

# Diagnóstico de glaucoma

## *Glaucoma diagnosis*

J. Téllez Vázquez, E. Mingorance Moya, M. Acuña Salles, A. Marín Ballesteros,  
I. Loscos Giménez

### Resumen

El diagnóstico y seguimiento del glaucoma es complejo, porque se basa en la evaluación subjetiva de gran cantidad de datos clínicos, estructurales y funcionales por un especialista con experiencia. La inteligencia artificial (IA) se postula como una herramienta clínica capaz de agilizar y simplificar el proceso de toma de decisiones, aportando un enfoque más preciso y uniforme. En este capítulo, ofreceremos un breve repaso de los algoritmos y las aplicaciones de la IA en glaucoma, y discutiremos las limitaciones y retos futuros que deberá superar esta tecnología para poder integrarse en la práctica clínica habitual.

**Palabras clave:** Inteligencia artificial. Glaucoma. Progresión. Diagnóstico. Cribado.

### Resum

El diagnòstic i seguiment del glaucoma és complex perquè es basa en l'avaluació subjectiva de gran quantitat de dades clíniques, estructurals i funcionals per un especialista amb experiència. La intel·ligència artificial (IA) es postula com una eina clínica capaç d'agilitzar i simplificar el procés de presa de decisions, aportant un enfoc més precís i uniforme. En aquest capítol oferirem un breu repàs dels algoritmes i les aplicacions de la IA en glaucoma, i discutirem les limitacions i reptes futurs que haurà de sobrepassar aquesta tecnologia per tal d'integrar-se a la pràctica clínica habitual.

**Paraules clau:** Intel·ligència artificial. Glaucoma. Progresió. Diagnòstic. Cribatge.

### Abstract

Diagnosis and management of glaucoma is complex due to the subjective evaluation of a large amount of clinical, structural, and functional data by an experienced specialist. Artificial intelligence (AI) is proposed as a clinical tool capable of streamlining and simplifying the decision-making process, providing a more accurate and consistent approach. In this chapter, we will provide a brief overview of AI algorithms and applications in glaucoma, and discuss the limitations and future challenges that this technology must overcome to be integrated into routine clinical practice.

**Key words:** Artificial intelligence. Glaucoma. Progression. Diagnosis. Screening.

## 3.6. Diagnóstico de glaucoma

### *Glaucoma diagnosis*

**J. Téllez Vázquez<sup>1</sup>, E. Mingorance Moya<sup>1</sup>, M. Acuña Salles<sup>1</sup>, A. Marín Ballesteros<sup>2</sup>, I. Loscos Giménez<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Adjunto en el Servicio de Oftalmología. Hospital Santa Creu i Sant Pau. Barcelona. <sup>2</sup>Residente en el Servicio de Oftalmología. Hospital Santa Creu i Sant Pau. Barcelona. <sup>3</sup>Servicio de Oftalmología. Hospital Santa Creu i Sant Pau. Barcelona.

#### Correspondencia:

Jesús Téllez Vazquez

E-mail: [jesus.tellez@barraquer.com](mailto:jesus.tellez@barraquer.com)

### Introducción

En el glaucoma, la detección precoz, el seguimiento periódico crónico y el tratamiento oportuno de cada caso son cruciales para preservar la función visual y reducir el riesgo de discapacidad permanente<sup>1</sup>. El diagnóstico y manejo de la enfermedad se basan en la valoración conjunta y repetida de datos obtenidos de la exploración oftalmológica y de pruebas estructurales (fotografía de fondo de ojo, tomografía de coherencia óptica [OCT]) y funcionales (campo visual [CV])<sup>1,2</sup>. El análisis de esta información combinada precisa un especialista con experiencia y, pese a ello, es dependiente del evaluador, fundamentalmente en etapas iniciales y en situaciones clínicas complejas (alta miopía, glaucoma normotensivo, etc.)<sup>1</sup>.

