

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS
INSTITUTO DE FÍSICA
CURSO BACHARELADO EM FÍSICA

TEORIAS DE VISÃO EM CORES E DE APARÊNCIAS

Aluno: Adriano de Andrade Torrano

Orientador: Dr. Ricardo Rego Bordalo Correia

Porto Alegre, 2007

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	3
1 ASPECTOS FISIOLÓGICOS DA VISÃO	4
1.1 Descrição e Funcionamento do Olho Humano.....	4
1.2 A Retina.....	5
2 PERCEPÇÃO VISUAL & DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE CORES E DE APARÊNCIAS	9
2.1 Sistemas Ordenados de Cores.....	9
2.1.1 Sistema HSB de Cores Aparentes	9
2.2 Colorimetria.....	11
2.2.1 A Generalização Tricromática.....	11
2.2.2 Observador Fotométrico Padrão	15
2.2.3 Observadores Padrão para Colorimetria.....	16
2.2.4 Iluminantes	18
2.2.5 Objetos de cor.....	19
2.2.6 Diagrama de Cromaticidade	19
2.2.7 Medidas de Diferenças de Cor.....	20
2.2.8 Escala de Cor CIE L*a*b*	21
2.2.9 Colorimetria Moderna	23
2.2.10 Aplicações industriais e tecnológicas da colorimetria.....	24
2.3 Definições.....	25
3 TEORIAS DE VISÃO EM CORES	26
3.1 Fundamentação Experimental	26
3.2 Teoria de Young-Helmholtz.....	26
3.3 Teoria de Hering.....	27
3.4 Estudos Recentes	27
CONCLUSÃO.....	31
REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS	32

INTRODUÇÃO

Esta monografia trata de uma breve compilação de resultados e teorias sobre a visão em cores.

A organização do trabalho segue a ordem que surge naturalmente pela necessidade de estruturar as teorias de visão em cores em bases experimentais. Assim, primeiramente são descritos os aspectos fisiológicos básicos da visão, como a estrutura e o funcionamento do olho humano. Em seguida, os aspectos da percepção visual e da determinação experimental de cores e de aparências são apresentados, incluindo a padronização dos elementos da colorimetria e uma breve discussão da importância científica, tecnológica e industrial de tais determinações. As teorias que buscam explicar os mecanismos de percepção das cores e aparências são apresentadas na parte final.

Este estudo possui um caráter interdisciplinar, pois envolve a interação da física com outras áreas do conhecimento: a biologia e a neurologia, nos processos fisiológicos da visão; as engenharias, nas aplicações de medidas de cor; e a psicologia, nos estudos psicofísicos dos estímulos percebidos como cores são os exemplos mais diretos. Não obstante, a abordagem ao tema é realizada essencialmente pelo ponto de vista da física.

1 ASPECTOS FISIOLÓGICOS DA VISÃO

Este capítulo trata dos aspectos da fisiologia que são estritamente relevantes para a visão em cores. É realizada uma breve descrição das partes e do funcionamento do olho humano, com especial atenção à retina.

1.1 Descrição e Funcionamento do Olho Humano

A primeira teoria sobre a formação de imagens nos olhos deve-se a Alhazen (965 – 1039). Baseado em observações experimentais descritas em seu *Livro de Óptica*, Alhazen comparou o funcionamento de um olho com o de uma câmera obscura e assumiu que a imagem, tornada nítida pelas lentes, era formada na cavidade interna do olho [1].

O olho pode ser descrito como um sistema ótico no qual todas as partes trabalham, direta ou indiretamente, para formar uma imagem resolvida sobre a retina. Os componentes deste sistema são essencialmente transparentes e translúcidos na região espectral de ~350-1400 nm, estando a região visível compreendida entre ~380-780 nm [2] [3].

O formato mais ou menos esférico do olho é preservado por um envoltório protetor, consistente de duas partes: a esclera, opaca (o branco dos olhos) e a córnea, transparente, que forma a protuberância frontal de maior convexidade (figura 1.1). A esclera é penetrada em sua parte posterior pelo nervo ótico. Neste local, conhecido como ponto cego, ocorre a ausência de células fotossensíveis. O nervo ótico conecta a retina ao cérebro.

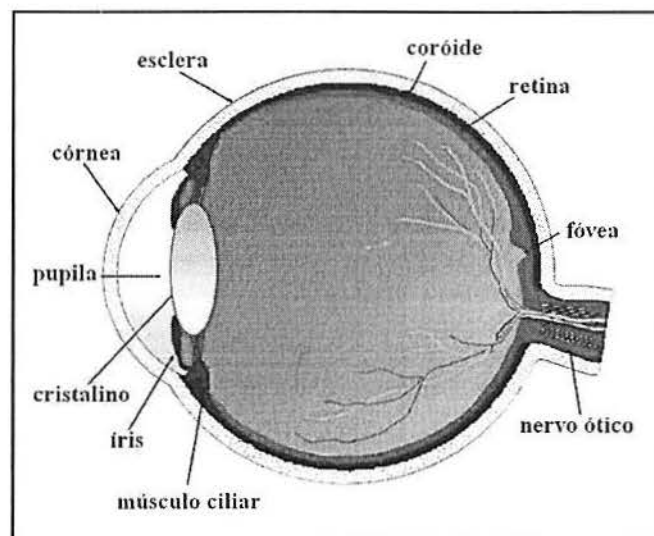


Figura 1.1: Anatomia simplificada do olho humano (adaptado de [3])

A coróide é uma membrana nutrieute presa à parte interna do envoltório, ela é formada por células epiteliais abundantemente pigmentadas que absorvem raios luminosos indesejados que, de outra forma, apresentariam múltiplas reflexões dentro do globo. Na sua parte frontal, a coróide é seguida pelo músculo ciliar; órgão que possui um papel essencial durante a acomodação, isto é, durante a focalização da imagem para longas distâncias. Após, a coróide é estendida até a íris, que possui uma abertura de diâmetro variável

chamada pupila. Em contato com a superfície posterior da íris, há uma lente biconvexa chamada cristalino ou, simplesmente, lente. A acomodação ocorre através da variação da tensão aplicada por ligamentos especiais que, em conjunto com os músculos ciliares, alteram o formato do cristalino.

As diferenças entre os índices de refração dos meios e as curvaturas da córnea e da lente são diretamente responsáveis pela focalização das imagens sobre a retina.

O espaço limitado pela córnea, íris e lente é preenchido com um líquido claro chamado humor aquoso. O espaço entre a lente e a retina contém o humor vítreo, um líquido gelatinoso e transparente, que é o maior constituinte do olho.

A parte posterior interna da coróide é coberta pela retina, cuja complexidade e importância para a visão solicitam uma seção especial.

1.2 A Retina

As células que atuam como receptores na retina foram descobertas em 1835, por Treviranus. Suas funções fotossensíveis foram definitivamente comprovadas por H. Müller (1853) e, a partir de então, através de métodos histológicos, diferentes tipos de células envolvidas no processo da visão foram descobertas. A retina humana é um tecido fino constituído por alguns milhões de células que estão empacotadas no formato de uma rede entrelaçada. Possui, em média, 0,5 μm de espessura e cobre cerca de 70% da sua superfície interna ocular [2] [3].

Este tecido sensível é enormemente heterogêneo em sua composição celular, em sua espessura e em suas conexões nervosas. A figura 1.2 apresenta a divisão da retina em camadas. Sendo uma extensão do cérebro, ela possui um curioso arranjo invertido, onde a luz alcança as células receptoras somente após ter penetrado as outras camadas, que são transparentes.

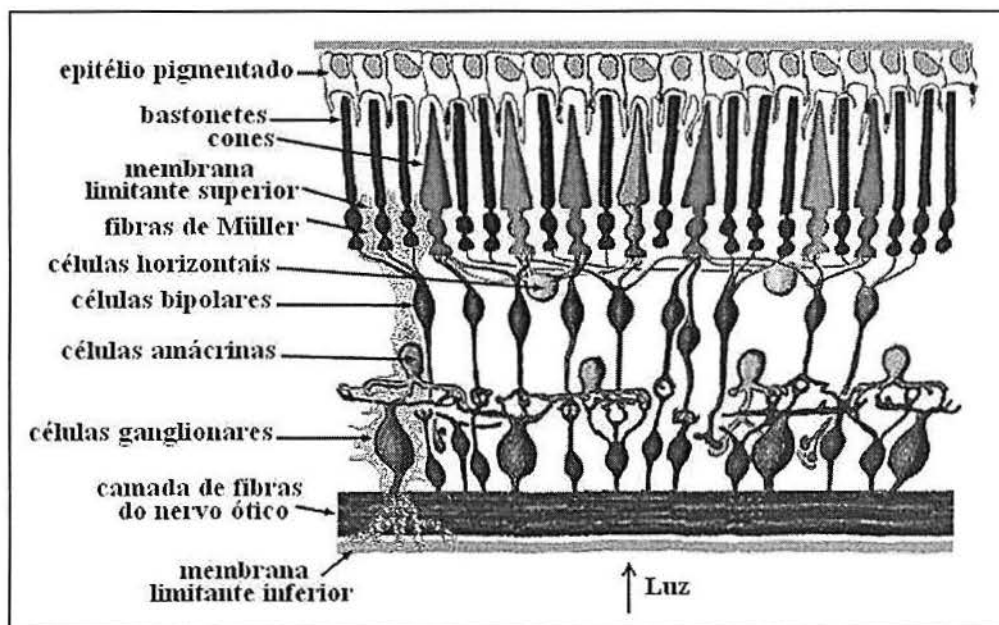


Figura 1.2: A retina em camadas (adaptado de [3])

As camadas da retina: A retina é formada por três camadas sucessivas de células neurais e por duas camadas de preenchimento interpostas, onde as sinapses entre os neurônios ocorrem. A primeira camada de neurônios atua como receptora da radiação e é formada por dois tipos básicos de células fotossensíveis, os cones e os bastonetes. A segunda ordem de neurônios contém as células bipolares, que atuam como retransmissores; geralmente alguns cones e bastonetes estão conectados por sinapses a uma única célula bipolar. A terceira cadeia de neurônios é formada por células ganglionares, que individualmente recebem impulsos de uma ou mais células bipolares. Estes impulsos são enviados ao cérebro através dos axônios das células ganglionares.

Outras células da retina: As células horizontais estão situadas na primeira camada de preenchimento, entre as células fotossensíveis e as células bipolares. Elas são responsáveis pela interação e associação direta dos cones e bastonetes entre si. As células amácrinas estão situadas na segunda região de preenchimento, elas relacionam as células bipolares e as células ganglionares. Através destas conexões, as células horizontais e amácrinas permitem a comparação espacial de sinais provenientes dos fotorreceptores [3].

