



ISSN 2674-8169



Qualis B3
CAPES 2021-2024

Latindex



DOI

Google
Acadêmico

CIRURGIA REFRACTIVA GUIADA POR RAY-TRACING: EVIDÊNCIAS ATUAIS, APLICAÇÕES CLÍNICAS, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Maria Mariana dos Santos Tourinho¹, Luiz Gustavo de Araújo Tavares¹, Gabriela de Quadros Ferraz¹, Biatriz de Quadros Ferraz¹, Ramiro dos Santos Tourinho¹, Maria Carolina Ferraz Cajado Sampaio¹, Íris Bianca Correia Santos¹, Lucas Ribeiro Vieira¹, Vitor Queiroz de Araújo¹, Ramona Ketly Silveira Santos¹, Marjorye Gonçalves Pereira Bacelar¹, Arthur Lima Queiroz¹, Lara Moraes Batista¹, Adriana Barretto Messias de Figueiredo Gois¹, Marcele Pimenta Cavalcante Muiños¹, Matheus Lima Queiroz¹



<https://doi.org/10.36557/2674-8169.2026v8n8p940-957>

Artigo recebido em 17 de Julho e publicado em 17 de Agosto de 2026

REVISÃO DE LITERATURA

RESUMO

Introdução: A cirurgia refrativa a laser evoluiu de perfis de ablação padronizados para plataformas cada vez mais personalizadas, culminando na tecnologia guiada por *ray-tracing* (traçado de raios), que utiliza um modelo virtual tridimensional do olho, construído a partir de biometria, tomografia corneana e aberrometria obtidas em um único dispositivo diagnóstico, para calcular perfis de ablação individualizados, incorporando aberrações de baixa e alta ordem.

Métodos: O estudo é uma revisão integrativa de literatura com abordagem exploratória e qualitativa. Para a coleta de dados, serão consultadas bases como BVS e SciELO, utilizando descritores controlados alinhados aos DeCS. A busca abrange publicações em português, inglês e espanhol, com acesso em formato "free full text" e realizadas com seres humanos. A seleção dos artigos será feita independentemente por dois revisores na plataforma Rayyan. Após a triagem inicial por título e resumo, os estudos elegíveis serão analisados integralmente. **Objetivo:** Revisar as evidências clínicas atuais sobre a cirurgia refrativa guiada por *ray-tracing*, suas aplicações clínicas, limitações técnicas e perspectivas futuras. **Conclusão:** O *ray-tracing* representa um avanço conceitual relevante na personalização da cirurgia refrativa, com evidências crescentes de segurança e eficácia, mas ainda carece de validação em estudos multicêntricos, randomizados e de seguimento prolongado antes de se consolidar como padrão universal de tratamento.

Palavras-chave: Aberrometria; Aberrações de Frente de Onda da Córnea; Ceratocone; Ceratomileuse Assistida por Excimer Laser In Situ; Miopia.

Ray-tracing-Guided Refractive Surgery: Current Evidence, Clinical Applications, Limitations, and Future Perspectives

ABSTRACT

Introduction: Laser refractive surgery has evolved from standardized ablation profiles to increasingly personalized platforms, culminating in *ray-tracing*-guided technology. This technology utilizes a three-dimensional virtual model of the eye—constructed from biometry, corneal tomography, and aberrometry data obtained via a single diagnostic device—to calculate individualized ablation profiles that incorporate both low- and high-order aberrations. **Methods:** This study is an integrative literature review employing an exploratory, qualitative approach. Data collection will involve consulting databases such as BVS and SciELO, using controlled descriptors aligned with DeCS. The search covers publications in Portuguese, English, and Spanish that are available as free full-text articles and involve human subjects. Article selection will be performed independently by two reviewers using the Rayyan platform. Following an initial screening of titles and abstracts, eligible studies will undergo full-text analysis. **Objective:** To review current clinical evidence regarding *ray-tracing*-guided refractive surgery, its clinical applications, technical limitations, and future prospects. **Conclusion:** *Ray-tracing* represents a significant conceptual advancement in the personalization of refractive surgery, with growing evidence of safety and efficacy; however, it still requires validation through multicenter, randomized, long-term follow-up studies before becoming a universal standard of care.

Keywords: Aberrometry; Corneal Wavefront Aberrations; Keratoconus; Laser In Situ Keratomileusis; Myopia.

Instituição afiliada – CEOQ Hospital de Olhos – Vitória da Conquista; Afya Vitória da Conquista.

