Medicina personalizada.

Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico fue realizado utilizando VOSviewer versión 1.6.20.

Se desarrollaron tres análisis principales:

Análisis de la coocurrencia de palabras clave

Permite identificar las relaciones conceptuales entre las palabras clave más utilizadas por los autores (Ver figura 2).

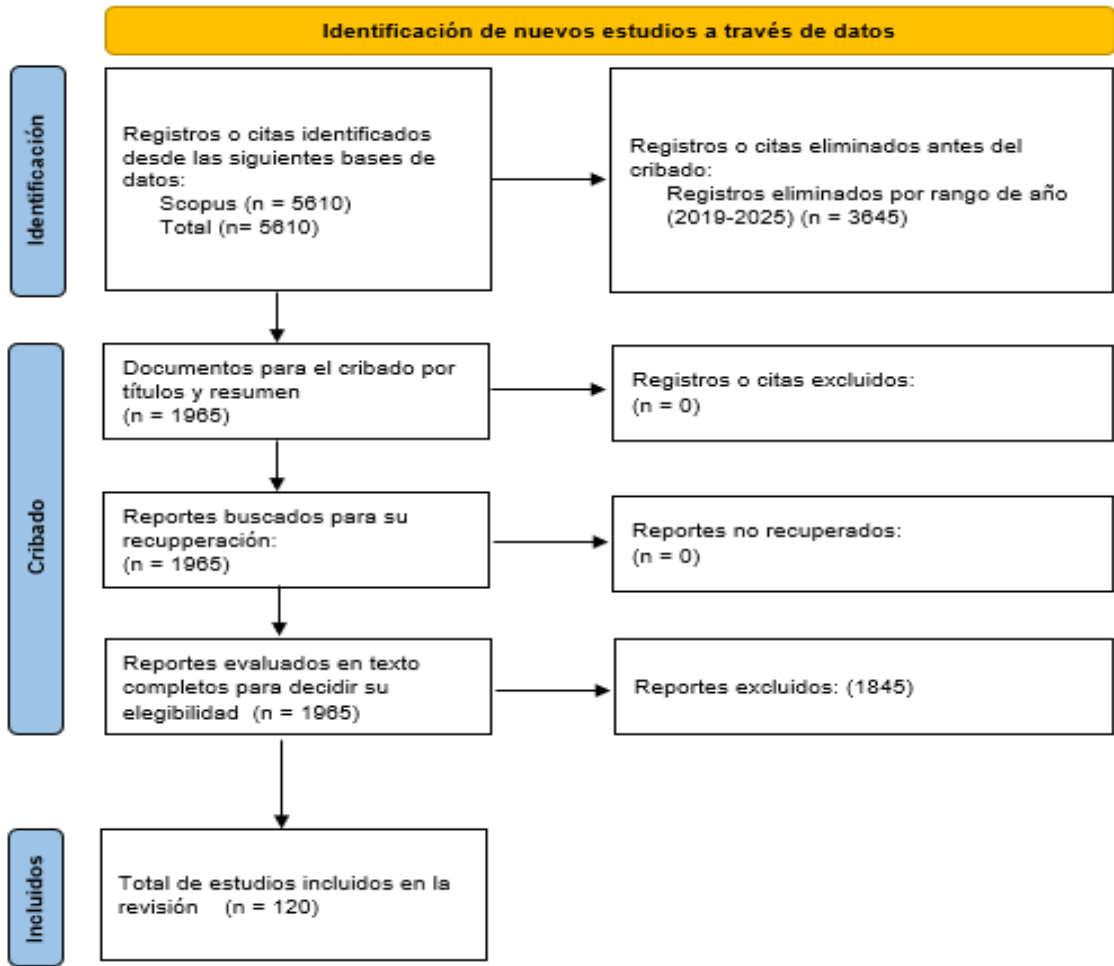


Fig 1 Flujo PRISMA: de 5,610 registros iniciales en Scopus (2020-2024), se seleccionaron 120 artículos para análisis bibliométrico.

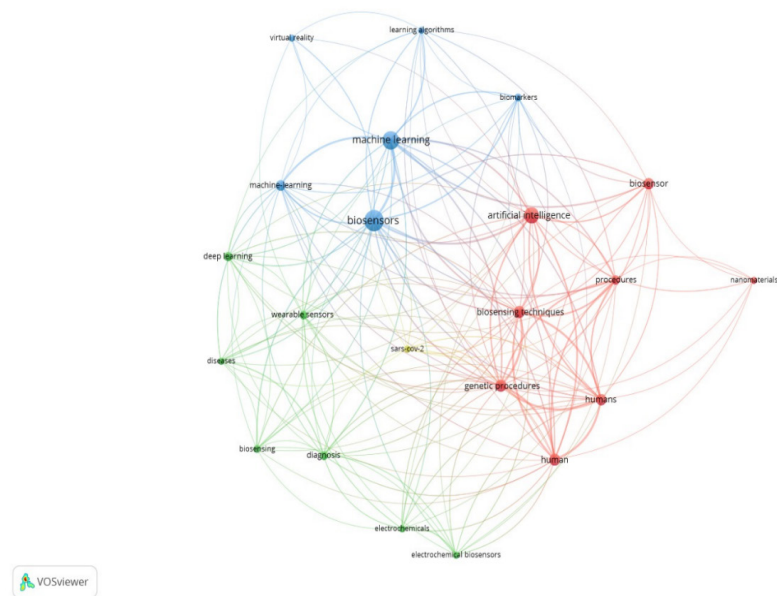


Fig 2: Red de coocurrencia de palabras clave (VOSviewer). Tamaño de nodos = frecuencia; conexiones = asociación; colores = clústeres temáticos.

Análisis de densidad

Permite identificar las áreas de investigación con mayor concentración científica (Ver figura 3).