As vias visuais: Os axônios das células ganglionares de cada retina formam os nervos óticos. Aqueles provenientes da retina temporal projetam-se ao núcleo geniculado lateral (NGL) do mesmo lado do cérebro (ipsilateral); já os axônios do lado nasal projetam-se ao núcleo geniculado contralateral (figura 1.3). Dentro de cada NGL, as projeções dos dois olhos são alinhadas e, assim, o mesmo mapa topográfico do campo visual contralateral é armazenado [5]. Os neurônios dos NGL's conectam-se aos neurônios do córtex visual primário, onde mais de 80 por cento das células recebem impulsos dos dois olhos. O resultado desta inter-relação é uma visão binocular estereoscópica, capaz de gerar a percepção de profundidade [4].

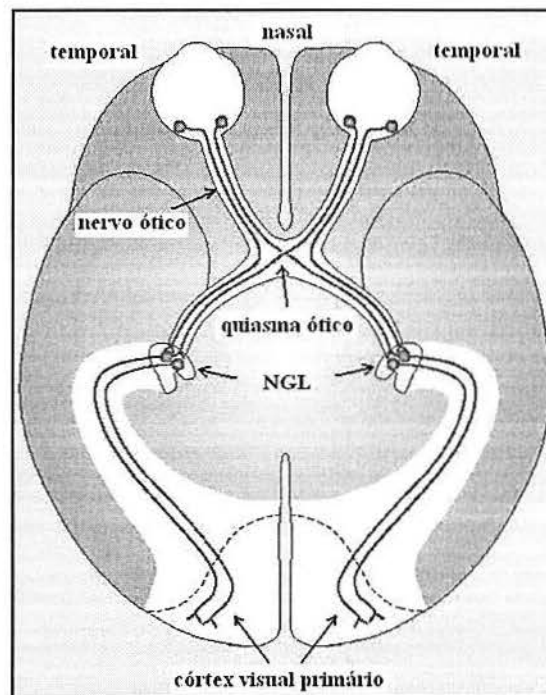


Figura 1.3: Vias visuais (adaptado de [5])

As fibras de Müller: São elementos de estrutura que mantêm os neurônios das diferentes camadas da retina unidos. Elas envolvem e isolam as células nervosas entre si quando não há sinapses. As suas extremidades formam as membranas limitantes inferior e superior [2] [3].

A fóvea: É uma depressão circular de 1,3 a 1,5 mm de diâmetro localizada no centro da retina (figura 1.1). Esta depressão é causada por uma pronunciada alteração da espessura das camadas da retina.

A mácula lútea: É uma área de pigmentação amarelada que engloba a fóvea e as suas imediações. A pigmentação deve-se, principalmente, a uma substância chamada xantofila, presente nos axônios dos cones. Acredita-se que a xantofila atue como um filtro para radiação ultravioleta, provendo um mecanismo de proteção à fóvea.

A dualidade da retina: A dualidade histológica, com cones e bastonetes, confere à retina uma dualidade funcional: os cones são responsáveis pela retina diurna, especialmente adaptada para a visão em cores em elevados níveis de iluminação; os bastonetes são responsáveis pela retina noturna, especialmente adaptada para visão monocromática com baixos níveis de iluminação. Este efeito está diretamente relacionado à distribuição das células receptoras no tecido retinal. Os bastonetes, cerca de 20 vezes mais numerosos que os cones, estão espalhados por praticamente toda a retina, mas ausentes na parte central da fóvea, onde a densidade de cones cresce abruptamente. A imagem formada nesta área apresenta a máxima acuidade visual e coincide com a imagem do ponto visual de fixação. A densidade de distribuição das células fotossensíveis é apresentada na figura 1.4.

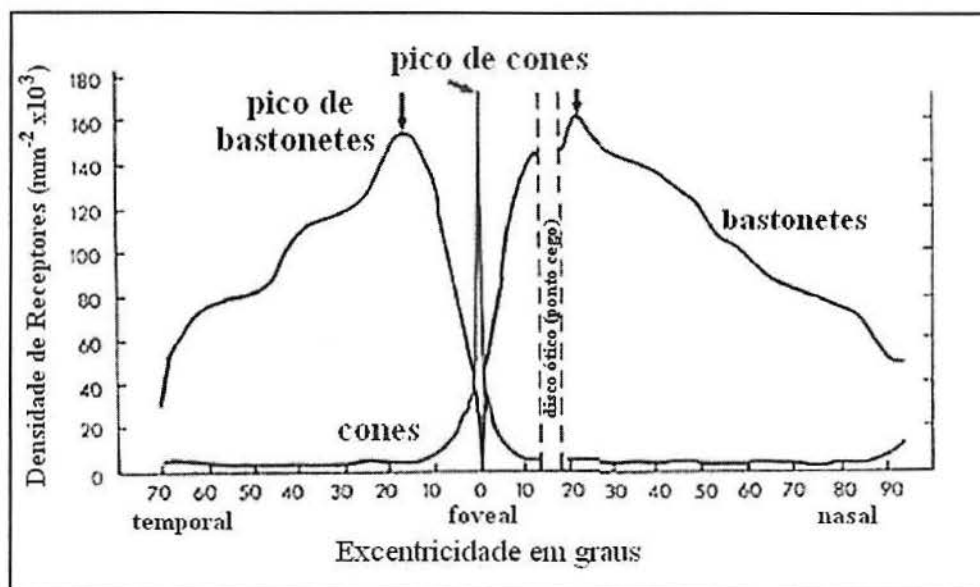


Figura 1.4: Distribuição de densidade de cones e bastonetes na retina (adaptado de [3])

Visão tricromática: Seres humanos com visão normal podem distinguir milhares de cores. Para tanto, são utilizados os sinais de três tipos de cones, nos quais a maior sensibilidade está nos comprimentos de onda curto (S, ~430 nm), médio (M, ~530 nm) e longo (L, ~560 nm). Porém, cada curva está estendida em uma grande faixa do espectro visível (figura

1.5). A sensibilidade espectral de um fotorreceptor é melhor concebida como a medida da probabilidade que o receptor absorverá o fóton de um particular comprimento de onda. Uma vez absorvido, a identidade do fóton é perdida, assim, nenhuma classe de fotorreceptores é capaz de sozinha distinguir mudanças no comprimento de onda da luz através de mudanças em sua intensidade [5].

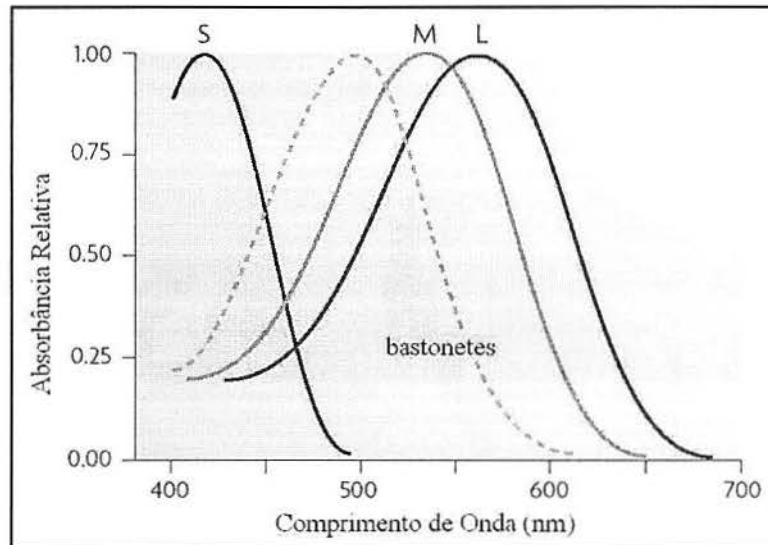


Figura 1.5: Curva de sensibilidade espectral dos fotorreceptores (adaptado de [5])

Opsinas: São proteínas fotossensíveis existentes nos cones e bastonetes. Nos bastonetes, estão unidas a uma estrutura não protéica para formar a rodopsina, responsável pela fotossensibilidade destes neurônios. Nos cones, a seqüência dos ~350 aminoácidos que as compõem determina a sensibilidade espectral das classes; é um fator tão determinante, que pequenas variações na seqüência implicam em uma grande diferença na sensibilidade, por exemplo, diferenças em dois aminoácidos das opsinas dos cones L e M explicam a maior parte da diferença de sensibilidade entre eles.

2 PERCEPÇÃO VISUAL & DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE CORES E DE APARÊNCIAS

A determinação das cores e das aparências diretamente pelo observador humano possui diversos aspectos, entre eles estão: aspectos físicos (e.g. propriedades da energia radiante*), aspectos fisiológicos (capítulo 1), aspectos psicofísicos (estímulos percebidos como cores) e aspectos psicológicos (como: atenção, memória, motivação, situação emocional). Diferentes observadores podem perceber e responder de diferentes formas a uma mesma situação de estímulo de cor. Este tipo de determinação é, portanto, subjetiva.

Na experiência visual são necessários três elementos para a ocorrência da visão em cores: uma fonte luminosa, um objeto e um observador (eventualmente, a fonte luminosa pode ser o próprio objeto observado). Desta forma, para a determinação experimental das cores e das aparências, faz-se necessário que cada um destes elementos seja quantificado e padronizado [6].

2.1 Sistemas Ordenados de Cores

Um sistema ordenado de cores representa uma tentativa sistemática de classificar cores. Dos diversos sistemas existentes, os que vêm sendo mais importantes nas pesquisas de visão são aqueles que dependem das propriedades perceptuais, chamados de sistemas de cores aparentes [7].

Como exemplo de um sistema de cores aparentes, e como forma de introdução ao assunto de especificação de cores, a seguir é apresentado o sistema HSB (dos termos em inglês: *Hue, Saturation, Brightness*).

2.1.1 Sistema HSB de Cores Aparentes

Quando uma radiação monocromática proveniente de uma fonte luminosa é diretamente apresentada a um observador, ele visualiza uma cor com brilho próprio, sem atributos de textura ou superfície. Tais cores, chamadas de cores de filme ou fenda, possuem três propriedades: matiz (*hue*), saturação e brilho* (figuras 2.1 e 2.2).

Matiz: Quando várias porções do espectro eletromagnético visível são isoladas, um observador normal é capaz de distinguir uma série de matizes: violeta, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho. O experimento no qual o observador atribui nomes a radiações eletromagnéticas monocromáticas é chamado de nomenclatura de cores ou de estimativa de matizes. As cores: branco, preto e cinza não possuem matiz e são chamadas de cores acromáticas.

Observadores podem descrever as sensações de cor que surgem das radiações espectrais isoladas pela combinação de quatro matizes: azul, verde, amarelo e vermelho. As quatro percepções são chamadas de: cores únicas ou primários psicológicos. Uma importante propriedade dos primários psicológicos é que eles possuem a organização natural de pares complementares: vermelho-verde e azul-amarelo. As qualidades destes pares estão em oposição perceptual, ou seja, um matiz nunca é percebido como “verde-avermelhado”, ou como “amarelo-azulado”. Outras percepções complexas de matizes, entretanto, são comumente encontradas (p.e. verde-azul ou verde-amarelo). Uma pessoa com visão normal em cores pode distinguir aproximadamente de 150 a 200 variações de matizes no espectro.

