

Inteligencia artificial en glaucoma: ¿dónde estamos y hacia dónde vamos?

Artificial intelligence in glaucoma: where are we and where are we headed?

Ma. Florencia Becchetti

Departamento de Oftalmología, Centro Quirúrgico Ambulatorio Privado HOMINIS, Oncativo, Córdoba, Argentina

Resumen

El glaucoma, una enfermedad ocular crónica que puede resultar en pérdida de visión irreversible, requiere detección temprana y tratamiento oportuno para prevenir su progresión y mejorar la calidad de vida del paciente. La inteligencia artificial (IA) en el glaucoma ha logrado avances alentadores, demostrando precisión en la evaluación de la enfermedad. Aunque presenta aún algunas limitaciones, posee el potencial para mejorar el diagnóstico y seguimiento de la patología, transformando así la atención médica en este ámbito. Se espera que futuras investigaciones y desarrollos superen los desafíos actuales, permitiendo una implementación más amplia y efectiva de la IA en el manejo del glaucoma. Este artículo presenta una revisión de los modelos actuales de IA aplicados a la detección, progresión y pronóstico del glaucoma, además de abordar las direcciones futuras y desafíos en este campo.

Palabras clave: Glaucoma. Inteligencia artificial. Aprendizaje automático. Aprendizaje profundo. Redes neuronales artificiales.

Abstract

Glaucoma, a chronic eye disease that can result in irreversible vision loss, requires early detection and timely treatment to prevent its progression and improve the patient's quality of life. Artificial Intelligence (AI) in glaucoma has achieved encouraging advancements, demonstrating accuracy in disease assessment. Although it still has some limitations, it has the potential to enhance diagnosis and monitoring of the disorder, thus transforming healthcare in this field. Future research and developments are expected to overcome current challenges, enabling a broader and more effective implementation of AI in glaucoma management. This article provides a review of current AI models applied to glaucoma detection, progression, and prognosis, while addressing future directions and challenges in this field.

Keywords: Glaucoma. Artificial intelligence. Machine learning. Deep learning. Artificial neural networks.

Correspondencia:

Ma. Florencia Becchetti
E-mail: florencia_becchetti@hotmail.com

Fecha de recepción: 20-07-2023

Fecha de aceptación: 27-10-2023

DOI: 10.24875/RSCO.23000022

Disponible en internet: 11-12-2023

Rev Soc Colomb Oftalmol. 2023;56(3):116-122

www.revistaSCO.com

Cómo citar este artículo: Becchetti MF. Inteligencia artificial en glaucoma: ¿dónde estamos y hacia dónde vamos? *Rev Soc Colomb Oftalmol.* 2023;56(2):116-122.

0120-0453 / © 2023 Sociedad Colombiana de Oftalmología (SOCOFTAL). Publicado por Permanyer. Este es un artículo *open access* bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

El glaucoma engloba un grupo de afecciones que varían en su fisiopatología, factores de riesgo, manifestaciones, tratamientos y pronósticos. Su característica común es la degeneración y excavación progresiva del nervio óptico, con pérdida de células ganglionares de la retina y adelgazamiento de la capa de fibras nerviosas¹.

Esta patología constituye la principal causa de ceguera irreversible en el mundo. Se estima que afecta al 3,5% de la población mundial de 40 a 80 años, lo que se traduce en aproximadamente 111,8 millones de casos para el año 2040².

Si bien la detección y el tratamiento temprano tienen un gran impacto en el pronóstico de la enfermedad, el carácter asintomático del daño inicial explica por qué muchas personas solo son diagnosticadas en una etapa avanzada con importantes consecuencias funcionales³. Cuando los síntomas aparecen, se demostró que entre el 30 y 50% de las células ganglionares de la retina ya podrían estar afectadas, resultando en la pérdida irreversible del campo visual, con la afectación concomitante de la calidad de vida del paciente⁴.