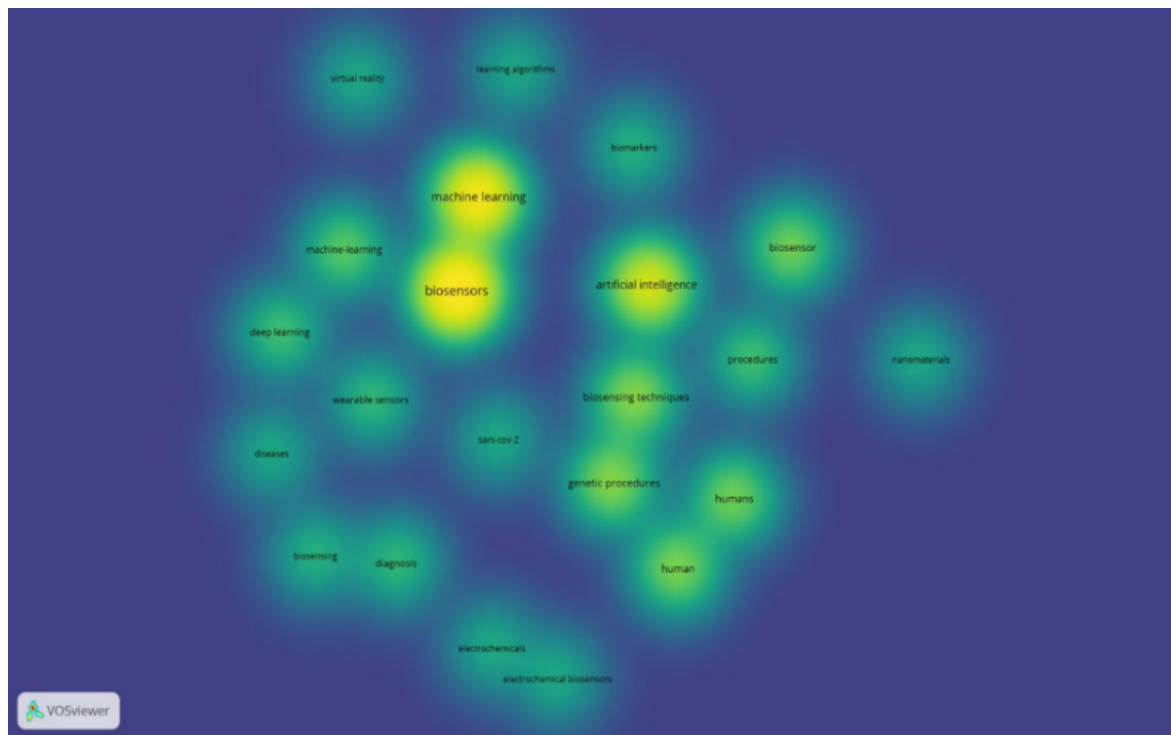


Fig 3: Mapa de densidad de palabras clave (VOSviewer). Colores cálidos (amarillo) = mayor frecuencia/relevancia; colores fríos (verde/azul) = menor densidad.

El mapa de densidad permite identificar las áreas de investigación con mayor concentración científica dentro del campo analizado. Las regiones de mayor intensidad se encuentran asociadas a los términos “*biosensors*”, “*machine learning*” y “*artificial intelligence*”, lo que confirma que estas tres temáticas constituyen actualmente el principal foco de investigación.

La elevada densidad observada alrededor de *Machine Learning* indica que esta tecnología se ha convertido en la herramienta dominante para el análisis de señales generadas por biosensores electroquímicos. La literatura reciente muestra que algoritmos como Random Forest, Redes Neuronales Artificiales y técnicas de aprendizaje profundo permiten mejorar significativamente los procesos de clasificación y predicción en aplicaciones biomédicas.

Asimismo, la proximidad de conceptos como “*biosensing techniques*”, “*genetic procedures*” y “*human*” revela una fuerte orientación hacia aplicaciones clínicas y biomédicas. Este comportamiento sugiere que gran parte de las investigaciones actuales buscan desarrollar plataformas inteligentes para el diagnóstico temprano de enfermedades, monitoreo fisiológico y análisis de biomarcadores.

Una tendencia particularmente relevante es la creciente incorporación de biosensores inteligentes en sistemas portátiles y dispositivos de atención médica descentralizada (*Point-of-Care*), donde la combinación entre sensores electroquímicos y algoritmos de IA permite obtener diagnósticos rápidos, precisos y de bajo costo (Leal-Junior et al., 2024; Saini et al., 2024).

Análisis de la coautoría

Permite identificar grupos de investigación, líderes científicos y niveles de colaboración internacional (ver figura 4).