Autor correspondente: Gabriela de Quadros Ferraz gabrielaferrazq@hotmail.com

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



INTRODUÇÃO

Desde a introdução da ceratectomia fotorrefrativa (PRK) e, posteriormente, do Ceratomileuse Assistida por Excimer Laser In Situ (LASIK) como técnicas padronizadas para correção de erros refracionais, a cirurgia refrativa corneana busca aprimorar continuamente a previsibilidade e a qualidade visual pós-operatória. Os primeiros algoritmos de ablação, baseados em modelos geométricos simplificados de remoção tecidual proporcional ao erro refracional esférico, representaram um marco fundamental, mas não consideravam de forma individualizada as aberrações ópticas de alta ordem nem as particularidades biométricas de cada olho¹. Com o amadurecimento da aberrometria de *Hartmann-Shack*, surgiram os perfis *wavefront-guided* e *wavefront-optimized*, que incorporaram parcialmente a correção de aberrações induzidas pelo próprio procedimento^{2,3}.

Mais recentemente, consolidou-se o conceito de cirurgia refrativa guiada por *ray-tracing* (traçado óptico de raios), técnica que se propõe a superar as limitações dos modelos anteriores ao construir um modelo virtual tridimensional individualizado do sistema óptico ocular completo, integrando topografia e tomografia corneana anterior e posterior (imagem de *Scheimpflug*), aberrometria de *Hartmann-Shack*, comprimento axial por interferometria de coerência parcial e a posição do cristalino, a partir de um único dispositivo diagnóstico. Por meio de algoritmos iterativos e, mais recentemente, de inteligência artificial, o sistema calcula o trajeto de cada raio de luz ao atravessar as superfícies ópticas do olho, determinando o contorno de ablação corneana que otimiza simultaneamente as aberrações de baixa e de alta ordem^{4,5}. Diferentemente dos perfis tradicionais baseados na refração subjetiva manifesta, algumas plataformas de *ray-tracing* calculam o alvo cirúrgico exclusivamente a partir de dados objetivos, dispensando ajustes por nomograma⁶.

O objetivo do presente artigo é revisar criticamente as evidências clínicas atuais sobre a cirurgia refrativa guiada por *ray-tracing*, discutindo suas bases ópticas, aplicações clínicas em miopia, astigmatismo e córneas irregulares, suas limitações técnicas e metodológicas, e as perspectivas futuras de desenvolvimento desta tecnologia.

METODOLOGIA

Trata-se de um estudo de revisão integrativa da literatura de caráter exploratório e qualitativo, que possibilita a combinação de dados provenientes de fontes empíricas e teóricas, sendo direcionada para a definição de conceitos, identificação de lacunas em áreas de estudo, revisão de teorias e análise metodológica dos estudos relacionados ao tema em análise.

Para a escolha dos artigos, a busca foi feita nas bases de dados: Medical Literature Analysis and Retrieval System on-line (MEDLINE), Biblioteca Virtual em Saúde (BVS) e Scientific Electronic Library Online (SciELO). E utilizados descritores controlados de acordo com os Descritores em Ciências da Saúde (DeCS) “Ceratomileuse Assistida por Excimer Laser In Situ”, “Miopia”, “Aberrometria”, “Ceratocône”, “Wavefront” e suas respectivas traduções para o inglês, e utilizados os operadores booleanos “and” e “or”. E avaliados artigos publicados entre os anos de 1988 e 2026, disponíveis nas bases de dados com formato “free full text”, limitada aos idiomas português, inglês e espanhol, e estudos realizados com seres humanos.

A seleção dos estudos foi de maneira independente por dois revisores, por meio da plataforma de seleção Rayyan. Inicialmente os artigos serão selecionados após a leitura do título e resumo e os que atenderem os critérios de elegibilidade por consenso entre os dois revisores, serão lidos na íntegra para inclusão ou exclusão na revisão. As discordâncias na fase da leitura na íntegra serão resolvidas por consenso por um terceiro revisor.

REVISÃO DE LITERATURA

Fundamentos ópticos do *ray-tracing* aplicado à córnea

O princípio do *ray-tracing* óptico não é novo em oftalmologia: já era empregado no cálculo de lentes intraoculares e na modelagem de aberrações induzidas por procedimentos refracionais desde o final da década de 1990, quando pesquisadores utilizaram o traçado exato de raios para determinar a aberração esférica introduzida pela PRK e propor padrões de ablação compensatórios¹. Munnerlyn e colaboradores, estabeleceram a fórmula geométrica clássica que relaciona a profundidade de ablação

necessária ao erro refracional e ao diâmetro da zona óptica, servindo de base matemática para praticamente todos os perfis de ablação subsequentes, incluindo os guiados por *ray-tracing*¹. A diferença conceitual do *ray-tracing* moderno está em não assumir um olho-modelo padronizado, mas sim reconstruir, para cada paciente, um modelo óptico individualizado que reproduz a real trajetória da luz através de todas as interfaces refringentes, córnea anterior, córnea posterior, humor aquoso, cristalino e comprimento axial, permitindo prever e corrigir simultaneamente o desfoque esférico, o astigmatismo e aberrações de alta ordem como coma e aberração esférica¹.

