



Os fundamentos da óptica geométrica de Johannes Kepler

Claudemir ROQUE TOSSATO



RESUMO

Este texto apresenta a teoria kepleriana do processo de visão, exposta no quinto livro dos *Paralipomena*, publicado no ano de 1604. Destacam-se os seguintes aspectos: (1) o mapeamento do olho humano feito por Kepler, que teve como fundamento os trabalhos anatômicos de Felix Plater; (2) a analogia entre a câmara escura e o olho humano, entendendo-se que o último torna-se um instrumento dióptrico tal como a primeira; (3) o correto uso, segundo Kepler, da geometria para a constituição anatômico-fisiológica desenhada nos *Paralipomena*. A partir destes elementos, Kepler trata de dois pontos básicos para a óptica do século XVII: o primeiro determina que a imagem do objeto visto pelo olho forma-se na retina e não no cristalino; o segundo restringe o campo de estudos ópticos àquilo que pode ser tratado somente mediante os componentes ópticos, isto é, os constituintes anatômicos e fisiológicos, e as suas possibilidades de geometrização.

PALAVRAS-CHAVE • Óptica. Kepler. Anatomia. Fisiologia. Plater. Alhazen. Retina. Cristalino.

INTRODUÇÃO

Johannes Kepler (1571-1630) é conhecido mais em função da descoberta das leis dos movimentos planetários (lei da forma elíptica, lei das áreas e lei harmônica) do que pelos seus trabalhos em outros campos do conhecimento humano. Um desses campos é a óptica. Kepler é um personagem central daquilo que se chama “óptica geométrica”, principalmente por ser ele quem estipulou as bases dessa ciência no início do século XVII. O conceito de óptica geométrica foi fruto de uma mudança de enfoque que Kepler operou nas concepções ópticas tradicionais de sua época. A óptica do início do século XVII contava com progressos satisfatórios em diversas áreas relacionadas aos seus estudos;¹ a partir da anatomia, principalmente com Felix Plater, Kepler pôde compreender

¹ Cf. Tossato, 2005, onde é apresentado um pequeno panorama da situação epistêmica da óptica no início do século XVII, principalmente no que se refere ao entendimento do processo de visão. O resumo que se segue está baseado nesse texto.

com maior detalhe o funcionamento das partes que compõem o olho humano; a partir da geometria, fundamentalmente com Alhazen e seus seguidores – Roger Bacon, Vitélio e Pechan – Kepler elaborou teorias que ajustavam de um modo mais satisfatório a aplicação do cone visual euclidiano à descrição dos fenômenos ópticos. Também os estudos sobre perspectiva, feitos pelos pintores renascentistas, especificamente Alberti e Brunelleschi, motivavam a aplicação de técnicas de representação de figuras tridimensionais em espaços planos, o que se mostrou profícuo para a compreensão do procedimento da visão. Além disso, os astrônomos e ópticos tinham um grande interesse pelo funcionamento e uso da câmara escura, o que os conduziu a associarem este instrumento com o olho. Neste sentido, sumariando os principais aspectos da óptica nesse período, temos:

- (1) no campo anatômico, os trabalhos de Felix Plater, para o qual o principal componente do olho, no ato da visão, é a retina, responsável pela formação das imagens dos objetos vistos, rompendo, assim, com a tradição galênica, representada principalmente por Alhazen, Bacon e Vitélio, para a qual é no cristalino que se forma a imagem;
- (2) no campo matemático, os trabalhos de Alhazen, continuados por Bacon, Pechan e Vitélio, que admitiram a abordagem geométrico-óptica do cone visual de Euclides e Ptolomeu, na qual o ápice do cone está no olho e a sua base no objeto visto, desenvolvendo-a até chegar à concepção de que há uma correspondência ponto a ponto entre imagem e objeto;
- (3) no campo técnico, a interessante analogia entre a câmara escura, um artefato mecânico, com o olho humano, um órgão natural, feita por Alhazen, Leonardo da Vinci e Porta, na qual o olho humano é análogo à câmara escura, que projeta a imagem invertida do objeto em sua tela, o que ocorre também no olho humano.

Todos esses campos fizeram parte dos assuntos discutidos pelos ópticos. O principal problema era organizá-los em uma teoria satisfatória que explicasse o funcionamento do olho humano e de suas partes no ato da visão. Mas, para chegar a isso, era necessário resolver um problema de ordem epistemológica: demarcar o escopo da óptica. A contribuição fundamental de Kepler para a óptica – aquilo que conduziu a mudar a aplicação da geometria para a compreensão do funcionamento do olho – insere-se na resolução dessa questão.

A demarcação da área de estudo da óptica implicava o entendimento do funcionamento do olho humano, não apenas quanto à descrição anatômica dos seus componentes, mas, principalmente, na compreensão das “funções” desses componentes

entre si, isto é, a óptica não poderia se restringir, como diz Crombie, àquilo que está representado pela visão: “Quando Kepler tratou dos problemas da visão, ninguém tinha tratado com a suposição essencial que a fisiologia ocular funciona como uma explicação imediata da percepção visual; entendiam que ver um objeto é ver apenas o que está presente na imagem formada no olho” (Crombie, 1991, p. 89). Como o olho vê um objeto, este ato de ver torna-se um objeto a ser explicado. A imagem formada no olho não é uma representação idêntica do objeto visto, mas algo que passou por um processo fisiológico-mecânico. Por isso, Kepler diz que “(...) na visão se produz um certo engano, que nasce, de uma parte, dos procedimentos de observações (...) e, de outra parte, da simples visão” (1938 [1604], p. 143; 1980 [1604], p. 303). Os procedimentos de observação são os que provêm do uso da câmara escura (e o mesmo poder-se-ia dizer do telescópio). Os enganos da própria visão tornam-se assunto de pesquisa da óptica. Entendendo como a visão funciona, pode-se corrigir os enganos que ela comete e aproximar-se cada vez mais da correspondência entre a imagem e o objeto real. Para tanto, Kepler concebe o olho humano analogamente a um artefato mecânico, a câmara escura, o que lhe permite entender como o olho pode errar e, assim, compreender em que parte ele erra.

Mas o serviço não se completa apenas com a anatomia e a fisiologia, pois como Kepler diz ao Imperador Rodolfo II na Dedicatória dos *Paralipomena*:

Não estou satisfeito com as especulações da geometria abstrata, para essas pinturas (...) às quais os geômetras hoje em dia consagram quase todo o seu tempo; pesquisarei a geometria lá onde ela se exprime realmente, nos corpos do mundo, e procurarei seguir, com transpiração e contentamento, os traços do Criador (Kepler, 1938 [1604], p. 10; 1980 [1604], p. 95).

Kepler nunca foi um anatomista ou fisiologista; na verdade, ele nunca participou de uma dissecação. Ele era um astrônomo matemático e, obviamente, suas preocupações eram matemáticas; por isso, ele aplicou a geometria como uma linguagem voltada para a expressão da realidade dos fenômenos ópticos. Kepler rejeitará, como veremos mais abaixo, a fisiologia galênica, expressa nas concepções de Alhazen, Bacon e Vitélio, porque ela não permite uma geometrização “adequada”, utilizando em seu lugar a concepção retiniana de Plater. Geometrização de fenômenos ópticos torna-se a segunda contribuição de Kepler para a óptica moderna.

Resumindo, o trabalho de Kepler foi o de organizar os elementos anatômicos, fisiológicos e geométricos obtidos pela óptica no final do século XVI numa teoria sobre a visão, que entende o olho como um artefato mecânico – semelhante à câmara escura –, no qual as imagens são formadas na retina, sem qualquer referência à interpre-

tação que o cérebro humano, isto é, qualquer elemento psicológico, possa dar. Em outras palavras, Kepler põe a retina como limite da ótica, o que se passa após ela, não é de sua competência.

A demarcação kepleriana da ciência óptica salienta três aspectos básicos, que podem ser apreciados nas próprias palavras de Kepler:

Pode-se considerar na astronomia óptica tanto os objetos próprios que se apresentam à visão, e dos quais se pode examinar as espécies, isto é, a luz e as sombras, quanto o meio que a luz atravessa contendo suas espécies e que é a causa da luz parecer-nos refratada, quanto também, enfim, o instrumento da visão, o olho (Kepler, 1938 [1604], p. 15; 1980 [1604], p. 101).

O primeiro aspecto é o estudo da natureza da luz e das sombras que se apresentam à visão. O segundo é o estudo da refração e de suas causas. O terceiro é o estudo do funcionamento do olho humano enquanto instrumento que forma as imagens do objeto visto. Mas o que se apresenta como mais importante nos trabalhos ópticos keplerianos é a ordem lógica dos estudos. Para conhecer como acontece a refração dos objetos e qual é a natureza da luz, torna-se necessário, antes, conhecer como se forma a imagem dos objetos na visão, isto é, o estudo sobre o funcionamento do olho humano antecede os estudos acerca da refração e da natureza da luz. Neste sentido, as pesquisas conduzidas nos *Paralipomena* antecedem a *Dioptrice*, de 1611. Assim, nossa principal preocupação neste texto é compreender a função, segundo Kepler, do olho humano no ato de ver, seu funcionamento e como isso levou a uma “melhor aplicação” da geometria à óptica.

Os primeiros interesses de Kepler pela óptica (cf. Chevalley, 1980, p. 11-23; Straker, 1981; Caspar, 1959, p. 142-6) deram-se quando da ocorrência de um eclipse solar em 30 de junho de 1600. Kepler ficou intrigado com o seguinte problema: o que leva à diminuição do diâmetro da Lua quando ocorre um eclipse solar, comparado com sua medida à mesma distância durante a Lua cheia? Em outros termos, por que o diâmetro da Lua diminui quando ela passa na frente do Sol, quando há uma conjunção? E por que, quando estão em oposição, o seu diâmetro é maior? Esse fenômeno abalou os astrônomos da época, tanto que Brahe mediu tal diminuição, utilizando-se de uma câmara escura, e a estipulou em uma parte em cinco (1/5).

Tycho Brahe sempre se interessou pela medição dos tamanhos dos astros, quando da ocorrência de eclipses, e sempre utilizou a câmara escura para a determinação de tais medidas. O próprio Brahe construía as suas câmaras escuras, seguindo as orientações de Reinerus Gemma Frisius, expostas na obra de 1545, *De radio astronomico et geometrico liber* (*Livro dos raios astronômicos e geométricos*) (cf. Straker, 1981). Sobre o eclipse de 1600, Brahe diz no *Astronomia instauratae progymnasmata* que:

A Lua não mantém o mesmo diâmetro visível que ela tem de outro modo, mas pela força da luz do Sol suas fronteiras são reduzidas, com alguma causa óptica produzindo esse resultado, assim, a quinta parte da Lua desaparece e não é apresentada ao olho (Brahe *apud* Straker, 1981, p. 282).