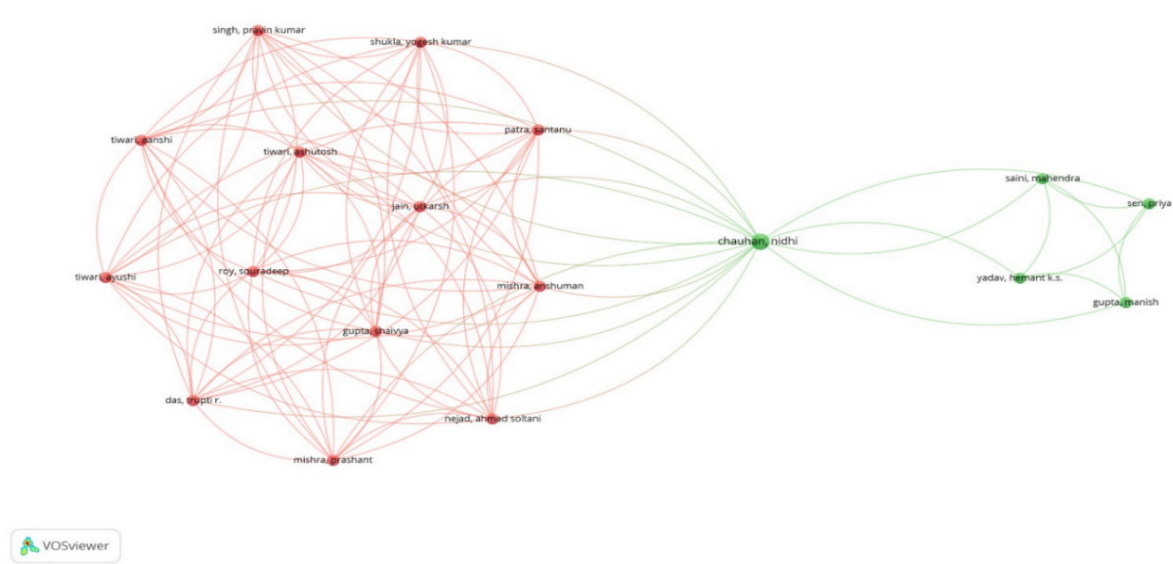


Fig 4: Red de coautoría (VOSviewer). Nodos = autores; conexiones = coautoría; tamaño = productividad; colores = grupos de colaboración.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tecnologías de biosensores electroquímicos y aplicaciones biomédicas.

La Tabla 1 resume aplicaciones biomédicas representativas, muestra, además, la evolución desde sensores aislados hacia sistemas orientados al paciente, integrados con plataformas clínicas, dispositivos portátiles y modelos predictivos.

Tabla 1. Principales aplicaciones biomédicas de los biosensores electroquímicos

Ref.	Aplicación biomédica	Biomarcador o señal objetivo	Aporte principal
Ding et al. (2023)	Diagnóstico oncológico	Células tumorales circulantes y elementos de reconocimiento molecular	Destaca la detección dinámica de células tumorales como línea clave para diagnóstico temprano y seguimiento clínico.
Chmaysssem et al. (2023)	Monitoreo de diabetes	Glucosa y variables asociadas al control metabólico	Analiza la evolución del monitoreo continuo de glucosa desde bases médicas hasta dispositivos comercializados.
Huang et al. (2023)	Enfermedad cardiovascular	Señales fisiológicas y marcadores cardiovasculares	Integra biosensores piezoeléctricos y aprendizaje automático para diagnóstico cardiovascular asistido.
Jin et al. (2023)	Monitoreo continuo de glucosa	Glucosa intersticial y señales continuas	Relaciona biosensores e IA para mejorar la interpretación y predicción en sistemas de monitoreo continuo.
Jung et al. (2024)	Diabetes mellitus y complicaciones	Biomarcadores electroquímicos en tiempo real	Revisa sensores electroquímicos portátiles para seguimiento en tiempo real de diabetes y complicaciones asociadas.

El diagnóstico biomédico es el principal motor de innovación. Enfermedades crónicas de alta prevalencia requieren seguimiento frecuente, lo que explica el interés en dispositivos portátiles con alta sensibilidad, estabilidad y capacidad de interpretación de señales.

El diagnóstico oncológico y la detección de biomarcadores específicos impulsan plataformas más selectivas que integran reconocimiento molecular, señales electroquímicas y análisis de datos, acercando el diagnóstico temprano a escenarios clínicos reales. Los biosensores electroquímicos emplean diversos principios de transducción que afectan sensibilidad, selectividad, tiempo de respuesta, costo e integración portátil. En la literatura destacan sensores basados en grafeno, métodos sin etiqueta, sensores de sudor, plataformas SERS y dispositivos autoalimentados.

La Tabla 2 compara tecnologías representativas reportadas en la literatura reciente. Aunque no todas corresponden estrictamente al mismo principio electroquímico, todas se relacionan con plataformas de biosensado orientadas a diagnóstico y monitoreo biomédico. La inclusión de sensores de sudor, microdispositivos ópticos y fotoelectroquímicos permite observar una tendencia clara hacia sistemas híbridos, miniaturizados y energéticamente eficientes. Este comportamiento es relevante porque la frontera actual del área no está limitada al electrodo, sino a la integración funcional del dispositivo completo.

Tabla 2. Tecnologías de biosensado y emergentes para salud digital.

Ref.	Tecnología	Principio/Característica	Ventaja/Aplicación futura
Ameku et al. (2022)	Grafeno inducido por láser	Transducción electroquímica	Alta sensibilidad, fabricación rápida, portátil
Rahn et al. (2023)	Métodos sin etiqueta	Cambios electroquímicos	Detección directa, reduce pasos, Point-of-Care
Bilbao et al. (2023)	Sensores de sudor	Medición de metabolitos/electrolitos	Monitoreo no invasivo y continuo
Lee et al. (2024)	Microdispositivos SERS	Señal Raman intensificada	Mejora sensibilidad, miniaturización
Zhu et al. (2024)	Sensor autoalimentado	Conversión fotoelectroquímica	Reduce dependencia energética, autónomo
Liu et al. (2023)	Biosensores flexibles	Materiales blandos	Integración corporal, monitoreo prolongado

Las tecnologías electroquímicas destacan por bajo costo, miniaturización y compatibilidad biológica. Los sensores de grafeno inducido por láser permiten fabricación rápida y dispositivos flexibles, mientras que los métodos sin etiqueta reducen complejidad para aplicaciones *Point-of-Care*. Tecnologías híbridas como SERS y fotoelectroquímicas mejoran

sensibilidad y autonomía energética, mientras los sensores de sudor refuerzan el monitoreo no invasivo. La tendencia apunta a dispositivos integrados, portátiles y operativos en contextos clínicos y extraclínicos.

La evolución reciente de los biosensores se encuentra estrechamente vinculada con materiales avanzados, nanotecnología, electrónica flexible y sistemas vestibles. Estas tecnologías buscan superar limitaciones tradicionales como rigidez del dispositivo, baja estabilidad, dificultades de integración corporal y dependencia de laboratorios especializados. El interés actual se centra en plataformas que puedan operar cerca del paciente y generar información continua. Por ello, los materiales biocompatibles y las estructuras flexibles son elementos estratégicos.

