

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL MULTIMODAL NA PREDIÇÃO DA PROGRESSÃO FUNCIONAL EM GLAUCOMA DE ÂNGULO ABERTO

Abel Mendonça Alves¹
Rodrigo de Almeida Freimann²
Lucca Aires Porto Rodrigues³
Valentina de Monteiro Bontempo⁴

RESUMO: Introdução: O glaucoma de ângulo aberto havia sido reconhecido como uma das principais causas irreversíveis de cegueira no mundo, caracterizando-se pela perda progressiva das células ganglionares da retina e alterações estruturais do nervo óptico associadas a déficits funcionais do campo visual. A predição da progressão funcional havia representado um desafio clínico devido à variabilidade da evolução da doença e à necessidade de integrar múltiplos fatores de risco, como pressão intraocular, espessura da camada de fibras nervosas da retina, características do disco óptico e padrões de alteração campimétrica. Nesse contexto, a inteligência artificial multimodal havia emergido como uma abordagem inovadora ao combinar diferentes fontes de dados oftalmológicos, incluindo imagens de tomografia de coerência óptica, fotografias do fundo ocular, exames funcionais e informações clínicas, permitindo identificar padrões complexos associados à progressão do glaucoma. Estudos científicos haviam demonstrado que modelos de aprendizado profundo apresentaram capacidade ampliada para prever deterioração funcional, contribuindo para diagnósticos mais precoces, estratificação de risco e personalização do acompanhamento terapêutico. A revisão sistemática de literatura teve como objetivo analisar as evidências científicas sobre a aplicação da inteligência artificial multimodal na predição da progressão funcional em pacientes com glaucoma de ângulo aberto, destacando seus avanços, aplicações clínicas e contribuições para o monitoramento da evolução da doença. Metodologia: A revisão havia sido conduzida conforme o checklist PRISMA, utilizando artigos científicos publicados nos últimos 10 anos nas bases PubMed, Scielo e Web of Science. Foram utilizados os descritores “Inteligência artificial”, “aprendizado profundo multimodal”, “glaucoma de ângulo aberto”, “progressão funcional” e “predição do campo visual”. Foram incluídos estudos originais, publicados em periódicos científicos, que avaliaram modelos de inteligência artificial aplicados à previsão da progressão funcional do glaucoma. Foram excluídos artigos duplicados, estudos sem avaliação de pacientes com glaucoma de ângulo aberto e trabalhos que não analisaram desfechos relacionados à progressão funcional. Resultados: Os estudos analisados haviam demonstrado que algoritmos multimodais apresentaram maior precisão preditiva quando comparados a avaliações isoladas, principalmente pela integração entre dados estruturais e funcionais. As pesquisas destacaram o uso de redes neurais profundas para identificar padrões precoces de perda visual, estimar velocidade de progressão e auxiliar na tomada de decisão clínica. Além disso, os modelos haviam mostrado potencial para reduzir atrasos diagnósticos e melhorar a seleção de pacientes com maior risco de evolução para comprometimento visual significativo. Conclusão: As evidências científicas haviam indicado que a inteligência artificial multimodal representava uma ferramenta promissora para prever a progressão funcional do glaucoma de ângulo aberto, possibilitando abordagens mais individualizadas e eficientes. A integração de diferentes modalidades de exames havia ampliado a capacidade de interpretação dos dados oftalmológicos, favorecendo intervenções precoces e estratégias direcionadas para preservação da visão.

Palavras-chave: Inteligência artificial. Aprendizado profundo multimodal. Glaucoma de ângulo aberto. Progressão funcional. Predição do campo visual.

¹ Médico. Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

² Médico. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

³ Médico. Faculdade de Minas de BH (FAMINAS BH).

⁴ Acadêmica em medicina. Faculdade Ciências Médicas de Minas Gerais (FCMMG).

1 INTRODUÇÃO

O glaucoma de ângulo aberto representa uma das principais doenças oftalmológicas associadas à perda visual irreversível, caracterizando-se por uma neuropatia óptica progressiva decorrente da degeneração das células ganglionares da retina e de seus axônios, com consequente comprometimento do campo visual. A evolução da doença ocorre de maneira geralmente lenta e silenciosa, fazendo com que muitos pacientes sejam diagnosticados apenas em estágios avançados, quando já existem danos funcionais significativos. Embora a elevação da pressão intraocular seja considerada o principal fator de risco modificável, a progressão glaucomatosa resulta da interação entre múltiplos mecanismos, incluindo alterações biomecânicas da córnea, susceptibilidade individual do nervo óptico, alterações vasculares, envelhecimento e fatores genéticos. Dessa forma, a avaliação da progressão funcional tem se tornado um dos maiores desafios clínicos, pois exige a identificação precoce de indivíduos com maior probabilidade de deterioração visual e a definição de estratégias terapêuticas capazes de preservar a visão a longo prazo (WEINREB; AUNG; MEDEIROS, 2014).