Notamos que Brahe, para explicar o “desaparecimento” de uma quinta parte da Lua durante um eclipse solar, entende que as razões devem ser procuradas na óptica. O problema é que Brahe não tinha uma teoria óptica da câmara escura. Kepler inicia seus estudos sobre a óptica, aceitando a perspectiva de Brahe e partindo dos resultados observacionais que ele apurou. (cf. Kepler, 1938 [1604], p. 47; 1980 [1604], p. 152). Portanto, Kepler procurou dar uma explicação do porquê a Lua apresenta uma diminuição do seu diâmetro durante um eclipse solar. Mas para chegar a essa explicação, era necessário, segundo Kepler, reformular o conjunto explicativo formulado pelas teorias ópticas do final do século XVI, por ser inadequado. O resultado se encontra nos *Paralipomena a Vitelione*. Na verdade, os *Paralipomena* não foram o projeto inicial de Kepler; sua ambição era maior, a de elaborar uma obra chamada *Hiparcus*, que conteria as suas pesquisas sobre óptica vinculadas à astronomia, que, contudo, não se realizou plenamente. O resultado foi menor, e está contido nos *Paralipomena*.

As obras completas de Kepler (cf. Caspar e Dyck, 1937), infelizmente, não contêm uma monografia escrita por ele em 1600, na qual são relatados seus primeiros estudos sobre óptica. Contudo, essa monografia foi descoberta na cidade de Leningrado² e tornada pública pelo pesquisador Frans Hammer. Esse manuscrito mostra as dúvidas que Kepler teve, motivadas pelo eclipse solar de 1600. Intrigado, como dissemos, pela diminuição aparente do diâmetro da Lua, quando observada em uma câmara escura durante a ocorrência do eclipse, Kepler procurou construir um novo instrumento de medição astronômica voltado para a obtenção de imagens com melhor definição; tal instrumento é descrito por Hammer do seguinte modo:

A peça central era um eixo pivô ao redor de um ponto fixo no azimute, no ponto máximo de sua altura. Sobre esse eixo, encontram-se discos fixados perpendicularmente, com uma distância determinada um do outro, o mais alto tendo uma abertura circular, enquanto que o mais baixo serve como placa. Se se volta o eixo em direção ao Sol, então a luz cai circularmente sobre a abertura e a placa.

² Esses manuscritos keplerianos foram comprados pela Czarina Catarina II, em 1773, e ficaram guardados na cidade de Leningrado, a partir dessa época. Ficaram conhecidos como “manuscritos de Pulkovo”.

Os movimentos do eixo, o diâmetro da imagem e as grandes características do eclipse são facilmente medidos por essas disposições especiais (Hammer *apud* Chevallier, 1980, p. 16).

Esse novo instrumento diminuía um pouco as aberrações das imagens obtidas pelo uso da câmara escura, que criava uma imagem das bordas do Sol, da sua circunferência, enfraquecida e arredondada, comparada à observação direta do Sol; assim, o instrumento descrito acima procurava diminuir essas aberrações, permitindo uma melhor medição do diâmetro do Sol e da Lua durante os eclipses.

Porém, Kepler não obteve dados satisfatórios com a utilização do seu invento. Em contrapartida, o instrumento permitiu questionar as bases teóricas da óptica de sua época. A sua inquietação ocorreu quando ele comparou a figura formada na placa do instrumento com a imagem formada na observação direta do céu (a olho nu), isto é, da observação do fenômeno real; dessa comparação, Kepler notou que a superfície iluminada da imagem formada na placa era distorcida e proporcionalmente maior que a imagem real (cf. Chevalley, 1980, p. 16-7). A partir dessa comparação, Kepler construiu 17 proposições (contidas também no manuscrito de Pulkovo), que serviram de base para os desenvolvimentos futuros contidos nos *Paralipomena*. Não vamos reproduzi-las aqui, pois essas proposições tratam diretamente da refração e da natureza da luz, enquanto que o nosso tema primário neste texto é a função do olho no ato de ver. Mas isso nos alerta sobre as preocupações básicas de Kepler com relação aos fenômenos ópticos. O fenômeno da diminuição do disco lunar durante um eclipse não pareceu a Kepler um problema óptico, pois essa diminuição parecia causada pelo funcionamento do olho humano.

O problema de Kepler foi, portanto, reformular a ciência da óptica de sua época e, para tanto, inicialmente, precisou entender como o olho humano funciona, como ele produz a visão. Isso conduz diretamente para a situação dessa ciência no final do século XVI e início do século XVII, seja em relação às concepções filosóficas, anatômicas e geométricas em voga, seja em relação aos problemas específicos que ela tinha.

Deste modo, faço a seguir uma apresentação da concepção kepleriana do funcionamento do olho humano. Concentraremos a apresentação no quinto livro dos *Paralipomena*, especialmente a seção 2, objetivando entender como a concepção de Kepler contribuiu para a reformulação da ciência da óptica no século XVII.

1 O QUINTO LIVRO DO *Paralipomena* E O MODO PELO QUAL SE FAZ A VISÃO

O primeiro trabalho de Kepler sobre a óptica foi os *Paralipomena*.³ Nesse trabalho, Kepler reformulou a óptica de Vitélio, exposta no livro deste último chamado *Perspectiva* e que foi baseada principalmente na obra óptica do pensador árabe Alhazen, *De aspectibus* (*Acerca dos aspectos* ou *Acerca das aparências*). O texto utilizado por Kepler foi a edição latina de ambas essas obras feita por Frederico Risner, publicada na Basileia, em 1572, cujo título é *Opticæ thesaurus Alhazeni arabis libri septem et Vitellionis libri X* (*Os sete livros das riquezas ópticas do árabe Alhazen e os dez livros de Vitélio*).

Partiremos diretamente para uma rápida exposição dos quatro primeiros livros dos *Paralipomena* e, em seguida, apresentaremos o quinto livro, que é o nosso interesse neste texto por conter o modo pelo qual Kepler entende o processo de formação das imagens na retina.

3 Os *Paralipomena a Vitellione* (*Suplementos a Vitélio*) pertencem à obra geral intitulada *Astronomiae pars optica* (*A parte óptica da astronomia*) que contém um total de 11 livros. Os *Paralipomena* são os cinco primeiros livros. Não existem muitas obras que comentam os trabalhos de Kepler no campo da óptica. Se há um grande número de obras dedicadas a comentar os trabalhos astronômicos, especificamente os relativos às suas três leis dos movimentos planetários, o mesmo não acontece em relação à óptica, o segundo campo de interesse de Kepler. Os trabalhos mais relevantes sobre a óptica kepleriana são, sem dúvida, até onde pudemos constatar, os de Crombie: o trabalho de 1976, dedicado a mostrar que os *Paralipomena* representaram uma mudança de compromisso em relação às concepções de Euclides, Ptolomeu, Aristóteles, Galeno etc, ao trazer a óptica para o escopo das ciências mecânicas; o mesmo tema é tratado em Crombie (1991), alargando o conteúdo do primeiro; outras obras de Crombie (1964, 1987) fornecem elementos interessantes da óptica de Kepler. Outro autor importante, mas que entende Kepler simplesmente como um continuador da obra de Alhazen, é Lindberg (1976, p. 185-208). Essas obras enriquecem em muito a compreensão dos aspectos técnicos da óptica kepleriana. Catherine Chevalley (1980) faz uma admirável introdução à óptica kepleriana, destacando as origens das preocupações de Kepler nessa ciência. Vasco Ronchi (1952, p. 73-84) é considerado um clássico, mas deixa muitas lacunas na apresentação das etapas da óptica kepleriana; do mesmo autor (1959, p. 43-51), há uma pequena apresentação da óptica de Kepler. Straker (1970) é talvez o estudo mais interessante sobre a óptica de Kepler; o problema é que essa obra é uma tese de doutorado que não foi publicada, dificultando seu acesso. Caspar (1959), o principal biógrafo de Kepler, apresenta dados importantes, mas não se aprofunda nas questões técnicas. Outro texto de caráter geral, mas importante, é o de Dijksterhuis (1986, p. 388-91). Alguns artigos devem ser destacados, entre eles, Linnik (1975) dedica-se à apresentação das principais contribuições de Kepler para a óptica, sem ser, porém, um texto crítico. Simon (1975) mostra o mecanicismo subjacente aos trabalhos de Kepler e Descartes em suas concepções ópticas. Görlich (1975) mostra o desenvolvimento da óptica após Kepler. Field (1986) desenvolve aspectos matemáticos contidos nos *Paralipomena*. Straker (1981) é importante pelo estudo acerca do uso que fez Kepler da câmara escura. Em relação à importância de Kepler para a construção teórica da fundamentação do uso do telescópio, temos Zik (2003). Um autor que merece destaque é Mareck (1975). Para quem se interessar por um trabalho crítico acerca da importância de Kepler para a óptica, tem-se Malet (1990), que contesta o papel de Kepler como o fundador da óptica geométrica. Em língua portuguesa, pelo que podemos observar, pouco existe sobre os trabalhos ópticos de Kepler. Alpers (1999, p. 83-157) é um belíssimo trabalho sobre a noção de “pintura” como imagem impressa na retina, noção que influenciou os pintores holandeses do século XVII. Chauí (1999, Introdução) traz dados interessantes da óptica de Kepler. Fora isso, alguns livros de divulgação científica apresentam, em pouquíssimas páginas, resumos da óptica kepleriana. Destaca-se apenas Mourão (2003, p. 130-6).

Os quatro primeiros livros dos *Paralipomena* tratam, pela ordem, da luz, da câmara escura, da catóptrica e da dióptrica. No primeiro livro, intitulado *De natura lucis* (*Da natureza da luz*), Kepler investiga os elementos da luz, e os principais resultados a que ele chega são que a luz é a responsável pela interação entre os corpos materiais e que sua velocidade é infinita, pois ela não contém massa (ou quantidade de matéria), nem pode ser destruída. Kepler chega ao esboço, ainda que errôneo, de uma lei sobre a transmissão da luz, quando admite que a iluminação de um objeto é inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte. Como veremos mais adiante, a natureza da luz concebida por Kepler é fundamental para entender a noção de “óptica geométrica”; a luz não contém massa e tem uma velocidade instantânea, o que mostra que não devemos considerá-la como um corpo material, que gera ação de toque (contato) nos componentes do olho.

No livro sobre a câmara escura, *De figuracione lucis* (*Das imagens da luz*), Kepler mostra que a figura da imagem do objeto projetada na parede da câmara depende do tamanho e da forma da abertura e, também, da forma e da distância do objeto a partir da fonte. No livro sobre a catóptrica, *De fundamentis catoptricis et loco imaginis* (*Dos fundamentos da catóptrica e do lugar da imagem*), Kepler considera os raios oblíquos no processo de reflexão da luz e também analisa os “lugares” das imagens produzidas em espelhos com lentes côncavas e convexas. O quarto livro, *De refractionum mensura* (*Das medidas da refração*), trata da tentativa frustrada de Kepler em obter a lei da refração. Apesar disso, Kepler fez análises das seções cônicas, o que o levou a introduzir o termo *focus* (foco), termo utilizado largamente na *Astronomia nova* de 1609, quando da elaboração da lei da forma elíptica das órbitas dos planetas. Kepler também propôs uma aproximação para o raio entre o ângulo de refração e o de incidência, mas não obteve nenhuma lei para a relação. O trabalho do quarto livro foi continuado na obra de 1611, a *Dioptrice*.