Las tecnologías emergentes muestran una tendencia clara hacia la integración del biosensor con el cuerpo humano y con sistemas digitales de salud. Los materiales flexibles y biocompatibles permiten mejorar comodidad, adherencia y estabilidad de la señal durante periodos largos. Asimismo, los textiles inteligentes amplían el campo de aplicación hacia prendas funcionales capaces de monitorear variables fisiológicas. Esta línea resulta especialmente relevante para seguimiento domiciliario, rehabilitación y medicina preventiva.

Por otra parte, los nanomateriales y MXenes contribuyen a mejorar límites de detección, conductividad y funcionalización superficial. Estas propiedades son determinantes para detectar biomarcadores en concentraciones muy bajas y en matrices biológicas complejas. La bioelectrónica blanda y el diagnóstico Point-of-Care complementan esta tendencia al favorecer sistemas menos invasivos y más cercanos al usuario. En consecuencia, el futuro de los biosensores se orienta hacia plataformas inteligentes, conectadas y personalizables.

Inteligencia artificial aplicada a biosensores electroquímicos y tendencias futuras

La Tabla 3 resume técnicas de IA identificadas: quimiometría, redes neuronales, aprendizaje automático aplicado a SERS, IA en sensores químicos y análisis predictivo para monitoreo continuo. La IA funciona como capa analítica transversal que conecta la señal del biosensor con información interpretable para diagnóstico o toma de decisiones.

Tabla 3. Técnicas de IA y aplicaciones diagnósticas en biosensores.

Ref.	Técnica/Enfoque IA	Función/Aplicación	Ventaja
Ding et al. (2023)	Machine Learning + SERS	Diagnóstico médico / Clasificación espectral	Extracción de información de señales complejas
Yoon (2024)	IA/ML en sensores químicos	Clasificación, predicción, análisis automatizado	Mejora desempeño analítico
Jin et al. (2023)	IA en monitoreo glucosa	Predicción de series temporales	Optimiza control glucémico
Sun et al. (2024)	Deep Learning	Análisis salival con biosensores colorimétricos	Interpretación automática
Huang et al. (2023)	Machine Learning	Diagnóstico cardiovascular	Asociación señales fisiológicas-diagnóstico
Taha et al. (2024)	IA + biosensores ópticos/nanomateriales	Diagnóstico de cáncer	Visión panorámica de plataformas inteligentes

El aprendizaje automático es la estrategia más extendida por su versatilidad para clasificar estados clínicos y predecir tendencias fisiológicas. Las redes neuronales son clave cuando la relación señal-variable es no lineal, frecuente en biosensores miniaturizados. El avance futuro requiere de bases de datos amplias, validación externa y modelos explicables para facilitar la aceptación clínica. El aprendizaje automático es la estrategia más extendida por su versatilidad para clasificar estados clínicos y predecir tendencias fisiológicas. Las redes neuronales son clave cuando la relación señal-variable es no lineal, frecuente en biosensores miniaturizados. El avance futuro requiere bases de datos amplias, validación externa y modelos explicables para facilitar la aceptación clínica.

La IA amplía la capacidad diagnóstica al reconocer patrones de enfermedad, diferenciar grupos clínicos y estimar riesgos a partir de datos complejos, convirtiéndose en componente estratégico para diagnóstico temprano.

Se incluyen análisis salival con **deep learning**, diagnóstico cardiovascular, monitoreo de glucosa, diagnóstico médico con SERS y detección de cáncer apoyada en nanomateriales. Estas aplicaciones reflejan una orientación clara hacia sistemas inteligentes que combinan detección, interpretación y soporte a decisiones. El énfasis ya no está únicamente en medir, sino en convertir la medición en información clínica útil.

La IA es especialmente valiosa cuando el biosensor genera señales multidimensionales. En cáncer y enfermedades cardiovasculares, los algoritmos identifican patrones sutiles de biomarcadores; en diabetes, analizan series temporales para control metabólico, con el fortalecimiento de la relación entre biosensores y medicina personalizada.

Las plataformas no convencionales (colorimétricas, SERS, ópticas) se benefician del *machine learning* al generar datos ricos pero complejos. La precisión diagnóstica depende cada vez más de la sinergia entre diseño del sensor y diseño del algoritmo, con requerimiento de validación en poblaciones clínicas reales.

Las tendencias futuras del campo se orientan hacia la convergencia entre biosensores, inteligencia artificial, dispositivos vestibles, conectividad e infraestructura digital. Esta integración permite que los sensores no funcionen como instrumentos aislados, sino como nodos de sistemas de salud conectados. La mejora de la calidad de datos, la interoperabilidad y el procesamiento en tiempo real serán factores determinantes. En este escenario, la IA actuará como herramienta de interpretación, control y soporte clínico.

La Tabla 4 presenta líneas emergentes asociadas con la nueva generación de biosensores inteligentes. Se incluyen sensores ópticos y de fibra para salud, mejora de datos vestibles mediante IA, dispositivos digitales habilitados por biosensado, biosensores libres de células e integración sistémica. Estas tendencias muestran que el campo se dirige hacia plataformas más autónomas, conectadas y programables. Su impacto potencial se relaciona con monitoreo remoto, diagnóstico personalizado y sistemas inteligentes de atención médica.

Tabla 4. Tendencias futuras en biosensores asistidos por IA.