Evolução tecnológica: de perfis padronizados a plataformas individualizadas

Schumacher et al., em um dos primeiros estudos clínicos relevantes, avaliaram o LASIK guiado por *ray-tracing* óptico em pacientes com miopia e astigmatismo moderado a alto, demonstrando resultados refracionais favoráveis e lançando as bases para a validação clínica subsequente da tecnologia². Cummings e Kelly, em estudo de coorte com um ano de seguimento, confirmaram a segurança e eficácia do LASIK guiado por *ray-tracing* óptico para miopia, reportando resultados consistentes de acuidade visual e estabilidade refracional⁷. Esses estudos pioneiros, ainda que unicêntricos e sem grupo comparativo randomizado, estabeleceram o racional clínico para o desenvolvimento de plataformas automatizadas de *ray-tracing*.

A partir de 2020, Kanellopoulos publicou uma série de estudos utilizando uma plataforma automatizada de otimização por *ray-tracing* (posteriormente comercializada como *WaveLight Plus*, Alcon), impulsionada por inteligência artificial, que calcula o perfil de ablação a partir de um modelo de olho tridimensional individualizado, obtido de dados de interferometria, aberrometria de *Hartmann-Shack* e tomografia de *Scheimpflug* em um único dispositivo (*InnovEyes Sightmap*)⁵. Em uma série de 25 pacientes (50 olhos) submetidos a LASIK miópico com esse sistema, observou-se melhora média da refração de -5,06 D para -0,11 D em seis meses, com 65% dos olhos ganhando pelo menos uma linha de visão e 38% ganhando duas linhas, além de melhora da sensibilidade ao contraste, sem aumento clinicamente relevante das aberrações de alta ordem⁵. Resultados de dois anos de seguimento da mesma linha de pesquisa, em pacientes com miopia e astigmatismo miópico, corroboraram a estabilidade refracional e funcional a longo prazo, com melhora de parâmetros psicométricos de qualidade de

visão⁸.

Plataformas atuais e disseminação da tecnologia

A validação da tecnologia fora do contexto controlado de centros pioneiros, é essencial para sua adoção mais ampla. He e Bala reportaram os desfechos clínicos de uma coorte pragmática de LASIK guiado por *ray-tracing* para miopia, confirmando segurança e eficácia consistentes com os achados dos estudos iniciais, com aproximadamente metade dos olhos atingindo acuidade visual sem correção igual ou superior a 20/12,5 e 8% atingindo 20/10, sem aumento clinicamente significativo das aberrações de alta ordem totais⁹. Esses achados são relevantes por demonstrarem reprodutibilidade da tecnologia em diferentes populações e contextos clínicos, para além do centro que originalmente descreveu a técnica⁹.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após aplicar a chave de busca em cada plataforma online citada acima, foram identificadas um total de 96 (100%) artigos. A distribuição por plataforma foi da seguinte forma: Pubmed 42 publicações (43,75%); SciELO 35 publicações (36,46%); BVS 19 publicações (19,79%). Após este processo, os pesquisadores seguiram os critérios de inclusão e exclusão definidos anteriormente, além da análise completa dos artigos respeitando os critérios previamente definidos. Assim, foram selecionados um total de 19 artigos (15,63%) para compor a presente revisão bibliográfica.

Para uma melhor visualização e compreensão dos artigos selecionados, foi elaborado um quadro (Quadro 1), contendo as principais informações de cada publicação (título do artigo, autores, ano, periódico e dados do artigo, objetivo da pesquisa).

QUADRO 1: Resumo dos artigos selecionados para a revisão bibliográfica, conforme título do artigo, autores, ano, periódico e dados do artigo, objetivo da pesquisa.

TÍTULO DO ARTIGO	AUTORES	PERIÓDICO E DADOS DO ARTIGO	OBJETIVO
------------------	---------	-----------------------------	----------