Todo o conteúdo do quinto livro, *De modo visionis* (*Do modo da visão*), dos *Paralipomena* é dedicado à questão de como ocorre a visão e sua explicação. “Explicar”, no sentido de entender como a imagem de um objeto qualquer, quando visto, é representada, de alguma forma, no olho humano; entendimento que envolve o conhecimento da constituição física do olho humano e o conhecimento das relações entre o olho e o meio, interposto entre ele e o objeto real. A questão é, portanto, complexa, pois envolve aspectos tanto da anatomia e da fisiologia, quanto da geometria. O grau de complexidade da questão é exposto pelo próprio Kepler, logo no início do quinto livro:

(...) localizarei, de início, para tratar essa questão metodicamente, as descrições das partes do olho que serão colocadas em consideração, confiando nos anatomistas mais respeitados, pois a descrição de Vitélio é incerta e confusa para obter os

princípios. Em segundo lugar, representarei por um raciocínio sumário a maneira pela qual se faz a visão. Em terceiro lugar, demonstrarei cada ponto em particular. Em quarto lugar, procurarei mostrar o que escapou das especulações dos ópticos e dos médicos no que concerne a essa função. Finalmente, explicarei as trapaças da visão que nascem da disposição dos instrumentos e farei a aplicação para a parte prática astronômica (Kepler, 1938 [1604], p. 143-4; 1980 [1604], p. 303-4).

O que nos interessa especificamente neste texto são os dois primeiros pontos da citação acima, que são desenvolvidos nas duas primeiras seções do livro quinto. O terceiro traz a demonstração geométrica do estipulado na segunda seção, à qual aludiremos apenas quando for necessária. O quarto é uma crítica aos anatomistas antigos e o quinto é uma aplicação da forma pela qual se faz a visão na prática astronômica.

2 A ANATOMIA DO OLHO

A primeira parte do quinto livro dos *Paralipomena*, intitulada “A anatomia do olho”, apresenta os componentes e a estrutura do olho. Como dissemos, Kepler nunca foi um anatomista ou fisiologista, seu trabalho sempre foi o de um matemático e astrônomo teórico, envolvido na criação de modelos estruturais acerca do cosmo e na procura das leis dos movimentos planetários, e, por isso, viu na óptica uma ciência que fornece um grande auxílio à astronomia. Sendo assim, ele procurou nos anatomistas mais proeminentes de seu tempo as respostas necessárias para a elaboração do seu trabalho. Kepler segue basicamente dois autores: Felix Plater e Johannes Jessenius de Jessen, este último, discípulo de Aquapendente:

Consultei principalmente as tabelas de Felix Plater⁴ sobre a estrutura e o uso do corpo humano, publicadas no ano de 1583 e que mereceu uma reedição neste ano de 1603. Adicionei a *Anatomia pragoense*, de meu amigo Doutor Johannes Jessenius de Jessen,⁵ não somente porque ele disse ter seguido principalmente

4 A obra de Plater à qual Kepler se refere é *De corporis humani structura et usu* (*Da estrutura e uso dos corpos humanos*).

5 Johannes Jessenius de Jessen (1566-1621) escreveu em 1600 a obra *Anatomia Praguae* (*Anatomia de Praga*). Jessenius estudou medicina em Wittenberg, Leipzig e Pádua. Em 1597, tornou-se reitor da Universidade de Wittenberg. Em 1600, vai para Praga sob a tutela do imperador Rudolfo II. Por ser um grande amigo de Kepler, interfere junto a Rudolfo II para que nomeie Kepler como Matemático Imperial, tendo obtido êxito após a morte de Tycho Brahe. Jessenius é mais importante por esse pedido do que como anatomista, pois ele não trouxe qualquer contribuição nova ou interessante para a anatomia do olho. Kepler cita-o mais por ser seu amigo e por ter uma grande coleção de obras anatômicas, da qual fez uso.

Aquapendente, mas também porque ele tem, por seus próprios meios, numerosos trabalhos de anatomia. Se se encontram homens com maiores méritos nesse domínio, dos quais não mencionei os seus nomes, eles que me perdoem, pois estou inteiramente absorvido no meu estado de matemático (Kepler, 1938 [1604], p. 144; 1980 [1604], p. 304).

Temos aqui um ponto importante. Como o trabalho de Kepler na óptica foi principalmente o de um matemático, ele importou informações das obras dos anatomistas, tais como os aspectos físicos e funcionais do olho e, dessa forma, teve condições de determinar matematicamente a ação da luz no olho, quando da observação de um objeto. Mais adiante, neste texto, isso mostrar-se-á relevante, pois a anatomia do olho aceita por Alhazem e Vitélio não se adequava perfeitamente à teoria matemática subjacente, justamente porque a ligação do nervo óptico não se faz com o cristalino, mas com a retina, algo que foi mostrado por Plater e seguido por Kepler.

Na verdade, Kepler seguirá apenas Plater, a menção ao seu amigo Jessenius é apenas elucidativa, pois este segue somente Galeno, aceitando que a imagem se forma no cristalino. Utiliza, então, somente a estrutura do olho proposta por Plater, fornecendo inicialmente elementos gerais sobre a posição do olho no corpo humano. O principal é a posição dos olhos na face humana; eles estão na parte de cima da face, pois essa colocação propicia um maior campo de visão, do que se fossem localizados na parte de baixo (Kepler, 1938 [1604], p. 144; 1980 [1604], p. 305). Kepler também comenta a esfericidade do olho e outros aspectos menos importantes (Kepler, 1938 [1604], p. 144-7; 1980 [1604], p. 304-10. Cf. Crombie, 1991; Lindberg, 1976, p. 191-3).

O que é mais relevante é a apresentação dos componentes externos e internos do olho, chamados de túnicas (Kepler, 1938 [1604], p. 147-51; 1980 [1604], p. 310-16). Externamente, o olho contém a íris e a pupila, sendo esta última responsável pela entrada dos raios visuais no interior do olho. A próxima túnica está dividida em dois hemisférios: o posterior, chamado de *sclerodis* (esclerótica), que é opaco, seco, pesado; e o anterior, que é a córnea, caracterizado pela sua transparência, umidade e por conter esferas pequeníssimas que atingem a esclerótica. A seguir, vem outra túnica que também contém dois hemisférios: o posterior chamado de coróide e o anterior de úvea. A diferença entre esses hemisférios está na espessura, a úvea é duas vezes mais espessa que a coróide. Esta última se une à esclerótica mediante pequenos fibramentos; a úvea não se une à córnea, mas a circunda com o humor aquoso. A úvea é perfurada pela pupila. A última túnica é a mais importante; ela é interna e une-se ao nervo óptico. Ela é a retina, ou túnica retiforme (cf. Kepler, 1938 [1604], p. 147-51; 1980 [1604], p. 310-16; Lindberg, 1976, p. 191).

Kepler, seguindo Plater, admite a teoria tradicional dos três humores: o aquoso, o cristalino e o vítreo. Este último é o mais largo de todos, ele é esférico e ocupa a região posterior do olho. O humor aquoso está na frente do cristalino; o humor cristalino está entre o aquoso e o vítreo, rodeado pela membrana aracnóide e pelos processos ciliares. O humor cristalino é mais denso que os outros dois. Os humores (líquidos) serão os responsáveis pela posição das partes do olho que formam as imagens visuais: o humor aquoso, para produzir a refração produzida na córnea (Kepler, 1938 [1604], p. 159; 1980 [1604], p. 329); o humor cristalino, para ligar a coróide e o cristalino (Kepler, 1938 [1604], p. 158; 1980 [1604], p. 327); e o humor vítreo, que deixa úmida as regiões entre a retina e o nervo óptico (Kepler, 1938 [1604], p. 158; 1980 [1604], p. 327).

É justamente a retina, principal órgão do olho, a responsável pela última formação das imagens vindas dos objetos. Esta foi uma mudança significativa na anatomia do olho, que serviu como suporte para que Alhazen e Vitélio utilizassem o modelo de Galeno, cujos estudos anatômicos, respeitados e seguidos em toda a Idade Média, apontavam o cristalino como o principal órgão da visão (cf. Tossato, 2005). Plater, ao contrário, mesmo respeitando Galeno, foi o primeiro a mudar do cristalino para a retina:

Seguirei em grande medida Plater porque sua exposição é bem mais clara [que a exposição de Jessenius]. Com efeito, parece que Vitélio transfere para o humor cristalino a faculdade de conhecer as coisas visíveis; existe, portanto, uma passagem para essa faculdade entre o nervo (ou a retina sobre o término do nervo óptico) e o cristalino, mediante os processos ciliares. Plater coloca, ao contrário, a faculdade de conhecer na retina, o que é, na verdade, mais lógico (Kepler, 1938 [1604], p. 150; 1980 [1604], p. 314).

A prova oferecida é empírica, pois as observações da escola de Galeno continuam um erro de entendimento das disposições dos órgãos do olho:

Se se coloca um eixo passando pelo centro da abertura da coróide no nervo óptico, os centros dos círculos do cristalino estarão sobre esse eixo; assim, têm-se razões para dizer que o cristalino está no centro do olho, se se entender que o olho está cortado por um plano perpendicular ao eixo, e que o centro do olho é o centro do círculo. Mas em relação ao conjunto da forma globular do olho, o cristalino situa-se mais à frente de um tal eixo. O cristalino está mais afastado do término do nervo óptico, e está mais para a abertura da coróide, que é muito menor que a abertura da córnea (Kepler, 1938 [1604], p. 151; 1980 [1604], p. 316).