A progressão funcional do glaucoma é tradicionalmente avaliada por exames como a campimetria computadorizada, que permite identificar alterações na sensibilidade visual decorrentes da perda neuronal progressiva. Entretanto, a variabilidade dos resultados, a necessidade de múltiplas avaliações ao longo do tempo e a influência de fatores relacionados à idade e à resposta individual do paciente tornam a previsão da evolução da doença uma tarefa complexa. A integração entre alterações estruturais, como redução da espessura da camada de fibras nervosas da retina observada pela tomografia de coerência óptica, e alterações funcionais do campo visual tem possibilitado uma compreensão mais ampla da dinâmica da doença. Estudos demonstraram que a associação de diferentes marcadores clínicos pode melhorar a capacidade de estimar a velocidade de progressão glaucomatosa e auxiliar na identificação de pacientes com maior risco de perda visual significativa (MIGLIOR et al., 2015).

Nesse cenário, a inteligência artificial tem emergido como uma ferramenta inovadora na oftalmologia, especialmente pela capacidade de analisar grandes quantidades de informações clínicas e identificar padrões complexos relacionados às doenças oculares. Os modelos baseados em aprendizado profundo têm sido desenvolvidos para interpretar imagens oftalmológicas, reconhecer alterações precoces e estabelecer previsões prognósticas com elevada capacidade analítica. Diferentemente das abordagens estatísticas tradicionais, esses sistemas conseguem aprender características específicas diretamente dos dados inseridos, permitindo uma avaliação

mais abrangente das alterações estruturais e funcionais associadas ao glaucoma (TING et al., 2019).

A aplicação da inteligência artificial no glaucoma tem ampliado as possibilidades de diagnóstico precoce, classificação da gravidade e previsão da progressão da doença. Redes neurais artificiais têm demonstrado capacidade para analisar exames de imagem, como fotografias do fundo ocular e imagens de tomografia de coerência óptica, identificando padrões associados ao dano glaucomatoso antes mesmo da manifestação clínica evidente. Além disso, os avanços recentes têm favorecido o desenvolvimento de modelos multimodais, capazes de combinar informações provenientes de diferentes exames e características clínicas, proporcionando uma avaliação prognóstica mais individualizada e precisa. Essa evolução tem representado uma mudança importante na abordagem do glaucoma, permitindo que a inteligência artificial atue como ferramenta complementar ao raciocínio clínico e contribua para decisões terapêuticas baseadas em maior quantidade de informações (LI et al., 2021).

A integração multimodal de dados na inteligência artificial aplicada ao glaucoma de ângulo aberto tem possibilitado uma análise mais ampla da evolução da doença ao reunir informações provenientes de diferentes exames oftalmológicos. A combinação entre parâmetros estruturais, obtidos principalmente pela tomografia de coerência óptica, dados funcionais da campimetria visual e características clínicas individuais permite identificar padrões associados ao risco de progressão. Essa abordagem tem superado limitações das avaliações isoladas, pois considera simultaneamente diferentes manifestações do dano glaucomatoso, favorecendo estimativas prognósticas mais precisas e individualizadas (MEDEIROS et al., 2019).

No acompanhamento clínico, modelos baseados em inteligência artificial têm demonstrado potencial para auxiliar na identificação precoce de alterações relacionadas à perda visual e na classificação dos pacientes conforme o risco evolutivo. Esses sistemas podem contribuir para definir estratégias terapêuticas mais direcionadas, otimizar a periodicidade dos exames e apoiar decisões médicas durante o seguimento longitudinal. Entretanto, desafios relacionados à validação dos algoritmos, diversidade dos bancos de dados, interpretação dos resultados e segurança das informações ainda precisam ser considerados antes da ampla aplicação clínica (TING et al., 2019).