Photorefractive keratectomy: a technique for laser refractive surgery.	Munnerlyn CR, Koons SJ, Marshall J.	J Cataract Refract Surg. 1988; 14(1): 46-52.	Descrever as condições necessárias para realização da ceratectomia fotorrefrativa (PRK), bem como os problemas associados a esta.
Aberrations and visual performance following standard laser vision correction.	Marcos S.	J Refract Surg. 2001; 17(1): S596-S601.	Relacionar a alteração das aberrações oculares com a alteração do desempenho visual produzida pela ceratomileusis in situ assistida por laser (LASIK) padrão para miopia.
Ocular optical aberrations after photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism.	Seiler T, Kaemmerer M, Mierdel P, Krinke HE.	Arch Ophthalmol. 2000; 118(1): 17-21.	Estudar os efeitos da ceratectomia fotorrefrativa nas aberrações ópticas oculares e estabelecer correlações com a visão ofuscante e a visão de baixo contraste.
Optical ray tracing-guided laser in situ keratomileusis for moderate to high myopic astigmatism.	Schumacher S, Seiler T, Cummings A, Maus M, Mrochen M, et al.	J Cataract Refract Surg. 2012; 38(1): 28-34.	Avaliar a eficácia, segurança e previsibilidade de um perfil de ablação LASIK (ceratomileusis in situ assistida por laser) individualizado, baseado em um algoritmo de rastreamento de raios ópticos, para o tratamento de astigmatismo miópico moderado a alto.
Initial outcomes with customized myopic LASIK, guided by automated ray tracing optimization: a novel technique.	Kanellopoulos AJ.	Clin Ophthalmol. 2020; 14(1): 3955-3963.	Segurança e eficácia de uma nova otimização automatizada de rastreamento de raios na personalização da ablação por excimer em LASIK para miopia.
Optical ray tracing-guided myopic laser in situ keratomileusis: 1-year clinical outcomes.	Cummings AB, Kelly GE.	Clin Ophthalmol. 2013; 7(1): 1181-1191.	Comparar a segurança, a eficácia e a previsibilidade dos tratamentos de ceratomileusis in situ a

			laser (LASIK) um ano após o procedimento, utilizando um novo algoritmo de rastreamento geométrico de raios, com os resultados dos tratamentos que utilizam perfis de ablação otimizados por frente de onda, guiados por frente de onda e guiados por topografia de um laser excimer.
Ray-tracing customization in myopic and myopic astigmatism LASIK treatments for low and high order aberrations treatment: 2-year visual function and psychometric value outcomes of a consecutive case series.	Kanellopoulos AJ.	Clin Ophthalmol. 2024 Feb 22; 18(1): 565-574.	Avaliar a segurança e a eficácia a longo prazo do LASIK personalizado com rastreamento de raios automatizado para correção de miopia e miopia astigmática.
Ray-tracing-guided myopic LASIK: real-world clinical outcomes.	He G, Bala C.	J Cataract Refract Surg. 2023; 49(11): 1140-1146.	Avaliar a eficácia da ceratomileusis in situ a laser (LASIK) individualizada baseada em traçado de raios para a correção da miopia na prática clínica diária.
A randomized comparative study of topography-guided versus wavefront-optimized FS-LASIK for correcting myopia and myopic astigmatism.	Zhang Y, Chen Y.	J Refract Surg. 2019; 35(9): 575-582.	Comparar os resultados clínicos entre o tratamento de ablação personalizado guiado por topografia (TCAT) e a ceratomileusis in situ a laser otimizada por frente de onda (LASIK) em olhos contralaterais de pacientes míopes.
Comparison of outcomes after topography-modified refraction versus wavefront-optimized versus	Kim J, Choi SH, Lim DH, Yoon GJ, Chung TY.	BMC Ophthalmol. 2020; 20(1): 192-199.	Comparar os resultados da correção da miopia e do astigmatismo miópico com LASIK com refração modificada por topografia (TMR-LASIK), LASIK

manifest topography-guided LASIK.			otimizado por frente de onda (WFO) e LASIK guiado por topografia (TG) com alvo de correção baseado na refração manifesta (TG-LASIK manifesto).
Longitudinal and regional non-uniform remodeling of corneal epithelium after topography-guided FS-LASIK.	Fan L, Xiong L, Zhang B, Wang Z.	J Refract Surg. 2019; 35(2): 88-95.	Observar a remodelação epitelial em uma córnea de 9 mm de diâmetro induzida pela ceratomileusis in situ assistida por laser de femtosegundo guiada por topografia (FS-LASIK) para correção da miopia, utilizando tomografia de coerência óptica de domínio espectral (SD-OCT).
Keratoconus management with customized photorefractive keratectomy by artificial intelligence ray-tracing optimization combined with higher fluence corneal crosslinking: the Ray-Tracing Athens Protocol.	Kanellopoulos AJ.	Cornea. 2021; 40(9): 1181-1187.	Relatar uma nova personalização por rastreamento de raios da ablação a laser de excímero de superfície combinada com crosslinking corneano (CXL) de alta fluência na estabilização e normalização da ectasia e na reabilitação visual do ceratocone progressivo.
Combined photorefractive keratectomy and corneal cross-linking for keratoconus and ectasia: the Athens protocol.	Kanellopoulos AJ.	Cornea. 2023; 42(10): 1199-1205.	Avaliar estudos publicados que corroboram o Protocolo de Atenas e suas várias modalidades como um meio de tratar distúrbios ectásicos da córnea.
Development of the 25-item National Eye Institute Visual Function Questionnaire.	Mangione CM, Lee PP, Gutierrez PR, Spritzer K, Berry S, Hays RD, et al.	Arch Ophthalmol. 2001; 119(7): 1050-1058.	Desenvolver e testar as propriedades psicométricas de uma versão de 25 itens do Questionário de Função Visual do Instituto Nacional do Olho (NEI VFQ-25).