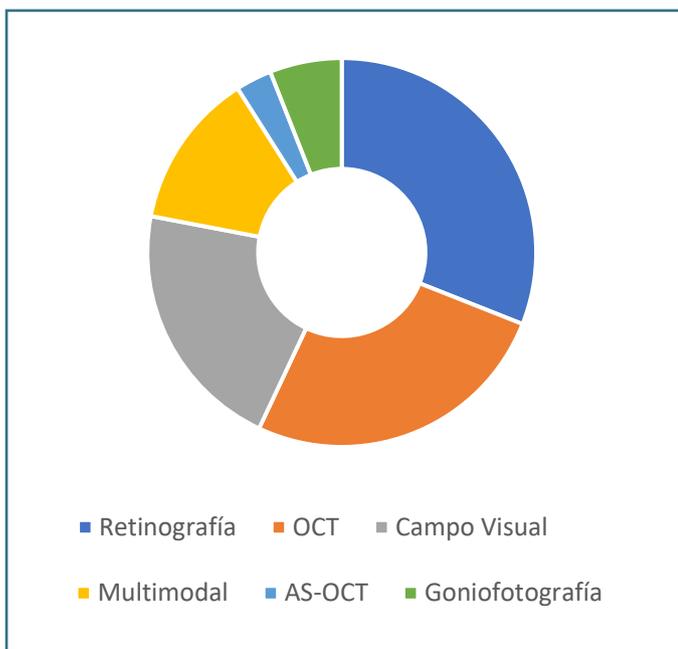
La previsión de aumento de la prevalencia de glaucoma debido al envejecimiento poblacional, junto con la alta demanda de atención sanitaria especializada crónica que esta enfermedad requiere, plantean un problema de salud pública para las próximas décadas<sup>2</sup>. En este marco, se hace imprescindible el desarrollo de nuevas modalidades de diagnóstico y estratificación de riesgo de glaucoma que permitan no solo abordar la discrepancia entre capacidad y demanda asistencial, sino mejorar los resultados de los estándares de la práctica clínica actual<sup>3</sup>.

La IA se perfila como una solución potencial a estos retos<sup>1,3</sup>, y prueba de ello es que el interés y la investigación clínica en esta área han crecido exponencialmente en los últimos años (Figura 1). El uso de múltiples modalidades de imagen y datos clínicos digitalizados en la asistencia rutinaria del glaucoma facilitan la investigación traslacional entre la disciplina médica y la informática<sup>3</sup>. Aunque la mayoría de tecnologías comercializadas de campo visual (CV) y OCT ya incorporan algoritmos de cuantificación, análisis y predicción asistidos por IA, no existe todavía aprobación oficial de un sistema autónomo de IA para la detección y monitoreo del glaucoma, pero los resultados obtenidos en estudios son prometedores<sup>4</sup>.

### Algoritmos de inteligencia artificial en glaucoma

#### *Algoritmos de inteligencia artificial basados en análisis de imágenes de fondo de ojo*

La IA, especialmente los algoritmos de aprendizaje profundo o *deep learning* (DL), puede agilizar el proceso de evaluación del nervio óptico y la capa de fibras nerviosas de la retina (CFNR) para el diagnóstico y seguimiento del glaucoma a partir de fotografías



**Figura 1.** Aportación de las diferentes tecnologías basadas en imagen al total de algoritmos de inteligencia artificial en glaucoma.

del fondo de ojo, que son fáciles de obtener y económicas. Esto supera la interpretación subjetiva y ahorra tiempo en comparación con la evaluación manual realizada por oftalmólogos<sup>1</sup>.

Desde la década de 1950, se han propuesto modelos de IA para el análisis de fotografías del fondo de ojo. En estos modelos convencionales, se utilizaban técnicas clásicas de procesamiento de imágenes que, aunque detectaban automáticamente los límites del disco óptico y la excavación papilar para cuantificar los cambios glaucomatosos, requerían la intervención de personas expertas en el proceso. Dado que las imágenes de fondo de ojo en color no proporcionan parámetros mensurables, su análisis requiere etapas de preprocesamiento en las que el algoritmo debe, primero, cuantificar las características importantes (identificación de puntos de referencia) y, luego, aprender esas características cuantificadas para el diagnóstico del glaucoma. Algunas técnicas comunes usadas para este fin eran la eualización de histogramas, la aplicación de filtros morfológicos y los contornos activos. Procesos más complejos, como el flujo de vectores de gradiente, se utilizaron para delinear los límites del disco óptico y la excavación en modelos de IA iniciales<sup>4</sup>.

Dado que la relación copa-disco es un parámetro importante en la valoración del glaucoma, muchas de las estrategias de IA se centraron en la localización del nervio óptico en la fotografía y medición del disco y su excavación para realizar una cuantificación automatizada de la relación copa-disco, mediante técnicas de segmentación o no segmentación de la imagen<sup>4,5</sup>.

Sin embargo, los modelos de redes neuronales convolucionales (CNN, *convolutional neural networks*) profundas emergentes han cambiado la forma en que se aborda la cuantificación de imágenes del fondo de ojo en color, pasando de un enfoque manual de ingeniería de características a un proceso automático de extremo a extremo. Estos modelos de DL aprenden características complejas de las imágenes (estructuras retinianas y papilares, curvatura de los vasos sanguíneos, etc.) para analizar y segmentar automáticamente el disco óptico y la excavación, y han demostrado una alta precisión diagnóstica del glaucoma con un área bajo la curva (AUC)-característica operativa del receptor (ROC) entre 0,84 y 0,99, siendo en la mayoría de estudios superior a 0,9, y con niveles de sensibilidad y especificidad superiores al 90%<sup>3-6</sup>. Además, estos resultados han demostrado ser estadísticamente superiores a la precisión diagnóstica de los oftalmólogos (0,80) empleando solo el 10% del tiempo que estos necesitan para evaluar las imágenes de fondo de ojo<sup>6</sup>.