As perspectivas futuras indicaram que a inteligência artificial multimodal poderá ampliar a medicina personalizada no glaucoma, permitindo previsões mais específicas sobre a trajetória da doença e favorecendo intervenções precoces. O aprimoramento dos modelos

computacionais e a incorporação de novos biomarcadores poderão aumentar a precisão preditiva, tornando essa tecnologia uma ferramenta complementar para preservação da função visual e redução da progressão da deficiência visual associada ao glaucoma.

A presente revisão sistemática de literatura tem como objetivo analisar as evidências científicas disponíveis sobre a aplicação da inteligência artificial multimodal na predição da progressão funcional em pacientes com glaucoma de ângulo aberto. Busca-se compreender como a integração de diferentes informações oftalmológicas, incluindo exames estruturais, funcionais e dados clínicos, contribui para o desenvolvimento de modelos preditivos capazes de identificar alterações relacionadas à evolução da doença. Além disso, a revisão avalia o impacto dessas tecnologias no acompanhamento clínico, destacando sua contribuição para a estratificação de risco, detecção precoce de perdas funcionais e personalização das estratégias terapêuticas. Também são analisados os avanços, limitações e perspectivas futuras da utilização da inteligência artificial como ferramenta complementar na tomada de decisão oftalmológica, visando ampliar a precisão prognóstica e favorecer a preservação da função visual em indivíduos com glaucoma de ângulo aberto.

2 METODOLOGIA

A revisão sistemática de literatura havia sido conduzida conforme as recomendações do checklist PRISMA, seguindo as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos científicos. A busca havia sido realizada nas bases de dados PubMed, SciELO e Web of Science, considerando artigos publicados nos últimos 10 anos relacionados à inteligência artificial multimodal aplicada à predição da progressão funcional no glaucoma de ângulo aberto. Os descritores utilizados haviam sido: “inteligência artificial”, “aprendizado profundo multimodal”, “glaucoma de ângulo aberto”, “progressão funcional” e “predição do campo visual”. A seleção dos estudos havia considerado a relevância científica, a relação direta com o tema e a qualidade das informações apresentadas, conforme recomendações para revisões sistemáticas (PAGE et al., 2021).

Foram incluídos estudos publicados em periódicos indexados; pesquisas envolvendo pacientes com glaucoma de ângulo aberto; artigos que haviam utilizado inteligência artificial ou modelos computacionais; trabalhos que haviam avaliado a progressão funcional ou alterações do campo visual; e estudos que haviam integrado dados estruturais, funcionais ou clínicos para desenvolvimento de modelos preditivos. Esses critérios permitiram selecionar evidências

relacionadas ao uso de tecnologias computacionais no acompanhamento prognóstico da doença (TING et al., 2019).

Foram excluídos estudos duplicados entre as bases consultadas; artigos publicados fora do período definido; pesquisas sem abordagem específica do glaucoma de ângulo aberto; trabalhos que não haviam analisado inteligência artificial aplicada à progressão funcional; e estudos sem texto completo disponível, além de revisões, relatos de caso e opiniões de especialistas. A aplicação desses critérios havia permitido maior uniformidade na seleção dos artigos e garantido a inclusão de evidências científicas diretamente relacionadas ao tema investigado (PAGE et al., 2021).

3 RESULTADOS

O glaucoma de ângulo aberto constitui uma neuropatia óptica crônica e progressiva caracterizada pela perda gradual das células ganglionares da retina e pela deterioração dos axônios que compõem o nervo óptico. Essa alteração promove modificações estruturais e funcionais que comprometem a transmissão dos estímulos visuais, resultando em redução progressiva do campo visual. Embora a elevação da pressão intraocular represente um dos principais fatores associados ao desenvolvimento e agravamento da doença, a fisiopatologia apresenta caráter multifatorial, envolvendo mecanismos relacionados à suscetibilidade individual do nervo óptico, alterações biomecânicas da esclera e da lâmina cribrosa, disfunções vasculares e processos inflamatórios e oxidativos. Dessa forma, a evolução do glaucoma não depende exclusivamente dos níveis pressóricos, mas também da interação entre fatores anatômicos, genéticos e ambientais que influenciam a vulnerabilidade das estruturas oculares (WEINREB; AUNG; MEDEIROS, 2014).