La evaluación y el diagnóstico del glaucoma se basan en un detallado examen oftalmológico que incluye la toma de la presión intraocular, la gonioscopia y exámenes complementarios para evaluar el estado estructural y funcional del nervio óptico. En cuanto al análisis estructural, se utilizan las fotografías a color del fondo de ojo (FFO) y, de desarrollo más reciente, la tomografía de coherencia óptica (OCT) del segmento posterior. Esta última proporciona vistas tridimensionales de las capas de la retina y las estructuras de la cabeza del nervio óptico para un estudio más detallado y de mayor profundidad. Por otro lado, la evaluación funcional se realiza típicamente mediante perimetría computarizada (PC)⁵⁻⁷.

Es importante remarcar que el ámbito de la salud está experimentando una evolución exponencial, encontrándose en la vanguardia de importantes progresos que favorecen al sistema sanitario y permiten una mejora en la atención médica. Las tecnologías emergentes están acelerando este cambio, impulsando la transformación digital y ofreciendo experiencias más atractivas tanto para el médico como para el paciente.

La inteligencia artificial (IA) es un término amplio, mencionado por primera vez por John McCarthy en 1956⁸, que describe el uso de computadoras para imitar la inteligencia y el pensamiento crítico de los humanos⁹, y que está dominando rápidamente el área de la salud¹⁰. Se ha convertido en una herramienta sumamente poderosa para

facilitar tareas que anteriormente requerían la intervención humana.

En los últimos años ha habido un gran entusiasmo por la investigación de la IA aplicada en el campo de la oftalmología, lo que se ha reflejado directamente en el glaucoma¹¹. Dada su capacidad para procesar grandes y complejos conjuntos de datos, la IA proporciona un complemento a las tecnologías disponibles para los médicos y podría tener una gran influencia en cómo se diagnostica y maneja la enfermedad, principalmente en su etapa temprana, aunque también en el seguimiento de casos avanzados. Por otro lado, debido a la naturaleza fuertemente multifactorial de esta patología y las limitaciones de las tecnologías actuales para evaluar todos sus factores de riesgo, la aplicación de la IA al glaucoma requiere el desarrollo de enfoques innovadores¹², por lo que es un campo lleno de desafíos y expectativas.

El propósito de este trabajo es realizar una revisión exhaustiva acerca de la IA y su aplicación en el manejo del glaucoma. Se examinan diversas tecnologías y técnicas utilizadas en la actualidad, como la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático (*machine learning*, ML), aprendizaje profundo (*deep learning*, DL) y redes neuronales artificiales (*artificial neural network*, ANN) para la diagnóstico, pronóstico y progresión de la enfermedad.

Método

Se realizó una búsqueda exhaustiva en la base de datos electrónica PubMed para identificar estudios relacionados con técnicas de IA para el diagnóstico, evaluación de progresión o pronóstico de glaucoma. Se combinaron los términos de búsqueda "glaucoma", "diagnosis", "progression", "prognosis", "artificial intelligence", "machine learning", "deep learning". Se incluyeron estudios publicados en los últimos cinco años, sin restricciones de idioma y aplicado a humanos. De 451 artículos recuperados, se seleccionaron aquellos que eran relevantes para el tema de esta revisión. Se examinaron las listas de referencias de los artículos elegidos y se agregaron otras publicaciones consideradas importantes por los autores.

¿Cómo funciona la inteligencia artificial? (Fig.1)

Para un mejor entendimiento acerca de la metodología de trabajo de la IA, es necesario entender conceptos relacionados como «aprendizaje automático», «aprendizaje profundo» y «redes neuronales artificiales». Hay que