Ref.	Tendencia futura	Elemento tecnológico clave	Impacto esperado
Leal-Junior et al. (2024)	Sensores ópticos y fibra óptica para salud	IoT, fotónica e IA en dispositivos vestibles	Contribuye a la nueva generación de dispositivos sanitarios inteligentes y conectados.
Lim et al. (2024)	Calidad de datos en biosensores vestibles	IA para depuración y mejora de datos	Reduce ruido, pérdidas de señal y errores en datos biomédicos portátiles.
Mishra et al. (2024)	Dispositivos digitales habilitados por biosensado	Integración de biosensores en salud digital	Plantea una transición hacia plataformas clínicas integradas y conectadas.
Soudier et al. (2022)	Biosensores libres de células e IA	Integración IA-biología sintética	Amplía la capacidad de diseño, predicción y optimización de biosensores programables.
McLamore et al. (2023)	Mundo conectado y soporte sistémico mediante biosensores	Biosensores conectados a sistemas de soporte	Define el biosensor como componente de ecosistemas inteligentes de toma de decisiones.

La revisión evidencia que la calidad de los datos es uno de los retos centrales para la adopción clínica de biosensores asistidos por IA. Los dispositivos vestibles generan información continua, pero también presentan pérdidas de señal, ruido y variabilidad entre usuarios. Por esta razón, los modelos de IA orientados a depuración y corrección de datos son cada vez más necesario. Esta línea permite aumentar confiabilidad y reducir falsos resultados en monitoreo remoto.

De manera complementaria, la integración con IoT, fotónica, biología sintética y sistemas conectados ampliará la función del biosensor dentro de ecosistemas digitales. Mishra et al. (2024). Los biosensores libres de células y las plataformas conectadas sugieren un futuro donde el dispositivo puede diseñarse, programarse y optimizarse con apoyo computacional. Sin embargo, es indispensable avanzar en explicabilidad, regulación y validación clínica. Así, la próxima etapa estará marcada por biosensores inteligentes, interoperables y clínicamente confiables.

Integración de la Inteligencia Artificial en los Biosensores Electroquímicos

La integración de IA con biosensores electroquímicos transforma la medicina digital al convertir dispositivos de adquisición de señales en sistemas capaces de interpretar información compleja y generar predicciones clínicas en tiempo real. Los resultados bibliométricos obtenidos muestran que términos como *Machine Learning*, *Artificial Intelligence*, *Biosensors*, *Diagnosis* y *Biomarkers* presentan una elevada conectividad dentro de las redes de coocurrencia, lo que evidencia una fuerte interacción entre ambas disciplinas. Asimismo, el crecimiento simultáneo de conceptos asociados a sensores portátiles, análisis predictivo e Internet de las Cosas indica que la investigación actual se orienta hacia sistemas inteligentes capaces de operar de manera autónoma dentro de ecosistemas digitales de salud (Tabla 5).

Tabla 5. Integración IA-Biosensores: aplicaciones, arquitecturas y tendencias futuras.

Ref.	Tecnología/Arquitectura	Técnica IA	Aplicación/Impacto	Nivel
Krishnan et al. (2023)	Biosensor electroquímico	Machine Learning	Clasificación de biomarcadores / Diagnóstico automatizado	Consolidado
Leal-Junior et al. (2024)	Sensor portátil + Wearable Biosensing	Deep Learning	Monitoreo fisiológico continuo / Monitoreo remoto	En crecimiento
Mishra et al. (2024)	Sistema integrado + Point-of-Care	Predictive Analytics + Cloud AI	Predicción de enfermedades / Respuesta inmediata	Emergente
Krishnan et al. (2023)	Digital Twins	-	Predicción personalizada	Emergente

DISCUSIÓN

Análisis de las tendencias de investigación y la evolución científica

Los resultados de este estudio confirman un crecimiento exponencial en la integración de la inteligencia artificial en biosensores electroquímicos durante el período 2020-2024. El análisis bibliométrico revela que *Machine Learning*, *Inteligencia Artificial*, *Biosensores* y *Diagnóstico* constituyen el núcleo temático, evidenciando una transición hacia sistemas inteligentes capaces de interpretar señales biomédicas complejas. Este hallazgo coincide con lo reportado por Krishnan et al. (2023) y Leal-Junior et al. (2024), quienes destacan el papel de la IA en la optimización de señales para diagnóstico clínico. La dominancia de *Machine Learning* en el mapa de densidad sugiere que esta tecnología se ha convertido en el estándar para el procesamiento de datos, mientras que términos emergentes como *Deep Learning* y *Edge Computing* indican una evolución hacia sistemas más autónomos y con menor latencia para aplicaciones de *Point-of-Care*.

Un hallazgo relevante es la creciente convergencia de los biosensores con el Internet de las Cosas Médicas (IoMT) y los dispositivos portátiles. Esta tendencia apunta a la creación de ecosistemas de salud digital capaces de realizar un monitoreo continuo y predictivo (McLamore & Datta, 2023; Mishra et al., 2024). Sin embargo, el análisis bibliométrico se ha centrado en aspectos de co-ocurrencia y densidad. Futuros estudios pueden beneficiarse de análisis más sofisticados, como la evolución temporal de los clústeres (análisis *overlay*) o la detección de *bursts* de palabras clave, para identificar con mayor precisión los temas emergentes frente a los declinantes (Yoon, 2024). Esta limitación metodológica abre una línea de investigación futura para profundizar en la dinámica temporal del campo.

Implicaciones para la Educación en Ingeniería y Ciencias de la Salud

Más allá del ámbito biomédico y tecnológico, los hallazgos de esta revisión tienen profundas implicaciones para

