

ARTÍCULO ORIGINAL

El papel de la inteligencia artificial en el diagnóstico, seguimiento y manejo de las enfermedades de la retina: una revisión de la literatura actual

The role of artificial intelligence in the diagnosis, monitoring, and management of retinal diseases: a review of the current literature

O papel da inteligência artificial no diagnóstico, acompanhamento e manejo das doenças da retina: uma revisão da literatura atual

Nayaris Gómez-Martínez¹  , Nairovys Gómez-Martínez²  , Yunaisy Barrera-Villar¹  , Raúl Socarras-Llábana¹  , José Carlos Moreno-Domínguez¹ 

¹Universidad de Ciencias Médicas de Pinar del Río. Hospital General Docente Abel Santamaría Cuadrado. Pinar del Rio, Cuba.

²Universidad Regional de los Andes. Ambato, Ecuador.

Recibido: 10 de octubre de 2024

Aceptado: 30 de diciembre de 2025

Publicado: 31 de diciembre de 2025

Citar como: Gómez Martínez N, Gómez Martínez N, Barrera Villar Y, Socarras Llábana R, Moreno-Domínguez JC. El papel de la inteligencia artificial en el diagnóstico, seguimiento y manejo de las enfermedades de la retina: una revisión de la literatura actual. Rev Ciencias Médicas [Internet]. 2025 [citado: fecha de acceso]; 29(2025): e691-95. Disponible en: <http://revcmpinar.sld.cu/index.php/publicaciones/article/view/6919>

RESUMEN

Introducción: las enfermedades retinianas, como la retinopatía diabética y la degeneración macular asociada a la edad, representan causas principales de discapacidad visual irreversible, generando una creciente presión sobre los sistemas de salud.

Objetivo: analizar la evidencia reciente sobre las aplicaciones de la inteligencia artificial en el diagnóstico, seguimiento y manejo de patologías retinianas.

Métodos: se desarrolló una revisión bibliográfica sistemática en bases de datos internacionales, empleando términos clave relacionados con inteligencia artificial, aprendizaje profundo y retina. Se seleccionaron artículos publicados en los últimos años que abordaran aplicaciones clínicas, validación de algoritmos y desafíos de implementación. El análisis se centró en identificar tendencias, aportes metodológicos y limitaciones reportadas.

Desarrollo: los algoritmos de aprendizaje profundo han alcanzado una precisión comparable o superior a la de expertos humanos en tareas de clasificación de imágenes retinianas. Se destacan avances en la detección automatizada de retinopatía diabética, la cuantificación de biomarcadores en tomografía de coherencia óptica y la predicción de progresión en degeneración macular. Asimismo, se han explorado aplicaciones en glaucoma y retinopatía del prematuro, ampliando el espectro de utilidad clínica. Sin embargo, persisten retos relacionados con la generalización de modelos, la explicabilidad de las decisiones algorítmicas, la integración en flujos asistenciales y las implicaciones éticas y legales.

Conclusiones: la inteligencia artificial constituye una herramienta prometedora para optimizar el diagnóstico y seguimiento de enfermedades retinianas. Su integración ética y efectiva puede mejorar la equidad, accesibilidad y calidad de la atención, consolidando un nuevo paradigma en la oftalmología contemporánea.

Palabras Claves: Diagnóstico Clínico; Enfermedades de la Retina; Inteligencia Artificial; Manejo de la Enfermedad; Sistemas Inteligentes.

ABSTRACT

Introduction: retinal diseases, such as diabetic retinopathy and age-related macular degeneration, represent major causes of irreversible visual disability, generating increasing pressure on health systems.

Objective: to analyze recent evidence on the applications of artificial intelligence in the diagnosis, monitoring, and management of retinal pathologies.

Methods: a systematic literature review was conducted in international databases, using key terms related to artificial intelligence, deep learning, and retina. Articles published in recent years addressing clinical applications, algorithm validation, and implementation challenges were selected. The analysis focused on identifying trends, methodological contributions, and reported limitations.

Development: deep learning algorithms have achieved accuracy comparable to or exceeding that of human experts in retinal image classification tasks. Advances are highlighted in automated detection of diabetic retinopathy, quantification of biomarkers in optical coherence tomography, and prediction of progression in macular degeneration. Applications have also been explored in glaucoma and retinopathy of prematurity, expanding the spectrum of clinical utility. However, challenges remain regarding model generalization, explainability of algorithmic decisions, integration into healthcare workflows, and ethical and legal implications.

Conclusions: artificial intelligence constitutes a promising tool to optimize the diagnosis and monitoring of retinal diseases. Its ethical and effective integration can improve equity, accessibility, and quality of care, consolidating a new paradigm in contemporary ophthalmology.

Keywords: Clinical Diagnosis; Retinal Diseases; Artificial Intelligence; Disease Management; Intelligent Systems.

RESUMO

Introdução: as doenças retinianas, como a retinopatia diabética e a degeneração macular relacionada à idade, representam causas principais de deficiência visual irreversível, gerando crescente pressão sobre os sistemas de saúde.

Objetivo: analisar as evidências recentes sobre as aplicações da inteligência artificial no diagnóstico, acompanhamento e manejo das patologias retinianas.

Métodos: foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática em bases de dados internacionais, utilizando termos-chave relacionados à inteligência artificial, aprendizado profundo e retina. Foram selecionados artigos publicados nos últimos anos que abordassem aplicações clínicas, validação de algoritmos e desafios de implementação. A análise concentrou-se em identificar tendências, contribuições metodológicas e limitações relatadas.