* Os termos identificados estão listados na seção 2.3 Definições. p. 25.

A capacidade de discriminação não é igual para todas as cores, varia conforme a região espectral.

Além dos matizes espectrais, existem também os matizes não-espectrais. A cor púrpura, por exemplo, não pode ser produzida pela visualização de um simples comprimento de onda. Ela é obtida quando estímulos com comprimentos de onda curtos e longos do espectro (azul e vermelho) são simultaneamente apresentados. Quando todo o espectro é simultaneamente visualizado, percebe-se uma luz branca, ou acromática (sem cor).

Saturação: É o atributo da percepção visual que permite um julgamento da proporção de cor cromática pura na sensação total. Em uma escala de saturação, as cores variam em quantidade de branco, ou, em outras palavras, em tendência ao cinza. Os matizes espectrais são chamados de cores saturadas e o branco é chamando de cor insaturada. Portanto, uma cor não-saturada pode ser especificada com uma mistura entre uma cor espectral e branco.

Brilho: É a terceira percepção correlata de cor. Uma cor parece mais brilhante quando a quantidade de energia radiante, a intensidade observada, é aumentada. A discriminação dos matizes e das saturações é ótima em altos níveis de iluminação (visão fotópica), pois a fixação é central (foveal) e a percepção é realizada pelos cones. Com a diminuição da iluminação, ocorre a gradativa diminuição da capacidade de distinção. Em níveis muito baixos de iluminação (visão escotópica) a fixação deixa de ser central, passa ser excêntrica e é realizada principalmente pelos bastonetes. Neste caso, a discriminação dos matizes e das saturações é mínima.

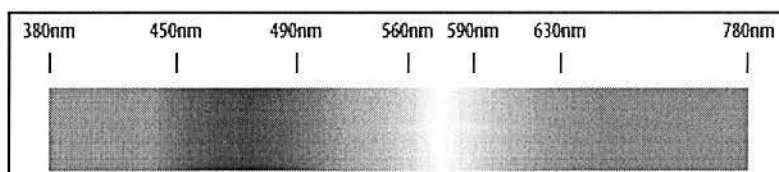


Figura 2.1: Região espectral denominada visível da radiação eletromagnética no vácuo (adaptado de [8])

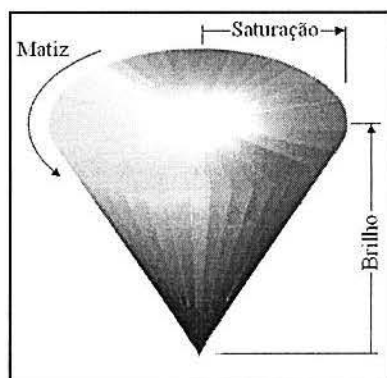


Figura 2.2: Representação do sistema HSB (adaptado de [9])

2.2 Colorimetria

As medidas de cor - colorimetria - tiveram o seu estágio inicial desenvolvido por Newton (1642-1727), foram aperfeiçoadas principalmente por Grassmann (1809-1877) e Maxwell (1831-1877) e sofreram um grande avanço a partir de 1931, quando a Comissão Internacional de Iluminação - CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) estabeleceu, entre outras coisas, um observador padrão para colorimetria. As inovações tecnológicas em métodos de detecção permitiram que as avaliações colorimétricas passassem a ser largamente utilizadas em diversas áreas e aplicações [10].

2.2.1 A Generalização Tricromática

Quando duas ou mais radiações eletromagnéticas cromáticas são combinadas, o resultado é uma mistura aditiva das intensidades. A colorimetria baseia-se nas regras experimentais da combinação de cores (*color-matching*) e estas são adicionadas aos conceitos do modelo de generalização tricromática.

A generalização tricromática estabelece que dentro de um amplo intervalo de condições de observação:

- (a) muitas cores podem ser completamente igualadas por misturas aditivas de quantidades apropriadas de três cores primárias fixas;
- (b) outras cores devem ser misturadas a uma quantidade apropriada de uma das três cores primárias para que a equiparação completa com uma mistura das outras duas seja possível.
- (c) para certos conjuntos de cores primárias, restam ainda outras cores que devem ser misturadas a quantidades apropriadas de duas das três cores primárias antes que a equiparação completa entre esta mistura e uma quantidade adequada da terceira cor primária seja possível.

Contudo, qualquer cor pode ser obtida em termos de combinações de três primárias fixas, por uma ou outra destas formas. A escolha das três cores primárias, embora ampla, não é completamente arbitrária. É possível escolher conjuntos que não se encaixam nas condições acima.

A generalização tricromática, em sua forma mais forte, estabelece ainda que a linearidade e a aditividade mantêm-se ao longo de um considerável intervalo de condições de observação nas combinações de cores. São requisitos da linearidade e da aditividade:

- (a) a combinação atingida entre duas cores quaisquer continua válida se os estímulos das cores correspondentes forem aumentados ou diminuídos em magnitude pelo mesmo fator constante;
- (b) se as cores *A* e *B* equivalem-se, e se as cores *C* e *D* equivalem-se, então as misturas aditivas (*A + C*) e (*B + D*) também se equivalem.

Valores de triestímulos: Dentro destas considerações, torna-se possível e conveniente: representar as cores por vetores em um espaço tridimensional; representar as combinações de cores por equações lineares entre estes vetores. Se *Q* é o vetor que representa uma determinada cor e *R*, *G*, *B* são os vetores que representam as quantidades unitárias de três padrões primários fixos, então a equação

$$Q = RR + GG + BB \quad (2)$$

estabelece que a cor Q é igual a uma mistura aditiva das quantidades R , G e B das respectivas cores primárias. Estes multiplicadores escalares são denominados valores de triestímulos da cor Q com respeito ao conjunto R, G, B .

Se uma dada cor Q pode ser obtida pela mistura das três primárias, os valores de R , G e B são positivos. No caso em que uma dada cor Q' necessite ser misturada a quantidades apropriadas de uma (ou duas) das primárias para que seja possível igualá-la à primária (ou às primárias) restante, um sinal negativo é dado ao valor (ou aos valores) de triestímulos. Por exemplo, se G' de G necessita ser misturado à Q' para resultar em uma igualdade com a mistura $RR + BB$, a equação de igualdade é

$$Q' + G'G = RR + BB$$

ou

$$Q' = RR - G'G + BB$$

ou ainda

$$Q' = RR + GG + BB, \text{ com } G = -G'. \quad (3)$$

Um estímulo de cor é definido pela composição espectral de energia radiante que, ao interagir com a retina, produz a sensação de cor.

Uma dada cor Q pode ser concebida como uma mistura aditiva das cores $Q(\lambda)d\lambda$, para as quais os estímulos correspondentes são os componentes monocromáticos $P_\lambda d\lambda$ do estímulo original. Se $R(\lambda)d\lambda$, $G(\lambda)d\lambda$, $B(\lambda)d\lambda$ são os valores dos triestímulos de $Q(\lambda)d\lambda$, e R, G, B são os valores dos triestímulos de Q , então

$$Q = \int_\lambda Q(\lambda)d\lambda \quad (4)$$

e

$$R = \int_\lambda R(\lambda)d\lambda, \quad G = \int_\lambda G(\lambda)d\lambda, \quad B = \int_\lambda B(\lambda)d\lambda. \quad (5)$$

No exemplo da figura 2.3, o modelo de cores primárias aditivas RGB, onde radiações monocromáticas correspondentes ao vermelho, ao azul e ao verde geram as cores ciano, magenta e amarelo.

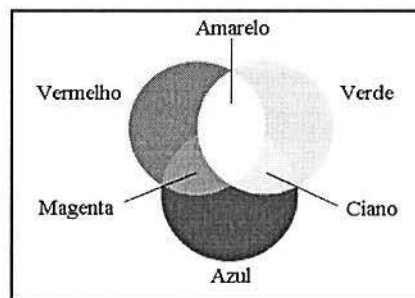


Figura 2.3: Sistema RGB (adaptado de [8])

Funções de combinação de cores: Para o que segue, é conveniente distinguir particularmente os valores de triestímulos $q(\lambda)$ para os quais os estímulos correspondentes são estímulos monocromáticos que contém o mesmo fluxo constante de radiação por intervalos iguais de comprimento de onda. Estes conjuntos específicos de valores de

* Os termos identificados estão listados na seção 2.3 Definições. p. 25.

triestímulos são denotados por $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ e reúnem as propriedades de combinação de cores de um observador no sistema \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B} . As funções $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ e $b(\lambda)$ são chamados de funções de combinação de cores. As unidades de medida das cores primárias são escolhidas, por conveniência, de tal forma que a cor da mistura de quantidades iguais de primários resulte em uma cor acromática específica [10].

Utilizando os conceitos de funções de combinação de cores, as equações (4) e (5) podem ser rescritas da seguinte forma:

$$\mathbf{Q} = \int_{\lambda} P_{\lambda} q(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

e

$$R = \int_{\lambda} P_{\lambda} r(\lambda) d\lambda, \quad G = \int_{\lambda} P_{\lambda} g(\lambda) d\lambda, \quad B = \int_{\lambda} P_{\lambda} b(\lambda) d\lambda. \quad (7)$$

Assim, dois estímulos de cor definidos pelas distribuições de energia espectral $P_{1\lambda} d\lambda$ e $P_{2\lambda} d\lambda$ estarão em completa igualdade se as três seguintes equações forem satisfeitas:

$$\begin{aligned} \int_{\lambda} P_{1\lambda} r(\lambda) d\lambda &= \int_{\lambda} P_{2\lambda} r(\lambda) d\lambda, \\ \int_{\lambda} P_{1\lambda} g(\lambda) d\lambda &= \int_{\lambda} P_{2\lambda} g(\lambda) d\lambda, \\ \int_{\lambda} P_{1\lambda} b(\lambda) d\lambda &= \int_{\lambda} P_{2\lambda} b(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (8)$$

Cores metaméricas: As integrais do lado esquerdo da equação (8) são os valores de triestímulos R_1 , G_1 e B_1 da cor \mathbf{Q}_1 ; as integrais do lado direito são os valores de triestímulos R_2 , G_2 e B_2 da cor \mathbf{Q}_2 ; quando as cores estão em igualdade: $R_1 = R_2$, $G_1 = G_2$, $B_1 = B_2$. Nas situações em que estas condições de igualdade são satisfeitas para duas cores, \mathbf{Q}_1 e \mathbf{Q}_2 , com diferentes distribuições espectrais de energia, as duas cores são chamadas de metaméricas.

Pode ser demonstrado que as condições de igualdade de cores expressas pelas equações (8) continuam inalteradas se as respectivas funções $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ forem multiplicadas por quaisquer três fatores não nulos. Na verdade, quaisquer três funções que sejam combinações linearmente independentes de $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ servem para estabelecer as condições de igualdade de cores.