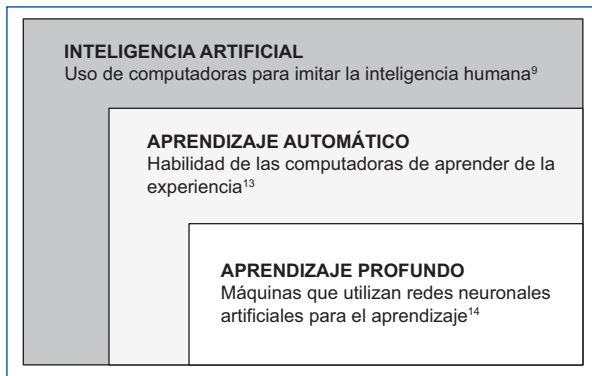


Figura 1. Relación entre inteligencia artificial, aprendizaje automático y aprendizaje profundo.

tener en cuenta que, al tratarse de términos relativamente nuevos, las definiciones encontradas en los trabajos publicados pueden ser confusas o mal interpretadas, ya que los significados están evolucionando rápidamente y, por lo tanto, pueden cambiar con el tiempo¹⁵. A pesar de esto, expondremos una explicación al respecto de cada término que creemos adecuada y necesaria para el enfoque de este trabajo:

– ML: es una forma de IA que hace referencia a la habilidad de las computadoras de aprender de la experiencia¹³. Técnicamente, son algoritmos que procesan entradas y proporcionan una salida específica que sirve para clasificar o calificar una amplia gama de datos¹⁶.

El primer paso en este proceso es asignar una tarea que completar¹⁴, por ejemplo, separar FFO en neuropatías ópticas glaucomatosas o normales. Para realizarlo, la máquina requerirá una gran cantidad de imágenes funduscópicas para aprender (conjunto de datos de entrenamiento), así como una base de datos separada para validación (conjunto de datos de validación). Posteriormente, se elige una estructura de aprendizaje básica para los algoritmos (p. ej., una red neuronal) y se alimenta a la máquina con los datos de entrenamiento para que finalmente desarrolle sus propias respuestas¹⁴.

– DL: es un subconjunto del ML que utiliza una estructura de redes neuronales artificiales¹⁴.

– ANN: fueron inspiradas en la red neuronal biológica¹⁴. Consiste en un modelo matemático basado en herramientas de modelado estadístico no lineal, donde ocurren relaciones complejas entre las entradas y las salidas¹³. Esta tecnología utiliza métodos de aprendizaje de representaciones con múltiples niveles de abstracción para procesar datos de entrada

sin necesidad de ingeniería de características manual, reconociendo automáticamente las estructuras complejas en datos de alta dimensionalidad mediante una proyección en un espacio de menor dimensión¹⁷. Básicamente, en las ANN la entrada se introduce en un conjunto de algoritmos y su salida se vuelve a introducir en otros hasta llegar a la salida final¹³.

Aplicación actual de inteligencia artificial en glaucoma

El diagnóstico precoz del glaucoma es esencial¹⁸ y, adicionalmente, evaluar su progresión y pronóstico ayuda a tomar decisiones terapéuticas y personalizar el tratamiento para un monitoreo más efectivo.

Aunque las primeras aplicaciones de procesamiento de imágenes en el glaucoma datan de 1950, el empleo de técnicas de ML en este campo se consolidó en la década de 1990. Específicamente, el uso de redes neuronales artificiales en el análisis de campos visuales para el diagnóstico de la enfermedad marcó un hito significativo⁵. En la actualidad, los sistemas de IA aplicadas al glaucoma se basan en imágenes de PC, FFO y OCT, ya que estas modalidades proporcionan datos altamente estructurados⁴.

Diagnóstico de glaucoma (Tabla 1)

Como se mencionó, inicialmente esta área estaba enfocada en la PC, ya que esta consiste en un estudio estandarizado y numérico que resulta fácil de interpretar para los *softwares* de IA. Las publicaciones actuales siguen apoyando el uso de este método complementario combinado con sistemas de ML para el diagnóstico de glaucoma. Un modelo de ANN publicado en el año 2022 que utilizó más de 16,000 PC logró áreas bajo la curva (AUC) de hasta 0,93 en la tarea de diferenciar entre casos glaucomatosos y normales¹⁹. Estos excelentes resultados también son apoyados por Li et al.²⁰, en este caso su algoritmo consiguió un AUC de hasta aproximadamente 0,87. Adicionalmente, en dicho trabajo se compararon la eficacia diagnóstica de las máquinas con médicos residentes, oftalmólogos y glaucomatólogos y dos métodos basados en reglas (AGIS y GSS2). Se demostró que la IA logró una mayor precisión en comparación con el resto.