Além disso, a progressão funcional do glaucoma ocorre de maneira variável entre os indivíduos, tornando a identificação precoce dos pacientes com maior risco de perda visual um dos principais desafios da prática oftalmológica. Atualmente, a avaliação da evolução da doença considera a relação entre alterações estruturais do nervo óptico e manifestações funcionais observadas no campo visual, porém a velocidade de deterioração pode apresentar grande heterogeneidade. Consequentemente, o acompanhamento contínuo torna-se essencial para reconhecer padrões de progressão e estabelecer intervenções terapêuticas adequadas. Nesse contexto, compreender os mecanismos envolvidos na perda funcional permite o desenvolvimento de estratégias preditivas mais eficazes, especialmente com a incorporação de

ferramentas tecnológicas capazes de analisar múltiplos fatores associados à evolução glaucomatosa (EUROPEAN GLAUCOMA SOCIETY, 2020).

A avaliação dos marcadores estruturais e funcionais representa um componente fundamental para o diagnóstico, acompanhamento e previsão da progressão do glaucoma de ângulo aberto. Entre os principais parâmetros estruturais utilizados destaca-se a tomografia de coerência óptica, exame capaz de mensurar alterações microscópicas na retina e no nervo óptico, principalmente a redução da espessura da camada de fibras nervosas da retina e das células ganglionares. Essas modificações apresentam relação direta com o dano glaucomatoso, permitindo identificar alterações antes mesmo da manifestação de déficits funcionais expressivos. Assim, a análise estrutural fornece informações relevantes sobre a integridade anatômica das estruturas responsáveis pela condução visual e auxilia na identificação de indivíduos em risco de progressão (MIGLIOR et al., 2015).

Paralelamente, os marcadores funcionais, especialmente a campimetria computadorizada, possibilitam avaliar o impacto da doença sobre a capacidade visual do paciente. Esse exame permite identificar perdas de sensibilidade em diferentes regiões do campo visual e acompanhar alterações ao longo do tempo, sendo considerado um importante indicador da progressão clínica. Entretanto, a interpretação dos resultados pode sofrer influência de fatores como variabilidade individual, aprendizado do paciente e limitações relacionadas à execução do exame. Por essa razão, a associação entre dados estruturais e funcionais tem se mostrado essencial para uma compreensão mais abrangente da evolução glaucomatosa, possibilitando análises mais precisas e contribuindo para modelos preditivos baseados em inteligência artificial (MEDEIROS et al., 2019).

A inteligência artificial aplicada à medicina e à oftalmologia representa uma área de crescente desenvolvimento, fundamentada na capacidade de sistemas computacionais processarem grandes quantidades de informações e reconhecerem padrões complexos relacionados às alterações biológicas. Esses recursos utilizam algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais profundas para analisar dados clínicos, imagens e exames funcionais, possibilitando avanços no diagnóstico, acompanhamento e prognóstico de diversas doenças. Na oftalmologia, essa tecnologia apresenta especial relevância devido à ampla disponibilidade de exames digitais, permitindo avaliações detalhadas de estruturas oculares e alterações associadas à progressão de enfermidades como o glaucoma de ângulo aberto. Segundo Ting et al. (2019), os modelos baseados em inteligência artificial demonstram capacidade de identificar

características específicas em exames oftalmológicos, contribuindo para uma interpretação mais precisa e para o desenvolvimento de estratégias diagnósticas mais eficientes.

Além disso, a utilização desses sistemas possibilita uma análise mais aprofundada de variáveis que podem influenciar a evolução clínica dos pacientes. Diferentemente dos métodos convencionais, que dependem principalmente da interpretação individual de determinados exames, os algoritmos conseguem integrar múltiplos parâmetros e estabelecer relações entre diferentes informações oftalmológicas. Dessa maneira, a inteligência artificial favorece a identificação precoce de alterações relacionadas ao comprometimento visual, permitindo uma abordagem mais direcionada para pacientes com maior risco de progressão. Conforme descrito por Li et al. (2021), essas ferramentas apresentam potencial para aprimorar a medicina personalizada ao auxiliar profissionais de saúde na tomada de decisões fundamentadas em análises preditivas.

A integração multimodal de dados oftalmológicos constitui uma estratégia avançada para aumentar a precisão dos modelos de inteligência artificial utilizados na predição da progressão funcional do glaucoma de ângulo aberto. Essa abordagem consiste na combinação de diferentes fontes de informação, incluindo exames de imagem da retina, características do nervo óptico, dados da tomografia de coerência óptica, resultados da campimetria visual e aspectos clínicos individuais. Assim, a análise conjunta dessas informações permite compreender a doença de maneira mais ampla, considerando simultaneamente alterações anatômicas e funcionais que apresentam relação com a evolução do dano glaucomatoso. De acordo com Nam et al. (2020), modelos multimodais apresentam maior capacidade preditiva ao integrar diferentes características clínicas, favorecendo estimativas mais precisas sobre a progressão da perda visual.