Aunque existen estrategias de IA para detectar la progresión del glaucoma basadas en fotografías de fondo de ojo que trabajan aplicando técnicas clásicas de procesamiento de imagen, estas son poco frecuentes y la mayoría de algoritmos de progresión utilizan imágenes de OCT y perimetría automatizada estándar (SAP)<sup>4</sup>. No obstante, el desarrollo por Medeiros *et al.* de un entrenamiento alternativo de los modelos de DL con imágenes emparejadas de fotografías de fondo de ojo y OCT, denominado "máquina a máquina" (M2M), ha demostrado cuantificar con alta precisión la CFNR a partir de fotografías del disco óptico y evaluar sus cambios a lo largo del tiempo<sup>1,7</sup>.

Con un enfoque similar, otro trabajo (Thompson *et al.*) usó el parámetro de apertura de la membrana de Bruch basada en la distancia mínima al borde (BMO-MRW) de la OCT para etiquetar fotografías del fondo de ojo, y demostró estimar las medidas reales de BMO-MRW y sus cambios evolutivos para el diagnóstico y seguimiento del glaucoma con una AUC-ROC de 0,94<sup>7</sup>.

## Algoritmos de inteligencia artificial en glaucoma basados en el análisis de OCT

Desde su introducción en 1990, la OCT se ha convertido en una modalidad de imagen indispensable en la evaluación del glaucoma. No es de extrañar, por tanto, que en los últimos años, se hayan desarrollado numerosas estrategias de IA basadas en imágenes de OCT para el diagnóstico y seguimiento de esta enfermedad.

Desde 2005, diversos modelos de aprendizaje automático tradicional (ML, *machine learning*) para el diagnóstico de glaucoma, basado en mapas de grosor de la CFNR peripapilar y la capa de células ganglionares (CCG) de la mácula derivados de la OCT, han demostrado una alta capacidad para discriminar entre ojos normales y ojos con glaucoma, con valores de AUC-ROC que van desde 0,69 a 0,99<sup>3</sup>. En estos estudios, se han utilizado distintos clasificadores de ML, tales como máquinas de vectores de soporte, análisis discriminante lineal, árboles de regresión, particiones recursivas y modelos lineales generalizados. Recientemente, los modelos de CNN profundas han transformado el procesamiento de imágenes de OCT, permitiendo una cuantificación automática de extremo a extremo, que ha simplificado y agilizado el proceso, eliminando la intervención humana para la extracción manual de características<sup>4</sup>.

Existen múltiples algoritmos de DL para el diagnóstico de glaucoma y, aunque la CFNR ha sido clásicamente la variable más cuantificada, muchos de ellos han basado su análisis en otros parámetros de las imágenes de OCT. Ran *et al.*, por ejemplo, desarrollaron un modelo de DL tridimensional multitarea a partir de escaneos de OCT volumétricos no procesados con un AUC-ROC de 0,86 a 0,90<sup>4</sup>.

Otro trabajo analizó redes neuronales artificiales (ANN, *artificial neural network*) basándose en la densidad de vasos maculares, la CCG de la mácula y la combinación de ambos en ANN, demostrando un mejor rendimiento cuando se combinaban los dos parámetros (AUC-ROC de 0,87)<sup>8</sup>.

En un estudio reciente, se propuso una estrategia de DL para clasificar ojos sanos y glaucomatosos a partir de volúmenes de OCT no segmentados de la cabeza del nervio óptico, logrando una AUC-ROC de 0,94 y mostrando que el margen neurorretiniano, el área del disco óptico, y la lámina cribosa y sus regiones circundantes, estaban significativamente asociados con la clasificación como glaucomatosos<sup>3</sup>.

Una metodología distinta de análisis de datos de OCT para la detección y progresión del glaucoma es el uso de un enfoque impulsado por datos y sin dependencia de características específicas (*feature-agnostic data-driven approach*). En este método, no se requiere el uso de biomarcadores de enfermedad conocidos o supuestos, como el grosor de la CFNR o de la CCG, evitando la dependencia de una segmentación depurada de las capas de OCT. Este enfoque ha mostrado resultados prometedores, y podría ser útil en imágenes con señal débil, ojos con enfermedad avanzada y ojos con otras patologías retinianas<sup>8</sup>.