Actualmente, se encuentran en auge los sistemas que utilizan fotografías del fondo de ojo, ya que proporcionan información detallada sobre el color, la textura y la morfología del nervio óptico⁴. De esta manera,

Tabla 1. Modelos de inteligencia artificial para diagnóstico de glaucoma

Publicación	Año	Modalidad	Resultados
Huang et al. ¹⁹	2022	PC	AUC 0,93 y P 85% HFA AUC 0,90 y P 90% Octopus
Li et al. ²⁰	2019	PC	AUC 0,87 S 93,2% E 82,6%
Phasuk et al. ²¹	2019	FFO	AUC 0,94
Liu et al. ²²	2019	FFO	AUC 0,996 S 96,2% E 97,7%
Asaoka et al. ²³	2019	OCT	AUC 0,937 S 82,5% E 93,9%
Lee et al. ²⁴	2020	OCT	AUC 0,990 S 94,7% E 100%

PC: perimetría computarizada; FFO: fotografía del fondo de ojo; OCT: tomografía de coherencia óptica; AUC: área bajo la curva; P: precisión; HFA: *Humphrey Field Analyzer*; S: sensibilidad; E: especificidad.

los modelos de ML son entrenados para detectar patrones específicos que indican la presencia o ausencia de glaucoma, como el patrón de pérdida del borde neuroretiniano, el adelgazamiento localizado de la capa de fibras nerviosas de la retina (RNFL) y el aumento del radio copa-disco (CDR)²¹. Con esta modalidad, la mayoría ha conseguido AUC de 0,9 o más⁴. Tal es el caso de un reciente metaanálisis de 17 estudios que utilizaron 30 cohortes diferentes de pacientes reportó un AUC de 0,93 para el diagnóstico del glaucoma basado en fotografías a color del fondo de ojo mediante ML²⁵. Estos hallazgos son respaldados por múltiples publicaciones^{21,22,26}.

Con respecto a la OCT, estudios han demostrado que el uso de IA para su interpretación es eficiente, preciso y tiene un buen rendimiento para discriminar los ojos glaucomatosos de los ojos normales⁸. Los parámetros analizados clásicamente para el glaucoma incluyen tres regiones: el grosor de la RNFL peripapilar, parámetros maculares (exploraciones de cubo macular, complejo de células ganglionares y capa de células ganglionares más la capa plexiforme interna) y parámetros del disco óptico (apertura de la membrana de Bruch-ancho mínimo de la cresta neuroretiniana y exploraciones de cubo de la cabeza del nervio óptico)²⁷. Modelos recientes han conseguido AUC por encima de 0,93²³ e incluso de hasta 0,99²⁴.

Tabla 2. Modelos de inteligencia artificial para progresión, predicción y pronóstico de glaucoma

Publicación	Año	Modalidad	Resultados
Lin et al. ²⁸	2003	PC	Progresión: – AUC 0,92 – S 86% – E 88%
Yousefi et al. ²⁹	2018	PC	Progresión en 25% de los ojos: – ML 3,5 años – Otros métodos > 3,9 años
Wang et al. ³⁰	2019	PC	Progresión: – AUC modelo de arquetipos 0,77
Li et al. ³¹	2022	FFO y PC	Incidencia: AUC 0,90 Progresión: AUC 0,91
Cristopher et al. ³²	2020	OCT	Detección: – DVG AUC 0,88 – DVG leve AUC 0,82 Predicción: – MD: R ² 0,70; MAE 2,5 dB
Thakur et al. ³³	2020	FFO	Predicción: – 1 a 3 años AUC 0,88 – 4 a 7 años AUC 0,77

PC: perimetría computarizada; FFO: fotografía del fondo de ojo; OCT: tomografía de coherencia óptica; AUC: área bajo la curva; S: sensibilidad; E: especificidad; ML: *machine learning*; DVG: daño visual glaucomatoso; MD: desviación media; MAE: error absoluto medio.