FONTE: Autoria Própria, 2026.

Eficácia e previsibilidade refracional

Os dados agregados da literatura mostram convergência quanto à eficácia do LASIK guiado por *ray-tracing* na correção de miopia e astigmatismo miópico. Nas séries de Kanellopoulos, mais de 90% dos olhos atingiram refração dentro de $\pm 0,5$ D do alvo pretendido, com ganho médio de linhas de visão e melhora objetiva da sensibilidade ao contraste^{5,8}. Já He e Bala, avaliando uma amostra maior e mais heterogênea, reportaram acuidade visual sem correção de 20/25 ou melhor em praticamente a totalidade dos casos, reforçando que os resultados obtidos em centros de referência são reproduzíveis em prática clínica ampliada⁹. A convergência entre esses dois grupos de autores, um vinculado ao desenvolvimento inicial da técnica e outro à sua validação independente, fortalece a robustez da evidência disponível, ainda que ambos os estudos sejam de natureza observacional, série de casos e coorte retrospectiva, respectivamente, sem grupo controle concorrente.

Comparação direta com plataformas *wavefront-optimized* e *topography-guided*

O nível de evidência mais robusto disponível até o momento é o estudo de Khoramnia et al., um ensaio prospectivo, randomizado, duplo-cego, com desenho intraindividual, olho contralateral), comparando o LASIK guiado por *ray-tracing* automatizado (*WaveLight Plus*) com o LASIK *wavefront-optimized* no olho contralateral do mesmo paciente⁶. Esse desenho experimental é particularmente valioso por eliminar variáveis de confusão interpessoais, como: cicatrizações, percepção subjetiva e aderência ao pós-operatório; permitindo comparação direta entre as duas tecnologias no mesmo indivíduo⁶. Os autores concluíram que o *ray-tracing* automatizado, mesmo dispensando a refração manifesta subjetiva para o planejamento cirúrgico e utilizando apenas dados objetivos de um único dispositivo diagnóstico, atingiu resultados refracionais não inferiores, e discretamente mais precisos em termos de equivalente esférico, em comparação ao *wavefront-optimized*, com segurança e eficácia elevadas em ambos os grupos⁶.

É importante destacar que os próprios autores do estudo de Khoramnia et al.

discutem, em correspondência posterior publicada no mesmo periódico, que comparações retrospectivas prévias sugeriram desempenho ainda superior do *ray-tracing* em relação ao *wavefront-optimized* e ao *topography-guided*, tanto em acuidade visual sem correção quanto em previsibilidade refracional, com maior proporção de olhos dentro de $\pm 0,25$ D do alvo pretendido⁶. Uma possível explicação discutida pelos revisores para diferenças de magnitude entre estudos é o grau de miopia pré-operatória da amostra: erros refracionais mais baixos (entre -4,0 e -5,0 D) tendem a se associar a resultados proporcionalmente melhores, tanto no *ray-tracing* quanto em outras plataformas, o que limita a comparabilidade direta entre coortes com perfis populacionais distintos⁶. Esse ponto ilustra uma limitação metodológica recorrente na literatura da área: a heterogeneidade do grau de ametropia entre as amostras estudadas dificulta a generalização de comparações de superioridade entre tecnologias.

Em paralelo, estudos comparando *topography-guided* e *wavefront-optimized*, tecnologias antecessoras e ainda amplamente utilizadas, mostram que a customização baseada exclusivamente na topografia corneana também produz resultados refracionais e de acuidade visual comparáveis, sem diferença estatisticamente significativa entre os grupos em desenhos contralaterais. Zhang e Chen, em estudo randomizado comparando *topography-guided* e *wavefront-optimized* FS-LASIK, e Kim et al., comparando estratégias de refração topográfica modificada, *wavefront-optimized* e *topography-guided* manifesto, reforçam que nenhuma dessas plataformas antecessoras é uniformemente superior às demais, havendo sobreposição relevante de desfechos^{10,11}. Ao situar o *ray-tracing* nesse contexto comparativo mais amplo, a leitura conjunta desses achados sugere que a vantagem central do *ray-tracing* não estaria necessariamente na magnitude absoluta da acuidade visual final, que já é elevada nas plataformas customizadas de geração anterior, mas na maior integração de dados biométricos multimodais em um único algoritmo, com potencial redução de erros sistemáticos por incompatibilidade entre dispositivos diagnósticos distintos^{10,11}.