Otros modelos con transformaciones más complejas de los datos de OCT, como la segmentación de superpíxeles en el aprendizaje supervisado, un enfoque híbrido de DL y el uso de la distancia de Mahalanobis, han alcanzado valores de AUC-ROC entre 0,86 y 0,99<sup>3</sup>.

En general, la mayoría de trabajos de DL han demostrado una alta precisión diagnóstica para el glaucoma, y así lo corrobora un metaanálisis reciente que examinó cinco estudios de DL basado en OCT y reportó una AUC-ROC de 0,96 para la detección de neuropatía óptica glaucomatosa, con una sensibilidad y especificidad combinadas del 94 y 95%, respectivamente<sup>4</sup>.

Los avances en los modelos de IA han planteado la posibilidad de utilizar mediciones objetivas de OCT para detectar y monitorear la pérdida visual funcional. En este sentido, varios estudios han intentado estimar parámetros de daño del CV global y local (estimación de sensibilidades de umbral y estimación de desviación media) a partir de mediciones de la CFNR derivadas de la exploración de polarimetría láser y OCT. Aunque sus resultados parecen prometedores, los modelos actuales para predecir parámetros de SAP a partir de OCT presentan aún tasas de error de estimación local y global insuficientemente bajas para su aplicación en clínica<sup>4</sup>.

## Algoritmos de inteligencia artificial en glaucoma basados en campo visual

Desde 1994, se han buscado estrategias de IA que permitan diagnosticar el glaucoma utilizando datos del CV. Ya en las primeras etapas, se observó que la IA puede clasificar la gravedad de la pérdida funcional, desde estadios tempranos a avanzados, partiendo de un solo CV. También en 1994 y mediante una estrategia de retropropagación con una ANN, se demostró que las

redes neuronales podían ser tan efectivas como un especialista experimentado en distinguir los CV normales de los afectados por glaucoma. La mayoría de estos estudios y otros posteriores han usado clasificadores de ML no supervisados para identificar patrones típicos de pérdida campimétrica, con resultados de sensibilidad y especificidad elevados. Además, las estrategias de ML han demostrado ser efectivas en la detección de lesiones tempranas del CV<sup>3,4</sup>.

En cuanto a la aplicación de DL en SAP, modelos recientes de CNN han obtenido AUC-ROC de hasta 0,93 para el diagnóstico del glaucoma<sup>4</sup>, y han demostrado que las CNN discriminan entre CV sanos y con glaucoma temprano, con una precisión mayor que el uso de la desviación media de la perimetría estándar o las redes neuronales sin características convolucionales<sup>7</sup>.

Además, los algoritmos de DL permiten el diagnóstico del glaucoma en CV que aún parecen normales según los parámetros estándar. En este sentido, Asaoka *et al.* desarrollaron un clasificador de DL que permite categorizar CV preperimétricos frente a CV normales con una AUC-ROC de 0,926, siendo significativamente mejor que otros clasificadores de ML utilizados para realizar la misma tarea<sup>1,7</sup>.

Múltiples estudios han reportado la potencial superioridad de algunos clasificadores de ML, ANN entrenadas y distintos algoritmos de DL (CNN, M2M) frente a oftalmólogos experimentados e índices tradicionales (*Glaucoma Hemifield Test*, *Mean Deviation*, *Pattern Standard Deviation*, *The Glaucoma Staging System 2 (GSS2)* y *Advanced Glaucoma Intervention Study [AGIS]*) en la detección de glaucoma basada en SAP<sup>1,3,4,7</sup>.

En la práctica clínica, el análisis de pruebas seriadas de CV constituye el patrón oro para evaluar la progresión del glaucoma. El primer éxito en la implementación de IA para detectar la progresión glaucomatosa del CV fue reportada por Lin *et al.* en 2003 con una AUC-ROC de 0,92. Aunque los trabajos iniciales utilizaron técnicas de aprendizaje supervisado, a partir de 2005 empezaron a aplicarse modelos de aprendizaje automático no supervisado para identificar áreas de progresión y patrones de progresión en CV con glaucoma, con resultados igual o mejores que los criterios clínicos. Los mejores enfoques de ML usados en la evaluación de progresión campimétrica han alcanzado un AUC-ROC de 0,86, con una sensibilidad y especificidad del 89,9 y 93,8%, respectivamente<sup>3</sup>.

Aunque prometedoras, ninguna de estas técnicas se ha incorporado a la práctica clínica, y no todas ellas han mostrado ventajas significativas respecto a métodos bien establecidos, como el análisis de progresión guiada o el análisis basado en tendencias de la desviación media. En cuanto a las aplicaciones de DL en la detección de progresión, existen pocos estudios y en ellos se han utilizado modelos de autoencodificador variacional, redes neuronales recurrentes y CNN de memoria a largo plazo<sup>7</sup>.