la educación. La rápida evolución de estas tecnologías exige una actualización significativa de los currículos en ingeniería biomédica, química y ciencias de la salud. No basta con enseñar los principios de la electroquímica o la instrumentación; es fundamental integrar la alfabetización en datos y el aprendizaje automático como herramientas transversales (Mishra et al., 2024). Asimismo, es imperativo incorporar componentes de ética, equidad y diseño centrado en el usuario, para que los futuros profesionales comprendan que la tecnología no es neutral y que sus diseños pueden perpetuar o reducir desigualdades (Panch et al., 2019). Los biosensores inteligentes representan una plataforma didáctica excepcional para la enseñanza de conceptos complejos de forma interdisciplinaria, conectando la química analítica, la física de semiconductores, la electrónica y la ciencia de datos. La formación debe enfatizar que el desarrollo de biosensores no termina en el laboratorio; su éxito social depende de la capacidad de los ingenieros para colaborar con comunidades, diseñar interfaces intuitivas, garantizar la asequibilidad y abordar las barreras de alfabetización digital que enfrentan muchos usuarios potenciales (Susilawati et al., 2025). Además, su potencial como herramientas didácticas es inmenso. La implementación de proyectos prácticos con biosensores de bajo costo y el uso de plataformas de IA accesibles puede fomentar el aprendizaje basado en problemas y preparar a los futuros ingenieros y profesionales de la salud para un ecosistema digital. Estos proyectos pueden, además, sensibilizar a los estudiantes sobre las realidades de las comunidades marginadas y la importancia de diseñar soluciones tecnológicas que respondan a sus necesidades específicas. La formación continua de los profesionales sanitarios también debe adaptarse, ello enfatiza la interpretación de datos generados por estos dispositivos y la comprensión de los principios de la IA (explicabilidad) para una toma de decisiones clínica informada y segura (Mishra et al., 2024). Sin esta conexión educativa, el impacto formativo de estas innovaciones se diluye, queda confinado a laboratorios de investigación y alejado de las aulas y la práctica clínica diaria.

Barreras para la Implementación en Entornos Reales

A pesar del prometedor panorama, la traslación de estos biosensores de la mesa de laboratorio a la práctica clínica o comunitaria enfrenta obstáculos significativos (Saini et al., 2024), que este estudio no aborda en profundidad. El análisis se ha mantenido en un plano teórico-bibliométrico, y es crucial reconocer las barreras reales para la implementación. En primer lugar, los costos de producción y escalabilidad siguen siendo un desafío. Muchos materiales avanzados (como el grafeno o los MXenes) y procesos de fabricación son costosos y difíciles de estandarizar, lo que limita su producción masiva y abaratamiento. Esta realidad económica implica que, sin intervenciones deliberadas (como subsidios o modelos de negocio de bajo costo), estas tecnologías pueden quedar reservadas para sistemas de salud de países de altos ingresos, exacerbando las desigualdades existentes (Tayfour et al., 2024). En segundo lugar, la brecha digital y la infraestructura son barreras críticas, especialmente en regiones como América Latina, África o el Sudeste Asiático. La promesa de un monitoreo remoto para “comunidades rurales” choca con la realidad de la falta de conectividad a Internet (IoT), inestabilidad eléctrica y ausencia de redes de comunicación robustas (Leal-Junior et al., 2024; Lim et al., 2024). En América Latina, por ejemplo, la brecha digital en salud es especialmente alta en zonas rurales, donde la diferencia de acceso a Internet entre zonas urbanas y rurales sigue siendo profunda. Esto subraya la necesidad de desarrollar sistemas que puedan operar offline o con conectividad intermitente. En tercer lugar, la validación en poblaciones diversas es insuficiente. La mayoría de los estudios se realizan en condiciones de laboratorio altamente controladas y con muestras de suero o plasma, no en la complejidad de los fluidos corporales (sudor, saliva, sangre) de pacientes con múltiples comorbilidades, lo que puede generar sesgos y reducir la precisión de los modelos predictivos. Esta falta de diversidad en los conjuntos de datos de entrenamiento de los algoritmos de IA puede generar un sesgo algorítmico que afecte desproporcionadamente a ciertos grupos étnicos o socioeconómicos; por ejemplo, se han documentado variaciones diferenciales en las respuestas ópticas según el tono de piel o en la química del sudor entre grupos étnicos (Vyas et al., 2020). Por último, los marcos regulatorios no están preparados. La aprobación de dispositivos médicos que integran algoritmos de IA en constante evolución (*software as a medical device*) plantea desafíos éticos y legales sin precedentes, como la responsabilidad por errores diagnósticos o la explicabilidad de las decisiones algorítmicas (Mishra et al., 2024; Sun et al., 2024). Además, la recopilación masiva de datos de salud plantea serias preocupaciones sobre la privacidad y la posibilidad de que

empleadores o aseguradoras utilicen esta información de manera discriminatoria (Ienca & Vayena, 2020).

Contexto Global y Alineación con los ODS

Para que este campo trascienda el ámbito académico y tenga un impacto social tangible, es fundamental contextualizar estos avances en el marco de las políticas internacionales de salud. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha lanzado su Estrategia Mundial de Salud Digital 2020-2025, que promueve el uso de tecnologías como la IA y los biosensores para lograr la cobertura sanitaria universal. Este estudio se alinea directamente con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 3: Salud y Bienestar, al ofrecer una hoja de ruta para el diagnóstico temprano y el monitoreo de enfermedades que pueden reducir la mortalidad prematura.

Comparativamente, iniciativas como el programa Horizonte Europa en biosensores, los proyectos del *National Institutes of Health* (NIH) en sensores portátiles, y los programas de salud digital en África y Asia (como los que utilizan dispositivos Point-of-Care para el VIH o la malaria) muestran que los desafíos son globales, pero las soluciones deben adaptarse al contexto (Mishra et al., 2024). América Latina, con sus particularidades de desigualdad y sistemas de salud fragmentados, puede beneficiarse enormemente de estas tecnologías, pero necesita desarrollar marcos de implementación propios que consideren sus realidades (Susilawati et al., 2025). La colaboración Sur-Sur y el intercambio de experiencias con países de ingresos similares (por ejemplo, en el Sudeste Asiático) pueden ser más fructíferos que la simple adaptación de modelos de países de altos ingresos.