Aberrações de alta ordem, remodelamento epitelial e qualidade visual

Um argumento central em favor do *ray-tracing* é sua capacidade teórica de preservar ou até reduzir aberrações de alta ordem, historicamente induzidas pelos procedimentos refracionais convencionais^{2,3}. Seiler et al., em estudo clássico sobre

aberrações ópticas após PRK, já haviam demonstrado que o próprio ato cirúrgico induz aberração esférica proporcional ao grau de correção pretendido, fenômeno posteriormente confirmado por Marcos ao revisar o desempenho de aberrações após cirurgia refracional a laser padronizada^{2,3}. Os estudos com *ray-tracing* sugerem que a incorporação do estado aberrométrico pré-operatório individual ao cálculo do perfil de ablação atenua esse fenômeno: nas séries de Kanellopoulos e colaboradores, não houve aumento clinicamente significativo do RMS de aberrações de alta ordem, e a aberração esférica manteve-se relativamente estável no pós-operatório^{5,9}.

Entretanto, é preciso ponderar esse achado com cautela metodológica. A maioria dos estudos disponíveis tem seguimento de curto a médio prazo, três a vinte e quatro meses, e amostras relativamente pequenas, e a avaliação de remodelamento epitelial corneano após *ray-tracing* revela um fenômeno biológico compensatório regionalmente não uniforme, com espessamento paracentral relacionado à distribuição de aberrações de alta ordem, o que pode, a longo prazo, modular ou até atenuar parcialmente o efeito óptico pretendido pelo algoritmo^{2,3,5,9}. Fan et al., ao descrever o remodelamento epitelial após *topography-guided* FS-LASIK, já haviam demonstrado que esse fenômeno compensatório não é exclusivo do *ray-tracing*, mas uma resposta biomecânica geral da córnea a qualquer ablação customizada de superfície, o que sugere que nenhuma plataforma atual, incluindo o *ray-tracing*, está isenta desse mecanismo adaptativo¹². A discussão entre os grupos de autores aponta, portanto, para um consenso emergente: a personalização do perfil de ablação reduz, mas não elimina, os fenômenos biológicos de remodelamento que podem influenciar o resultado óptico final, reforçando a necessidade de seguimento pós-operatório mais prolongado do que o habitualmente reportado^{5,9,12}.

Aplicações em córneas irregulares e ceratocone

Uma das aplicações clínicas mais promissoras do *ray-tracing* é sua utilização em córneas irregulares, sobretudo no manejo do ceratocone. Kanellopoulos descreveu uma modificação do já consolidado Protocolo de Atenas, que combina ablação de superfície customizada (PRK parcial transepitelial) com *crosslinking* corneano de maior fluência, incorporando o cálculo do perfil de ablação por *ray-tracing* gerado por inteligência artificial, com o objetivo de normalizar a superfície corneana distorcida do ceratocone

progressivo, simultaneamente ao fortalecimento biomecânico pelo crosslinking¹³. Estudos de seguimento de longo prazo do Protocolo de Atenas clássico, incluindo dados de dez anos e de casos pediátricos, fundamentam a segurança dessa abordagem combinada, servindo de base histórica para a incorporação do *ray-tracing* como refinamento adicional da técnica^{13,14}.

Essa aplicação amplia o escopo do *ray-tracing* para além da correção refracional em olhos normais, posicionando-o como ferramenta potencial no tratamento de ectasias corneanas, historicamente um domínio dominado pelo *topography-guided* PRK associado a *crosslinking*. Contudo, cabe ponderar, na leitura crítica desses estudos, que se trata predominantemente de séries de casos de um único grupo de pesquisa, com ausência, até o momento, de ensaios clínicos randomizados comparando diretamente o *ray-tracing* ao *topography-guided* estabelecido no manejo do ceratocone, o que limita a extrapolação de superioridade entre as duas abordagens nesse cenário específico^{13,14}.

Qualidade de vida e desfechos reportados pelo paciente

A avaliação da satisfação e da qualidade de vida relacionada à visão tem ganhado espaço crescente como desfecho complementar à acuidade visual objetiva². Instrumentos psicométricos validados, como o questionário de função visual do *National Eye Institute*, adaptado e utilizado em estudos de *ray-tracing* de longo prazo, têm demonstrado melhora consistente da percepção subjetiva de qualidade visual após o procedimento, incluindo domínios de visão geral, dependência de correção óptica e sintomas visuais². A incorporação sistemática desses desfechos centrados no paciente representa um avanço metodológico importante, pois desfechos puramente objetivos como acuidade visual e equivalente esférico nem sempre se correlacionam linearmente com a satisfação percebida, especialmente em pacientes com expectativas elevadas quanto à independência de óculos².