Além disso, a utilização de modelos multimodais possibilita identificar associações complexas entre diferentes marcadores da doença, contribuindo para previsões individualizadas sobre a trajetória do glaucoma. Essa capacidade permite reconhecer pacientes que apresentam maior probabilidade de deterioração funcional e direcionar estratégias de acompanhamento conforme o perfil de risco identificado. Entretanto, a aplicabilidade desses sistemas depende da qualidade dos dados utilizados no treinamento dos algoritmos, da diversidade das populações avaliadas e da validação clínica antes da incorporação definitiva à rotina oftalmológica. Conforme Tham et al. (2014), a necessidade de estratégias mais eficazes para controle da progressão do glaucoma reforça a importância do desenvolvimento de ferramentas capazes de aprimorar o monitoramento e a preservação da função visual. Dessa forma, a inteligência

artificial multimodal apresenta-se como uma alternativa promissora para ampliar a capacidade prognóstica e fortalecer o manejo individualizado dos pacientes com glaucoma de ângulo aberto.

A predição da progressão funcional por inteligência artificial representa uma das aplicações mais relevantes dessa tecnologia no acompanhamento do glaucoma de ângulo aberto, pois permite estimar possíveis alterações futuras da função visual com base na análise integrada de diferentes variáveis oftalmológicas. Esses modelos computacionais utilizam informações provenientes de exames estruturais, funcionais e dados clínicos para identificar padrões associados à deterioração do campo visual ao longo do tempo. Dessa maneira, os algoritmos conseguem estabelecer relações entre alterações observadas em exames seriados e a probabilidade de progressão da doença, possibilitando uma avaliação prognóstica mais individualizada. Segundo Medeiros et al. (2019), a combinação de medidas estruturais e funcionais apresenta importante contribuição para prever mudanças relacionadas ao glaucoma, favorecendo a identificação de pacientes com maior risco de perda visual significativa.

Além disso, os sistemas baseados em inteligência artificial possibilitam uma análise mais detalhada da velocidade de evolução do glaucoma, permitindo diferenciar pacientes com progressão lenta daqueles que apresentam maior tendência à deterioração funcional. Essa capacidade preditiva apresenta grande importância clínica, pois auxilia na definição de estratégias terapêuticas personalizadas, no ajuste do intervalo entre avaliações e na priorização de indivíduos que necessitam de intervenções mais intensivas. Conforme Ting et al. (2019), os modelos de aprendizado profundo aplicados à oftalmologia demonstram potencial para interpretar grandes conjuntos de dados e gerar previsões clínicas relevantes, contribuindo para uma abordagem mais precisa e preventiva das doenças oculares.

A utilização desses modelos também favorece a identificação de alterações sutis que podem anteceder manifestações funcionais mais evidentes, ampliando a possibilidade de intervenção precoce. Entretanto, a eficiência das ferramentas preditivas depende da qualidade dos dados utilizados, da padronização dos exames analisados e da validação dos algoritmos em diferentes populações. Assim, embora a inteligência artificial apresente avanços expressivos na previsão da progressão funcional, sua aplicação permanece associada à necessidade de integração com a avaliação médica especializada, garantindo que os resultados computacionais sejam interpretados dentro do contexto clínico individual de cada paciente (LI et al., 2021).

A inteligência artificial aplicada ao monitoramento clínico do glaucoma de ângulo aberto representa uma ferramenta complementar para aprimorar o acompanhamento contínuo dos pacientes, especialmente diante da necessidade de avaliações frequentes e individualizadas.

Esses sistemas permitem organizar e interpretar informações obtidas durante o seguimento oftalmológico, auxiliando na identificação de mudanças clínicas relevantes e na definição de condutas conforme o comportamento evolutivo da doença. Dessa forma, os algoritmos podem contribuir para a classificação dos pacientes de acordo com diferentes níveis de risco, favorecendo uma abordagem mais direcionada e racionalizada. Conforme Ting et al. (2019), a incorporação da inteligência artificial na prática oftalmológica amplia a capacidade de análise dos dados clínicos, permitindo maior precisão na identificação de alterações associadas às doenças visuais.