Las CNN de memoria a largo plazo mostraron una precisión del 0,91-0,93 y obtuvieron un mejor rendimiento cuando se combinaron con datos clínicos<sup>9</sup>.

Más recientemente, se han probado estrategias de DL con ANN que predicen la evolución del CV a cinco años a partir de una única prueba inicial<sup>3</sup>, y se ha desarrollado una aplicación para *smartphone* (teléfono inteligente) denominada iGlaucoma que utiliza técnicas de reconocimiento óptico y modelos de CNN para detectar cambios en el CV. Conviene destacar que en algún estudio, los modelos de CNN y red neuronal recurrente han presentado errores en la predicción de progresión de glaucomas severos, subestimando la pérdida campimétrica. Aunque estas deficiencias se han mejorado con modelos generativos de autoencodificador variacional, estos resultados pueden limitar su aplicabilidad clínica<sup>9</sup>.

Otra consideración importante es que la mayoría de algoritmos se han entrenado solo con pruebas de CV confiables, y su precisión diagnóstica podría variar al aplicarse a CV de baja calidad propios de la práctica clínica real<sup>7</sup>.

## Aplicaciones de inteligencia artificial en glaucoma

### Aplicaciones de inteligencia artificial en el cribado y diagnóstico del glaucoma

La prevalencia del glaucoma, así como la trascendencia de su diagnóstico precoz, hacen de esta patología una candidata ideal para la aplicación de programas de cribado basados en IA. Sin embargo, no existe en la actualidad ningún algoritmo aprobado para tal indicación.

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, los sistemas de IA basados en fotografías del fondo de ojo, OCT y SAP, han demostrado una alta precisión diagnóstica del glaucoma,

superando incluso a expertos oftalmólogos y a los parámetros convencionales de cada prueba<sup>3,10</sup>.

Dentro de estos sistemas, los que han despertado mayor interés son las estructuras que trabajan con segmentación de la imagen de retinografía, es decir, en un primer paso, se detectan los bordes de la excavación y el disco, y en un segundo paso, se llega al diagnóstico, bien aplicando una regla clínica lógica o un modelo de ML. La alta capacidad diagnóstica de estas estructuras en dos pasos (0,95) es comparable a los modelos de DL de un solo paso, ofreciendo ventajas evidentes desde el punto de vista ético-legal y la posibilidad de involucrar al paciente en la toma de decisiones<sup>11</sup>. De hecho, modelos de DL basados en retinografías pueden predecir el glaucoma 4-7 años antes del desarrollo de la enfermedad<sup>12</sup>.

¿Qué modalidad de imagen se adaptaría mejor a las condiciones que exige un *screening* (cribado) poblacional? Probablemente, los modelos de IA basados en imagen del fondo de ojo, en cualquiera de sus modalidades, serían los más viables. Las ventajas de la retinografía derivan de su bajo coste y su portabilidad a las poblaciones y localizaciones más desfavorecidas; incluso con un teléfono móvil se obtienen imágenes de calidad suficiente. Además, en la actualidad, disponemos de algoritmos que nos permiten predecir valores de la CFNR obtenidos por OCT<sup>13</sup> o discriminación de CV normales-patológicos<sup>14</sup> a partir de una simple retinografía. La tecnología OCT, aunque rápida y sencilla de usar, no puede transportarse fácilmente y su precio es más costoso; y las características inherentes a SAP, como el tiempo de adquisición o variabilidad, dificultan su aplicación en la práctica clínica diaria.

Aunque muy prometedor, el uso de las diferentes modalidades de imagen basadas en IA para el diagnóstico y *screening* de glaucoma presenta a día de hoy algunas limitaciones. Entre ellas, se encuentra la falta de estudios que comparen entre sí las diferentes tecnologías y los diferentes dispositivos comerciales para el despistaje poblacional o la necesidad de incluir en los sistemas otras fuentes de datos, como información clínica o genética. Por otro lado, las limitaciones asociadas a las bases de datos, referentes a su volumen, accesibilidad y diversidad, suponen también un problema a la hora de generalizar y extrapolar los resultados a la población real. La falta de consenso en los criterios diagnósticos del glaucoma y la alta variabilidad anatómica de la región papilar son dos factores que suponen una dificultad añadida.

No obstante, ¿qué puede aportar la IA en el diagnóstico y *screening* del glaucoma? En un futuro próximo, debería convertirse en

una herramienta básica que posibilitara el acceso a la atención especializada a aquellos enfermos que realmente lo precisan, es decir, aquellos en riesgo de discapacidad y/o pérdida de la calidad de vida relacionada con la visión. A esto se le llama refinamiento de las derivaciones. Por supuesto, un cribado poblacional de calidad permitiría un diagnóstico más precoz y, por consiguiente, menor discapacidad. Este cribado debería ser el foco de los futuros algoritmos de DL; precisaría el mejor balance sensibilidad/especificidad a un coste/beneficio aceptable; y debería incluir diferentes parámetros, como la presión intraocular, SAP, índice excavación-disco y valores de OCT<sup>15</sup>.