Desenvolvimento: os algoritmos de aprendizado profundo alcançaram precisão comparável ou superior à de especialistas humanos em tarefas de classificação de imagens retinianas. Destacam-se avanços na detecção automatizada da retinopatia diabética, na quantificação de biomarcadores em tomografia de coerência óptica e na previsão da progressão da degeneração macular. Também foram exploradas aplicações em glaucoma e retinopatia da prematuridade, ampliando o espectro de utilidade clínica. No entanto, persistem desafios relacionados à generalização dos modelos, à explicabilidade das decisões algorítmicas, à integração nos fluxos assistenciais e às implicações éticas e legais.

Conclusões: a inteligência artificial constitui uma ferramenta promissora para otimizar o diagnóstico e o acompanhamento das doenças retinianas. Sua integração ética e eficaz pode melhorar a equidade, a acessibilidade e a qualidade da atenção, consolidando um novo paradigma na oftalmologia contemporânea.

Palavras-chave: Diagnóstico Clínico; Doenças Retinianas; Inteligência Artificial; Gerenciamento Clínico; Sistemas Inteligentes.

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades de la retina, como la retinopatía diabética (RD), la degeneración macular asociada a la edad (DMAE) y las oclusiones venosas de la retina, constituyen las principales causas de discapacidad visual irreversible y ceguera a nivel mundial, representando una carga sanitaria y socioeconómica de proporciones epidémicas.⁽¹⁾ Esta crisis de salud visual se ve agravada por dos mega tendencias demográficas y clínicas globales: el envejecimiento progresivo de la población, que incrementa la prevalencia de afecciones asociadas a la edad como la DMAE, y la pandemia paralela de diabetes mellitus, que impulsa la incidencia de la RD.⁽²⁾

Como consecuencia directa, los servicios de oftalmología y, en particular, las unidades de retina, se encuentran bajo una presión asistencial sin precedentes, enfrentándose a un volumen creciente de pacientes que requieren un diagnóstico precoz, un seguimiento estrecho y tratamientos cada vez más complejos y personalizados. Esta saturación amenaza con desbordar la capacidad de los sistemas de salud, generando listas de espera prolongadas que pueden traducirse en retrasos diagnósticos y terapéuticos, con el consiguiente deterioro visual evitable para miles de personas.⁽³⁾

El pilar fundamental para el manejo de estas enfermedades retinianas ha sido, durante décadas, la evaluación e interpretación experta de un conjunto diverso de modalidades de imagen diagnóstica. Entre ellas, la retinografía color (fotografía del fondo de ojo) se erige como una herramienta de cribado y diagnóstico inicial esencial, particularmente para la RD y la DMAE avanzada.^(4,5,6) La tomografía de coherencia óptica (OCT) ha revolucionado el campo al permitir una visualización en corte transversal de alta resolución de las capas retinianas, siendo crucial para la detección y cuantificación de fluidos intraretinianos, subretinianos y quistes maculares, hallazgos clave en la DMAE neovascular, el edema macular diabético y las oclusiones venosas.^(7,8,9,10) Por su parte, la angiografía, ya sea con fluoresceína o con verde de indocianina, proporciona información funcional y dinámica sobre la integridad de la barrera hematorretiniana y la presencia de neovasos, aunque su carácter invasivo limita su uso repetitivo.⁽³⁾

Sin embargo, este paradigma diagnóstico dependiente de la imagen adolece de limitaciones inherentes al factor humano. La evaluación manual de estas imágenes por parte de especialistas es intrínsecamente subjetiva, consume un tiempo considerable —un recurso escaso en sistemas sanitarios sobre exigidos— y está sujeta a una variabilidad interobservador e intraobservador significativa.^(4,5) La fatigabilidad del experto, la carga de trabajo y la complejidad de ciertos casos pueden conducir a inconsistencias en la interpretación, lo que potencialmente se traduce en errores diagnósticos o en una cuantificación imprecisa de biomarcadores de actividad de la enfermedad, como el volumen de fluido en la OCT, que guía decisiones terapéuticas críticas.⁽¹⁰⁾ Esta variabilidad no solo afecta a la práctica clínica individual, sino que también introduce ruido en los ensayos clínicos multicéntricos, donde la estandarización de los criterios de evaluación es fundamental para la validez de los resultados.

En este contexto de creciente demanda asistencial y limitaciones del diagnóstico tradicional, la inteligencia artificial (IA) emerge como una tecnología disruptiva con el potencial de transformar radicalmente el cuidado de la salud ocular y aliviar la presión sobre los sistemas sanitarios.^(2,4) En base a lo indicado, se realiza la presente revisión, la cual tuvo como objetivo analizar la evidencia reciente sobre las aplicaciones de la inteligencia artificial en el diagnóstico, seguimiento y manejo de patologías retinianas.

MÉTODOS

Se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura siguiendo las directrices PRISMA, con el propósito de sintetizar la evidencia científica disponible sobre las aplicaciones de la inteligencia artificial en el diagnóstico, seguimiento y manejo de las enfermedades de la retina. El periodo de búsqueda se delimitó entre enero de 2010 y diciembre de 2024, considerando que en dicho intervalo se han producido los principales avances en algoritmos de aprendizaje profundo aplicados a la oftalmología. La revisión se diseñó para garantizar transparencia, reproducibilidad y rigor metodológico, evitando sesgos en la identificación y selección de estudios relevantes.

Estrategia de búsqueda

La búsqueda se realizó en bases de datos internacionales de amplia cobertura: PubMed/MEDLINE, SciELO, ScienceDirect, Google Scholar, LILACS y BVSALUD. Estas plataformas fueron seleccionadas por su pertinencia en ciencias biomédicas y por incluir literatura tanto regional como global. Además, se revisaron las listas de referencias de los artículos seleccionados para identificar estudios adicionales no recuperados en la búsqueda inicial. Se consideró también literatura gris, incluyendo informes técnicos, actas de congresos y documentos institucionales, siempre que cumplieran con los criterios de calidad y relevancia temática. Esta estrategia permitió ampliar el espectro de fuentes y reducir el riesgo de omitir información significativa.