Progresión, predicción y pronóstico de glaucoma (Tabla 2)

Tradicionalmente, la progresión del glaucoma puede clasificarse como estructural o funcional. La primera se evalúa mediante medidas del área del borde neuroretiniano, el grosor de la RNFL, y la CDR expresada en unidades de cambio por año. Por otro lado, la funcional se evalúa mediante PC y análisis de índices derivados de esta, como la desviación media y el índice de campo visual¹². Actualmente no existen pruebas clínicas ampliamente aceptadas que puedan predecir la progresión del glaucoma, por lo que la evaluación depende en gran medida de la experiencia y conocimiento de los médicos y generalmente requiere múltiples consultas⁴.

Al igual que sucede con los modelos de diagnóstico, las más antiguas aplicaciones de IA en la progresión de glaucoma se han centrado en la PC. Esto puede explicarse, principalmente, por la existencia más prolongada de la tecnología de pruebas perimétricas, lo que permite más disponibilidad de datos con un mayor

seguimiento comparado a otras técnicas más recientes⁵. Lin et al.²⁸ introdujeron uno de los primeros modelos de ML en la detección de progresión del glaucoma basada en PC, obteniendo un AUC de 0,92. De manera más reciente, Yousefi et al.²⁹ demostraron que la IA detecta la pérdida de campo visual en etapas más tempranas que los métodos tradicionales. Asimismo, el trabajo de Wang et al.³⁰ utilizó un método de arquetipos basado en PC que demuestra también muy buena eficacia para este propósito.

Tal como se ha indicado, predecir la progresión y pronóstico del glaucoma es un área de investigación en la que la IA podría prosperar, por lo que varios grupos de investigación están evaluando activamente nuevos enfoques¹¹. En este campo se han demostrado resultados prometedores en el uso de PC, OCT e imágenes de fondo de ojos.

En una publicación de Li et al.³¹ se presentó un sistema de DL para predecir y estratificar el riesgo de glaucoma y su progresión mediante FFO y PC, respectivamente. El sistema logró un rendimiento sobresaliente, consiguiendo AUC de 0,90 para incidencia de glaucoma y 0,91 para predecir progresión. Adicionalmente, Christopher et al.³² demostraron que sus modelos tuvieron una alta precisión al predecir la gravedad de la pérdida funcional en ojos glaucomatosos a partir de imágenes de OCT. Por otra parte, Thakur et al.³³ Propusieron un algoritmo de DL para predecir el desarrollo del glaucoma a partir de FFO varios años antes del inicio de la enfermedad. En la predicción uno a tres años antes del inicio de la enfermedad el modelo consiguió un AUC 0,88 y de 0,77 para cuatro a siete años.

Desafíos y direcciones futuras

A medida que la IA continúa evolucionando e integrándose cada vez más en nuestras vidas, es crucial comprender sus restricciones y desafíos. Si bien ha demostrado un potencial extraordinario en áreas como el reconocimiento de imágenes y la toma de decisiones automatizada, también se enfrenta a limitaciones significativas que requieren una cuidadosa atención.

Para comenzar, existen dificultades relacionadas con la enfermedad en sí y las comorbilidades de cada individuo en particular. El diagnóstico del glaucoma se complica por la falta de una definición universal para la neuropatía óptica glaucomatosa, y específicamente por la falta de un valor de corte cuantificable claro. Esto, sin embargo, no sucede con otras enfermedades oculares que sí causan cambios más claramente definidos²⁷,

como, por ejemplo, la retinopatía diabética. Incluso si las muestras son altamente homogéneas, las discrepancias entre diferentes clínicos pueden inducir variaciones en las entradas, lo cual se propagará durante el entrenamiento y puede generar sesgos en la salida del modelo⁴. Adicionalmente, publicaciones demuestran que comorbilidades oculares como la miopía patológica y la excavación fisiológica son importantes causas de falsos positivos y negativos^{22,34}.