### **Aplicaciones de inteligencia artificial en el seguimiento y progresión del glaucoma**

En la clínica, para determinar si un paciente individual está empeorando, debemos considerar todos los parámetros clínicos y demográficos: presión intraocular, retinografías, información del CV y de los *scans* (escaneos) de OCT. Esta tarea resulta ardua y puede dar lugar a falsos positivos y negativos. La introducción de IA para la identificación de verdaderos progresores, en particular, de los progresores rápidos, resultaría francamente útil para señalar qué casos requieren una mayor dedicación de esfuerzos y recursos con objeto de disminuir el riesgo de discapacidad visual.

Los primeros estudios sobre IA y progresión en glaucoma datan de los años 90<sup>16-19</sup> y emplean exclusivamente parámetros de CV. Desde entonces, diversos trabajos con IA han reportado la capacidad de algoritmos de ML para detectar la progresión antes y velocidades de progresión más lentas que el análisis estadístico convencional en CV normales, sospechosos y con glaucoma (Yousefi *et al.*<sup>20</sup>), detectar la progresión campimétrica en glaucoma miópico (Lee *et al.*<sup>21</sup>), clasificar la severidad de la pérdida de CV y monitorizar su progresión (Yousefi *et al.*<sup>22</sup>).

Otros grupos han puesto su foco en el uso de IA para identificar patrones de pérdida espacial en el CV que podrían estar asociados a futura progresión<sup>23,24</sup>.

En 2021, se publica el primer estudio en el que un modelo de DL basado en retinografías permite discriminar progresores y no progresores a partir de la predicción del grosor de CFNR<sup>25</sup>. Ese mismo año, el estudio de Nouri-Mahdavi<sup>26</sup> describe un modelo de ML con capacidad para predecir la progresión campimétrica a partir de medidas estructurales basales y longitudinales de OCT,

concretando los parámetros y topografías con mayor capacidad predictiva.

Mejorar la habilidad de un modelo de IA para detectar la progresión es posible combinando datos clínicos, campimétricos y de OCT (Dixit *et al.*<sup>27</sup>). Sin embargo, no en todos los modelos la combinación de *inputs* supone una mayor capacidad diagnóstica. De hecho, pocas son las aplicaciones que trabajan con todos los parámetros (estructura, función y datos clínicos) en algoritmos destinados a detectar la progresión en glaucoma. Como se ha comentado anteriormente, las predicciones de DL de CFNR basadas en retinografía pueden predecir la progresión futura en sospechosos de glaucoma, y otros modelos multimodales han demostrado potencial para individualizar la frecuencia de visitas en glaucomas y sospechosos<sup>28</sup>.

Un nuevo método para descubrir la progresión de forma precoz, actualmente en fase II, es la detección de células retinianas en apoptosis (DARC)<sup>29</sup>. La técnica usa el marcador molecular anexina A5, con gran afinidad por células bajo estrés y fases tempranas de apoptosis. De esta forma, el número de células teñidas, observadas con imágenes de fluorescencia retiniana, representan el grado de actividad de la enfermedad. Posteriormente, un algoritmo CNN automático entrenado para la detección de puntos DARC demostró un mayor número de puntos DARC en pacientes con glaucoma que después progresaron por OCT.

En la actualidad, lamentablemente, ninguno de los algoritmos mencionados está disponible para su uso en la práctica clínica. La escasez de bases de datos públicas adecuadas, la escasa diversidad de estas bases, la falta de estandarización de los dispositivos, la heterogeneidad en los criterios diagnósticos y la necesidad de validación prospectiva, son algunas de las barreras para la implementación de algoritmos de IA en la progresión y seguimiento del glaucoma.

## Perspectivas futuras

Los avances en IA ofrecen prometedores niveles de precisión diagnóstica en el glaucoma, lo que puede conducir al desarrollo de modelos confiables para su uso en la práctica clínica habitual. La integración de la IA en los sistemas de atención médica puede abordar las limitaciones actuales en el acceso y manejo oportuno de pacientes con glaucoma en todo el mundo. Los sistemas de ML y DL pueden ayudar a discriminar entre ojos estables y aque-

llos con riesgo de progresión de la enfermedad, lo que facilitaría la planificación terapéutica y el seguimiento de los pacientes. Además, los algoritmos de IA pueden identificar nuevos parámetros asociados al glaucoma y descubrir biomarcadores para una detección temprana y el desarrollo de nuevos tratamientos.