Na figura 2.4, ilustra-se as curvas de triestímulos $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ correspondentes às quantidades das cores primárias fixas $\mathbf{R} = 700,0 \text{ nm}$; $\mathbf{G} = 546,1 \text{ nm}$; $\mathbf{B} = 435,8 \text{ nm}$ que, misturadas aditivamente, igualam as cores das luzes monocromáticas do espectro visível [11].

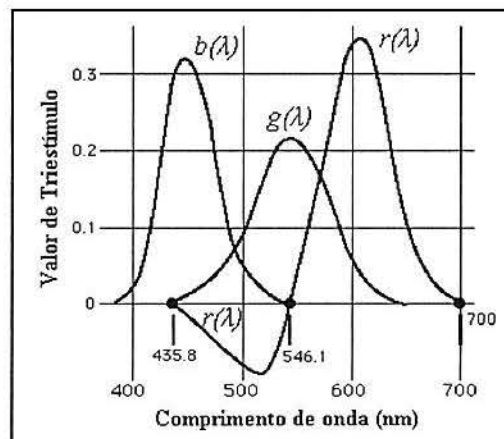


Figura 2.4: Curvas de valores de triestímulos $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ (adaptado de [11])

Limitações experimentais: Normalmente, os dois estímulos comparados são apresentados ao observador como porções contínuas de luz, com formas e áreas similares. Mas a generalização tricromática não inclui considerações sobre:

- (a) a dependência das cores combinadas em relação às condições observacionais nas quais os dois estímulos de cores são comparados (e.g. posição das fontes);
- (b) os possíveis efeitos, resultantes de diferentes exposições prévias do olho à luz, na avaliação de cores;
- (c) diferenças nas comparações de cores efetuadas por diferentes observadores.

Todas estas considerações afetam as regras de combinação de cores e, de certa forma, limitam a sua validade.

Princípio da persistência de cores igualadas: Na prática geral, costuma-se assumir que uma igualdade de cores não é afetada pela exposição prévia ao branco ou à luz colorida, ou ainda, pela adaptação que ocorre nos olhos devido à variação da luz. Este fato empírico é conhecido como princípio da persistência de cores igualadas. Contudo, isto não implica que a cor aparente de dois estímulos igualados permanecerá inalterada frente à variação na adaptação; tampouco não implica que a precisão da igualdade não será afetada. A persistência da igualdade ocorrerá para pré-exposição a iluminações baixas ou moderadas, mas certamente não ocorrerá para pré-exposição a iluminações muito altas.

Limitações adicionais surgem nas comparações de cores realizadas com campos de visão amplos, pois elas envolvem, em parte, a participação dos bastonetes. Neste caso, igualdades metaméricas podem ser desfeitas se os dois estímulos de cor forem reduzidos a baixas intensidades, situação na qual o mecanismo escotópico da visão pode causar uma efetiva perturbação na determinação de combinação de cores. Assim, as técnicas psicofísicas de combinação de cores devem ser tais que minimizem os efeitos das limitações citadas.

O Experimento de combinação de cores de Wright: O experimento realizado por Wright (figura 2.5) utilizou um campo de visão bipartido, com ângulo subtendido de 2° e espectros primário em 650 nm (R), 530 nm (G) e 460 nm (B). Os comprimentos de onda espectrais foram varridos em passos de 10 nm entre 410 e 710 nm. Em cada passo, apresentada a luz monocromática teste, o observador ajustava a quantidade de cada uma das luzes primárias a fim de obter a combinação das cores em igualdade com a luz teste. Em alguns casos, um dos primários poderia ser adicionado à luz teste para obter a igualdade das combinações de cores; a quantidade deste primário era então contabilizada como negativa (ver equações (3)) [7].

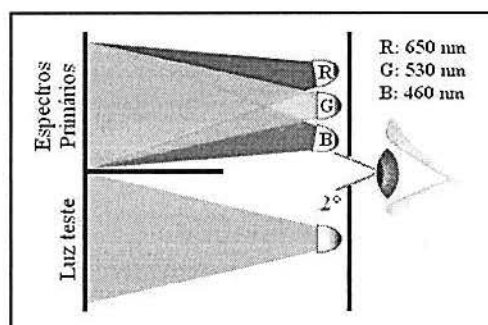


Figura 2.5: Experimento de combinação de cores de Wright (adaptado de [8])

Defeitos da visão em cores: Nem todos os observadores necessitam de três estímulos primários independentes para igualar cores aditivas a um estímulo de cor arbitrário. Cerca de 2,6 % da população masculina, e menos que 0,05% da população feminina precisam de apenas duas cores primárias. Tais observadores são chamados de dicromatas. Uma parcela muito pequena da população (cerca de 0,003%) não possui discriminação de cor. Estas pessoas são chamadas de monocromatas e suas comparações de cores consistem em igualar o brilho utilizando um único estímulo primário. Os observadores restantes, chamados de tricromatas, necessitam de três estímulos primários para o emparelhamento de cores. Entretanto, existe uma minoria de cerca de 5,5% dos homens e 0,4% das mulheres que são classificados como tricromatas anômalos, pois suas igualdades metaméricas apresentam desvios pronunciados e sistemáticos em relação ao grande grupo [10].

2.2.2 Observador Fotométrico Padrão

Fotometria é a medida de quantidades associadas à energia radiante de acordo com o seu efeito visual. O conceito de observador fotométrico padrão foi estabelecido em 1924 pela Comissão Internacional de Iluminação – CIE. Utilizando os dados de observadores reais submetidos a dois tipos de experimentos psicofísicos de comparação de brilho: fotometria de luz pulsada heterocromática (*Heterochromatic Flicker Photometry* – HFP) e fronteira minimamente distinta (*Minimally Distinct Border* – MDB) a função $V(\lambda)$ de luminosidade* fotópica CIE foi estabelecida (figura 2.6). A curva $V(\lambda)$, que representa o observador fotométrico padrão, possui a forma aproximada de um sino, com um máximo em 555 nm, o que significa que as sensações próximas ao amarelo-esverdeado são percebidas como mais luminosas. Algumas propostas de pequenas correções à função surgiram, entretanto, a $V(\lambda)$ continua válida para os propósitos da fotometria [6].

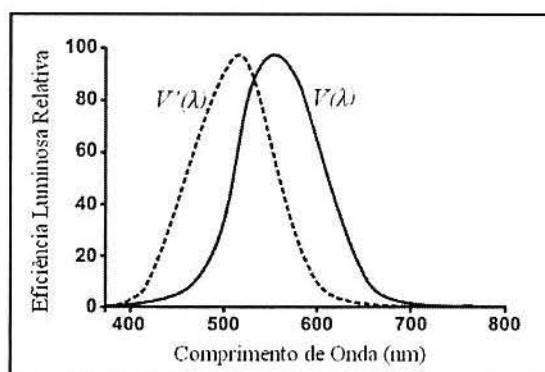


Figura 2.6: Função $V(\lambda)$ de luminosidade fotópica CIE e função $V'(\lambda)$ de luminosidade escotópica CIE (adaptado de [10])

Observador escotópico padrão: Em 1951, a CIE introduziu a curva padrão $V'(\lambda)$ para a fotometria escotópica, baseada em experimento com observadores reais submetidos a experimentos de comparação de brilho em baixos níveis de iluminação [10].

As diferenças entre as curvas das funções de luminosidade escotópica e fotópica (figura 2.6) devem-se ao fato da resposta visual variar conforme a dimensão e a localização da área retinal iluminada. Conforme apresentado anteriormente (seções 1.2 e 2.1.1), a dualidade histológica da retina implica na visão fotópica, diurna e foveal e na visão

* Os termos identificados estão listados na seção 2.3 Definições. p. 25.

escotópica, noturna e expandida por praticamente toda a retina. A visão entre estes extremos (devida a ambos os fotorreceptores) é denominada mesópica. Enquanto as visões fotópica e mesópica causam a percepção de brilho e cor, a visão escotópica causa apenas a percepção de brilho.

2.2.3 Observadores Padrão para Colorimetria

O principal objetivo da colorimetria é obter resultados que sejam válidos para o grupo de tricromatas normais. Para tal realização, as propriedades de combinação de cores de um observador ideal devem ser definidas. Assim, um conjunto de três funções dependentes do comprimento de onda, e independentes entre si, deve ser especificado de tal forma que identifique as funções de comparação de cores de um observador tricromata normal ideal. É requerido que o observador ideal realize as combinações de cores estritamente de acordo com a forma mais forte da generalização tricromática e de acordo com o princípio da persistência de cores igualladas.

Observador Padrão CIE 1931: O primeiro observador ideal foi introduzido pela CIE em 1931 e estabeleceu as bases de toda a colorimetria moderna.

As funções $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$, que definem o Observador Padrão CIE 1931 (figura 2.7), foram estabelecidas através da unificação dos dados obtidos de forma independente por W. David Wright e por John Guild, em experimentos com observadores reais.

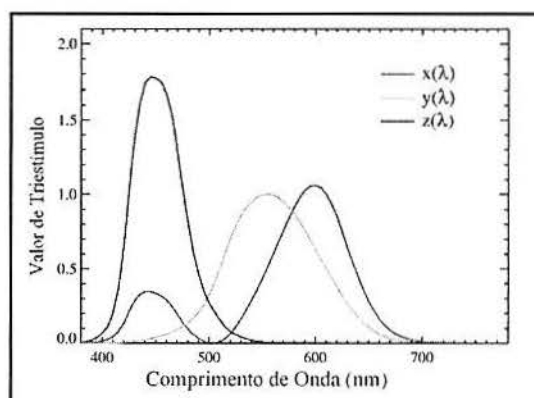


Figura 2.7: Funções $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ do Observador Padrão para Colorimetria CIE 1931 (adaptado de [10])

Os observadores de Wright foram submetidos ao experimento descrito na seção 2.2.1 e os observadores de Guild foram submetidos a um experimento essencialmente similar. Em ambos os experimentos as cores foram igualladas em um campo de visão de 2° subtendidos, evitando a participação dos bastonetes e a perturbação causada pela pigmentação macular (seção 1.2). Os experimentos foram planejados para incorporar a função padrão de eficiência luminosa $V(\lambda)$ (seção 2.2.2) e, assim, as funções de combinação de cores obtidas incluem as propriedades do observador fotométrico padrão. Com a adoção deste princípio, e com a consideração das leis de aditividade para a comparação de brilho, a função $V(\lambda)$ deve ser uma combinação linear das funções de combinação de cores. Portanto, é possível selecionar alguns conjuntos para os quais a função central $y(\lambda)$ coincida com a função $V(\lambda)$. Desta forma, o observador padrão CIE

* Os termos identificados estão listados na seção 2.3 Definições. p. 25.

1931 foi construído para abranger as propriedades de combinação de brilhos e de cores em um único esquema quantitativo.

