

Universidade do Minho
Escola de Ciências

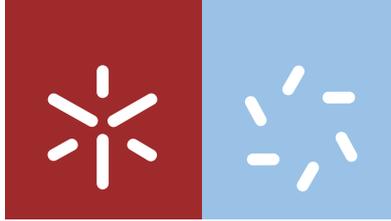
Eva Daniela Gonçalves Silva

**Influência de filtros de ruído dinâmico na
percepção das cores utilizando um novo teste
de visão das cores**

Eva Daniela Gonçalves Silva **Influência de filtros de ruído dinâmico na percepção das cores utilizando um novo teste de visão das cores**

UMinho | 2015

outubro de 2015



Universidade do Minho
Escola de Ciências

Eva Daniela Gonçalves Silva

**Influência de filtros de ruído dinâmico na
perceção das cores utilizando um novo teste
de visão das cores**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Optometria Avançada

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor João Manuel Maciel Linhares

outubro de 2015

DECLARAÇÃO

Nome: Eva Daniela Gonçalves Silva

Endereço eletrónico: evitah_silva@hotmail.com

Número do Cartão de Cidadão: 13980455

Título da dissertação: Influência de filtros de ruído dinâmico na perceção das cores utilizando um novo teste de visão das cores

Orientador: Professor Doutor João Manuel Maciel Linhares

Ano de conclusão: 2015

Designação do Mestrado: Mestrado em Optometria Avançada

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE, APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, 30 de outubro de 2015

Assinatura:

A conclusão desta dissertação não teria sido possível sem a ajuda das pessoas que comigo participaram nesta caminhada. Por isso, reservo este bocadinho para lhes agradecer.

Agradeço aos meus orientadores. Em especial ao Professor João Linhares, muito obrigada pela ajuda, compreensão e paciência. Sem a sua competência e disponibilidade não seria possível realizar este trabalho.

Ao meu namorado, Joel, pela força, ajuda, amor e amizade que sempre manifestou. Obrigada por estares presente e iluminares a minha vida.

Aos meus pais e ao meu irmão pelo apoio, paciência e amor que sempre demonstraram, muito obrigada! Um agradecimento especial ao meu pai, pela ajuda na formatação deste trabalho.

Agradeço à Catarina João, pela grande ajuda que deu na recolha dos dados.

À Cristina, por tornar possível frequentar o mestrado enquanto exerço a minha profissão, obrigada! Sem a sua compreensão não teria sido possível.

Obrigada à Sofia pela paciência com que me ouviu todos os dias, nunca deixando de ser companheira e profissional competente.

Obrigada ao meu tio Cícero, à Sara, ao Rogério e à Ariana pela disponibilidade e honestidade com que também quiseram participar no teste.

A todos os meus amigos, muito obrigada!

Influência de filtros de ruído dinâmico na percepção das cores utilizando um novo teste de visão das cores

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar a influência do ruído de contraste de luminância (RCL) dinâmico na percepção da visão das cores em observadores tricromatas normais e tricromatas anômalos. Era esperado que a discriminação cromática ficasse afetada com a utilização do RCL dinâmico. Para testar esta hipótese, foi utilizado um novo teste para avaliar a visão das cores criado no Laboratório da Cor da Universidade do Minho. Este teste foi realizado num ecrã CRT, calibrado em cor e luminância, e consistia num alvo colorido apresentado num fundo de cor branca. Tanto o alvo como o fundo estavam preenchidos com discos de tamanho variável. Cada disco assumia valores aleatórios de luminância com a mesma cor que o fundo, criando o ruído de contraste de luminância. Quando a distribuição espacial da luminância e da cor dos discos permanecem constantes ao longo do tempo, cria-se a condição de RCL estático. Por sua vez, se cada disco variar o seu valor de luminância continuamente ao longo do tempo cria-se a condição de RCL dinâmico. Neste teste, na condição de RCL dinâmico, cada disco alterava a sua luminância aleatoriamente com uma frequência de 10Hz. Foram estimados os valores dos limiares de discriminação cromática ao longo de 20 tonalidades, cuja saturação mínima correspondia à cor do fundo. Participaram 6 observadores tricromatas normais, 3 observadores protanómalos e 6 observadores deuteranómalos, e todos eles foram avaliados nas duas condições de RCL. Nos observadores normais não houve diferenças estatisticamente significativas entre as duas condições de RCL. Porém, nos observadores anômalos verificou-se uma melhoria nos valores de discriminação cromática com a condição de RCL dinâmico, com significância estatística. Este resultado sugere que o RCL dinâmico facilita a discriminação cromática nos observadores tricromatas anômalos.