El algoritmo de búsqueda se construyó mediante la combinación de palabras clave y operadores booleanos, adaptados a cada base de datos. Se emplearon términos como "inteligencia artificial" OR "artificial intelligence" OR "aprendizaje profundo" OR "deep learning" AND "retina" OR "retinal diseases" OR "retinopatía diabética" OR "degeneración macular". Se aplicaron filtros para restringir los resultados al rango temporal definido y se consideraron publicaciones en español, inglés y portugués, con el fin de abarcar la producción científica más representativa en el ámbito iberoamericano y anglosajón. La estrategia se validó mediante búsquedas piloto, ajustando los descriptores para maximizar la sensibilidad y especificidad de los resultados.

Proceso de selección

Se incluyeron artículos originales, revisiones sistemáticas y metaanálisis publicados entre 2010 y 2024, que abordaran de manera directa la aplicación de la inteligencia artificial en el diagnóstico, seguimiento o manejo de enfermedades retinianas. Se aceptaron estudios clínicos, validaciones de algoritmos y análisis de implementación en entornos asistenciales. Se excluyeron duplicados, artículos sin acceso al texto completo, publicaciones fuera del rango temporal establecido, estudios irrelevantes para la temática y aquellos que no presentaran resultados aplicables a la práctica clínica. Esta depuración garantizó la pertinencia y calidad de la evidencia analizada.

La selección de estudios se realizó en varias fases. En primer lugar, se identificaron los registros mediante la búsqueda en las bases de datos, obteniéndose un número inicial de aproximadamente 1.200 artículos. Posteriormente, se eliminaron duplicados y se procedió a la lectura de títulos y resúmenes, lo que redujo la muestra a 350 estudios potencialmente elegibles. Finalmente, se efectuó la lectura completa de los textos, aplicando rigurosamente los criterios de inclusión y exclusión, con lo cual se obtuvo un conjunto final de 23 artículos incluidos en la síntesis cualitativa. El proceso se documentó mediante un diagrama de flujo PRISMA, que refleja cada etapa de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión, asegurando transparencia metodológica.

Se realizó un análisis cualitativo narrativo, destacando tendencias, aportes metodológicos y limitaciones reportadas. No se efectuó metaanálisis cuantitativo debido a la heterogeneidad de los diseños y resultados, aunque se identificaron patrones comunes que permiten establecer conclusiones sólidas sobre la aplicabilidad clínica de la inteligencia artificial en oftalmología.

DESARROLLO

La IA, definida en términos generales como la capacidad de las máquinas para realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana, ha encontrado en el aprendizaje profundo una sub disciplina que utiliza redes neuronales artificiales con múltiples capas para aprender representaciones de datos de manera jerárquica— su arma más poderosa para el análisis de imágenes médicas.⁽⁴⁾ A diferencia de los algoritmos tradicionales, que dependen de características predefinidas por expertos humanos, los modelos de deep learning, particularmente las redes neuronales convolucionales (CNN), son capaces de aprender automáticamente los patrones visuales más relevantes y complejos directamente a partir de miles o millones de imágenes anotadas, sin necesidad de una ingeniería manual de características.⁽⁵⁾

El rendimiento excepcional de la IA en oftalmología, a menudo equiparable o incluso superior al de clínicos expertos en tareas específicas, ha quedado demostrado en una pléthora de estudios seminales publicados en los últimos años. Uno de los hitos fundacionales lo constituyó el trabajo de Gulshan V et al.,⁽⁶⁾ que desarrolló y validó un algoritmo de deep learning para detectar la retinopatía diabética en retinografías color con una sensibilidad y especificidad muy altas, utilizando un conjunto de datos de decenas de miles de imágenes. Este estudio sentó un precedente crucial, probando que la automatización del cribado de la RD era factible.

Poco después, Ting DSW et al.,⁽⁷⁾ ampliaron este concepto, creando un sistema que no solo detectaba la RD, sino que también identificaba el glaucoma y la DMAE, demostrando la capacidad de la IA para abordar múltiples enfermedades oculares de forma simultánea, un avance significativo hacia la polivalencia en el diagnóstico automatizado.

La transición desde la validación en entornos controlados hacia la implementación en la práctica clínica real comenzó con estudios pivotales, como el de Abràmoff MD et al.,⁽⁸⁾ que evaluó un sistema autónomo de IA para el diagnóstico de la RD en consultas de atención primaria. Este trabajo fue pionero al demostrar la viabilidad y la seguridad de desplegar la IA en un entorno no especializado, con el potencial de descentralizar el cribado y acercarlo a los pacientes, reduciendo barreras de acceso. Más allá de la mera detección, la IA ha demostrado una capacidad prometedora para la estratificación del riesgo. Bora A et al.,⁽⁹⁾ exploraron la posibilidad de utilizar algoritmos de deep learning no solo para diagnosticar la RD manifiesta, sino para predecir el riesgo futuro de que un paciente diabético sin retinopatía aparente la desarrolle, abriendo la puerta a estrategias de prevención verdaderamente personalizadas.^(11, 12)

En el ámbito de la degeneración macular asociada a la edad, las aplicaciones de la IA son igualmente profundas. Por un lado, se han desarrollado algoritmos altamente precisos para la clasificación automatizada de la gravedad de la DMAE a partir de retinografías color, como el modelo DeepSeeNet descrito por Peng Y et al.,⁽¹³⁾ que replica el sistema de clasificación clínica estándar. Por otro lado, el análisis de imágenes de OCT mediante IA ha alcanzado un nivel de sofisticación notable. Schlegl T et al.,⁽¹⁰⁾ crearon un sistema completamente automatizado para la detección y, lo que es más importante, la cuantificación precisa del fluido macular en la OCT, una métrica cuantitativa objetiva que es crucial para monitorizar la respuesta al tratamiento en la DMAE neovascular y el edema macular diabético. Esta capacidad de cuantificación va más allá de lo que el ojo humano puede realizar de forma rutinaria y reproducible en la práctica clínica diaria.