Limitações da tecnologia e da evidência disponível

A leitura conjunta e crítica dos estudos disponíveis permite identificar limitações relevantes, tanto tecnológicas quanto metodológicas. Do ponto de vista tecnológico, o *ray-tracing* depende da aquisição precisa e simultânea de múltiplas variáveis biométricas, como: tomografia anterior e posterior, aberrometria, comprimento axial, posição do cristalino, em um único exame; erros de aquisição, opacidades de meios,

olho seco significativo ou instabilidade do filme lacrimal podem comprometer a acurácia de todo o modelo virtual construído a partir desses dados, propagando erros ao longo do cálculo do perfil de ablação^{4,5,6,9}. Além disso, o custo do equipamento e a curva de aprendizado associada à interpretação de um sistema multivariável mais complexo do que os algoritmos tradicionais representam barreiras à disseminação da tecnologia em centros de menor porte^{4,9}.

Do ponto de vista clínico, discrepâncias entre o mapa objetivo gerado pelo sightmap e a refração subjetiva manifesta têm sido reportadas em subgrupos de pacientes, podendo resultar em sub ou sobrecorreção quando não identificadas e ajustadas adequadamente durante o planejamento cirúrgico. Esse é, atualmente, um dos pontos de maior debate entre os grupos que revisam a tecnologia: alguns autores defendem a manutenção estrita do cálculo objetivo automatizado, argumentando que a subjetividade da refração manifesta introduz variabilidade interexaminador; outros defendem ajustes manuais guiados por refração subjetiva nos casos em que a diferença ultrapassa 0,75 D, sob o argumento de que a experiência clínica acumulada com refração manifesta ainda é o padrão-ouro de referência para o resultado percebido pelo paciente. Esse debate permanece não resolvido na literatura atual, refletindo a necessidade de estudos comparativos específicos entre as estratégias automatizada e ajustada manualmente.

Do ponto de vista metodológico, é necessário reconhecer que grande parte da evidência publicada até 2026 provém de séries de casos consecutivos e estudos de coorte retrospectivos ou prospectivos não controlados, frequentemente originados de poucos centros e, em parte relevante da produção científica, vinculados ao mesmo grupo de pesquisadores pioneiros na técnica. O estudo randomizado contralateral de Khoramnia et al. representa um avanço metodológico importante nesse cenário, mas ainda se trata de amostra relativamente pequena (60 olhos) e seguimento de curto prazo⁶. A ausência de ensaios multicêntricos, randomizados, com seguimento superior a cinco anos, e comparando diferentes plataformas comerciais de *ray-tracing* entre si, constitui a principal lacuna a ser preenchida para consolidar essa tecnologia como padrão de tratamento amplamente recomendado, e não apenas como alternativa promissora em centros especializados.

Perspectivas futuras

O amadurecimento do *ray-tracing* guiado por inteligência artificial aponta para diversas direções de desenvolvimento futuro⁶. Em primeiro lugar, espera-se o refinamento contínuo dos algoritmos de otimização automatizada, incorporando bancos de dados cada vez maiores de resultados pós-operatórios reais para retroalimentar e ajustar os modelos preditivos, uma estratégia já em curso, à semelhança de propostas de otimização automatizada versus estratégias manuais comparadas em estudos prospectivos recentes^{5,6}. Em segundo lugar, a expansão das indicações para além do LASIK convencional, incluindo PRK de superfície customizada combinada a *crosslinking* para ceratocone e outras ectasias, sinaliza uma tendência de convergência entre tecnologias de correção refracional e de fortalecimento biomecânico corneano em uma única plataforma de planejamento^{13,14}.

Em terceiro lugar, a integração de desfechos centrados no paciente, qualidade de vida, sintomas visuais subjetivos, satisfação, como parte rotineira da avaliação de eficácia, e não apenas desfechos objetivos, deve se consolidar como padrão metodológico esperado para novos estudos, seguindo o exemplo de instrumentos psicométricos já validados na literatura oftalmológica¹⁵. Por fim, a extensão do *ray-tracing* a outras modalidades cirúrgicas correlatas, como o cálculo personalizado de lentes intraoculares em córneas irregulares e olhos previamente operados, sugere que essa tecnologia possa evoluir de uma ferramenta específica de planejamento de LASIK para uma plataforma integrada de modelagem óptica ocular, aplicável a todo o espectro da cirurgia refrativa e da cirurgia de catarata refrativa¹⁵.