The influence of the dynamic noise filtering on the color perception using a new color vision test

ABSTRACT

The purpose of this work was to assess the influence of the dynamic luminance contrast noise (LCN) in the colour vision perception of normal and anomalous trichromatic observers. The initial expectation was to experience changes in the chromatic discrimination thresholds by using dynamic LCN. To test such expectation, a new colour vision assessment test was developed at the Laboratório da Cor of the University of Minho. The test was performed on a CRT computer screen calibrated in colour and luminance with a coloured target presented over a white background. Both the target and the background were packed with disks with variable size. The colour of each disk was the same as the background and the luminance was randomly selected over time to create the effect of the dynamic LCN. The static LCN condition was obtained by maintaining the luminance and the colour properties of each disk stable over time. If the luminance of each disk changed over time the dynamic LCN condition was obtained. On the dynamic LCN condition, each disk changed its luminance with a frequency of 10 Hz. The chromatic discrimination thresholds were estimated along 20 different hues concurrent at the colour of the background. Six normal, 3 protanomalous and 6 deuteranomalous observers performed the experiment on both static and dynamic LCN conditions. It was found that for normal observers there were no differences on the chromatic discrimination thresholds across the 20 hues on both LCN conditions. For anomalous trichromatic observers it was found an improvement on the thresholds values when the dynamic LCN condition was in use. Such a result suggests that the dynamic LCN improves the chromatic discrimination thresholds of anomalous trichromatic observers, but not on normal observers.

DECLARAÇÃO	II
AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE GERAL	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	XXI
1. OBJETIVO E HIPÓTESE DE TRABALHO	1
2. INTRODUÇÃO	3
2.1. O sistema visual	3
2.1.1. Organização do globo ocular	3
2.1.1.1. <i>Camada Fibrosa</i>	4
2.1.1.2. <i>Camada pigmentada vascular</i>	5
2.1.1.3. <i>Camada nervosa ou interna</i>	6
2.1.2. Meios de refração do olho	12
2.1.3. Bases fisiológicas da percepção visual	13
2.1.3.1. <i>Convergência de sinal</i>	14
2.1.3.2. <i>Inibição lateral: como a atividade de uma célula pode diminuir a atividade de outra célula</i>	16
2.1.3.3. <i>Campos recetivos na retina: células ganglionares</i>	20
2.1.3.4. <i>Processamento desde a retina ao córtex visual</i>	24
2.2. Da luz à cor	28
2.2.1. A luz como espectro eletromagnético	28
2.2.2. História da visão das cores	30
2.2.3. Curvas de sensibilidade dos cones e bastonetes	35
2.2.4. Tipos de deficiências na visão das cores	38
2.2.4.1. <i>Explicação genética para a incidência masculina das deficiências no vermelho-verde</i>	41
2.2.5. Colorimetria: medindo a cor	42
2.2.6. Diagramas cromáticos	48
2.2.6.1. <i>Diagrama cromático CIE 1931 (x, y)</i>	48