Con respecto a la IA *per se*, es importante destacar que los algoritmos dependen fundamentalmente de las bases de datos⁴. Por lo tanto, para que puedan predecir con alta sensibilidad y especificidad, se deben incluir un gran número de imágenes, lo que muchas veces es limitado por tiempo o dificultades tecnológicas en la obtención y el almacenamiento de estas³⁵. Además, habitualmente el rendimiento de estos sistemas se encuentra afectado cuando las muestras son tomadas en diferentes grupos étnicos, utilizando máquinas y protocolos diferentes con distintas calidades. Se observó que la sensibilidad de un modelo de DL fue ligeramente menor en conjuntos de datos multiétnicos y basados en sitios web²².

La IA se considera una «caja negra», ya que su mecanismo predictivo se desconoce³⁵. A pesar de los esfuerzos realizados para explicar los resultados de estos modelos, la comprensibilidad sigue siendo un desafío crucial en las aplicaciones de oftalmología, ya que, generalmente, los médicos depositan mayor confianza en los métodos que ofrecen razones claras sobre cómo se llega a una determinada decisión, en lugar de simplemente proporcionar un diagnóstico binario sin explicación⁵.

En el futuro, una vez que estos sistemas de IA consigan los permisos y especificaciones pertinentes para su aplicación a la consulta diaria, hay que considerar su integración a dispositivos médicos y sistemas de telemedicina para facilitar la detección y monitorización remota del glaucoma, mejorando así el acceso y la calidad de la atención oftalmológica. Algo interesante que destacar del trabajo ya mencionado de Li et al.³¹ es que demostraron que su algoritmo podría implementarse mediante la captura de imágenes con un *smartphone* para permitir una detección ampliamente accesible del glaucoma a distancia en el futuro. De similar manera, el *Sydney genesis program enlight. AI System*³⁶ desarrolló una plataforma que puede detectar signos de glaucoma utilizando cámaras portátiles para fondo de ojos que envían la información a una nube para su evaluación. Luego, la misma plataforma creará un reporte diferenciando entre aquellos con riesgo alto de glaucoma (que serán referidos a un especialista

para completar el examen) o bajo (se sugerirá un control en 12 meses). Estos sistemas podrían complementarse con otros métodos diagnósticos para mejor precisión.

Conclusión

La aplicación de la IA en el área del glaucoma ha demostrado avances prometedores. Los modelos de aprendizaje automático, como las redes neuronales artificiales y las técnicas de aprendizaje profundo, han evidenciado precisión en la evaluación de dicha enfermedad utilizando diferentes métodos diagnósticos complementarios.

A pesar de que persisten desafíos, la IA se presenta como una herramienta complementaria para los oftalmólogos, mejorando la toma de decisiones clínicas. Sin embargo, se requiere más investigación y validación para su implementación generalizada en la práctica diaria.

En conclusión, la IA tiene el potencial de transformar el cuidado del glaucoma al mejorar la detección temprana y el seguimiento de la enfermedad. Con un enfoque continuo en la colaboración entre oftalmólogos y especialistas en IA, podemos esperar mejoras significativas en la atención y el manejo de esta patología en el futuro.

Financiamiento

La presente investigación no ha recibido ninguna beca específica de agencias de los sectores públicos, comercial, o con ánimo de lucro.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Responsabilidades éticas

Protección de personas y animales. Los autores declaran que para esta investigación no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad de los datos. Los autores declaran que en este artículo no aparecen datos de pacientes.

Derecho a la privacidad y consentimiento informado. Los autores declaran que en este artículo no aparecen datos de pacientes.