Repercusiones sociales y económicas

Desde una perspectiva socio-económica, los biosensores electroquímicos asistidos por IA representan una oportunidad para optimizar recursos sanitarios (Mishra et al., 2024). El diagnóstico temprano puede reducir la necesidad de hospitalizaciones y tratamientos complejos, así alivian la carga sobre los sistemas de salud. Estudios recientes indican que la IA puede reducir los falsos positivos y negativos del 15-20% al 5-10%, lo que se traduce en menos pruebas confirmatorias, menor ansiedad para los pacientes y un uso más eficiente de los recursos (Tayfour et al., 2024). La medicina personalizada, impulsada por el monitoreo continuo, permite tratamientos más efectivos y con menos efectos secundarios. A nivel macroeconómico, se estima que el mercado global de biosensores electroquímicos crecerá de 24,95 mil millones de dólares en 2026 a cifras significativamente mayores en la próxima década, lo que evidencia el interés comercial y la necesidad de que los beneficios de este crecimiento

lleguen también a los sistemas de salud públicos y a las poblaciones más desatendidas. Sin embargo, para que estos beneficios sean equitativos, es crucial que el diseño de los dispositivos y los algoritmos se realice con poblaciones diversas y que se implementen políticas públicas que garanticen el acceso. Un dispositivo de bajo costo inicial no es equitativo si los consumibles recurrentes son inaccesibles o si requiere una conectividad o alfabetización digital que no está disponible para todos. La “brecha digital de la salud” puede convertirse en una nueva forma de desigualdad si estas tecnologías solo están disponibles para poblaciones con mayores recursos. Por lo tanto, la integración de la IA en biosensores no es solo un desafío tecnológico, sino también un desafío social, ético y político que debe ser abordado desde una perspectiva multidisciplinaria que incluya a las ciencias sociales y la salud pública.

CONCLUSIONES

Esta investigación identificó las principales tendencias científicas en la aplicación de IA en biosensores electroquímicos mediante revisión sistemática y análisis bibliométrico (2020-2024). Los resultados evidencian un crecimiento sostenido impulsado por algoritmos avanzados que mejoran el procesamiento de señales y la precisión diagnóstica. *Machine Learning*, *Deep Learning* y Redes Neuronales se han consolidado como herramientas fundamentales para optimizar el desempeño de los biosensores electroquímicos. La convergencia con IoMT, computación en la nube y dispositivos portátiles transforman la generación e interpretación de datos biomédicos, facilitan una atención médica más preventiva y descentralizada. Sin embargo, la verdadera revolución social de estas tecnologías no ocurrirá automáticamente. Requerirá un esfuerzo concertado para superar las barreras de costo, infraestructura, sesgo algorítmico y alfabetización digital que actualmente limitan su adopción en las poblaciones más vulnerables. El potencial para reducir desigualdades en el acceso a la salud mediante dispositivos portátiles y sistemas *Point-of-Care* es significativo, especialmente para comunidades rurales y regiones con infraestructura limitada, pero este potencial solo se materializará si los diseños son culturalmente apropiados, los costos son accesibles y los sistemas de salud pública incorporan estas herramientas de manera planificada. Desde una perspectiva económica, la adopción de biosensores inteligentes puede optimizar recursos sanitarios mediante detección temprana y reducción de hospitalizaciones, contribuye así, a la sostenibilidad de los sistemas de salud y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Se concluye que la integración de IA en biosensores electroquímicos constituye una herramienta con alto potencial

para generar beneficios sociales, económicos y sanitarios, pero su impacto final dependerá críticamente de las decisiones políticas, los marcos regulatorios y la voluntad de priorizar la equidad sobre el beneficio comercial. El fortalecimiento de la investigación interdisciplinaria que incluya a las ciencias sociales, la salud pública y la ética, y la colaboración academia-industria-gobierno serán fundamentales para acelerar la transferencia de estas innovaciones hacia aplicaciones reales que beneficien a toda la sociedad, y no solo a unos pocos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ameku, W. A., Negahdary, M., Lima, I. S., Santos, B. G., Oliveira, T. G., Paixão, T. R. L. C., & Angnes, L. (2022). Laser-Scribed Graphene-Based Electrochemical Sensors: A Review. *Chemosensors*, *10*(12), 505. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10120505>
- Bilbao, E., Garate, O., Rodríguez Campos, T., Roberti, M., Mass, M., Lozano, A., Longinotti, G., Monsalve, L., & Ybarra, G. (2023). Electrochemical Sweat Sensors. *Chemosensors*, *11*(4), 244. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11040244>
- Chmaysssem, A., Nadolska, M., Tubbs, E., Sadowska, K., Vadgama, P., Shitanda, I., Tsujimura, S., Lattach, Y., Peacock, M., Tingry, S., Marinesco, S., Mailley, P., La-blanché, S., Yves Benhamou P., & Zebda A., (2023). Insight into continuous glucose monitoring: From medical basics to commercialized devices. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *161*, 116998. <https://doi.org/10.1007/s00604-023-05743-w>
- Ding, R., Ye, M., Zhu, Y., Zhao, Y., Liu, Q., Cao, Y., & Xu, J. (2023). Toward dynamic detection of circulating tumor cells exploiting specific molecular recognition elements. *Chemosensors*, *11*(2), 99. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11020099>
- Huang, S., Gao, Y., Hu, Y., Shen, F., Jin, Z., & Cho, Y. (2023). Recent development of piezoelectric biosensors for physiological signal detection and machine learning assisted cardiovascular disease diagnosis. *RSC Advances*, *13*(42), 29174–29194. <https://doi.org/10.1039/d3ra05932d>
- Ilenca, M., & Vayena, E. (2020). On the responsible use of digital data to tackle the COVID-19 pandemic. *Nature Medicine*, *26*(4), 463–464. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0832-5>
- Jin, X., Cai, A., Xu, T., & Zhang, X. (2023). Artificial intelligence biosensors for continuous glucose monitoring. *Interdisciplinary Materials*, *2*(2), 290–307. <https://doi.org/10.1002/idm2.12069>
- Jung, H. H., Lee, H., Yea, J., & Jang, K.-I. (2024). Wearable electrochemical sensors for real-time monitoring in diabetes mellitus and associated complications. *Soft Science*, *4*(2), 10. <https://doi.org/10.20517/ss.2024.02>