O sucesso na utilização deste sistema indica que, na média, os observadores reais possuem propriedades de visão em cores que estão de acordo com àquelas estabelecidas pelas funções $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$.

Observador Padrão Suplementar CIE 1964: Em 1964, a CIE introduziu o observador padrão suplementar, ou observador CIE 10°, definido pelas funções de combinação de cores $x_{10}(\lambda)$, $y_{10}(\lambda)$, $z_{10}(\lambda)$, ilustradas nas figuras 2.8 e 2.9. A utilização deste observador é conveniente em práticas colorimétricas onde a determinação de cores em campos de visão amplos (maiores que 4°) é desejada.

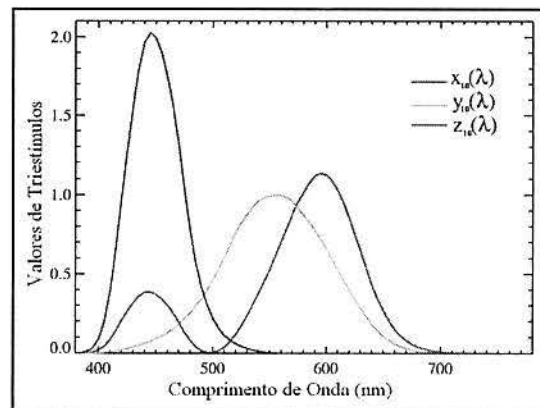


Figura 2.8: Funções $x_{10}(\lambda)$, $y_{10}(\lambda)$, $z_{10}(\lambda)$ do observador Padrão Suplementar CIE 1964 (adaptado de [10])

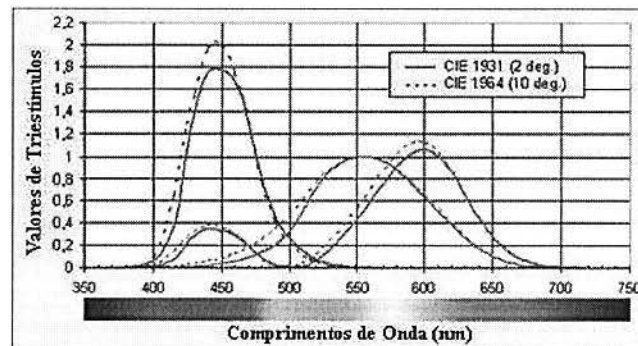


Figura 2.9: Funções dos Observadores Padrão CIE 1931 e CIE 1964 (adaptado de [6])

As funções de combinação de cores estão baseadas nos dados experimentais obtidos por Stiles & Burch e por Speranskaya para campos visuais de 10° centralmente observados. A precisão dos resultados costuma ser melhor em campos visuais de 10° do que em campos visuais de 2°. Desse modo, muitas técnicas aplicadas sugerem o uso do observador CIE 10°. Entretanto, existem limitações exclusivas a este observador padrão (evitadas por Wright e Guild em seus experimentos): a imagem retinal invariavelmente cobre áreas que contém fotorreceptores do tipo bastonetes e o mecanismo escotópico pode perturbar a

* Os termos identificados estão listados na seção 2.3 Definições. p. 25.

combinação das cores em baixos níveis de iluminação; o pigmento macular pode levar a percepção de uma mancha (mancha de Maxwell) com diâmetro aproximado de 2° e borda não definida, conferindo a sensação de não-uniformidade de cor na área principal do campo e perturbando a tarefa combinação de cores. Para muitos estímulos de cor, incluindo a maioria daqueles encontrados na vida diária, a mancha de Maxwell não é percebida, mas para estímulos com distribuição de energia espectral alta, ela pode ser uma característica marcante [10].

A operação básica em colorimetria é a determinação dos valores de triestímulos X, Y, Z no sistema padrão CIE. Recordando as equações (8), os valores de triestímulos de uma determinada cor, especificada em termos da sua distribuição espectral de fluxo radiante $P_\lambda d\lambda$, são dados pelas seguintes integrais:

$$\begin{aligned} X &= k \int_\lambda P_\lambda x(\lambda) d\lambda, \\ Y &= k \int_\lambda P_\lambda y(\lambda) d\lambda, \\ Z &= k \int_\lambda P_\lambda z(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (9)$$

As funções de comparação de cores $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$ representam aqui as funções do observador padrão CIE 1931 ou as funções $x_{10}(\lambda), y_{10}(\lambda), z_{10}(\lambda)$ do observador padrão suplementar CIE 1964. O fator k é uma constante arbitrária de normalização.

2.2.4 Iluminantes

As fontes luminosas são caracterizadas pela energia espectral relativa da radiação eletromagnética que emitem. Os dados são obtidos experimentalmente por um equipamento chamado espectrorradiômetro; a curva gerada pela energia espectral relativa em função do comprimento de onda é denominada distribuição espectral de potência (*spectral power distribution* - SPD). A SPD de uma fonte luminosa define um iluminante. Em outras palavras, o iluminante é uma tabela de dados numéricos que define uma fonte luminosa. Uma forma alternativa de especificação utiliza os conceitos de temperatura de cor* e temperatura de cor correlata*.

Iluminantes padrão: A colorimetria de objetos foi padronizada com a introdução dos três iluminantes padrão CIE 1931 A, B, C. Estes padrões permitiram a realização de medidas de cor de objetos sob condições de reprodutibilidade de iluminação.

Visando atender aos diferentes tipos de aplicações tecnológicas, industriais e comerciais, diversos iluminantes padrão foram estabelecidos pela CIE. A seguir, e na figura 2.10, alguns exemplos:

- Iluminante padrão A: Luz de uma lâmpada incandescente com temperatura de cor 2855,6 K.
- Iluminante padrão D₆₅: Luz diurna com uma temperatura de cor correlata de 6504 K.
- Iluminante padrão F₂: Luz de uma lâmpada fluorescente branca com temperatura de cor correlata de 4230 K.

* Os termos identificados estão listados na seção 2.3 Definições. p. 25.

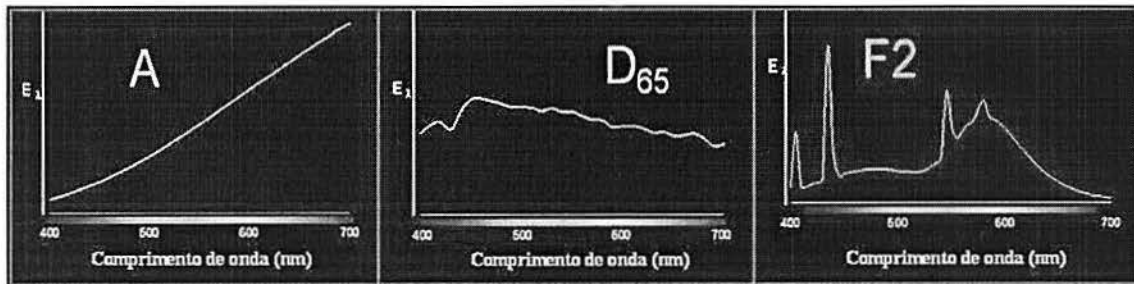


Figura 2.10: Distribuição espectral de potência dos iluminantes padrão CIE A, D₆₅ e F₂. (adaptado de [6])

2.2.5 Objetos de cor

Os objetos modificam a luz incidente de diversas formas. Os corantes e pigmentos contidos no objeto absorvem de maneira selecionada em alguns comprimentos de onda enquanto refletem ou transmitem em outros. Para a determinação colorimétrica, as amostras costumam ser caracterizadas por curvas espectrais, o que pode ser realizado através de um espectrofotômetro [10].

O fluxo radiante refletido (ou transmitido) por um objeto, considerando-o um estímulo de cor, é chamado de objeto de cor. Um objeto de cor é especificado pela distribuição espectral $\zeta(\lambda)H_\lambda d\lambda$ ou $\tau(\lambda)H_\lambda d\lambda$, onde $\zeta(\lambda)$ é a reflectância espectral do objeto, $\tau(\lambda)$ a sua transmitância espectral e $H_\lambda d\lambda$ é a distribuição espectral do fluxo de radiação incidente no objeto.

Assim, os valores de triestímulos X, Y, Z de um objeto de cor são dados pelas equações (9), onde P_λ é substituído por $\zeta(\lambda)H_\lambda$ ou por $\tau(\lambda)H_\lambda$. Ao fator de normalização k , geralmente é atribuído o valor

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} H_{\lambda} y(\lambda) d\lambda} \quad (10)$$

Para um objeto de cor, cuja superfície reflete perfeitamente e difunde perfeitamente, $\zeta(\lambda) = 1,0$ em todos os comprimentos de onda e para um objeto de cor perfeitamente transparente, $\tau(\lambda) = 1,0$ em todos os comprimentos de onda. Nestas condições, Y tem o valor 100. Usando esta normalização, o valor de Y de um objeto refletor é a sua reflectância expressa como porcentagem, e, analogamente, o valor de Y de um objeto transmissor é a sua porcentagem de transmitância. Contudo, estas interpretações fotométricas aplicam-se somente se os dados do observador padrão CIE 1931 estiverem sendo utilizados nos cálculos da determinação.

2.2.6 Diagrama de Cromaticidade

Embora os valores X, Y, Z de triestímulos CIE descrevam de forma única um dado estímulo de cor, geralmente é conveniente utilizar as coordenadas de cromaticidade x, y, z para sua descrição. Estas coordenadas são obtidas pelas seguintes relações:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z},$$

* Os termos identificados estão listados na seção 2.3 Definições. p. 25.

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z},$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}. \quad (11)$$

Como $x + y + z = 1$, é suficiente fornecer apenas duas coordenadas, que geralmente são x , y . A cromaticidade de um estímulo de cor, dada em termos de x e y , pode ser representada por um ponto em um diagrama plano de coordenadas x,y : o diagrama de cromaticidade CIE 1931 (figura 2.11). O espectro das cores apresentado no diagrama tem o formato próximo ao de uma ferradura, com as cores púrpuras puras conectando as duas extremidades. O centro do diagrama ($x = 1/3, y = 1/3$) representa a cromaticidade de estímulos de energias iguais ($P_\lambda d\lambda = 1$ para todos os comprimentos de onda). Aproximadamente, a cromaticidade de um estímulo de cor correlaciona-se com a “cromaticidade aparente” sob condições usuais de observação.

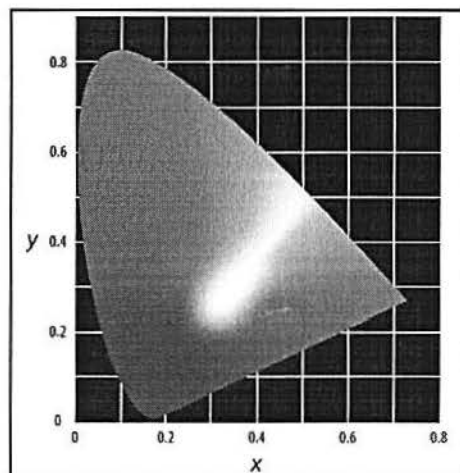


Figura 2.11: Diagrama de cromaticidade CIE 1931 ([8])

A luminância*, a reflectância e a transmitância não são consideradas pela cromaticidade e, sempre que tal determinação for importante, o valor de triestímulo Y , indicando a luminosidade da cor, pode ser adicionado às coordenadas x,y para completar a especificação.