Quizás una de las aplicaciones más ambiciosas de la IA en la DMAE sea la predicción de la progresión de la enfermedad. Schmidt-Erfurth U et al.,⁽¹¹⁾ y, posteriormente, Yim J et al.,⁽¹²⁾ mostraron que los algoritmos de deep learning pueden analizar imágenes de OCT de pacientes con DMAE seca y predecir con una precisión significativa qué ojos tienen un alto riesgo de convertir a la forma neovascular o "húmeda", que es la causa más rápida de pérdida visual severa. Esta capacidad predictiva podría permitir intervenciones más tempranas y un seguimiento más intensivo de los pacientes de alto riesgo, cambiando el paradigma de un modelo reactivo a uno proactivo y preventivo.

Si bien el foco de esta revisión se centra en las enfermedades de la retina, es ilustrativo observar cómo la IA está impactando en otras áreas de la oftalmología con desafíos similares. Por ejemplo, Li Z et al.,⁽¹⁴⁾ desarrollaron un sistema de deep learning para detectar el glaucoma a partir de retinografías color, mientras que Brown JN et al.,⁽¹⁵⁾ lograron automatizar el diagnóstico del "plus disease" en la retinopatía del prematuro, una tarea particularmente desafiante y subjetiva. Incluso la clasificación básica de imágenes de OCT entre normales y patológicas (por ejemplo, con DMAE o edema macular) ha sido resuelta con alta eficacia por algoritmos como el presentado por Lee CS et al.⁽¹⁶⁾ Estos éxitos transversales refuerzan la solidez del deep learning como tecnología habilitadora central en el diagnóstico ocular.

Sorprendentemente, el potencial de la IA en oftalmología trasciende el ámbito estrictamente ocular. El fondo de ojo, a través de la retinografía, ha sido descrito como una "ventana" a la salud sistémica. Poplin R et al.,⁽¹⁷⁾ demostraron de manera pionera que un algoritmo de deep learning podía predecir factores de riesgo cardiovascular como la edad, el sexo, el hábito de fumar, la presión arterial sistólica y el índice de masa corporal, e incluso inferir el riesgo de un evento cardiovascular mayor, únicamente a partir de imágenes de retinografía color. Este hallazgo abre un campo de posibilidades insospechadas para la oftalmología como puerta de entrada a la evaluación de la salud general, posicionando a la IA como una herramienta de medicina predictiva y preventiva de amplio espectro.

A pesar de este panorama extraordinariamente prometedor, el camino hacia la implementación masiva y rutinaria de la IA en la clínica diaria está plagado de desafíos significativos que deben ser abordados con rigor. Keane PA y Topol EJ,⁽¹⁸⁾ advirtieron tempranamente sobre la necesidad de realizar ensayos clínicos prospectivos y robustos que demuestren no solo la precisión diagnóstica, sino también la mejora en los desenlaces clínicos finales (outcomes) y la rentabilidad (coste-efectividad). Uno de los obstáculos más críticos es el riesgo de sesgos en los algoritmos.

Como destacó Seyyed-Kalantari L et al.,⁽¹⁹⁾ los modelos de IA entrenados predominantemente con datos de poblaciones específicas (por ejemplo, caucásicas o con acceso a sistemas de salud determinados) pueden sufrir de un "sesgo de subdiagnóstico" cuando se aplican a poblaciones subatendidas o con características demográficas diferentes, lo que podría exacerbar, en lugar de reducir, las disparidades en salud. La generalizabilidad de estos sistemas a través de diferentes dispositivos de imagen, protocolos de adquisición y poblaciones étnicamente diversas es, por tanto, una prioridad de investigación.

Otro desafío fundamental es la "caja negra" de la IA. La toma de decisiones de muchas redes neuronales profundas es a menudo opaca y difícil de interpretar para el médico humano, lo que genera desconfianza y cuestionamientos sobre la responsabilidad (accountability).⁽²⁰⁾ El emergente campo de la IA explicable (XAI) busca desarrollar métodos para visualizar y comprender qué características de la imagen están impulsando la decisión del algoritmo (por ejemplo, mediante mapas de calor o atención), facilitando así la aceptación clínica y la corrección de errores.^(21,22) Junto a esto, surgen complejas cuestiones legales y éticas. Price WN et al.,⁽²³⁾ analizaron la potencial responsabilidad legal de los médicos que utilizan sistemas de IA, un territorio jurídico en gran medida inexplorado que requiere marcos regulatorios claros para definir las responsabilidades del fabricante, el proveedor y el profesional sanitario.

La evaluación en el "mundo real" es el siguiente escalón de validación. Estudios recientes, como el de Karthik A et al.,⁽²¹⁾ han comenzado a evaluar el rendimiento de los modelos de IA en entornos clínicos rutinarios, fuera de las condiciones ideales de los estudios de validación, identificando desafíos prácticos relacionados con la calidad variable de las imágenes, la integración en los flujos de trabajo hospitalarios y la interoperabilidad con los sistemas de historia clínica electrónica. Finalmente, los análisis de coste-efectividad, como el realizado por Xie Y et al.,⁽²²⁾ para un programa nacional de tele oftalmología para la RD, son esenciales para convencer a los gestores sanitarios y a los pagadores sobre el valor económico de la implementación de la IA a gran escala.