- Krishnan, V., Pandey, G. R., & Pandiyaraj, K. (2023). Fundamentals of a biosensor system. En *Health and Environmental Applications of Biosensing Technologies: Clinical and Allied Health Science Perspective* (pp. 1–25). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19039-1.00001-8>
- Leal-Junior, A., Silva, J., Macedo, L., Marchesi, A., Morau, S., Valentino, J., Valentim, F., & Costa, M. (2024). The role of optical fiber sensors in the new generation of healthcare devices: A review. *Sensors and Diagnostics*, 3(7), 1135–1158. <https://doi.org/10.1039/d4sd00032c>
- Lee, S., Dang, H., Moon, J.-I., Kim, K., Joung, Y., Park, S., Yu, Q., Chen, J., Lu, M., Chen, L., Joo, S.-W., & Choo, J. (2024). SERS-based microdevices for use as in vitro diagnostic biosensors. *Chemical Society Reviews*, 53(11), 5394–5427. <https://doi.org/10.1039/d3cs01055d>
- Lim, T. H., Abdullah, A. F., & Lim, S. A. (2024). Improving quality of wearable biosensor data through artificial intelligence. In *Biosensors in Precision Medicine* (pp. 315–344). <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15380-8.00011-4>
- Liu, Y., Li, M., Zhou, B., Xuan, X., & Li, H., (2023). Flexible B, N co-doped graphene electrodes for electrochemical detection of serotonin in bodily fluids. *Electrochimica Acta*, 457, 142494. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142494>
- McLamore, E. S., & Datta, S. P. A. (2023). A connected world: System-level support through biosensors. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 16(1), 285–309. <https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-100322-040914>
- Mishra, A., Singh, P. K., Chauhan, N., Roy, S., Tiwari, A., Gupta, S., Tiwari, A., Patra, S., Das, T. R., Mishra, P., Nejad, A. S., Shukla, Y. K., Jain, U., & Tiwari, A. (2024). Emergence of integrated biosensing-enabled digital healthcare devices. *Sensors & Diagnostics*, 3(5), 718–744. <https://doi.org/10.1039/d4sd00017j>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Panch, T., Mattie, H., & Atun, R. (2019). Artificial intelligence and algorithmic bias: implications for health systems. *Journal of Global Health*, 9(2), 010318. <https://doi.org/10.7189/jogh.09.020318>
- Rahn, K. L., Peramune, U., Zhang, T., & Anand, R. K. (2023). Label-free electrochemical methods for disease detection. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 16(1), 123–145. <https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-091622-085754>
- Saini, M., Yadav, H. K. S., Sen, P., Gupta, M., & Mishra, N. (2024). Temperature biosensors. En *Fundamentals of Biosensors in Healthcare* (Vol. 1, pp. 243–272). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21658-9.00011-5>
- Soudier, P., Faure, L., Kushwaha, M., & Faulon, J.-L. (2022). Cell-free biosensors and AI integration. *Methods in Molecular Biology*, 2433, 303–323. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1998-8_19
- Sun, S., Ku, Y.-H., Unsuhay, N., Florez, O., Suk, J. Y., Yettisen, A. K., & Vega, K. (2024). BioCosMe: Lip-based cosmetics with colorimetric biosensors for salivary analysis using deep learning. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. <https://doi.org/10.1145/3675095.3676610>
- Susilawati, A., Al-Obaidi, A. S. M., Abduh, A., Irwansyah, F. S., & Nandiyanto, A. B. D. (2025). How to do research methodology: From literature review, bibliometric, step-by-step research stages, to practical examples in science and engineering education. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 10(1), 1–40. <https://doi.org/10.17509/ijost.v10i1.78637>
- Taha, B. A., Kadhim, A. C., Addie, A. J., Haider, A. J., Az-zahrani, A. S., Raizada, P., Rustagi, S., Chaudhary, V., & Arsad, N. (2024). Advancing cancer diagnostics through multifaceted optical biosensors supported by nanomaterials and artificial intelligence: A panoramic outlook. *Microchemical Journal*, 205, 111307. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111307>
- Tayfour Ahmed, A. E., Dhahi, T. S., Attia, T. A., Elhassan Ali, F. A., Elobaid, M. E., Adam, T., & Gopinath, S. C. B. (2024). AI-optimized electrochemical aptasensors for stable, reproducible detection of neurodegenerative diseases, cancer, and coronavirus. *Heliyon*, 11(1), e41338. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41338>
- Vyas, D. A., Eisenstein, L. G., & Jones, D. S. (2020). Hidden in plain sight — Reconsidering the use of race correction in clinical algorithms. *New England Journal of Medicine*, 383(9), 874–882. <https://doi.org/10.1056/NEJMms2004740>
- Yoon, J.-Y. (2024). Use of machine learning/artificial intelligence in chemical sensors and biosensors. In *Machine Learning and Artificial Intelligence in Chemical and Biological Sensing* (pp. 71–81). <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-22001-2.00003-2>
- Zhu, J., Shao, D., Wen, W., Tian, Z., Zhang, X., & Wang, S. (2024). Self-powered electrochemical sensor based on photoelectrode: An up-to-date review. *Coordination Chemistry Reviews*, 518, 216095. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216095>

CONFLICTO DE INTERESES:

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Autor.	Roles.
A.Y. Resendiz-Jaramillo	Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Escritura.
Luis Angel Iturralde Carrera	Supervisión, Validación, Metodología, Redacción.
D. Resendiz Jaramillo	Curación de datos, Análisis formal, Metodología, Escritura.
Luis Ángel Chávez Espínola	Supervisión, Validación, Metodología, Redacción
Juvenal Rodríguez-Reséndiz	Supervisión, Validación, Metodología, Redacción.

Universidad & Sociedad publica sus artículos bajo una licencia Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