Estudos randomizados multicêntricos de maior porte, com seguimento de longo prazo e comparação sistemática entre diferentes plataformas comerciais e estratégias de ajuste, automatizado *versus* manual, serão determinantes para definir o real posicionamento do *ray-tracing* na hierarquia das tecnologias de cirurgia refrativa customizada nos próximos anos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cirurgia refrativa guiada por *ray-tracing* constitui um avanço conceitual e tecnológico relevante na personalização do LASIK e de procedimentos correlatos, ao

integrar, em um modelo virtual individualizado, múltiplas variáveis biométricas e aberrométricas do sistema óptico ocular completo. As evidências disponíveis, embora ainda predominantemente provenientes de séries de casos e de um número limitado de centros, convergem para demonstrar segurança, eficácia e previsibilidade refracional elevadas, com resultados não inferiores, e em determinados desfechos potencialmente superiores, aos das plataformas *wavefront-optimized* e *topography-guided* já consolidadas. Aplicações emergentes no manejo de córneas irregulares e ceratocone, combinadas ao *crosslinking* corneano, ampliam o potencial clínico da técnica para além da correção refracional convencional.

Entretanto, limitações relacionadas à complexidade tecnológica, ao custo, à curva de aprendizado, às discrepâncias entre dados objetivos e refração subjetiva, e sobretudo à escassez de estudos randomizados multicêntricos de longo prazo, impõem cautela na generalização dos resultados. O posicionamento definitivo do *ray-tracing* como padrão de referência na cirurgia refrativa dependerá do acúmulo de evidências de maior nível metodológico nos próximos anos.

REFERÊNCIAS

- Munnerlyn CR, Koons SJ, Marshall J. Photorefractive keratectomy: a technique for laser refractive surgery. J Cataract Refract Surg. 1988; 14(1): 46-52.
- Marcos S. Aberrations and visual performance following standard laser vision correction. J Refract Surg. 2001; 17(1): S596-S601.
- Seiler T, Kaemmerer M, Mierdel P, Krinke HE. Ocular optical aberrations after photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism. Arch Ophthalmol. 2000; 118(1): 17-21.
- Schumacher S, Seiler T, Cummings A, Maus M, Mrochen M, et al. Optical ray tracing-guided laser in situ keratomileusis for moderate to high myopic astigmatism. J Cataract Refract Surg. 2012; 38(1): 28-34.
- Kanellopoulos AJ. Initial outcomes with customized myopic LASIK, guided by automated ray tracing optimization: a novel technique. Clin Ophthalmol. 2020; 14(1): 3955-3963.
- Khoramnia R, et al. Prospective intraindividual comparison of automated customized ray-tracing-guided versus wavefront-optimized LASIK. Ophthalmology. 2025; 132(1): 1169-1179.
- Cummings AB, Kelly GE. Optical ray tracing-guided myopic laser in situ keratomileusis: 1-year

clinical outcomes. Clin Ophthalmol. 2013; 7(1): 1181-1191.

Kanellopoulos AJ. Ray-tracing customization in myopic and myopic astigmatism LASIK treatments for low and high order aberrations treatment: 2-year visual function and psychometric value outcomes of a consecutive case series. Clin Ophthalmol. 2024 Feb 22; 18(1): 565-574.

He G, Bala C. Ray-tracing-guided myopic LASIK: real-world clinical outcomes. J Cataract Refract Surg. 2023; 49(11): 1140-1146.

Zhang Y, Chen Y. A randomized comparative study of topography-guided versus wavefront-optimized FS-LASIK for correcting myopia and myopic astigmatism. J Refract Surg. 2019; 35(9): 575-582.

Kim J, Choi SH, Lim DH, Yoon GJ, Chung TY. Comparison of outcomes after topography-modified refraction versus wavefront-optimized versus manifest topography-guided LASIK. BMC Ophthalmol. 2020; 20(1): 192-199.

Fan L, Xiong L, Zhang B, Wang Z. Longitudinal and regional non-uniform remodeling of corneal epithelium after topography-guided FS-LASIK. J Refract Surg. 2019; 35(2): 88-95.

Kanellopoulos AJ. Keratoconus management with customized photorefractive keratectomy by artificial intelligence ray-tracing optimization combined with higher fluence corneal crosslinking: the Ray-Tracing Athens Protocol. Cornea. 2021; 40(9): 1181-1187.

Kanellopoulos AJ. Combined photorefractive keratectomy and corneal cross-linking for keratoconus and ectasia: the Athens protocol. Cornea. 2023; 42(10): 1199-1205.

Mangione CM, Lee PP, Gutierrez PR, Spritzer K, Berry S, Hays RD, et al. Development of the 25-item National Eye Institute Visual Function Questionnaire. Arch Ophthalmol. 2001; 119(7): 1050-1058.