La IA debe considerarse como una herramienta complementaria a las habilidades clínicas que mejorará la toma de decisiones del oftalmólogo y transformará la atención clínica del glaucoma en los próximos años. La conectividad, las imágenes médicas digitales y los registros electrónicos de salud, serán clave para impulsar estos avances.

## Retos y obstáculos

Los avances de la IA en el ámbito de la salud se ven obstaculizados por desafíos éticos, financieros, regulatorios y de seguridad. Para superar estos obstáculos, se requiere establecer criterios universales para el diagnóstico y pronóstico del glaucoma, así como estandarizar la adquisición de datos, crear guías que evalúen el impacto de la IA en los ensayos clínicos, garantizar la transparencia en el proceso de toma de decisiones de los algoritmos de DL y afianzar la ciberseguridad. Además, se necesita un cambio de paradigma que promueva la cultura digital y la adopción de tecnologías consideradas disruptivas. La implementación de la IA debe cumplir con estándares legales, éticos y sociales, y se deben realizar validaciones externas en diversas poblaciones antes de proceder a su integración en la práctica clínica real.

## Conclusiones

Los algoritmos de IA basados en el análisis de fotografías de fondo de ojo han demostrado una alta precisión diagnóstica del glaucoma usando una prueba sencilla y ampliamente accesible. Sin embargo, en pacientes con riesgo de glaucoma, se requieren modelos más complejos que incorporen datos de la OCT y CV. Los resultados proporcionados por las estrategias de IA pueden complementar la toma de decisiones clínicas, mejorando la eficiencia, la productividad y la calidad asistencial de los pacientes. Aunque su implementación en la práctica diaria presenta obstáculos, es responsabilidad de todas las esferas de la sociedad trabajar coordinadamente para superarlos, pues la IA es ya una realidad y dará forma al futuro de la atención del glaucoma de las próximas generaciones.

## Puntos clave

- Las estrategias de DL basadas en fotografías del fondo de ojo han demostrado una alta precisión diagnóstica del glaucoma usando una prueba sencilla y accesible.
- Los algoritmos de DL basados en imágenes de OCT han probado una alta precisión diagnóstica para el glaucoma usando parámetros muy variados (CFNR, CCG, volumen de cabeza del nervio óptico, densidad vascular, etc.), que a menudo son independientes de la segmentación de capas.
- La IA basada en SAP ha demostrado identificar CV glaucomatosos, diferenciar patrones de afectación del CV, clasificar la gravedad de la pérdida funcional, diagnosticar glaucoma en CV normales (glaucoma preperimétrico) y detectar la progresión campimétrica.
- Por sus características de bajo coste y la facilidad de transporte, los algoritmos de IA basados en fotografías de fondo de ojo se perfilan como el sistema ideal para la detección y el cribado de glaucoma en la población.
- Aunque algunos trabajos han permitido monitorizar la progresión glaucomatosa con algoritmos de IA que predicen la CFNR a partir de una retinografía o el defecto de CV a partir de una imagen de OCT, hasta la fecha, la mayoría de estudios de progresión del glaucoma se basan en el análisis de datos de la SAP.