Uso de inteligencia artificial para generar textos. Los autores declaran que no han utilizado ningún tipo de inteligencia artificial generativa en la redacción de

este manuscrito ni para la creación de figuras, gráficos, tablas o sus correspondientes pies o leyendas.

Bibliografía

- Schuster AK, Erb C, Hoffmann EM, Dietlein T, Pfeiffer N. The diagnosis and treatment of glaucoma. *Dtsch Arztebl Int.* 2020;117(13):225-34.
- Kang JM, Tanna AP. Glaucoma. *Med Clin North Am.* 2021;105(3):493-510.
- Bunod R, Augstburger E, Brasnu E, Labbe A, Baudouin C. Artificial intelligence and glaucoma: A literature review. *J Fr Ophtalmol.* 2022;45(2):216-32.
- Ichhpujani P, Thakur S, eds. *Artificial intelligence and ophthalmology.* Springer Singapore; 2021.
- Yousefi S. Clinical applications of artificial intelligence in glaucoma. *J Ophthalmic Vis Res.* 2023;18(1):97-112.
- Stein JD, Khawaja AP, Weizer JS. Glaucoma in adults-screening, diagnosis, and management: A review. *JAMA.* 2021;325(2):164-174.
- Thompson AC, Jammal AA, Medeiros FA. A review of deep learning for screening, diagnosis, and detection of glaucoma progression. *Transl Vis Sci Technol.* 2020;9(2):42.
- Ran AR, Tham CC, Chan PP, Cheng CY, Tham YC, Rimm TH, et al. Deep learning in glaucoma with optical coherence tomography: a review [published correction appears in: *Eye (Lond).* 2021;35(1):357]. *Eye (Lond).* 2021;35(1):188-201.
- Amisha, Malik P, Pathania M, Rathaur VK. Overview of artificial intelligence in medicine. *J Family Med Prim Care.* 2019;8(7):2328-31.
- Sunarti S, Fadzilul Rahman F, Naufal M, Risky M, Febriyanto K, Masnina R. Artificial intelligence in healthcare: opportunities and risk for future. *Gac Sanit.* 2021;35(Suppl 1):S67-S70.
- Girard MJA, Schmetterer L. Artificial intelligence and deep learning in glaucoma: Current state and future prospects. *Prog Brain Res.* 2020; 257:37-64.
- Nunez R, Harris A, Ibrahim O, Keller J, Wikle CK, Robinson E, et al. Artificial intelligence to aid glaucoma diagnosis and monitoring: State of the art and new directions. *Photonics.* 2022;9:810.
- Mintz Y, Brodie R. Introduction to artificial intelligence in medicine. *Minim Invasive Ther Allied Technol.* 2019;28(2):73-81.
- Hogarty DT, Mackey DA, Hewitt AW. Current state and future prospects of artificial intelligence in ophthalmology: a review. *Clin Exp Ophthalmol.* 2019;47(1):128-39.
- Zheng C, Johnson TV, Garg A, Boland MV. Artificial intelligence in glaucoma. *Curr Opin Ophthalmol.* 2019;30(2):97-103.
- Cote MP, Lubowitz JH, Brand JC, Rossi MJ. Artificial intelligence, machine learning, and medicine: A little background goes a long way toward understanding. *Arthroscopy.* 2021;37(6):1699-702.
- Ting DSW, Pasquale LR, Peng L, Campbell JP, Lee AY, Raman R, et al. Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology. *Br J Ophthalmol.* 2019;103(2):167-75.
- Camara J, Neto A, Pires IM, Villasana MV, Zdravevski E, Cunha A. Literature review on artificial intelligence methods for glaucoma screening, segmentation, and classification. *J Imaging.* 2022;8(2):19.
- Huang X, Jin K, Zhu J, Xue Y, Si K, Zhang C, et al. A structure-related fine-grained deep learning system with diversity data for universal glaucoma visual field grading. *Front Med (Lausanne).* 2022;9:832920.
- Li F, Wang Z, Qu G, Song D, Yuan Y, Xu Y, et al. Automatic differentiation of glaucoma visual field from non-glaucoma visual field using deep convolutional neural network [published correction appears in: *BMC Med Imaging.* 2019;19(1):40]. *BMC Med Imaging.* 2018;18(1):35.
- Phasuk S, Tantibundhit C, Poopresert P, Yaemsuk A, Suvannachart P, Itthipanichpong R, et al. Automated glaucoma screening from retinal fundus image using deep learning. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2019;2019:904-7.
- Liu H, Li L, Wormstone IM, Qiao C, Zhang C, Liu P, et al. Development and validation of a deep learning system to detect glaucomatous optic neuropathy using fundus photographs [published correction appears in: *JAMA Ophthalmol.* 2019;137(12):1468]. *JAMA Ophthalmol.* 2019; 137(12):1353-60.
- Asaoka R, Murata H, Hirasawa K, Fujino Y, Matsuura M, Miki A, et al. Using deep learning and transfer learning to accurately diagnose early-onset glaucoma from macular optical coherence tomography images. *Am J Ophthalmol.* 2019;198:136-45.
- Lee J, Kim YK, Park KH, Jeoung JW. Diagnosing glaucoma with spectral-domain optical coherence tomography using deep learning classifier. *J Glaucoma.* 2020;29(4):287-94.
- Aggarwal R, Sounderajah V, Martin G, Ting DSW, Karthikesalingam A, King D, et al. Diagnostic accuracy of deep learning in medical imaging: a systematic review and meta-analysis. *NPJ Digit Med.* 2021;4(1):65.
- Buisson M, Navel V, Labbé A, Watson SL, Baker JS, Murtagh P, et al. Deep learning versus ophthalmologists for screening for glaucoma on fundus examination: A systematic review and meta-analysis. *Clin Exp Ophthalmol.* 2021;49(9):1027-38.