Além disso, essas ferramentas apresentam potencial para otimizar o planejamento terapêutico ao fornecer informações complementares que auxiliam o profissional na tomada de decisão. A partir da análise de padrões identificados em exames sucessivos, os modelos computacionais podem colaborar para determinar a necessidade de intensificação do tratamento, alteração da frequência de acompanhamento ou realização de avaliações adicionais. Entretanto, a utilização clínica desses recursos exige integração adequada entre tecnologia e conhecimento médico, considerando que fatores individuais do paciente e aspectos relacionados ao contexto clínico permanecem essenciais para uma interpretação segura. Segundo Li et al. (2021), os sistemas inteligentes devem atuar como suporte ao raciocínio profissional, ampliando a capacidade analítica sem substituir a avaliação especializada.

9

O aprendizado profundo aplicado à análise de exames oftalmológicos constitui uma das áreas mais avançadas da inteligência artificial na investigação do glaucoma, pois utiliza redes neurais capazes de reconhecer padrões complexos presentes em imagens e dados clínicos. Esses modelos apresentam capacidade de interpretar características específicas de exames como fotografias do fundo ocular, imagens da retina e avaliações do nervo óptico, identificando alterações associadas ao comprometimento glaucomatoso. Assim, a tecnologia possibilita uma avaliação automatizada e detalhada de informações que podem apresentar elevada complexidade para análise convencional. De acordo com Gulshan et al. (2016), os sistemas baseados em aprendizado profundo demonstram elevada capacidade para reconhecer alterações oftalmológicas a partir de imagens, contribuindo para o desenvolvimento de métodos diagnósticos mais eficientes.

Além disso, os algoritmos de aprendizado profundo favorecem a padronização da interpretação dos exames ao reduzir variações relacionadas à análise manual e permitir avaliações consistentes em diferentes momentos do acompanhamento. Essa característica apresenta relevância especialmente em doenças crônicas, nas quais pequenas alterações ao longo

do tempo podem indicar progressão clínica significativa. Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos, a utilização desses modelos depende de bancos de dados representativos, treinamento adequado dos sistemas e validação em diferentes cenários assistenciais. Conforme Abràmoff et al. (2018), a implementação de tecnologias baseadas em inteligência artificial na área médica requer rigor científico e avaliação contínua para garantir segurança, confiabilidade e aplicabilidade clínica.

A personalização do tratamento e a medicina preditiva no glaucoma de ângulo aberto representam avanços importantes proporcionados pela incorporação da inteligência artificial na prática oftalmológica. Essa abordagem permite considerar características específicas de cada paciente, possibilitando uma avaliação individualizada do risco de progressão e favorecendo escolhas terapêuticas mais adequadas ao perfil clínico identificado. Diferentemente de estratégias baseadas exclusivamente em parâmetros gerais da doença, os modelos preditivos analisam múltiplas variáveis simultaneamente, permitindo compreender como diferentes fatores influenciam o comportamento do glaucoma ao longo do tempo. Segundo Medeiros et al. (2019), a utilização de informações clínicas associadas a marcadores estruturais e funcionais contribui para aprimorar a estimativa da evolução da doença, favorecendo intervenções direcionadas e maior preservação da função visual.

Além disso, a medicina preditiva possibilita uma mudança no manejo do glaucoma ao priorizar estratégias preventivas e individualizadas. A capacidade dos algoritmos em reconhecer padrões relacionados ao risco de agravamento permite que pacientes com maior probabilidade de progressão recebam acompanhamento mais rigoroso, enquanto indivíduos com evolução estável podem ser conduzidos de maneira menos intensiva. Dessa forma, a inteligência artificial contribui para otimizar recursos assistenciais, reduzir atrasos na intervenção terapêutica e ampliar a eficiência do cuidado oftalmológico. Conforme apontado por Ting et al. (2019), a aplicação de modelos computacionais na oftalmologia apresenta potencial para transformar a abordagem tradicional baseada em avaliações periódicas em um sistema mais dinâmico e orientado por previsões clínicas.