O diagrama de cromaticidade CIE 1964, baseado nos dados do observador padrão 10° , é obtido por um caminho análogo ao do diagrama de cromaticidade CIE 1931, e a interpretação é idêntica àquela já mencionada.

2.2.7 Medidas de Diferenças de Cor

A colorimetria, em seu sentido mais amplo, inclui também a avaliação de diferenças entre cores. Devido à importância prática da determinação desta diferença perceptual, há um grande interesse no assunto [10].

Um dos objetivos aqui é descrever a diferença perceptual de cores em termos das coordenadas CIE.

* Os termos identificados estão listados na seção 2.3 Definições, p. 25.

A fórmula ΔE , proposta por Wyszecki e recomendada pelo CIE em 1960, baseia-se no sistema de coordenadas U^* , V^* , W^* , derivado do sistema CIE X , Y , Z através das seguintes transformações:

$$\begin{aligned} U^* &= 13 W^* (u - u_0), \\ V^* &= 13 W^* (v - v_0), \\ W^* &= 25 Y^{1/3} - 17, \quad \text{com } (1 < Y < 100). \end{aligned} \quad (12)$$

Onde u e v são definidos como:

$$\begin{aligned} u &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}, \\ v &= \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z}. \end{aligned} \quad (13)$$

As coordenadas u_0 e v_0 são obtidas através dos valores de triestímulos X_0 , Y_0 e Z_0 do iluminante sob o qual os objetos estão sendo avaliados. A medida ΔE da dimensão perceptual da diferença entre as cores $Q_1(U^*_1, V^*_1, W^*_1)$ e $Q_2(U^*_2, V^*_2, W^*_2)$ é dada por:

$$\Delta E = [(U^*_1 - U^*_2) + (V^*_1 - V^*_2) + (W^*_1 - W^*_2)]^{1/2}. \quad (14)$$

No diagrama onde u , v são as coordenadas, os pontos de cromaticidade estão igualmente espaçados. Este tipo de representação é conhecido como diagrama de escala cromática uniforme, ou diagrama UCS (figura 2.12).

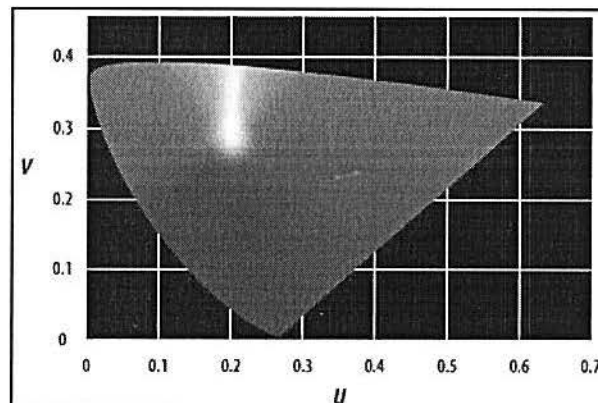


Figura 2.12: Diagrama UCS CIE 1960 ([8])

Ao comparar o diagrama UCS da figura 2.12 com o diagrama CIE 1931 da figura 2.11, nota-se um alongamento da porção azul-vermelho, uma recolocação da cor acromática (branco) e uma diminuição da porção verde. Como os pontos de cromaticidade do diagrama UCS estão igualmente espaçados, evidenciam-se onde as diferenças de cores são mais facilmente (ou mais dificilmente) percebidas.

2.2.8 Escala de Cor CIE $L^*a^*b^*$

A escala de cor CIE $L^*a^*b^*$ (ou CIELAB) foi recomendada pela CIE em 1976. É uma escala aproximadamente uniforme, no sentido que as diferenças entre pontos localizados

no espaço de cor* correspondem às diferenças aparentes dessas cores. O espaço de cor CIELAB é organizado em um arranjo tridimensional (figura 2.13). O eixo L^* compreende valores que se distribuem de maneira contínua de 0 a 100. O valor 0 (zero) representa a absorção total da luz incidente sobre o objeto de cor e o valor 100 representa a reflexão perfeitamente difusa. Os valores dos eixos a^* e b^* não possuem um limite numérico específico e descrevem aproximadamente as cores dos primários psicológicos (seção 2.1): a^* representa o par complementar vermelho-verde, sendo que valores positivos de a^* indicam tendência ao vermelho e valores negativos de a^* , tendência ao verde; b^* representa o par complementar azul-amarelo, sendo que valores positivos de b^* indicam tendência ao amarelo e valores negativos de b^* , tendência ao azul [6].

Os valores L^* , a^* e b^* são derivados dos valores de triestímulos X , Y , Z através das seguintes equações:

$$L^* = 116\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16, \quad a^* = 500\left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}}\right), \quad b^* = 200\left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}}\right), \quad (15)$$

onde X , Y , Z são os valores de triestímulos obtidos na determinação colorimétrica e X_n , Y_n , Z_n são os valores de triestímulos do iluminante.

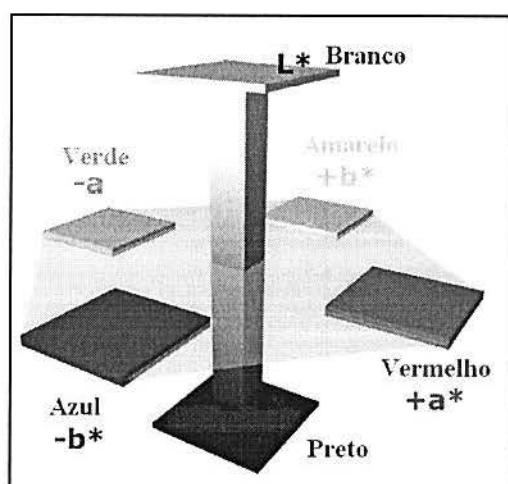


Figura 2.13: Cores aparentes representadas no espaço de cores CIE $L^*a^*b^*$ (adaptado de [12])

A intenção da CIE foi a de prover uma escala de cores as onde as variáveis estivessem mais diretamente relacionadas aos atributos das cores aparentes. Assim, a especificação em termos de L^* , a^* , b^* , embora obtida a partir dos valores de triestímulos X , Y , Z , possui a vantagem de permitir uma interpretação mais direta da cor aparente que os valores medidos representam [6].

Os valores de diferença associados com esta escala são denotados por ΔL^* , Δa^* e Δb^* . Os cálculos são realizados por simples subtrações e indicam, por exemplo, o quanto um padrão e uma amostra diferem entre si.

A diferença total de cor total é dada por

* Os termos identificados estão listados na seção 2.3 Definições. p. 25.

$$\Delta E_{L^*a^*b^*} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} . \quad (16)$$

Esta escala é extensivamente utilizada pela indústria para, por exemplo, o controle de qualidade e o ajuste de formulações.

2.2.9 Colorimetria Moderna

A colorimetria moderna possui métodos diretos que utilizam equipamentos automatizados para a determinação de valores de triestímulos e, se desejado, para a conseqüente descrição do resultado em espaços de cores alternativos, como o CIELAB.

Seguindo o sistema CIE de especificação de cores, as medidas de reflectância $\rho(\lambda)$ ou de transmitância $\tau(\lambda)$ são realizadas em um espectrofotômetro. A determinação dos valores de triestímulos X, Y, Z é realizada através de cálculos automatizados que utilizam as equações (8) e (9) [10].

Em seguida, exemplifica-se o funcionamento geral de um colorímetro típico:

Espectrofotômetro colorímetro ou colorímetro: utiliza uma fonte luminosa para iluminar a amostra analisada. A luz refletida (ou transmitida) por este objeto interage com uma grade de difração e abre-se em um espectro de difração. O espectro gerado atinge detectores com sensibilidades que dependem da faixa espectral da radiação incidente. Os sinais elétricos dos detectores à energia radiante são enviados para um processador. No processador, os sinais provenientes dos detectores são numericamente relacionados com a curva do iluminante CIE escolhido e com as curvas das funções do observador padrão CIE 2° ou 10°. A resposta surge em termos dos valores de triestímulos X, Y, Z e podem ser prontamente transformados para outras escalas de cor (figuras 2.14 e 2.15) [6].

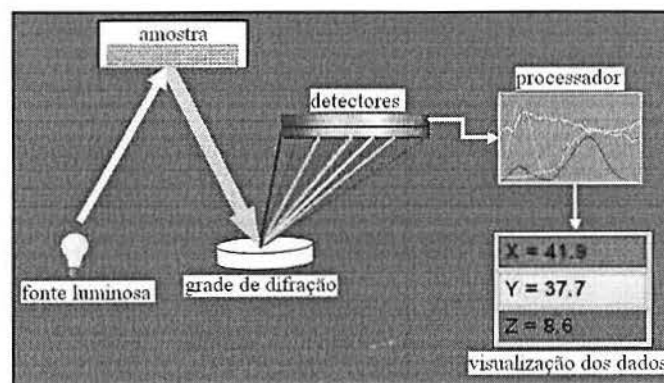


Figura 2.14: Ilustração do funcionamento de um colorímetro (adaptado de [6])

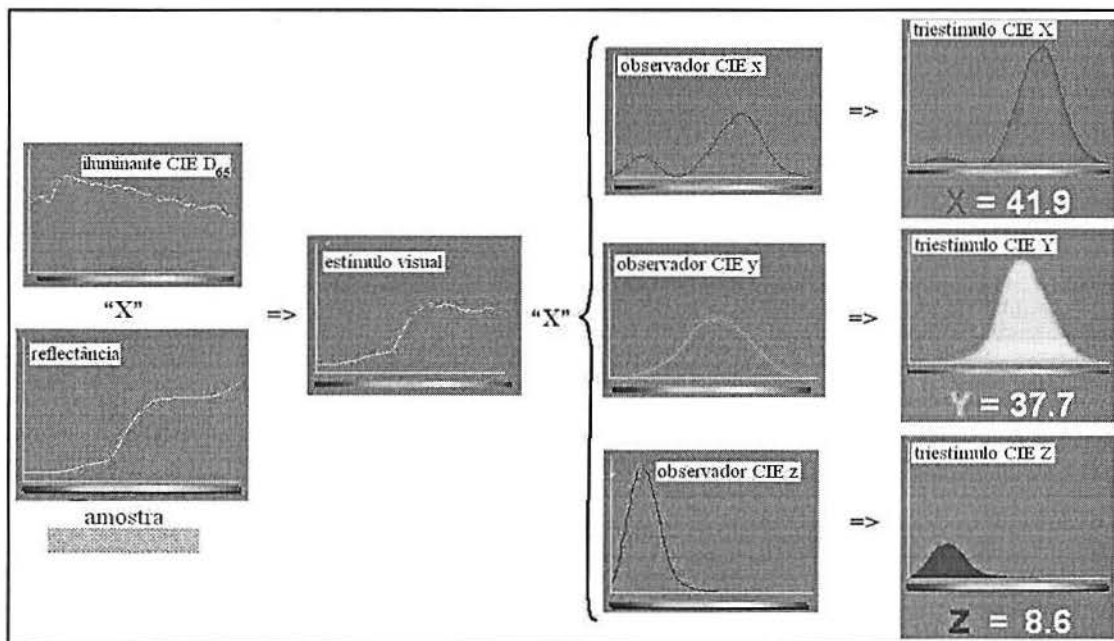


Figura 2.15 Ilustração do processamento de dados em um colorímetro moderno (adaptado de [6])

2.2.10 Aplicações industriais e tecnológicas da colorimetria

A aparência total de um objeto é obtida pela combinação de seus atributos de cor e de seus atributos geométricos. Assim, ambos devem ser medidos e considerados em determinações visuais ou instrumentais [6].