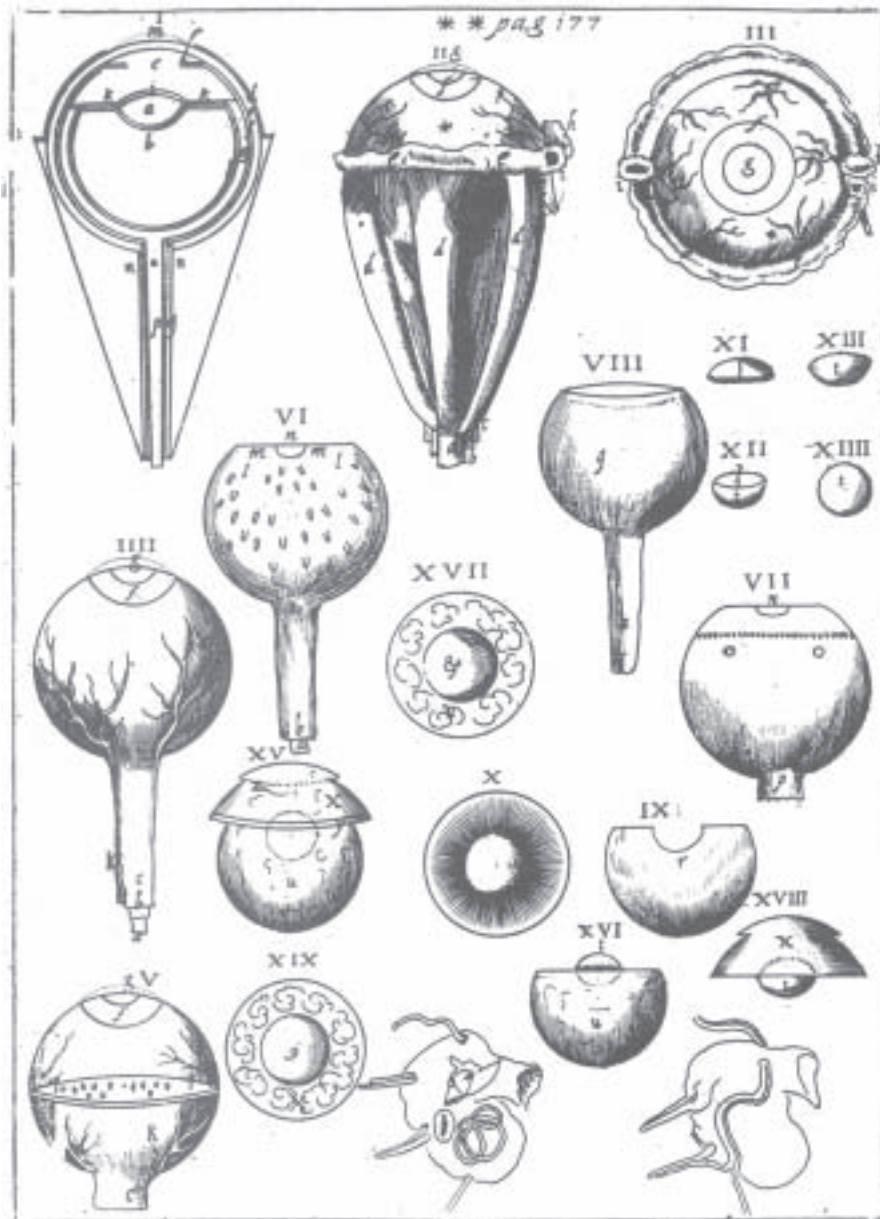


Figura 1. Os componentes do olho segundo Plater. Kepler reproduziu os desenhos e o esquema de Plater no quinto livro dos *Paralipomena*.

I. Representação por linhas das membranas e dos humores do olho a partir de um olho real, na qual: A, humores do cristalino; B, humor vítreo; C, humor aquoso; D, a túnica aderente; E, a parte opaca da esclerótica; F, úvea; G, retina; H, hialóide; I, cristalóide; K, os processos ciliares da túnica da úvea; L, do traço da úvea afastando-se da esclerótica; M, a parte da córnea da esclerótica, sua convexidade saliente, que é observada por outros, é notada pela linha; N, músculos do olho; O, nervo óptico; P, a membrana fina do nervo; Q, a membrana (esclerótica) do nervo.

- II. O olho inteiro com os músculos, retirado do crânio e simplesmente removidas as pálpebras.
- III. Face anterior do globo ocular.
- IV. A esclerótica, com parte do nervo óptico.
- V. A esclerótica cortada em secções transversais.
- VI. Túnica da coróide com parte do nervo óptico.
- VII. A superfície interna da coróide invertida.
- VIII. A retina com a substância do nervo óptico.
- IX. A túnica hialóide.
- X. O processo ciliar, radiando sobre a face superior da túnica hialóide.
- XI. A túnica cristalóide.
- XII. O humor cristalino ainda com a sua túnica.
- XIII. O humor cristalino a nu, posto sobre um lado.
- XIV. Face anterior do humor cristalino.
- XV. Os três humores do olho juntos, o aquoso, o vítreo e o cristalino, representados por uma sombra ligeira.
- XVI. O humor vítreo contendo o cristalino.
- XVII. Somente a face anterior do humor vítreo.
- XVIII. O humor aquoso mostrado em posição sobre as lentes.
- XIX. Somente a face anterior do humor aquoso.
- A em II, IV, VI, VIII. Nervo visual ou óptico.
- B em II, IV VI. Túnica fina envolvendo o nervo.
- C em II, IV, VI. Túnica espessa envolvendo o nervo.
- DDD em II. Os músculos dos olhos em um lado.
- EE em II, III. Parte da túnica aderente sustentada pelas pálpebras.
- EE em II, III. Parte expandida da mesma, intacta.
- F em II, III, IV, V. Parte escura do olho, ou íris, circundada de branco.
- G em II, III, I, V. Pupila negra ou centro do olho, ao centro da íris.
- Nota sobre II, IV, V. À letra G marquei um par de pontos, um arco saindo das extremidades da íris e pertencendo a um círculo menor que o do globo ocular; baseio-me por outras observações: (esse arco) marca a proeminência da córnea, que emerge do branco.
- H em II, III. Pequeno pedaço de carne no ângulo interno do olho.
- I em II, III. Abertura de onde saem as lágrimas.
- K em IV, V. Vasos dispersos na membrana da esclerótica.
- LL em V, VI. Fibras que fixam a túnica da coróide à membrana da esclerótica.
- MM em VI. Traço da coróide que está afastada da córnea.
- N em VI, VII. Abertura da coróide ou pupila.
- O O em VII. Nascimento dos processos ciliares.
- P em VII. Nascimento da coróide pela dilatação da túnica fina.
- Q em VIII. Amplitude da túnica da retiforme estendida acima do centro do olho.
- R em IX. Dobra da túnica hialóide, sustentando o humor cristalino.
- S em XI, XII. Largura da túnica cristalina.
- T em XII, XIII, XVIII. Parte esférica superior do humor cristalino (segundo outros, produzida em um cone; mas para mim, ela é hiperbólica).
- T em XIV, XVI. Parte anterior fincada no mesmo humor.
- V em XV, XVI. Amplitude do humor vítreo.
- X em XV, XVIII, XIX. Amplitude do humor vítreo.
- Y em XV. Face onde o humor vítreo se separa do aquoso pela intervenção da túnica hialóide.
- Z em XV, XVIII. Face onde a coróide molha-se no humor aquoso.
- & em XVII. Cavidade do humor vítreo após o cristalino ter sido removido.
- ξ em XIX. Cavidade do humor aquoso após o cristalino ter sido retirado.

Se projetarmos o olho em um plano reto, então o cristalino mostrar-se-á próximo ao nervo óptico, mas se considerarmos a figura real do olho, isto é, uma figura globular, o cristalino aparecerá próximo da coróide e não do nervo óptico.

Essa passagem final da primeira parte do capítulo v dos *Paralipomena* aponta para um grave problema da anatomia óptica utilizada por Alhazem e Vitélio: o cristalino não se liga ao nervo óptico; não pode, portanto, ser o centro de formação das imagens visuais. Na segunda parte do quinto capítulo dos *Paralipomena*, intitulada “Maneira pela qual se forma a visão”, Kepler explora mais detidamente os estudos anatômicos de Plater e conclui, mediante a análise das partes do olho e de suas funções e, também, da possibilidade dessas partes e funções serem expressas geometricamente, que a imagem não se forma no cristalino, mas na retina. Isso concorda com a analogia entre o olho e a câmara escura. Para entender as partes e funções do olho humano, Kepler reproduz o esquema (ver a figura 1) utilizado pelo próprio Plater no *De corporis*. Reproduzimos a figura e as legendas por serem importantes para a concepção kepleriana de imagem formada na retina.

3 COMO SE PRODUZ A VISÃO

No início da segunda parte, *De modo visionis (Do modo [de produção] da visão)*, do quinto capítulo do *Paralipomena*, Kepler enfatiza que a sua concepção da anatomia do olho, exposta na primeira parte do capítulo quinto, é melhor do que a concepção tradicional “porque tenho aqui explicado o uso preferível conjuntamente com as suas descrições” (Kepler, 1938 [1604], p. 151; 1980 [1604], p. 316) e que, “para fazer surgir o uso de cada parte, explicarei a maneira pela qual se forma a visão, maneira que, pelo meu conhecimento, ninguém jamais explorou plenamente e compreendeu” (1938 [1604], p. 151; 1980 [1604], p. 316). A explicação dada por Kepler tem um duplo objetivo; em primeiro lugar, determinar qual é a região do olho em que se forma, de fato, a imagem do objeto visto; em segundo lugar, qual é o limite da ciência óptica. Pelas próprias palavras de Kepler:

Digo que há visão quando uma representação de todo o hemisfério do mundo, situado diante do olho (...) fixa-se sobre a parede branco-rosácea da superfície côncava da retina. Deixo para os filósofos naturais discutirem o modo pelo qual essa representação ou pintura une-se aos espíritos visuais que residem na retina e no nervo, e se ela é levada por esses espíritos para o interior das cavidades do cérebro, para comparecer diante do tribunal da alma ou da faculdade visual, ou antes se é a faculdade visual que, como um magistrado designado pela alma,

desce do pretório do cérebro até o nervo visual e a retina (...). Pois os ópticos não engajam suas tropas para além dessa parede opaca que constitui no olho o primeiro obstáculo (Kepler, 1938 [1604], p. 151-2; 1980 [1604], p. 317).

Duas coisas devem ser ditas inicialmente sobre a proposta de localização da imagem na retina. Primeiramente, “imagem” para Kepler é *imago rerum* (imagem das coisas), a qual antes era chamada pelos ópticos gregos de *eidola*, que podemos traduzir por “espécie visual”; há uma mudança de significado dos termos: de espécie visual para imagem, temos uma mudança de “perspectiva de trabalho” de modo que, na primeira, trabalha-se com uma certa entidade, um espírito, por exemplo, que entra no olho e conduz à representação do objeto, e, na segunda, trabalha-se com um efeito, de modo que, para Kepler, a imagem é a representação refratada do objeto iluminado pela luz exterior ao olho.

Em segundo lugar, *pictura*, que traduzimos por pintura, expressa que, como diz Alpers, “Kepler não só define a pintura sobre a retina como uma representação, mas também se desvia do mundo real para o mundo ali ‘pintado’” (1999, p. 101). “Pintura”, portanto, não é a cópia fiel da coisa vista, mas a maneira pela qual vemos o objeto, a maneira como o representamos.