La inteligencia artificial, y específicamente el aprendizaje profundo, está posicionada para redefinir el estándar de cuidado en las enfermedades de la retina. Su capacidad para automatizar tareas diagnósticas, cuantificar biomarcadores con precisión supra-humana y predecir el riesgo de progresión de la enfermedad promete no solo aliviar la carga de los oftalmólogos, sino también mejorar la calidad, la accesibilidad y la equidad de la atención al paciente. El objetivo de esta revisión es, por lo tanto, examinar críticamente la bibliografía más actualizada publicada en los últimos años sobre la aplicación de la IA en el manejo de las enfermedades de la retina. Se abordarán sus aplicaciones clínicas más relevantes en detalle, se discutirán en profundidad los desafíos técnicos, éticos y de implementación que actualmente limitan su adopción masiva, y se explorarán las perspectivas futuras y las direcciones de investigación necesarias para materializar el pleno potencial de esta tecnología transformadora, siempre basando las conclusiones en la evidencia científica analizada.

Los algoritmos de DL, entrenados con cientos de miles de retinografías color anotadas por expertos, han alcanzado un nivel de precisión sobresaliente. Conjuntos de datos públicos como Messidor-2 y EyePACS han sido fundamentales para este progreso. Estos algoritmos no solo realizan una clasificación binaria (enfermedad referible vs. no referible), sino que son capaces de realizar una gradación más fina. Por ejemplo, pueden clasificar la RD según la escala internacional de gravedad o el sistema ETDRS (Early Treatment Diabetic Retinopathy Study), identificando lesiones específicas como microaneurismas (los primeros signos de la RD), hemorragias, exudados duros (indicativos de edema macular diabético) y neovasos (señal de retinopatía proliferativa).^(6,7)

Un hito regulatorio crucial fue la aprobación en 2018 por la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA) del sistema IDx-DR (ahora comercializado como LumineticsCore™). Este fue el primer sistema de IA autónomo autorizado para proporcionar una decisión de cribado sin la intervención de un especialista. Su implementación en entornos de atención primaria permite que un técnico capture una imagen de la retina y el algoritmo determine en minutos si el paciente necesita ser derivado a un oftalmólogo, optimizando recursos y reduciendo los tiempos de espera.⁽⁸⁾

Más allá de la detección y clasificación, la IA está avanzando hacia la predicción de riesgo. Los algoritmos están aprendiendo a identificar patrones sutiles en las imágenes de la retina que pueden predecir la probabilidad de que un paciente con diabetes desarrolle RD en el futuro, o que un paciente con RD no proliferativa leve progrese a formas más severas. Este enfoque proactivo y predictivo podría revolucionar las estrategias de seguimiento, permitiendo una atención personalizada y más intensiva para los pacientes de alto riesgo.⁽⁹⁾ Además, se están desarrollando algoritmos para cuantificar el edema macular diabético en las OCT, midiendo con precisión el volumen y el grosor de la retina, lo que es crucial para evaluar la respuesta al tratamiento con inyecciones intravítreas.

La DMAE es la principal causa de ceguera irreversible en personas mayores en el mundo desarrollado. La OCT se ha establecido como la técnica de imagen *gold standard* para su diagnóstico y manejo, ya que proporciona cortes transversales de alta resolución de la retina. Sin embargo, la interpretación de las OCT es compleja, consume tiempo y está sujeta a cierta subjetividad inter observador.

La IA ha encontrado en la DMAE un campo de aplicación extremadamente fértil. Una de las aplicaciones más consolidadas es la segmentación automática de fluidos. En la forma neovascular o húmeda de la DMAE, la acumulación de fluido intraretiniano (IRF) y subretiniano (SRF) es un biomarcador crítico que guía la necesidad de tratamiento con agentes anti-VEGF. Los algoritmos de DL pueden segmentar y cuantificar automáticamente estos volúmenes de fluido con una precisión comparable a la de expertos humanos.⁽¹⁰⁾ Esto no solo agiliza enormemente la consulta, liberando al oftalmólogo de tareas manuales tediosas, sino que proporciona una medida objetiva y cuantitativa de la respuesta al tratamiento. Esto reduce la variabilidad en la toma de decisiones, como cuándo reiniciar el tratamiento o espaciar las dosis, un desafío constante en la práctica clínica.⁽¹¹⁾

Otro frente de desarrollo de vanguardia es la predicción de la conversión de DMAE seca (o atrófica) a la forma húmeda. La conversión a la forma húmeda es un evento devastador para la visión, y detectarla lo antes posible es crucial. Los algoritmos de IA están siendo entrenados para analizar secuencias temporales de OCTs, identificando cambios estructurales sutiles y precursores que pueden ser imperceptibles para el ojo humano. Estos cambios podrían incluir alteraciones en el patrón de las drusas, la aparición de hiperreflectividad sub-RPE o cambios en la arquitectura de las capas retinianas. Poder predecir qué pacientes con DMAE seca tienen un

alto riesgo de convertir permitiría un seguimiento más estrecho y una intervención ultra-precoz, potencialmente salvando la visión central.⁽¹²⁾

Finalmente, en la DMAE seca, la IA está demostrando una gran utilidad en la identificación y seguimiento de la atrofia geográfica (AG). Los algoritmos pueden delimitar automáticamente las áreas de atrofia, midiendo su progresión a lo largo del tiempo con una precisión superior a la evaluación manual, que es propensa a la variabilidad. Esta cuantificación robusta es esencial para la evaluación de nuevas terapias en ensayos clínicos dirigidos a frenar la progresión de la DMAE seca.⁽¹³⁾

El alcance de la IA en oftalmología se extiende más allá de la RD y la DMAE, abarcando un espectro cada vez más amplio de enfermedades. En el glaucoma, una neuropatía óptica progresiva, el diagnóstico y seguimiento se basan en la evaluación del nervio óptico y la capa de fibras nerviosas retinianas (RNFL). Los algoritmos pueden analizar retinografías para detectar signos de daño glaucomatoso en la papila óptica, como el aumento de la excavación o el adelgazamiento del anillo neuronal. Sin embargo, es en la OCT donde la IA muestra todo su potencial, segmentando automáticamente la RNFL y la capa de células ganglionares, y detectando patrones de adelgazamiento característicos del glaucoma que pueden preceder a los defectos en el campo visual. Esto facilita un diagnóstico más temprano y un seguimiento más preciso de la progresión de la enfermedad.⁽¹⁴⁾