27. Gutierrez A, Chen TC. Artificial intelligence in glaucoma: posterior segment optical coherence tomography. *Curr Opin Ophthalmol.* 2023; 34(3):245-54.
28. Lin A, Hoffman D, Gaasterland DE, Caprioli J. Neural networks to identify glaucomatous visual field progression. *Am J Ophthalmol.* 2003; 135(1):49-54.
29. Yousefi S, Kiwaki T, Zheng Y, Sugiura H, Asaoka R, Murata H, et al. Detection of longitudinal visual field progression in glaucoma using machine learning. *Am J Ophthalmol.* 2018;193:71-9.
30. Wang M, Shen LQ, Pasquale LR, Petrakos P, Formica S, Boland MV, et al. An artificial intelligence approach to detect visual field progression in glaucoma based on spatial pattern analysis. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2019;60(1):365-75.
31. Li F, Su Y, Lin F, Li Z, Song Y, Nie S, et al. A deep-learning system predicts glaucoma incidence and progression using retinal photographs. *J Clin Invest.* 2022;132(11):e157968.
32. Christopher M, Bowd C, Belghith A, Goldbaum MH, Weinreb RN, Fazio MA, et al. Deep learning approaches predict glaucomatous visual field damage from OCT optic nerve head en face images and retinal nerve fiber layer thickness maps. *Ophthalmology.* 2020; 127(3):346-56.
33. Thakur A, Goldbaum M, Yousefi S. Predicting glaucoma before onset using deep learning. *Ophthalmol Glaucoma.* 2020;3(4):262-8.
34. 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.* 2018;125(8):1199-206.
35. Mayro EL, Wang M, Elze T, Pasquale LR. The impact of artificial intelligence in the diagnosis and management of glaucoma. *Eye (Lond).* 2020; 34(1):1-11.
36. Liu S. Sydney genesis program enlight. *AI System [Internet]. Sydney Morning Herald; 2019.* Disponible en: <https://researchers.mq.edu.au/en/clippings/sydney-genesis-program-enlightai-system>