A imagem se forma na retina. Nada que vá além dela é objeto de pesquisa da óptica. O primeiro ponto estabelece uma teoria óptica: a imagem que é vista é impressa na retina do olho humano; o segundo demarca o objeto de pesquisa da óptica: considerar apenas os aspectos anatômicos juntamente com as suas funções fisiológicas e a possibilidade de matematizá-los, deixando quaisquer outros aspectos, tais como os psicológicos, para outro ramo científico.⁶ De fato, Kepler pergunta por que as leis da óptica devem tratar de aspectos que não são necessários para as suas elaborações (Kepler, 1938 [1604], p. 152; 1980 [1604], p. 317), pois os espíritos propostos não são de mesma natureza que os humores e as partes do olho (retina, cristalino, coróide, esclerótica,

⁶ Existe um paralelo entre os estudos ópticos e astronômicos keplerianos que não se pode deixar de apresentar. Os *Paralipomena* foram escritos em sua maior parte em 1603 e sua publicação deu-se no início de 1604; provavelmente, Kepler chegou à concepção de imagem formada na retina e a delimitação do campo de estudos ópticos no ano de 1603. As duas primeiras leis de Kepler foram obtidas na seguinte ordem: a segunda em 1602-1603 e a primeira em 1604. Ora, Kepler escreveu os *Paralipomena* entre a elaboração de suas duas primeiras leis. O paralelo é que a diretriz básica para conduzir os trabalhos é a mesma em ambos os estudos, isto é, a obtenção das leis dos movimentos planetários ocorre por eliminação de explicações não condizentes com o objeto de estudos astronômicos, tal como as explicações animistas, em favor de explicações dinâmicas, como o conceito de força magnética. Para a óptica, os espíritos visuais são abolidos, sendo substituídos, como veremos mais adiante, por um modelo mecânico, a câmara escura. O relevante nesse paralelo é a maneira como dois ramos científicos, a óptica e a astronomia, foram analisados sob a mesma perspectiva metodológica: o de demarcação dos campos de estudos, considerando apenas o que é necessário e suficiente para descrever e explicar matematicamente os seus respectivos fenômenos.

córnea etc.), que são detectáveis por exploração anatômica. Vitélio precisava dos espíritos porque eram corpos transparentes que conduziam as imagens pelos humores. Para Kepler, nada de espíritos ou coisa que não seja necessária, pois “os espíritos não são corpos ópticos” (1938 [1604], p. 152; 1980 [1604], p. 318). O sentido tradicional para “espíritos visuais”, no fim do século XVI, era o de serem os responsáveis pela transmissão das imagens visuais; porém, a tradição óptica entendia-os como os responsáveis por conduzir a própria imagem do objeto sendo, na interpretação da visão como intromissão, aquilo que produz a ação no olho, a explicação dada para ocorrer a visão. Com Kepler, é somente pela ação imaterial da luz que ocorre a representação do objeto.

Esse aspecto é importante para a compreensão do campo de ação da óptica geométrica kepleriana. Sobre isso, a função dos espíritos é transportada por Kepler para algo que não pertence à óptica, mas é de outra natureza, que, para Kepler, ainda é desconhecida. Acerca das impressões que persistem após o fenômeno visto, Kepler diz o seguinte:

Essa espécie, que subsiste separadamente da presença do objeto visto, não se encontra nos humores ou nas túnicas, como provo; ela se encontra, portanto, nos espíritos, e é por meio dessas impressões das espécies sobre o espírito que se mantém a visão. Mas a própria impressão não é óptica, mas física, e admirável. Entretanto, isto é apenas uma digressão (Kepler, 1938 [1604], p. 152-3; 1980 [1604], p. 319).

Compreendemos essa citação da seguinte maneira: o processo óptico é formado pela luz que “conduz instantaneamente” a imagem do objeto visto até as partes anatômicas do olho (córnea, cristalino, retina etc.), ocorrendo, então, os processos de refração (que, mais adiante, veremos como se formam) até a imagem ser representada como uma pintura na retina. Até aí, os espíritos visuais não têm qualquer utilidade. O problema são as impressões das imagens que persistem na memória, isto é, como a representação do objeto visto na retina é mantida no cérebro independentemente da existência do objeto no próprio cérebro. A óptica versa sobre a representação da imagem na retina; essa imagem não é o objeto; a existência representacional do objeto pode ser alicerçada na ação da luz na córnea, no cristalino e na retina, como Kepler almeja explicar no quinto livro dos *Paralipomena*. O que acontece depois é assunto físico ou psicológico; é um assunto ligado a uma teoria das idéias e da representação.

Após ter estipulado que a visão se forma na retina, Kepler procura explicar o processo das inversões que se apresentava na óptica desde a época de Alhazem. As imagens quando alcançam a retina tornam-se invertidas:

A visão se faz, portanto, por uma pintura do objeto visível sobre a parede branca e côncava da retina, e os objetos que, no exterior, encontram-se à direita, são impressos sobre o lado esquerdo da parede; aqueles que se encontram à esquerda, sobre o lado direito; aqueles que estão no alto, abaixo, e aqueles que estão abaixo, ao alto (Kepler, 1938 [1604], p. 153; 1980 [1604], p. 319).

A explicação kepleriana é uma análise dióptrica do próprio olho humano, tal como ocorre quando da representação da imagem de um objeto iluminado no interior de uma câmara escura. Nesta, tal como podemos observar nas figuras 2 e 3, a imagem iluminada de um objeto passa pela abertura da câmara, sofre uma inversão e uma refração. Este é o mecanismo que funciona como analogia ao olho humano.

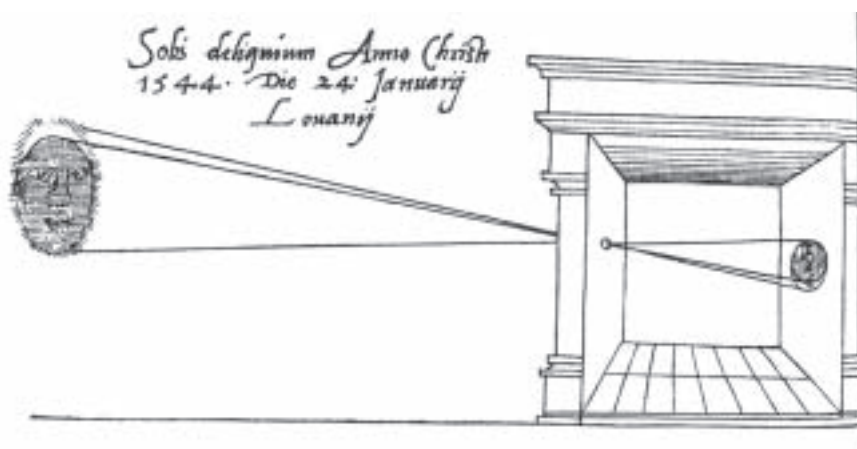


Figura 2. Ilustração do funcionamento de uma câmara escura. A imagem invertida do Sol eclipsado é projetada na parede da câmara, após passar pela sua abertura.

O olho humano funciona por um mecanismo dióptrico, tal como a câmara escura, que se compõe de uma caixa ou de um quarto fechado, contendo uma tela em uma de suas paredes e um pequeno orifício, uma pequena abertura, na parede oposta. Os raios do Sol ou de um corpo que emite luz entram pela abertura. A imagem é projetada invertida na tela. O processo de formação de imagens em uma câmara escura segue os seguintes estágios, expostos por Kepler no livro segundo dos *Parapilomena*:

(...) os objetos, iluminados no exterior [da câmara escura] por uma luz qualquer, tingem a luz comunicada e difundem-na esfericamente por todo o seu redor. Conseqüentemente, (...) os objetos exteriores iluminarão a tela interior oposta, de tal forma que a figura da tela iluminada será uma mistura da figura da abertura

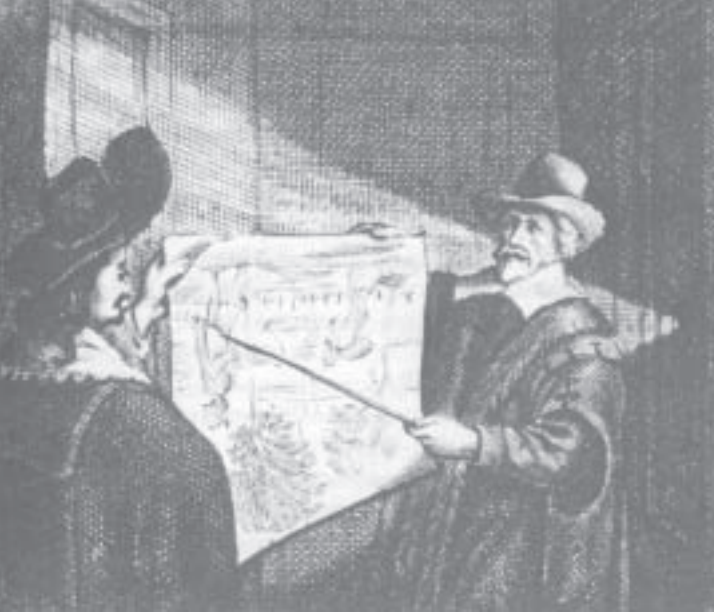


Figura 3. Desenho mostrando dois homens no interior da câmara escura comentando a imagem invertida em uma tela após essa imagem ter passado pela abertura. Na verdade, este desenho “sugere” que os dois homens podem ser vistos, pois o interior da câmara é totalmente escuro, somente sendo perceptível a luz que entra pela abertura.

e da dos objetos de exterior; mas, como se supôs que a abertura era muito pequena em relação a sua distância da tela, a figura participará muito pouco da figura da abertura e [muito] da dos objetos expostos. Os únicos defeitos dessa pintura serão inicialmente que (...) os objetos aparecerão no interior invertidos; em seguida, que todas as partes de todo objeto exterior, compreendido no estreitamento do cone cujo vértice está sobre a tela e que é diminuído e comprimido na abertura, não podem ser distinguidas em sua articulação sobre a tela, enquanto todo objeto, cuja largura supera o estreitamento do cone que lhe é próprio, está pintado no interior com suas partes características (Kepler, 1938 [1604], p. 58; 1980 [1604], p. 169).

O funcionamento da câmara escura é análogo ao funcionamento do olho. Porta já tinha esboçado o mecanismo da câmara escura (*Magia naturalis*, livro XVII, cap. 6), mas Porta seguiu Alhazen e Vitélio⁷ afirmando, como eles, que a visão torna-se invertida e revertida no cristalino. Para Kepler, se Porta tivesse notado que a imagem (pintura) formada no cristalino é ainda confusa devido à pequena abertura da coróide, e que a luz não termina a sua ação no cristalino, mas continua até a retina, unindo os pontos separados (tal como esclarece a analogia com a câmara escura), ele não teria ficado restrito ao cristalino e teria obtido o modo de operação e descrição das imagens.