La retinopatía del prematuro (ROP) es una causa importante de ceguera infantil en lactantes prematuros. Su diagnóstico requiere un examen oftalmológico realizado por un experto, un recurso escaso en muchas regiones. Los sistemas de IA, entrenados con imágenes de fondo de ojo de lactantes, pueden ayudar en el cribado identificando signos de ROP "plus disease" (dilatación y tortuosidad vascular), que es un criterio clave para el tratamiento. Estos sistemas tienen el potencial de aumentar el acceso al cribado en zonas remotas o con escasez de especialistas, previniendo casos de ceguera.⁽¹⁵⁾

Los algoritmos están siendo utilizados para predecir el resultado visual tras cirugías complejas como la vitrectomía para desprendimiento de retina. Analizando características preoperatorias en la OCT, como el estado de la mácula, pueden predecir la probabilidad de recuperar una buena agudeza visual.⁽¹⁶⁾

La retina es una extensión del sistema nervioso central, y sus vasos sanguíneos pueden reflejar la salud vascular de todo el cuerpo. Los algoritmos de IA están demostrando una capacidad sorprendente para predecir factores de riesgo cardiovascular (como la hipertensión, la edad y el sexo) e incluso para estimar la edad biológica de una persona a partir de una simple retinografía. Más allá, se están explorando correlaciones entre los patrones vasculares retinianos y enfermedades neurodegenerativas como la enfermedad de Alzheimer y el deterioro cognitivo leve, abriendo la puerta a que un examen ocular rutinario pueda servir como una herramienta de cribado no invasiva para estas condiciones.⁽¹⁷⁾

A pesar del entusiasmo y el progreso evidente, la transición de los algoritmos de IA desde los entornos de investigación controlados a la práctica clínica diaria y generalizada se enfrenta a una serie de obstáculos significativos que deben ser abordados de manera integral. Uno de los problemas más críticos es la falta de robustez y generalización de muchos modelos. Un algoritmo puede exhibir un rendimiento excepcional en el conjunto de datos con el que fue entrenado y validado, pero su precisión puede desplomarse drásticamente cuando se enfrenta a datos del "mundo real". Esto se debe a varios factores:

Sesgos del Equipamiento: Los algoritmos suelen entrenarse con imágenes procedentes de un modelo o fabricante específico de cámara retinal o de OCT. Cuando se aplican a imágenes adquiridas con un equipo diferente, con distintas resoluciones, iluminación o protocolos de adquisición, el rendimiento puede degradarse.⁽¹⁸⁾

Si un algoritmo se entrena predominantemente con imágenes de una etnia, grupo demográfico o región geográfica específica, puede no generalizar bien a otras poblaciones. Por ejemplo, las características del nervio óptico pueden variar entre diferentes etnias, y un algoritmo entrenado principalmente en poblaciones caucásicas podría cometer errores al evaluar el glaucoma en poblaciones africanas o asiáticas. Esto no es solo un problema técnico, sino una cuestión de equidad en la salud. Si no se mitiga, la IA corre el riesgo de perpetuar e incluso amplificar las disparidades sanitarias existentes, proporcionando una atención de menor calidad a las poblaciones subrepresentadas en los datos de entrenamiento.⁽¹⁹⁾

Un modelo entrenado para detectar una enfermedad en una etapa específica puede no ser sensible para detectar presentaciones atípicas o formas muy tempranas de la enfermedad.

La solución pasa por la creación de conjuntos de datos de entrenamiento más grandes, diversos y representativos, que abarquen múltiples etnias, equipos y entornos clínicos. Además, las técnicas de aumento de datos y el aprendizaje federado (donde el modelo se entrena de forma distribuida en varios centros sin compartir los datos de los pacientes) son estrategias prometedoras para mejorar la generalización.

Los clínicos necesitan confiar en las herramientas que utilizan. Es poco probable que un oftalmólogo acepte ciegamente la recomendación de un sistema que no puede justificar su conclusión. Además, en caso de un error diagnóstico, es fundamental entender por qué el algoritmo falló para poder corregirlo y aprender del suceso.⁽²⁰⁾

El campo de la IA explicable (XAI) está creciendo rápidamente para abordar este desafío. Técnicas como los mapas de calor de activación son particularmente útiles en el análisis de imágenes. Estos mapas superponen una capa de color sobre la imagen original, resaltando las regiones que más contribuyeron a la decisión del algoritmo. Por ejemplo, si un algoritmo diagnostica una RD proliferativa, un mapa de calor ideal debería resaltar las áreas de neovasos. Esto permite al oftalmólogo verificar visualmente si el algoritmo está "fijándose" en las características patológicas correctas, generando confianza y facilitando la correlación clínica.⁽²¹⁾ Sin embargo, la XAI aún está en desarrollo, y garantizar que estas explicaciones sean precisas y significativas es un área de investigación activa.

La mera existencia de un algoritmo preciso no garantiza su adopción clínica. Su integración fluida en los sistemas existentes es un desafío monumental. Para ser verdaderamente útiles, estas herramientas deben integrarse directamente en los sistemas de archivo y comunicación de imágenes (PACS) y en las historias clínicas electrónicas (HCE). El proceso debe ser ágil: el técnico adquiere la imagen, el algoritmo la procesa automáticamente en segundo plano y los resultados se presentan al médico de una manera clara y concisa dentro de su flujo de trabajo habitual, sin requerir pasos adicionales engorrosos o el uso de plataformas externas.⁽²²⁾

¿Quién es responsable si un algoritmo de IA comete un error diagnóstico que conduce a un daño en el paciente? ¿El desarrollador del algoritmo, el hospital que lo implementó, el médico que confió en su resultado o una combinación de todos? La legislación actual no está bien definida en este ámbito y requiere una actualización urgente. La mayoría defiende un modelo en el que la IA actúe como una "segunda opinión" o una herramienta de apoyo a la decisión, donde la responsabilidad final recaiga siempre en el médico tratante.⁽²³⁾

El entrenamiento de estos algoritmos requiere grandes cantidades de datos de pacientes anónimos, pero la anonimización perfecta es difícil de garantizar. Es crucial establecer marcos robustos de gobernanza de datos que aseguren la privacidad y el consentimiento informado para el uso de estas imágenes.