Os valores de reflectância dos objetos geralmente dependem das condições de iluminação e das condições de visualização. Se as condições de observação não forem padronizadas e controladas, podem aparecer muitas divergências entre os resultados obtidos por diferentes investigadores para uma mesma amostra. Assim, é importante que o procedimento utilizado tenha sido desenvolvido levando-se em considerações as condições relevantes (aplicação, preparo da amostra, condições geométricas e de iluminação, número de medidas, etc.).

A colorimetria possibilita a obtenção de dados quantitativos e permanentes. Tais determinações instrumentais costumam ser convenientes, pois o sistema visual humano, embora bastante sensível e discriminante, não é capaz de julgamentos quantitativos diretamente objetivos, padronizados e reproduzíveis.

São encontrados exemplos da utilização da colorimetria em indústrias de tintas, de alimentos, de metais, de cerâmicas, de polímeros, automobilísticas, têxteis, de recobrimento, etc. Os exemplos incluem análises relacionadas ao controle de qualidade, ao desenvolvimento de produtos, ao desenvolvimento de padrões comerciais, à automatização e controle contínuo de processos industriais, etc.

Em aplicações tecnológicas, existe um crescente desenvolvimento da área de geração e análise de imagens em física médica, astrofísica, biologia, etc. Neste caso, o mais importante é atingir o máximo de resolução em cor como representação gráfica (desenvolvimento de placas gráficas, telas e impressão), a fim de facilitar a análise instrumental através de imagem.

* Os termos identificados estão listados na seção 2.3 Definições. p. 25.

Uma outra aplicação tecnológica interessante envolve a modelagem e simulação computacional do complexo sistema visual humano, com aplicações voltadas à robótica e à medicina [18].

2.3 Definições

Brilho (brightness): Aspecto da percepção visual pelo qual uma área parece emitir mais ou menos luz (ver a definição de luminosidade).

Energia radiante: Energia transmitida como onda eletromagnética.

Espaço de cor: Espaço geométrico, geralmente de três dimensões, no qual as cores são arranjadas sistematicamente.

Luminosidade (lightness): Atributo da percepção de cores no qual um corpo que não possui luz própria é julgado refletir mais ou menos luz (ver a definição de brilho).

Luminância: fluxo luminoso que emana ou incide sobre uma superfície em uma dada direção, por unidade da área da superfície, por unidade de ângulo sólido.

Temperatura de cor: Temperatura que um corpo negro perfeito teria ao emitir luz na mesma cromaticidade da fonte luminosa especificada.

Temperatura de cor correlata: Temperatura que um corpo negro perfeito teria ao emitir luz na cromaticidade que melhor se ajusta àquela emitida pela fonte luminosa especificada.

3 TEORIAS DE VISÃO EM CORES

As teorias de visão em cores trazem os temas mais debatidos e, possivelmente, os mais interessantes dentro das teorias de visão. Apesar dos esforços de incontáveis pesquisadores do assunto, chega-se à conclusão de que não há, até o momento, uma teoria completa capaz de explicar todos os fenômenos da visão em cores. Este campo, ainda aberto a investigações, eleva o interesse pelo problema.

As teorias de Young-Helmholtz e de Hering formaram a base para o desenvolvimento do conhecimento já alcançado. No final deste capítulo, veremos que a compreensão dos fenômenos ligados à visão em cores é dada pela união destas propostas.

3.1 Fundamentação Experimental

As teorias de visão em cores compreendem um conjunto de deduções formuladas de modo a explicar como a luz, atuando nos receptores visuais, produz as respostas de cor encontradas nos experimentos de percepção e na vida diária. Assim, uma particular teoria deve explicar todos os fatos estabelecidos, como: funções de combinação de cores; os vários casos de visão anômala em cores; as funções de luminosidade fotópica e escotópica; a natureza da percepção dos primários psicológicos (vermelho, amarelo, verde e azul); a discriminação dos matizes, da saturação e do brilho; efeitos espaciais e temporais; entre outros. Adicionalmente, a teoria deve estar de acordo com os fatos fisiológicos [2] [14].

3.2 Teoria de Young-Helmholtz

Em 1802, o inglês Thomas Young sugeriu que a visão em cores depende de três tipos de receptores localizados na retina, cada um deles possuindo uma sensibilidade espectral diferente. O postulado teve argumentação fisiológica, considerando que a retina não poderia ter infinitos fotorreceptores distintos em cada ponto; o número três foi proposto seguindo o número de cores primárias. Inicialmente as hipóteses de Young não foram seguidas, mas, cerca de 50 anos mais tarde, ressurgiram através do trabalho do cientista alemão H. von Helmholtz. Em 1857, também sob a influência da teoria de Young, J. C. Maxwell realizou as medições que colocaram o aspecto tricromático da visão em bases experimentais [2].

Na teoria de Young-Helmholtz, cada tipo de receptor está conectado ao seu próprio conjunto de nervos e envia a sua própria mensagem ao sistema visual. Os três tipos de mensagens são combinados no momento em que as cores são vistas.

Durante quase dois séculos, ocorreu uma completa confusão envolvendo a trivariância dos estímulos, fato estabelecido, e as hipóteses da teoria de Young, que davam a este fato uma interpretação. Inicialmente, qualquer confirmação da trivariância parecia, erroneamente, ser suportada pela teoria de Young. Após, notou-se que a trivariância é independente de qualquer teoria, mas por ela deve ser explicada.

Erros e limitações desta teoria levaram ao surgimento de adições, modificações novas propostas.

3.3 Teoria de Hering

Em 1872, o alemão E. Hering propôs a existência de seis sensações distintas arranjadas em três pares de processos opostos: branco-preto, azul-amarelo e verde-vermelho. Para explicar a existência destes pares, Hering sugeriu que a luz é absorvida nos receptores por substâncias fotoquímicas. Esta absorção inicia a atividade do resto do sistema visual e é diretamente responsável pela percepção das cores [14].

Enquanto a teoria de Young-Helmholtz ocupava-se com os efeitos diretos dos estímulos de cor, a teoria de Hering direciona-se à resposta, à sensação psicofísica de cor.

De acordo com esta teoria, o par de processos azul-amarelo no sistema visual atua de tal forma que eventos “azuis” são opostos a eventos “amarelos”. Portanto, uma dada cor pode parecer azulada ou amarelada, mas jamais as duas coisas ao mesmo tempo, isto é, o azul inibe o amarelo e vice-versa. O mesmo pode ser dito a respeito do par de processos verde-vermelho. A proposta do par de processos branco-preto sugere que os eventos “brancos” são opostos aos eventos “pretos” no sentido que uma dada cor deve afastar-se do meio da escala em direção ao branco ou preto, mas nunca em direção aos dois ao mesmo tempo, isto é, o branco não inibe o preto, mas mistura-se a ele para produzir o cinza. Contudo, a percepção de uma cor em especial depende de quais dos três processos de oposição estão respondendo, em quais direções (oposições) e com que magnitudes.

Erros e limitações também foram encontrados na teoria de Hering, incentivando a busca por novas idéias e interpretações. Em especial, cita-se o trabalho de Hurvich & Jameson (1956), que obteve um sucesso até então não alcançado por outras teorias.

Teoria de cores opostas de Hurvich-Jameson: Os autores colocaram a teoria de Hering em bases matemáticas equivalentes às da teoria de Young-Helmholtz, levando-a a resultados quantitativos. O mecanismo de excitação suposto estava localizado nos cones e o mecanismo de resposta, que consistia dos três pares de processos de oposição de Hering, estava localizado no sistema nervoso central. Os estudos da atualidade seguem os passos iniciados por esta proposta.

3.4 Estudos Recentes

As teorias de visão em cores direcionaram as investigações fisiológicas que, nos últimos 40 anos, confirmaram a existência de três classes de cones fotorreceptores (embora alguns estudos apontem a existência de uma minoria de indivíduos tetracromáticos [16]) e a existência de respostas neurológicas que comparam em oposição os sinais visuais [5] [15].

A maioria dos casos conhecidos de defeitos da visão em cores (quando não proveniente de danos causados aos olhos, nervos ou cérebro) vem sendo explicada por mutações e perdas dos genes que codificam as opsinas dos cones L (vermelho) e M (verde) [5].

Trabalhos recentes têm revelado uma riqueza inesperada da organização fisiológica das estruturas que participam da visão em cores e que são inacessíveis às investigação de percepção.

Acuidade visual em cores: Foi experimentalmente verificada [17] uma grande variação da razão entre cones L e M ao longo do mosaico bidimensional que forma a superfície de uma retina. Este fato influencia a acuidade da visão de cores, pois os aglomerados de células fotorreceptoras de um mesmo tipo estão aleatoriamente espalhados e, dessa forma, trazem a necessidade de uma maior superfície retinal iluminada para percepção das cores [5].

Além disso, foi verificada a existência de uma considerável diferença (de ~0,4 até ~10) na proporção dos cones M e L em indivíduos com visão normal distintos. Ao contrário do que se poderia supor esta grande variação não resulta em uma diferença significativa na sensação das cores experimentadas por estes indivíduos. Neste nível de detalhamento dos caminhos da percepção visual, as conexões formadas durante o desenvolvimento dos olhos e do cérebro parecem formar uma estrutura única de conexões para cada indivíduo, atuando diferentemente conforme a região da retina ativada [5].

Caminhos visuais na retina: Embora a percepção final da visão seja, sem dúvidas, realizada pelo cérebro, uma grande parte da construção das imagens ocorre na retina. Após a energia radiante ser absorvida pelos fotorreceptores, a rede neural formada pelas células horizontais, bipolares, amácrinas e ganglionares (seção 1.2) realiza o primeiro passo do estágio do processamento que permite a percepção visual [15].