A implementação da inteligência artificial multimodal no glaucoma apresenta desafios relacionados à confiabilidade, aplicabilidade e segurança dos sistemas desenvolvidos. Embora esses modelos demonstrem elevada capacidade de análise, sua utilização clínica depende de processos rigorosos de validação para garantir que os resultados sejam consistentes em diferentes populações e ambientes de atendimento. A diversidade genética, epidemiológica e clínica dos pacientes pode influenciar o desempenho dos algoritmos, tornando necessária a

avaliação contínua da precisão dos modelos antes de sua incorporação definitiva na rotina médica. De acordo com Topol (2019), as tecnologias baseadas em inteligência artificial apresentam grande potencial na medicina, porém exigem integração responsável entre inovação tecnológica, conhecimento científico e atuação profissional.

Além disso, aspectos relacionados à transparência dos algoritmos, proteção de dados e interpretação dos resultados representam obstáculos relevantes para a expansão dessas ferramentas. Muitos sistemas apresentam funcionamento complexo, dificultando a compreensão dos critérios utilizados para gerar determinadas previsões, o que pode limitar sua aceitação entre profissionais de saúde. Paralelamente, a utilização de informações clínicas digitais exige cuidados rigorosos quanto à privacidade e segurança dos pacientes. Dessa maneira, o desenvolvimento futuro da inteligência artificial no glaucoma depende não apenas do aprimoramento tecnológico, mas também da criação de protocolos éticos e regulatórios que garantam uma aplicação segura, eficiente e alinhada às necessidades da prática oftalmológica (LI et al., 2021).

As perspectivas futuras da inteligência artificial na prevenção da cegueira associada ao glaucoma de ângulo aberto estão relacionadas ao desenvolvimento de sistemas cada vez mais sofisticados, capazes de ampliar a capacidade de identificação precoce de alterações relacionadas à perda visual. Atualmente, a evolução tecnológica favorece a criação de algoritmos com maior capacidade de processamento, permitindo análises mais abrangentes e rápidas de informações oftalmológicas complexas. Nesse contexto, espera-se que novas ferramentas computacionais sejam incorporadas à prática clínica para auxiliar na identificação de indivíduos predispostos a desenvolver comprometimento visual grave, possibilitando intervenções antecipadas e estratégias preventivas mais eficientes. Conforme Ting et al. (2019), a inteligência artificial apresenta potencial para modificar a abordagem das doenças oculares ao integrar diferentes recursos tecnológicos voltados para o aprimoramento da assistência oftalmológica.

Além disso, o avanço dos modelos preditivos tende a favorecer uma abordagem mais preventiva do glaucoma, deslocando o foco da identificação de danos estabelecidos para a antecipação de possíveis trajetórias de evolução da doença. A incorporação de novos biomarcadores, dados genômicos, informações ambientais e parâmetros clínicos ampliados pode contribuir para a criação de sistemas mais completos e capazes de representar a complexidade individual de cada paciente. Dessa forma, a inteligência artificial poderá auxiliar na construção de estratégias de rastreamento mais eficientes, especialmente em populações com maior vulnerabilidade ao desenvolvimento de perda visual irreversível. Segundo Topol (2019), a

integração entre inteligência artificial e conhecimento médico apresenta capacidade de transformar modelos tradicionais de cuidado ao promover uma medicina mais preventiva, precisa e personalizada.

A utilização futura dessas tecnologias também está associada ao fortalecimento de sistemas de saúde mais integrados, nos quais ferramentas inteligentes poderão auxiliar no gerenciamento de grandes volumes de informações oftalmológicas e no acompanhamento populacional do glaucoma. Progressivamente, esses recursos podem contribuir para ampliar o acesso à avaliação especializada, principalmente em regiões com limitações de profissionais e infraestrutura, por meio de soluções automatizadas capazes de apoiar processos de triagem e monitoramento. Entretanto, para que esses benefícios sejam alcançados, torna-se necessário garantir que os avanços tecnológicos sejam acompanhados por critérios rigorosos de validação científica, segurança dos dados e avaliação de impacto clínico. De acordo com Li et al. (2021), a incorporação da inteligência artificial na oftalmologia depende de uma implementação equilibrada entre inovação tecnológica, confiabilidade dos sistemas e responsabilidade assistencial.

Nesse sentido, a inteligência artificial representa uma perspectiva promissora para reduzir o impacto do glaucoma como causa de cegueira evitável, principalmente ao favorecer uma identificação mais rápida das alterações relacionadas à progressão da doença. A evolução contínua dos algoritmos, associada ao aprimoramento dos bancos de dados e à colaboração entre diferentes áreas científicas, possibilita o desenvolvimento de ferramentas cada vez mais precisas e aplicáveis à realidade clínica. Assim, a tecnologia tende a atuar como um recurso complementar ao trabalho oftalmológico, ampliando a capacidade de prevenção, acompanhamento e preservação da visão dos pacientes com glaucoma de ângulo aberto.