Existe el riesgo percibido de que la automatización del diagnóstico distancie al médico del paciente. La clave está en la implementación. La IA debe verse como una herramienta que libera al oftalmólogo de tareas repetitivas de análisis cuantitativo, permitiéndole dedicar más tiempo a la comunicación con el paciente, la explicación de la enfermedad y la planificación terapéutica personalizada. El juicio clínico, la empatía y la relación médico-paciente deben permanecer en el centro de la atención. El futuro de la IA en las enfermedades retinianas es extremadamente prometedor y se dirige hacia una integración más profunda y multifacética. Las tendencias futuras incluyen:

- **Algoritmos Multimodales:** En lugar de analizar un único tipo de imagen, los algoritmos del futuro integrarán información de múltiples fuentes simultáneamente: OCT, retinografía color, angiografía por OCT, autofluorescencia y campos visuales. Esta visión holística permitirá un diagnóstico más completo y robusto.
- **Pronóstico y Medicina de Precisión:** La IA evolucionará desde el diagnóstico hacia la predicción de la trayectoria individual de la enfermedad. Podrá responder preguntas como: "¿A qué ritmo progresará el glaucoma de este paciente?" o "¿Qué tratamiento anti-VEGF tendrá la mejor respuesta en este caso particular de DMAE húmeda?".
- **Detección de Enfermedades Sistémicas:** La "retina como biomarcador" será un campo de explosivo crecimiento. Los algoritmos se refinarán para predecir no solo el riesgo cardiovascular, sino también enfermedades renales, hematológicas y neurológicas con mayor precisión.
- **Generación de Imágenes e Incremento de Datos:** La IA generativa se puede utilizar para crear imágenes retinianas sintéticas pero realistas de enfermedades raras, ayudando a entrenar modelos sin comprometer la privacidad de los pacientes y mejorando el reconocimiento de casos poco comunes.

La IA en el campo de las enfermedades retinianas no es simplemente una herramienta más; representa un cambio de paradigma en la forma en que entendemos y practicamos la oftalmología. Su potencial para democratizar el acceso a un diagnóstico oftalmológico de alta calidad, especialmente en áreas de bajos recursos o con escasez de especialistas, es, sin duda, su contribución más transformadora y éticamente resonante. La posibilidad de que un paciente diabético en una zona rural pueda ser cribado con la misma precisión que en un hospital universitario de élite es un avance monumental hacia la equidad en salud.

CONCLUSIONES

La inteligencia artificial se ha consolidado como una herramienta transformadora en el manejo de enfermedades de la retina, gracias a su capacidad para analizar imágenes con gran precisión y rapidez, lo que la hace clave en el cribado masivo, el diagnóstico temprano y la predicción de la progresión de patologías como la retinopatía diabética y la degeneración macular asociada a la edad. Sin embargo, su implementación enfrenta retos como la falta de generalización de los modelos, los sesgos en los datos, la necesidad de explicabilidad, las barreras tecnológicas y los dilemas éticos y legales. Más que sustituir al oftalmólogo, la IA debe ser vista como un aliado que optimiza su labor clínica, en un marco de colaboración entre ingenieros, médicos y

reguladores. El futuro inmediato dependerá de validar estos sistemas en la práctica real y de establecer marcos regulatorios que garanticen su seguridad, eficacia y equidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Flaxman SR, Bourne RRA, Resnikoff S, Ackland P, Braithwaite T, Cicinelli MV, et al. Global causes of blindness and distance vision impairment 1990-2020: a systematic review and meta-analysis. *Lancet Glob Health* [Internet]. 2017 [citado 18/11/2025]; 5(12):e1221-e1234. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/s2214-109x\(17\)30393-5](https://doi.org/10.1016/s2214-109x(17)30393-5)
2. Ting DSW, Pasquale LR, Peng L, Campbell JP, Lee AY, Raman R, et al. Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology. *Br J Ophthalmol* [Internet]. 2019 Feb [citado 18/11/2025]; 103(2):167-175. Disponible en: <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2018-313173>
3. Schmidt-Erfurth U, Sadeghipour A, Gerendas BS, Waldstein SM, Bogunović H. Artificial intelligence in retina. *Prog Retin Eye Res* [Internet]. 2018 Nov [citado 18/11/2025]; 67:1-29. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2018.07.004>
4. Esteva A, Robicquet A, Ramsundar B, Kuleshov V, DePristo M, Chou K, et al. A guide to deep learning in healthcare. *Nat Med* [Internet]. 2019 [citado 18/11/2025]; 25(1):24-29. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0316-z>
5. De Fauw J, Ledsam JR, Romera-Paredes B, Nikolov S, Tomasev N, Blackwell S, et al. Clinically applicable deep learning for diagnosis and referral in retinal disease. *Nat Med* [Internet]. 2018 [citado 18/11/2025]; 24(9):1342-1350. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0107-6>
6. Gulshan V, Peng L, Coram M, Stumpe MC, Wu D, Narayanaswamy A, et al. Development and Validation of a Deep Learning Algorithm for Detection of Diabetic Retinopathy in Retinal Fundus Photographs. *JAMA* [Internet]. 2016 [citado 18/11/2025]; 316(22):2402-2410. Disponible en: <https://doi.org/10.1001/jama.2016.17216>
7. Ting DSW, Cheung CY, Lim G, Tan GSW, Quang ND, Gan A, et al. Development and Validation of a Deep Learning System for Diabetic Retinopathy and Related Eye Diseases Using Retinal Images From Multiethnic Populations With Diabetes. *JAMA* [Internet]. 2017 [citado 18/11/2025]; 318(22):2211-2223. Disponible en: <https://doi.org/10.1001/jama.2017.18152>
8. Abràmoff MD, Lavin PT, Birch M, Shah N, Folk JC. Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices. *NPJ Digit Med* [Internet]. 2018 [citado 18/11/2025]; 1:39. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41746-018-0040-6>
9. Bora A, Balasubramanian S, Babenko B, Virmani S, Venugopalan S, Mitani A, et al. Predicting the risk of developing diabetic retinopathy using deep learning. *Lancet Digit Health* [Internet]. 2021 [citado 18/11/2025]; 3(1):e10-e19. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/s2589-7500\(20\)30250-8](https://doi.org/10.1016/s2589-7500(20)30250-8)
10. Schlegl T, Waldstein SM, Bogunovic H, Endstraßer F, Sadeghipour A, Philip AM, et al. Fully Automated Detection and Quantification of Macular Fluid in OCT Using Deep Learning. *Ophthalmology* [Internet]. 2018 [citado 18/11/2025]; 125(4):549-558. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2017.10.031>