Investigações eletrofisiológicas da retina, iniciadas a mais de 60 anos, demonstraram que o potencial elétrico das membranas das células fotorreceptoras tornava-se mais negativo ou mais positivo (hiperpolarização e depolarização, respectivamente) conforme ocorresse ou não a incidência de energia radiante. Com isto, verificou-se que cones e bastonetes liberam neurotransmissores na ausência de luz e, interrompem a neurotransmissão na presença de luz. Os cones estão conectados a dois tipos básicos de células bipolares, chamadas de ON e OFF: as células bipolares ON reagem “disparando” sinais para as células ganglionares apenas quando *não* recebem o neurotransmissor dos cones (ou seja, quando há iluminação da região retinal correspondente); as células bipolares OFF emitem os sinais para as células ganglionares apenas quando *recebem* o neurotransmissor (ou seja, na ausência de iluminação).

A resolução da imagem inicia-se na primeira camada de preenchimento da retina (seção 1.2), onde as células horizontais recebem sinais de muitos cones. Assim, o campo receptivo das células horizontais é muito maior do que o campo receptivo dos cones (praticamente puntual). Além disso, algumas células horizontais próximas unem-se entre si e a energia potencial de uma porção de células torna-se a mesma; conseqüentemente, as células horizontais respondem à luz em uma área muito ampla. Entrementes, uma única célula bipolar recebe informação de vários cones.

A visão humana depende da percepção do contraste de diferentes estímulos: a sinalização ON é responsável pela percepção de luz em fundo escuro; a sinalização OFF é responsável pela percepção do escuro em fundo claro.

Com a resposta ON ou OFF, uma única célula bipolar transmitiria somente mensagens quase indistintas às suas células ganglionares. Porém, as células horizontais adicionam um sinal elétrico em oposição que é espacialmente construtivo, dando aos campos receptivos das células bipolares uma organização em círculos concêntricos (figura 3.1).

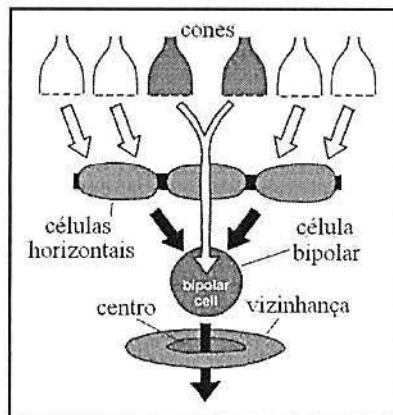


Figura 3.1: Ilustração do campo receptivo de uma célula bipolar (adaptado de [4])

Os dois tipos básicos de células ganglionares localizadas na retina humana, centro ON e centro OFF, também possuem seus campos receptivos organizados na forma de círculos concêntricos. As células do tipo centro ON são ativadas quando um feixe de luz cai sobre o centro de seu campo receptivo (sobre os fotorreceptores localizados nesta região) e são inativadas quando a luz incide sobre a periferia de seu campo. As células ganglionares do tipo centro OFF reagem de forma oposta, aumentando a sua atividade quando a periferia de seu campo receptivo é iluminada e diminuindo quando a luz incide no centro de seu campo. Estes sinais são então conduzidos aos centros visuais do cérebro (figura 3.2).

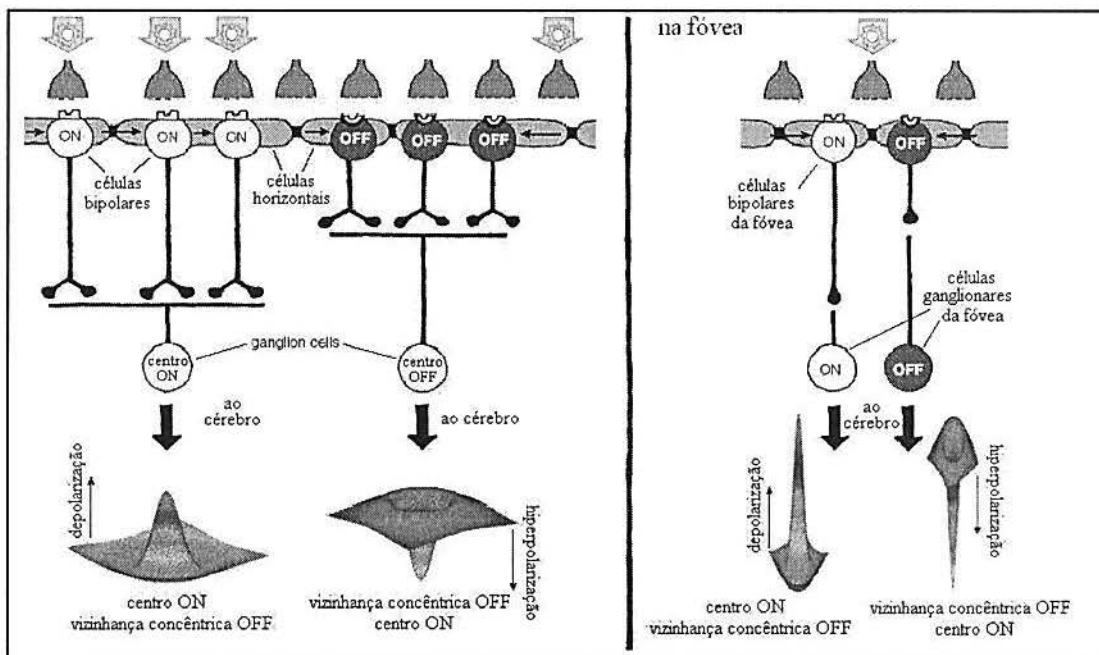


Figura 3.2: Ilustração dos caminhos visuais na retina periférica e na fóvea & Representação dos centros receptivos das células ganglionares (adaptado de [4])

Na fóvea, onde praticamente não há células horizontais ou amácrinas, cada célula ganglionar liga-se a apenas uma célula bipolar e, ainda, cada cone M ou L conecta-se a apenas duas células ganglionares, enviando uma mensagem ON ou OFF que oferecem ao cérebro informação espacial e espectral de alta resolução.

Os estudos atuais indicam que os mecanismos acima citados ocorrem apenas para os cones M (verde) e L (vermelho). Os cones S (azuis) atuam transmitindo as respostas ON-OFF ao cérebro através de caminhos formados por células bipolares e ganglionares de tipos especiais.

Existem células amácrinas de vários tipos conectadas às células bipolares e ganglionares. Algumas estão associadas a grandes e outras a pequenos campos receptivos. Uma de funções consiste em coletar mensagens de muitas células bipolares que estão ligadas a bastonetes. O grande número de bastonetes assim conectados a uma célula amácrina permite a percepção visual em um nível muito baixo de iluminação.

Os fatos apresentados demonstram a alta complexidade dos arranjos e conexões da retina. Considerações mais elaboradas e a interpretação cerebral aos sinais em oposição espacial e espectral permanecem em profundo debate nas comunidades científicas envolvidas no assunto.

CONCLUSÃO

Esta monografia teve por objetivo apresentar alguns tópicos introdutórios de teorias de visão em cores, mostrando a diversidade de assuntos nela contida.

Foi possível constatar que a colorimetria fundamenta-se em medidas que estão além das considerações físicas puras. Os aspectos fisiológicos e psicofísicos da visão humana são indispensáveis ao desenvolvimento de padrões e técnicas de medidas de cor.

Em relação às teorias de visão, os estudos recentes demonstram que grandes avanços foram feitos nos últimos tempos. No entanto, permanecem lacunas no conhecimento em praticamente todos os estágios da percepção em cores. Na retina, sabe-se muito pouco sobre os caminhos visuais dos cones às células ganglionares e sobre o fato da proporção de cones aparentemente não afetar a visão em cores. No córtex, um desafio muito importante está em entender como as propriedades cromáticas dos objetos são perceptualmente ligadas às propriedades espaciais.

O interesse puramente científico, por si só, justificaria completamente a relevância do tema. Entretanto, além deste, existem os interesses tecnológicos e industriais. O desenvolvimento de novas aplicações, de novos instrumentos, de novos detectores, de novas modelagens matemáticas da visão humana e de outras concepções depende consideravelmente dos avanços na compreensão dos mecanismos de percepção visual em cores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Park, David. **The Fire within the Eye**. New edition. USA: Princeton University, April 12, 1999.
- [2] Le Grand, Yves. **Light, Colour and Vision**. London, Great Britain: Chapman & Hall, 1957.
- [3] Kolb, H., Fernandez, E., & Nelson, R. **Webvision: The Organization of the Retina and Visual Systems**. Salt Lake City, USA: University of Utah, 2005. Disponível em: <<http://webvision.med.utah.edu/>>. Acesso em: 09 nov. 2007.
- [4] Gilbert, Scoot F. **Developmental Biology**. 4th ed. Massachusetts, USA: Sinauer, 1994. Ch. 8.
- [5] Solomon, S., Lennie, P. The machinery of colour vision. **Nature Reviews Neuroscience** 8, 276 - 286, April 01, 2007.
- [6] THE BASICS of Color Perception and Measurement. **HunterLab**. 2001. Disponível em <http://www.hunterlab.com/colorbasics_shows.php>. Acesso em: 09 nov. 2007.
- [7] Pokorny, J., et al. **Congenital and Acquired Color Vision Defects**. New York, USA: Grune & Stratton, 1979.
- [8] TECHNICAL Guides. **Adobe**. 2000. Disponível em <http://dba.med.sc.edu/price/irf/Adobe_tg/models/main.html>. Acesso em: 10 nov. 2007.
- [9] Jewett, T. **Color Tutorial**. 2006. Disponível em: <<http://www.tomjewett.com/colors/hsb.html>>. Acesso em: 10 nov. 2007.
- [10] Wyszecki, G. **The Measurement of Brightness and Color**. In: Colorimetry, Selected Reprints. New York, USA: AAPT, 1970. p. 71 – 85.
- [11] Wyszecki, G., Stiles, W. S. **Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formula**. 2nd edition. USA: John Wiley & Sons, 1982.
- [12] CIELAB. Disponível em <www.cielab.de>. Acesso em: 10 nov. 2007.
- [13] E284-03a - Standard Terminology of Appearance. **American Society for Testing and Materials - ASTM**, July 10, 2003.
- [14] Burnham, R., Hanes, R., & Bartleson, C.J. **Color: a guide to basic facts and concepts**. New York, USA: John Wiley & Sons, 1963.
- [15] Kolb, H., How the Retina Works. **American Scientist**, Volume 91, January-February, 28-35, 2003.
- [16] Jameson, K. A., Highnote, S. M., & Wasserman, L. M. Richer color experience in observers with multiple photopigment opsin genes. **Psychonomic Bulletin and Review** 8 (2): 244–261, 2001.
- [17] Roorda, A., Williams, D. R. The arrangement of the three cone classes in the living human eye. **Nature**, Vol 397, 520-522, February 11, 1999.
- [18] DURAN, R. S. **Modelador e simulador do sistema visual humano**. 2005. 50 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação e Matemática Computacional) - Universidade de São Paulo.