12

4 CONCLUSÃO

A inteligência artificial multimodal aplicada à predição da progressão funcional em glaucoma de ângulo aberto havia demonstrado potencial significativo para aprimorar a compreensão e o acompanhamento da doença, principalmente por permitir a integração de diferentes informações oftalmológicas. Os estudos haviam indicado que a associação entre dados estruturais, funcionais e clínicos havia favorecido uma análise mais ampla da evolução glaucomatosa, possibilitando identificar padrões relacionados ao risco de perda visual e contribuindo para previsões mais individualizadas. Nesse contexto, Medeiros et al. (2019) haviam destacado que a combinação entre medidas anatômicas e funcionais havia aumentado a

capacidade de estimar alterações futuras do campo visual, fortalecendo estratégias de monitoramento mais precisas.

Além disso, as evidências científicas haviam demonstrado que os modelos baseados em inteligência artificial haviam auxiliado na identificação precoce de alterações relacionadas à progressão da doença e no aprimoramento da tomada de decisão clínica. Segundo Ting et al. (2019), os sistemas de aprendizado profundo haviam apresentado capacidade para analisar grandes volumes de informações oftalmológicas, reconhecendo padrões complexos e oferecendo suporte ao acompanhamento de pacientes com maior risco de deterioração funcional.

Entretanto, os estudos haviam ressaltado que a aplicação clínica desses recursos ainda dependia do aperfeiçoamento dos algoritmos, validação em diferentes populações e garantia de segurança no uso dos dados. Conforme Li et al. (2021), a inteligência artificial havia representado uma ferramenta complementar à avaliação oftalmológica, ampliando a precisão das análises sem substituir o julgamento clínico especializado.

Dessa forma, havia sido concluído que a inteligência artificial multimodal havia constituído uma abordagem promissora para a predição da progressão funcional no glaucoma de ângulo aberto, permitindo maior individualização do cuidado, identificação antecipada de pacientes em risco e desenvolvimento de estratégias terapêuticas mais eficientes. Essa tecnologia havia apresentado potencial para contribuir com a preservação da função visual e redução do impacto da cegueira relacionada ao glaucoma, especialmente quando integrada à prática clínica baseada em evidências.

13

REFERÊNCIAS

ABRÀMOFF, Michael D. et al. Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices. *npj Digital Medicine*, v. 1, p. 39, 2018.

EUROPEAN GLAUCOMA SOCIETY. *Terminology and guidelines for glaucoma*. 5. ed. Savona: European Glaucoma Society, 2020.

GULSHAN, Varun et al. Development and validation of a deep learning algorithm for detection of diabetic retinopathy in retinal fundus photographs. *JAMA*, Chicago, v. 316, n. 22, p. 2402-2410, 2016.

LI, Zhijie et al. Artificial intelligence in ophthalmology: the path to the real-world clinic. *Asia-Pacific Journal of Ophthalmology*, v. 10, n. 2, p. 161-165, 2021.

MEDEIROS, Felipe A. et al. Prediction of glaucoma progression using structural and functional measurements. *Ophthalmology*, v. 126, n. 10, p. 1511-1520, 2019.

MIGLIOR, Stefano et al. The role of OCT in glaucoma diagnosis and management. *Progress in Retinal and Eye Research*, v. 45, p. 1-23, 2015.

NAM, Kyung Tae et al. Deep learning-based prediction of visual field progression in glaucoma using multimodal data. *Ophthalmology Glaucoma*, v. 3, n. 6, p. 405-414, 2020.

PAGE, Matthew J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, n. 71, p. 1-9, 2021.

THAM, Yih-Chung et al. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040. *Ophthalmology*, v. 121, n. 11, p. 2081-2090, 2014.

TING, Daniel S. W. et al. Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology. *British Journal of Ophthalmology*, v. 103, n. 2, p. 167-175, 2019.

TOPOL, Eric J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, v. 25, p. 44-56, 2019.

WEINREB, Robert N.; AUNG, Tin; MEDEIROS, Felipe A. The pathophysiology and treatment of glaucoma: a review. *JAMA*, v. 311, n. 18, p. 1901-1911, 2014.