11. Schmidt-Erfurth U, Waldstein SM, Klimscha S, Sadeghipour A, Hu X, Gerendas BS, et al. Prediction of Individual Disease Conversion in Early AMD Using Artificial Intelligence. *Invest Ophthalmol Vis Sci* [Internet]. 2018 [citado 18/11/2025]; 59(8):3199-3208. Disponible en: <https://doi.org/10.1167/iovs.18-24106>
12. Yim J, Chopra R, Spitz T, Winkens J, Obika A, Kelly C, et al. Predicting conversion to wet age-related macular degeneration using deep learning. *Nat Med* [Internet]. 2020 [citado 18/11/2025]; 26(6):892-899. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0867-7>
13. Peng Y, Dharssi S, Chen Q, Keenan TD, Agrón E, Wong WT, et al. DeepSeeNet: A Deep Learning Model for Automated Classification of Patient-based Age-related Macular Degeneration Severity from Color Fundus Photographs. *Ophthalmology* [Internet]. 2019 [citado 18/11/2025]; 126(4):565-575. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2018.11.015>
14. Li Z, He Y, Keel S, Meng W, Chang RT, He M. Efficacy of a Deep Learning System for Detecting Glaucomatous Optic Neuropathy Based on Color Fundus Photographs. *Ophthalmology* [Internet]. 2018 [citado 18/11/2025]; 125(8):1199-1206. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2018.01.023>
15. Brown JM, Campbell JP, Beers A, Chang K, Ostmo S, Chan RVP, et al. Automated Diagnosis of Plus Disease in Retinopathy of Prematurity Using Deep Convolutional Neural Networks. *JAMA Ophthalmol* [Internet]. 2018 [citado 18/11/2025]; 136(7):803-810. Disponible en: <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2018.1934>
16. Lee CS, Baughman DM, Lee AY. Deep learning is effective for the classification of OCT images of normal versus Age-related Macular Degeneration. *Ophthalmol Retina* [Internet]. 2017 [citado 18/11/2025]; 1(4):322-327. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.joret.2016.12.009>
17. Poplin R, Varadarajan AV, Blumer K, Liu Y, McConnell MV, Corrado GS, et al. Prediction of cardiovascular risk factors from retinal fundus photographs via deep learning. *Nat Biomed Eng* [Internet]. 2018 [citado 18/11/2025]; 2(3):158-164. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41551-018-0195-0>
18. Keane PA, Topol EJ. With an eye to AI and autonomous diagnosis. *NPJ Digit Med* [Internet]. 2018 [citado 18/11/2025]; 1:40. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41746-018-0048-y>
19. Seyyed-Kalantari L, Zhang H, McDermott MBA, Chen IY, Ghassemi M. Underdiagnosis bias of artificial intelligence algorithms applied to chest radiographs in under-served patient populations. *Nat Med* [Internet]. 2021 [citado 18/11/2025]; 27(12):2176-2182. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41591-021-01595-0>
20. Reyes M, Meier R, Pereira S, Silva CA, Dahlweid FM, von Tengg-Kobligk H, et al. On the Interpretability of Artificial Intelligence in Radiology: Challenges and Opportunities. *Radiol Artif Intell* [Internet]. 2020 [citado 18/11/2025]; 2(3):e190043. Disponible en: <https://doi.org/10.1148/ryai.2020190043>
21. Karthik A, Mynampati S. Explainable AI for Diabetic Retinopathy Detection Using Deep Learning with Attention Mechanisms and Fuzzy Logic-Based Interpretability [Internet]. 2025; arXiv preprint arXiv:2511.16294. Disponible en: <https://arxiv.org/pdf/2511.16294>

22. Xie Y, Nguyen QD, Hamzah H, Lim G, Bellemo V, Gunasekeran DV, et al. Artificial intelligence for teleophthalmology-based diabetic retinopathy screening in a national programme: an economic analysis modelling study. *Lancet Digit Health* [Internet]. 2020 [citado 18/11/2025]; 2(5):e240-e249. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/s2589-7500\(20\)30060-1](https://doi.org/10.1016/s2589-7500(20)30060-1)
23. Price WN 2nd, Gerke S, Cohen IG. Potential Liability for Physicians Using Artificial Intelligence. *JAMA* [Internet]. 2019 [citado 18/11/2025]; 322(18):1765-1766. Disponible en: <https://doi.org/10.1001/jama.2019.15064>