O mais complexo é a prova kepleriana para provar que a pintura (imagem) é formada na retina. Tal prova estabelece os pontos anatômicos de Plater, juntamente com os princípios de funcionamento da câmara escura e, principalmente, com a geometrização desses componentes, isto é, a geometria óptica. Acreditamos que a principal contribuição de Kepler para a óptica alicerça-se justamente nesse tratamento: unir a

⁷ Acerca da história da câmara escura antes de Kepler, dois artigos são importantes Lindberg (1968; 1970).

anatomia com a geometria, isto é, fornecer para os estudos anatômicos sobre o olho uma descrição suficiente e adequada para que, por meio dessa descrição, seja possível entender o mecanismo da visão e, a partir disso, elaborar conhecimentos ópticos (relação entre a imagem de um objeto com o mecanismo do olho que vê esse objeto). Kepler parte dos problemas que a anatomia tradicional, baseada em Galeno e seguida por Alhazen e Vitélio, enfrentou quando procurou geometrizar os seus aspectos. As concepções da óptica tradicional geravam três importantes problemas:

- (1) anatomicamente, segundo Plater, o cristalino não é conectado com o nervo óptico, mas com a coróide;
- (2) a perspectiva utilizada por Alhazen e Vitélio ignora os raios refratores, restringindo-se apenas aos raios perpendiculares;
- (3) a visão não é uma ação material, um toque (contato), pois a natureza da luz indica que ela passa instantaneamente pelos componentes do olho.

Os problemas listados mostram a necessidade de uma reformulação na relação entre a anatomia e a geometria. Para relacioná-las, devemos seguir alguns passos. O primeiro, como já dissemos, foi o uso da anatomia de Plater em vez da de Jessenius, que seguiu Galeno, porque o primeiro determinou que a imagem se forma na retina, não no cristalino. O segundo foi determinar os cones que formam o raio visual. Basicamente, dois cones entram no processo: “digo que essa pintura contém pares de cones que têm pontos no objeto visto; dois cones têm sempre como base comum a largura do cristalino (...) de modo que um dos cones tem seu vértice no objeto visto e a sua base no cristalino” (Kepler, 1938 [1604], p. 153-4; 1980 [1604], p. 319-20). O primeiro tem como vértice um ponto do objeto visto entrando pela parte externa do olho, primeiramente pela pupila, até alcançar as túnicas exteriores, a córnea, a esclerótica e a coróide e, por esta última, a imagem é refratada no cristalino. Portanto, duas refrações formando dois cones visuais. A seguir, “o outro cone tem uma base comum com o primeiro, no cristalino, mas tem como vértice um ponto na pintura, sobre a superfície da retina, ele sofre, assim, uma refração do cristalino” (Kepler, 1938 [1604], p. 154; 1980 [1604], p. 320).

Com essa concepção geral do duplo cone,⁸ um tendo o seu vértice no objeto visto e base no cristalino, e o segundo com a mesma base no cristalino e vértice na retina, Kepler produz uma ruptura com a tradição euclidiana – que, lembremos, foi seguida

⁸ Cada objeto iluminado contém infinitos pontos, o que leva a ter infinitos cones visuais. Falamos apenas de um cone para cada ponto visual apenas para simplificar a apresentação da geometria óptica kepleriana.

principalmente por nomes como Ptolomeu, al-Kind, Alhazen, Bacon, Pecham e Vitellio – que admitia o cone visual formado pelo olho como o seu vértice e o objeto como a sua base. Isso foi possível a Kepler devido ao uso do modelo da câmara escura como análogo ao funcionamento do olho. O modelo euclidiano, por ter o ápice do cone visual no próprio olho, não considera todos os possíveis pontos que formam a imagem do objeto visto. Quando invertemos o cone visual, de modo que entra em consideração toda a quantidade de luz que passa pela abertura da câmara, formando a base do cone visual no interior do olho humano, temos meios de explicar os desvios que a imagem sofre após passar pela abertura, pois, como diz Crombie:

A câmara escura torna-se o verdadeiro modelo do olho. Reconstruindo a geometria óptica, Kepler não fez dela uma percepção vital para a correção da ordenada e orientada imagem guiada pelo cone euclidiano, mas, como em qualquer estratégia usado com artifícios inanimados, imediatamente sugeriu em uma forma geométrica a questão da identidade e localização do receptor sensitivo sobre o qual a imagem foi localizada. (...) Dos inumeráveis raios físicos, que vão em todas as direções a partir de cada ponto de uma fonte luminosa ou iluminada, alguns caem sobre a pupila. Ele demonstrou como uma imagem invertida e revertida é focada no olho por meio de uma construção que, ao mesmo tempo, mostra que a imagem deve cair sobre a retina, e que, portanto (como Plater sugeriu), ela deve ser o receptor sensitivo. Ele demonstrou como a partir de um ápice em cada ponto sobre o objeto visível uma multidão de cones radiantes passa pela pupila (Crombie, 1991, p. 96).

A pupila é semelhante à abertura da câmara escura; uma quantidade x de raios entra por essas aberturas e, no interior, tanto da câmara escura quanto do olho, os processos refratários tomam lugar, formando as imagens, seja na tela da câmara escura, seja na retina do olho. No modelo euclidiano, o olho é entendido como um órgão receptor que representa fielmente as imagens vistas; por isso, o olho não é visto como um mecanismo, um artefato, mas como um órgão “vivo”, capaz de expressar realmente as imagens dos objetos; desta forma, o ápice do cone pode estar no olho, como receptor, e a base no objeto visto. No enfoque kepleriano, ao contrário, o olho é um artefato mecânico, que recebe informações, que são os raios visuais, e atua sobre elas segundo as suas características, isto é, de acordo com as funções de cada um dos seus componentes (partes do olho) e da relação entre eles. Assim, no modelo de olho kepleriano, é analisada a quantidade de raios que entra pela pupila e de como esses raios passam ao interior do olho, por refrações de cada raio, a primeira na córnea, a segunda no cristalino, obtendo-se a imagem, uma pintura, do objeto na retina.

Para entendermos o cone visual de Kepler, notemos a figura 4, representando como o cone se forma no olho:

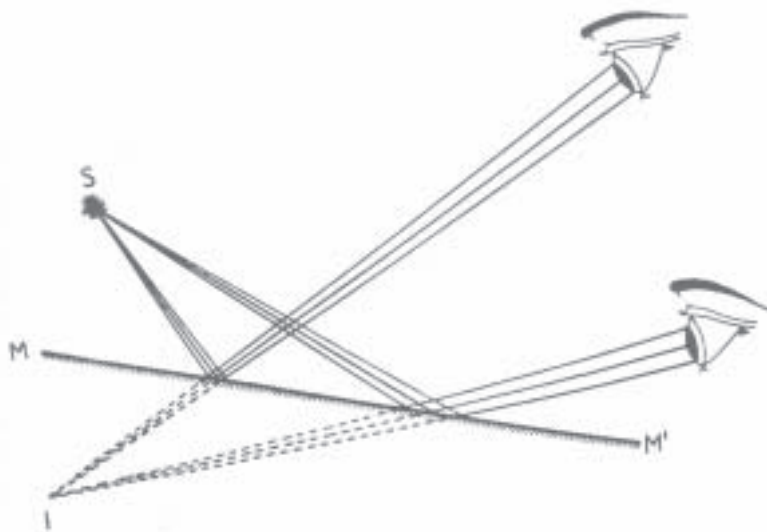


Figura 4. O cone visual kepleriano. Os olhos, representados na figura, na parte direita, focalizam um objeto em I; a diferença entre a geometria euclidiana e a kepleriana é que, na primeira, o ápice da figura formada entre os olhos e I está nos olhos e a base está no objeto I, enquanto que, na segunda, o ápice está no objeto e a base nos olhos, tal como representado na figura.

Nessa figura, S emite raios que são refletidos por um espelho MM', formando um cone com seus vértices no ponto I (Ronchi, 1959, p. 44).

A noção de “pintura” kepleriana como expressão da imagem formada na retina relaciona-se analogamente com as técnicas de perspectiva dos pintores renascentistas. Para estes, uma pintura é a representação do que o artista vê, respeitando a distância em que este está de um tema e o local para o qual se dirige a visão do artista (“ponto de vista” e “ponto de fuga”, respectivamente; cf. Tossato, 2005). A pintura formada na retina retém esses elementos; o olho humano dirige a sua ação até uma cena qualquer, e a luz que ilumina essa cena manda informações para o olho, que recebe essas informações e iniciam-se as refrações entre a pupila e o cristalino e, deste último, outra refração para a retina. No próprio olho ocorrem os processos de pintura e de projeção em perspectiva, que culminarão na formação da imagem.

Um terceiro passo é relacionar todos os vários cones que formam as imagens, no que entra em jogo a natureza da luz. Para Kepler, a luz é uma substância imaterial, tal como ocorre com o seu conceito de força magnética, utilizado para explicar por que os

planetas movem-se elipticamente em torno do Sol, percorrendo áreas iguais em tempos iguais.⁹ A luz, por ser imaterial, não pode “tocar” o olho ou os seus órgãos, isto é, ela não passa pelas partes constituintes do olho: pupila, esclerótica, coróide, cristalino, retina etc., tocando-os, tal como era entendido pela óptica de sua época. A ação da luz é instantânea¹⁰ e, assim, a sua ação é percebida por meio das refrações que ela produz dentro do olho humano: da pupila até o cristalino e deste para a retina.

A partir disso, temos a aplicação da geometria aos fenômenos e componentes ópticos. O principal elemento da óptica é a luz,¹¹ que perpassa os aparelhos ópticos do olho produzindo refrações, até finalizar o processo quando representa a imagem do objeto exterior na retina. Considerando-se físicos, ou biológicos, os componentes do olho, em que cada um tem a sua função específica, falta relacionar a ação refratada da luz nesses componentes e, a partir disso, obter a representação geométrica dessas ações. Este é o conceito, acreditamos, de “óptica geométrica” para Kepler. Ele pode ser compreendido melhor quando lemos a análise kepleriana sobre as funções das lentes refratoras: primeiramente na córnea e, em seguida, no cristalino:

(...) Pois a natureza mede o espaço ocupado pelo humor vítreo entre o cristalino e a retina em função da densidade do cristalino e do que produz a grandeza dessas refrações.

9 Essas são as suas duas primeiras leis dos movimentos planetários, expostas na *Astronomia Nova*, caps. 58 e 40, respectivamente. Note-se outro paralelo entre a obtenção das leis e a fundamentação da óptica geométrica. A força tem o mesmo estatuto que a luz, ambas são substâncias imateriais. A luz é notada pelos sentidos: vemos os objetos porque existe luz para iluminá-los. A força magnética não pode ser vista como vemos a luz, mas isso não é um problema da força, mas das faculdades cognitivas humanas. Não é porque não vemos a força magnética que se pode inferir corretamente que ela não existe. Além disso, e mais importante ainda, a luz e a força são substâncias que produzem ação: a força, por conduzir os planetas; a luz, por conduzir as imagens do objeto ao interior do olho humano. É bem possível que Kepler tenha elaborado o seu conceito de força tendo como modelo o seu conceito de luz. Isso é atestado pela ordem das investigações. A natureza da luz foi investigada em 1603, antes do conceito de força, que foi tratado nos anos de 1604-1605.