## Bibliografía

1. Ittoop SM, Jaccard N, Lanouette G, Kahook MY. The Role of Artificial Intelligence in the Diagnosis and Management of Glaucoma. *J Glaucoma*. 2022;31(3):137-46.
2. Bunod R, Augstburger E, Brasnu E, Labbe A, Baudouin C. Artificial intelligence and glaucoma: A literature review. *J Fr Ophthalmol*. 2022;45(2):216-32.
3. Mursch-Edlmayr AS, Ng WS, Diniz-Filho A, Sousa DC, Arnold L, Schlenker MB, et al. Artificial Intelligence Algorithms to Diagnose Glaucoma and Detect Glaucoma Progression: Translation to Clinical Practice. *Transl Vis Sci Technol*. 2020;9(2):55.
4. Yousefi S. Clinical Applications of Artificial Intelligence in Glaucoma. *J Ophthalmic Vis Res*. 2023;18(1):97-112.
5. Chaurasia AK, Greatbatch CJ, Hewitt AW. Diagnostic Accuracy of Artificial Intelligence in Glaucoma Screening and Clinical Practice. *J Glaucoma*. 2022;31(5):285-99.
6. Wong SH, Tsai JC. Telehealth and Screening Strategies in the Diagnosis and Management of Glaucoma. *J Clin Med*. 2021;10(16):3452.
7. 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.
8. Schuman JS, De Los Angeles Ramos Cadena M, McGee R, Al-Aswad LA, Medeiros FA; Collaborative Community on Ophthalmic Imaging Executive Committee and Glaucoma Workgroup. A Case for the Use of Artificial Intelligence in Glaucoma Assessment. *Ophthalmol Glaucoma*. 2022;5(3):e3-e13.
9. Zhang L, Tang L, Xia M, Cao G. The application of artificial intelligence in glaucoma diagnosis and prediction. *Front Cell Dev Biol*. 2023;11:1173094.
10. 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. *BMC Med Imaging*. 2018;18(1):35.
11. Coan LJ, Williams BM, Krishna Adithya V, Upadhyaya S, Alkafri A, et al. Automatic detection of glaucoma via fundus imaging and artificial intelligence: A review. *Surv Ophthalmol*. 2023;68(1):17-41.
12. Thakur A, Goldbaum M, Yousefi S. Convex Representations Using Deep Archetypal Analysis for Predicting Glaucoma. *IEEE J Transl Eng Health Med*. 2020;8:3800107.
13. Medeiros FA, Jammal AA, Thompson AC. From machine to machine: an OCT-trained deep learning algorithm for objective quantification of glaucomatous damage in fundus photographs. *Ophthalmology*. 2019;126(4):513-21.
14. Jammal AA, Thompson AC, Mariottoni EB, Berchuck SI, Urata CN, Estrela T, et al. Human versus machine: comparing a deep learning algorithm to human gradings for detecting glaucoma on fundus photographs. *Am J Ophthalmol*. 2020;211:123-31.
15. Francis BA, Varma R, Vigen C, Lai MY, Winarko J, Nguyen B, et al. Population and high-risk group screening for glaucoma: the Los Angeles Latino Eye Study. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2011;52(9):6257-64.
16. Goldbaum MH, Sample PA, White H, Còlt B, Raphaelian P, Fechtner RD, et al. Interpretation of automated perimetry for glaucoma by neural network. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1994;35(9):3362-73.
17. Speneley SE, Henson DB, Bull DR. Visual field análisis using artificial neural networks. *Ophthalmic Physiol Opt*. 1994;14(3):239-48.
18. Liu X, Cheng G, Wu JX. Identifying the measurement noise in glaucomatous testing: an artificial neural network approach. *Artif Intell Med*. 1994;6(5):401-16.
19. Brigatti L, Nouri-Mahdavi K, Weitzman M, Caprioli J. Automatic detection of glaucomatous visual field progression with neural networks. *Arch Ophthalmol*. 1997;115(6):725-8.
20. 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.
21. Lee J, Kim YK, Jeoung JW, Ha A, Kim YW, Park KH. Machine learning classifiers-based prediction of normal-tension glaucoma progression in Young myopic patients. *Jpn J Ophthalmol*. 2020;64(1):68-76.
22. Yousefi S, Elze T, Pasquale LR, Saeedi O, Wang M, Shen LQ, et al. Monitoring Glaucomatous Functional Loss Using an Artificial Intelligence-Enabled Dashboard. *Ophthalmology*. 2020;127(9):1170-8.

23. Wang M, Tichelaar J, Pasquale LR, Shen LQ, Boland MV, Wellik SR, et al. Characterization of central visual field loss in end-stage glaucoma by unsupervised artificial intelligence. *JAMA Ophthalmol*. 2020;138(2):190-8.
24. Yousefi S, Pasquale LR, Boland MV, Johnson CA. Machine-identified patterns of visual field loss and an association with rapid progression in the ocular hypertension treatment study. *Ophthalmology*. 2022;129(12):1402-11.
25. Medeiros FA, Jammal AA, Mariottoni EB. Detection of Progressive Glaucomatous Optic Nerve Damage on Fundus Photographs with Deep Learning. *Ophthalmology*. 2021;128(3):383-92.
26. Nouri-Mahdavi K, Mohammadzadeh V, Rabiolo A, Edalati K, Caprioli J, Yousefi S. Prediction of Visual Field Progression from OCT Structural Measures in Moderate to Advanced Glaucoma. *Am J Ophthalmol*. 2021;226:172-81.
27. Dixit A, Yohannan J, Booland MV. Assessing Glaucoma Progression Using Machine Learning Trained on Longitudinal Visual Field and Clinical Data. *Ophthalmology*. 2021;128(7):1016-26.
28. Sedai S, Antony B, Ishikawa H, Wollstein G, Schuman JS, Garnavi R. Forecasting retinal nerve fiber layer thickness from multimodal temporal data incorporating OCT volumes. *Ophthalmol Glaucoma*. 2020;3(1):14-24.
29. Cordeiro MF, Hill D, Patel R, Corazza P, Maddison J, Younis S. Detecting retinal cell stress and apoptosis with DARC: Progression from lab to clinic. *Prog Retin Eye Res*. 2022;86:100976. doi: 10.1016/j.preteyeres.2021.100976. Epub 2021 Jun 5.