10 Kepler considerava a ação da luz, isto é, a sua velocidade, como instantânea, equivalente à velocidade infinita. De fato, Kepler seguiu a opinião dos antigos, para os quais, como um objeto iluminado pela luz do Sol, por exemplo, apresenta a sua iluminação menor que “um piscar de olhos”, a sua velocidade deve ser instantânea. As condições técnicas de conhecimento mostravam que isso era uma postulação razoável. Na época de Kepler, não havia qualquer medida para a velocidade da luz. A primeira tentativa de medição da velocidade da luz foi feita por Olaf Römer em 1676, que deu uma estimativa em torno de 214.300 km por segundo. O problema para a determinação da velocidade da luz é que envolve o conhecimento da distância da Terra ao Sol, o que só foi resolvido no século XVIII. Hoje temos uma medida muito boa para a velocidade da luz, considerada como aproximadamente 300.000 Km por segundo. Os valores modernos para a velocidade da luz foram dados por Hypolite Fizeau em 1849 e Leon Foucault em 1862. Michelson e Morley, no célebre experimento de 1881, determinaram que a velocidade da luz não apenas é finita, mas também é invariável.

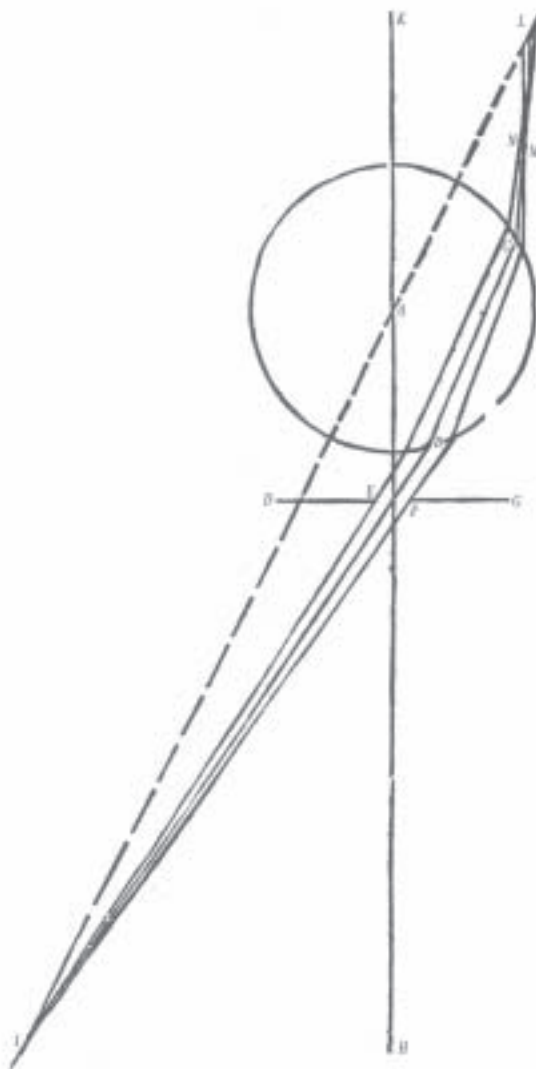
11 A óptica trata da luz e das cores. Não estamos analisando o estatuto das cores no processo óptico kepleriano apenas por simplificação, mas a análise das cores segue os mesmos procedimentos dos da luz.

Adiciono que esta visão não é perfeitamente distinta da totalidade da luz proveniente de um mesmo ponto, dispersada de modo que ele esteja na amplitude do cone vindo da abertura da coróide, agrupado segundo duas refrações, uma na córnea e outra na superfície posterior do cristalino, que ilumina muito intensamente um ponto único da retina, que é o próprio orifício do nervo que veicula a faculdade visual ou espírito, sem que, do fato da negridão e da opacidade da coróide, da estreiteza da abertura, dos processos ciliares e de outras razões das quais se falará mais abaixo, nenhum outro raio entra por nenhum outro ponto luminoso que possa guiar-se até esse ponto (Kepler, 1938 [1604], p. 154; 1980 [1604], p. 322).

Ocorre uma delimitação do campo óptico. Como vimos, Kepler determina o que é do escopo da óptica e o que não lhe pertence. O que é de análise matemática, geométrica, são as ações da luz nos componentes anatômicos do olho; esta ação provoca refrações em dois níveis: da córnea ao cristalino; deste para a retina. O que se interpreta sobre essa imagem está em um campo extra-óptico.

Infelizmente, Kepler não apresentou nenhum desenho ou esquema sobre o processo de refração no cristalino e na retina, seja nos *Paralipomena* seja em qualquer outra obra. O que ele deu foi uma representação geométrica de uma gota de água que refrata a imagem de uma folha de papel no interior de uma câmara escura, apresentada na figura ao lado.

Figura 5. Apresentação do processo de visão usando a refração de uma gota de água em uma câmara escura, que é análogo, segundo Kepler, ao processo de formação da visão no olho humano. Esta é a única representação gráfica do processo de formação da visão para Kepler na sua obra de 1604, *Paralipomena*. Pela figura, podemos notar que a visão de um objeto qualquer sofre duas refrações até alcançar a retina.



A figura acima pertence à terceira parte do quinto livro dos *Paralipomena*, proposição XXIII. Nela, uma folha de papel está localizada em K, onde se tem a última intersecção da radiação vinda de HI. I é a posição do objeto. A é o centro de uma gota de água que refrata a imagem em I. EF é a abertura de uma câmara escura. KL é a tela da câmara. Kepler procurou demonstrar geometricamente como os raios vindos do ponto em I, do objeto visível estando em HI, após passarem pela abertura EF, são refratados pela gota de água A, seguindo raios paralelos de B a C e, quando chegam no ponto em M, as imagens são invertidas em N e vistas no ponto L.¹²

Mas, felizmente, temos uma figura dada por Descartes que nos ajuda a entender o processo kepleriano da visão. Descartes apresenta na sua *Dioptrique*, publicada em 1637, portanto, 23 anos após Kepler publicar os *Paraplomena*, um esquema contendo fielmente as idéias de Kepler,¹³ que é o da figura ao lado.

Esta figura ilustra plenamente a dióptrica ocular de Kepler. Os raios emitidos do objeto, VXY, passam por refrações quando entram no olho. Primeiro pela córnea, em BCD, alcançando o cristalino em L e, depois deste, até chegar à retina em RST. Notar o processo de inversão, em que a imagem na retina é uma pintura invertida do objeto real.

A importância dos *Paralipomena* fez-se sentir nos trabalhos ópticos subsequentes. Um dos mais importantes personagens após Kepler foi o jesuíta Christopher Scheiner, que publicou o livro *Rosa ursina* (1626-30), relatando um experimento que corrobora a formação das imagens na retina, escrevendo: “mostro muito claramente no olho humano (...) que (...) os raios, que se interceptam, caem sobre a retina” (Scheiner *apud* Crombie, 1991, p. 106). Ele adiciona uma figura comparativa entre o olho e a câmara escura.

Figura 6. A visão segundo Descartes na *Dioptrique*. Descartes, 23 anos após a publicação dos *Paralipomena*, chega à mesma estrutura kepleriana do olho humano, no qual ocorrem duas refrações até a imagem ser formada no olho.

¹² Não reproduziremos toda a prova. Para maiores informações sobre a prova, ver a proposição XXIII da terceira seção do quinto livro dos *Paralipomena*, (Kepler, 1938 [1604], p. 177-8; 1980 [1604], p. 356-8); Conferir também as proposições xv, xvi e xx da mesma seção, porque essas proposições são provas anteriores necessárias para a prova da proposição XXIII.

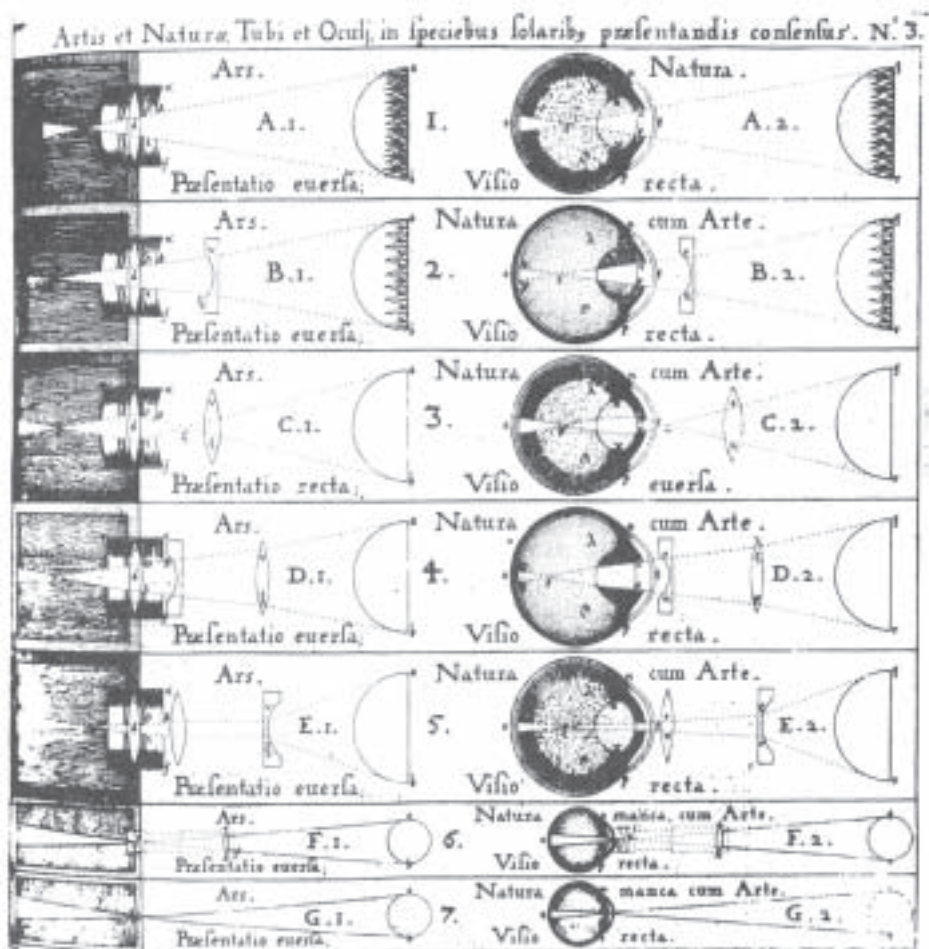


Figura 7. Ilustração destacando a comparação entre o olho e uma câmara escura, feita por Scheiner, em sua obra *Rosa ursina*, escrita entre 1626 e 1630. Na parte esquerda da figura, temos o processo de formação da imagem no interior de uma câmara escura; na direita, o mesmo processo no interior do olho.

Outros ópticos seguiram a idéia da imagem retiniana de Kepler, tais como Johann Christoph Kohlans, em sua obra *Tractatus opticus (Tratado de óptica)*, de 1663; Johann Christoph Sturn, na obra *Collegium experimentale (Colégio experimental)* de 1676; e François Aguillon, na obra *Opticorum libri (Livros de óptica)*, de 1613, entre os mais importantes.

13 A relação entre Kepler e Descartes na óptica, especialmente no que concerne à obtenção da lei da refração, é um assunto interessante, mas que não trataremos neste artigo. Trata-se de um assunto para outro texto. Apenas como elucidação do ponto, Kepler não chegou, tanto nos *Paralipomena* quanto na *Dioptrice*, à lei da refração. Quem fez isso foi Descartes e, separadamente, Snel. O que salientamos é que, para obter a correta lei da refração, era necessário um trabalho anterior, o de entender o mecanismo de visão, como faz Kepler. Para maiores informações sobre Kepler, Descartes e a óptica, cf. Simon (1975).

Em síntese, a nova proposta kepleriana, ao estipular a formação das imagens na retina e não no cristalino, serviu como uma proposta teórica que influenciou os estudos ópticos subsequentes. Um grande número de ópticos não trabalhou mais com a teoria do cristalino, desenvolvendo as potencialidades da imagem retiniana. Aliado a isso, a aplicação da geometria à óptica torna-se algo menos problemático do que o era para a tradição euclidiana, baseada no cone visual com ápice no olho e base no objeto visto; a inversão proposta por Kepler, ápices nos pontos do objeto e bases no cristalino, permitiu um maior aprofundamento no uso da geometria aplicada à óptica, esclarecendo muitos de seus aspectos.

CONCLUSÃO

Dissemos ao longo deste texto que a importância de Kepler para a óptica reside em sua geometrização. O termo “óptica geométrica” adquire com Kepler um significado mais substancial do que quando aplicado às teorias que antecederam seus trabalhos ópticos. Neste sentido, a conclusão deste texto é reservada para esclarecer o significado do uso de “óptica geométrica” em Kepler.

O papel de Kepler para a história da óptica pode ser sintetizado no seguinte aspecto: Kepler retirou da óptica qualquer referência à percepção ou à sensação, deixando as interpretações psicológicas fora do seu escopo, o que lhe permitiu isolar os aspectos ópticos e relacioná-los com a geometria. Livre dos problemas relacionados com uma teoria do conhecimento da percepção e da sensação, Kepler considerou somente os componentes anatômicos do olho, retirando, conseqüentemente, qualquer ação não necessária para o seu trabalho, isto é, principalmente os espíritos visuais. A interpretação das imagens após terem saído da retina pertence ao cérebro e, portanto, não à óptica. Em termos atuais, é função da psicologia, ou da neurologia, investigar como o cérebro interpreta as imagens pintadas na retina, mas não é função da óptica.

Crombie sintetiza claramente a importância de Kepler para a óptica moderna, quando escreve:

Em um novo contexto intelectual, o tratamento kepleriano para a operação do olho como um instrumento óptico marcou uma mudança radical na concepção de visão aceita pelos seus predecessores antigos e medievais, levando-o a elaborar uma nova interpretação para a fisiologia e a percepção (...). A analogia com a câmara escura, uma analogia formal, sem identificar as partes materiais, levou-o a isolar a óptica geométrica do olho como um problema físico imediatamente solúvel, a ser tratado primeiramente e à parte de qualquer problema de

percepção ou sensação. Com sua nova concepção de sujeito-matéria, ele pôde reduzir a óptica fisiológica à física inanimada e banir, a partir disso, os mecanismos físicos passivos e qualquer poder sensitivo para ver um objeto ou receber estímulos selecionados (Crombie, 1991, p. 96).

A citação de Crombie é elucidativa. Kepler não abole a importância da percepção ou da sensação. Apenas não as trata como pertencentes aos estudos do campo da óptica. Isso implicou um campo mais específico para a aplicação da linguagem geométrica aos fenômenos ópticos. Um fenômeno óptico passa a ser entendido como somente a ação imaterial da luz que ilumina um objeto, ou objetos, e desta iluminação o olho recebe informações do objeto; a partir do recebimento da imagem no olho, inicia-se o funcionamento deste como um aparato mecânico, ocorrendo refrações contínuas das imagens em seus órgãos, até a imagem ser pintada na retina. A geometria utilizada apenas dá conta da descrição das refrações que ocorrem no olho humano.

Kepler utilizou os conhecimentos anatômicos de Plater, a analogia da câmara escura ao olho, iniciada por Alhazen e seguida por Leonardo e Porta, e as técnicas de representação em perspectiva iniciadas pelos pintores renascentistas. Mas a sua principal contribuição foi algo original: a inversão do cone visual euclidiano. Kepler foi o primeiro a propor tal inversão e, sem ela, a óptica do século XVII não conseguiria descrever a ação da luz que entra pela pupila e segue, por duas refrações, até a retina, formando imagens do mundo externo no olho.

Finalmente, uma consequência da óptica geométrica kepleriana e da admissão de que as imagens se formam na retina foi de âmbito filosófico. As teorias da representação, após a óptica de Kepler, não poderiam mais trabalhar com a suposição de que a nossa visão expressa fielmente o objeto visto. Seja para um racionalista, seja para um empirista, a tônica da questão visão-representação terá como fio condutor o ponto em que formamos as imagens na retina, que se apresentam como representações, ou pinturas, como prefere Kepler, do mundo exterior, mas que não são cópias exatas desse mundo exterior, são somente a nossa forma de ver o que nos rodeia, sujeita a correções. Se, por um lado, ganhamos uma aplicação mais profícua com a substituição da geometria euclidiana de cone visual pelo cone visual kepleriano, aproximando-nos um pouco melhor da correspondência entre o objeto e a visão, por outro lado, contudo, afastamos de uma certeza, a de visualizarmos o mundo exterior tal como ele realmente é.☉

Claudemir ROQUE TOSSATO

Professor da Fundação Escola de Comércio Álvares Penteado (Fecap).

toclare@uol.com.br

ABSTRACT

This paper presents Kepler's theory of the process of vision, exposed in fifth book of *Paralipomena*, published in 1604. We pointed the following aspects: (1) the catalogue of the human eye made by Kepler, that was founded in Felix Plater's anatomical works; (2) the analogy between the obscure chamber and the human eye, with the understanding that the former is a dioptrical instrument like the last one; (3) the correct use, following Kepler, of geometry to the anatomical-physiological constitution exposed in the *Paralipomena*. From these elements, Kepler treats two basic points for the optic in the xviith century: the first affirms that the image of the object seen by the eye is formed in the retina and not in the crystalline; the second restricts the realm of optical studies only to that treated through optical components, that is to say, to anatomical and physiological constituents, and their possibilities of geometrization.

KEYWORDS • Optic. Kepler. Anatomy. Physiology. Plater. Alhazen. Retina. Crystalline.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALPERS, S. *A arte de descrever*. São Paulo: Edusp, 1999.
- BRADBURY, S. & TURNER, G. L. E. (Ed.). *Conference of Royal Microscopical Society*. Cambridge: University of Cambridge Press, 1976.
- CASPAR, M. *Kepler*. New York: Dover, 1959.
- CASPAR, M. & DYCK, W. (Ed.). *Gesammelte Werke*, Munich: C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, 1937. 17 v.
- CHAUI, M. *A nervura do real. Imanência e liberdade em Espinosa*. São Paulo: Companhia das Letras, 1999.
- CHEVALLEY, C. Introdução. In: KEPLER, J. *Les fondament de l'optique moderne: paralipomènes à Vitellion*. Paris: Vrin, 1980. p. 1-85.
- COHEN, I. B. & TATON, R. (Ed.). *L'aventure de la science, histoire de la pensée*. Paris: Hermann, 1964.
- CROMBIE, A. C. Kepler: de modo visionis. In: COHEN, I. B. & TATON, R. (Ed.). *L'aventure de la science, histoire de la pensée*. Paris: Hermann, 1964. p. 135-72.
- _____. Historical aspects of microscopy. In: BRADBURY, S. & TURNER, G. L. E. (Ed.). *Conference of Royal Microscopical Society*. Cambridge: University of Cambridge Press, 1976. p. 3-112.
- _____. *Historia de la ciência: de San Agustín a Galileo*. Madrid: Alianza Editorial, 1987. 2 v.
- _____. Expectation, modeling and assent in the history of optics II. Kepler and Descartes. *Studies in History and Philosophy of Science*, 22, 1, p. 89-115, 1991.
- DJIKSTERHUIS, E. J. *The mechanization of the world pictures*. Princeton, Princeton University Press, 1986.
- FIELD, J. V. Two mathematical inventions in Kepler's *Ad Vitellionem paralipomena*. *Studies in History and Philosophy of Science*, 17, 4, p. 449-68, 1986.
- GÖRLICH, P. Kepler's optical achievements. *Vistas in Astronomy*, 18, p. 835-47, 1975.
- KEPLER, J. *Ad Vitellionem paralipomena quibus astronomia pars optica traditur*. In: CASPAR, M. & DYCK, W. (Ed.). *Gesammelte Werke*, Munich: C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, 1938 [1604]. v. 2, p. 5-378.
- _____. *Les fondament de l'optique moderne: Paralipomènes à Vitellion*. Paris: Vrin, 1980 [1604].
- LINDBERG, D. C. The theory of pinhole images from antiquity to the thirteenth century. *Archive for History of Exact Sciences*, 5, p. 154-76, 1968.
- _____. The theory of pinhole images in the fourteenth century. *Archive for History of Exact Sciences*, 6, p. 299-325, 1970.
- _____. *Theories of vision from Al-Kindi to Kepler*, Chicago/London, The University of Chicago Press, 1976.

OS FUNDAMENTOS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA DE JOHANNES KEPLER

- LINNIK, V. P. Kepler's works in the field of optics. *Vistas in Astronomy*, 18, p. 809-17, 1975.
- MALET, A. Keplerian illusions: geometrical pictures versus optical images in Kepler's visual theory. *Studies in History and Philosophy of Science*, 21, 1, p. 1-40, 1990.
- MARECK, J. Kepler and optics. *Vistas in Astronomy*, 18, p. 849-54, 1975.
- MOURÃO, R. R. F. *Kepler. A descoberta das leis do movimento planetário*. São Paulo: Odysseus, 2003.
- RONCHI, V. *Storia della luce*. Bologna: N. Zanichelli, 1952.
- _____. *Optics: the science of vision*. New York: Dover, 1959.
- SIMON, G. On the theory of visual perception of Kepler and Descartes. *Vistas in Astronomy*, 18, p. 823-32, 1975.
- STRAKER, S. M. *Kepler's optics: a study in the development of seventeenth-century natural philosophy*. Indiana, 1970. Tese (Doutorado em Filosofia). Indiana University.
- _____. Kepler, Tycho, and the 'optical part of astronomy': the geneous of Kepler's theory of pinhole images. *Archive for History of Exact Sciences*, 24, 4, p. 267-93, 1981.
- TOSSATO, C. R. A função do olho humano na óptica do final do século XVI. *Scientiae Studia*, 3, 3, p. 415-41, 2005.
- ZIK, Y. Kepler and the telescope. *Nuncius*, 18, 2, p. 481-514, 2003.