2.2.6.2.	Diagrama cromático CIE 1976 (u' , v') – diagrama cromático uniforme	49
2.2.6.3.	Linhas de confusão dos dicromatas	51
2.2.7.	Testes de visão das cores	51
2.2.7.1.	Placas pseudoisocromáticas	52
2.2.7.1.1.	Teste de Ishihara	53
2.2.7.1.2.	Cambridge Colour Test (CCT)	54
2.2.7.1.3.	Colour Assessment and Diagnosis (CAD)	56
2.2.7.2.	Testes de ordenação da cor	59
2.2.7.3.	Testes de correspondência	61
3.	TRABALHO EXPERIMENTAL	65
3.1.	Ruído de contraste de luminância	65
3.2.	Metodologia	65
3.2.1.	Configuração experimental do teste	65
3.2.2.	O estímulo	66
3.2.3.	Observadores	67
3.2.4.	Protocolo de teste	68
3.3.	Resultados	69
3.3.1.	Comparação das variáveis RCL estático e RCL dinâmico entre os observadores normais, protanómalos e deuteranómalos	70
3.3.1.1.	Observadores normais	70
3.3.1.2.	Observadores protanómalos	73
3.3.1.3.	Observadores deuteranómalos	75
3.3.2.	Análise dos limiares de discriminação cromática por cor nas duas condições de RCL	77
3.3.2.1.	Observadores normais	77
3.3.2.2.	Observadores protanómalos e deuteranómalos	78
3.3.3.	Análise intra-observadores	81
3.3.3.1.	Observadores normais	81
3.3.3.2.	Observadores protanómalos	81
3.3.3.3.	Observadores deuteranómalos	82
3.3.4.	Resultados globais	83
4.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	85
5.	CONCLUSÃO	89
6.	TRABALHO FUTURO	91
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	ANEXOS	97

Tabela 1 Diferenças entre deficiências na visão das cores hereditárias e adquiridas.	39
Tabela 2 Representação dos resultados finais utilizados para a análise dos resultados.	70
Tabela 3 Foram executados dois testes de normalidade no IBM SPSS, com o objetivo de averiguar se as variáveis RCL estático e RCL dinâmico, em observadores normais, seguiam uma distribuição normal: o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Shapiro-Wilk. Como o valor de $p < 0.05$, a hipótese nula foi rejeitada para ambas as variáveis, logo, as distribuições não são normais em ambos os testes.	71
Tabela 4 Teste não paramétrico dos postos sinalizados de Wilcoxon para observadores normais. Como o valor de $p > 0.05$, a hipótese nula é retida. Assim, conclui-se que não existem diferenças estatisticamente significativas entre as duas variáveis para os observadores normais.	73
Tabela 5 Foram executados dois testes de normalidade no IBM SPSS, com o objetivo de averiguar se as variáveis RCL estático e RCL dinâmico, em observadores protanómalos, seguiam uma distribuição normal: o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Shapiro-Wilk. Como o valor de $p < 0.05$, a hipótese nula foi rejeitada para ambas as variáveis, logo, as distribuições de RCL estático e RCL dinâmico não são normais em ambos os testes.	73
Tabela 6 Teste não paramétrico dos postos sinalizados de Wilcoxon para observadores protanómalos. Como o valor de $p < 0.05$, a hipótese nula é rejeitada. Assim, verifica-se que existem diferenças estatisticamente significativas entre as duas variáveis.	75
Tabela 7 Foram executados dois testes de normalidade no IBM SPSS, com o objetivo de averiguar se as variáveis RCL estático e RCL dinâmico seguiam uma distribuição normal, em observadores deuteranómalos: o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Shapiro-Wilk. Como o valor de $p < 0.05$, a hipótese nula foi rejeitada para ambas as variáveis, logo, as distribuições não são normais em ambos os testes.	75
Tabela 8 Teste não paramétrico dos postos sinalizados de Wilcoxon para os observadores deuteranómalos. Como o valor de $p < 0.05$, a hipótese nula é rejeitada. Assim, verifica-se que existem diferenças estatisticamente significativas entre as duas variáveis.	77

Figura 1 Secção horizontal do olho direito (adaptada de Snell & Lemp, 1998).	3
Figura 2 Camadas e organização da retina: Cones (C), Bastonetes (R), células bipolares (B), células horizontais (H), células de Müller (M), células amácrinas (A) e células ganglionares (G) (adaptada de Swaroop, Kim, & Forrest, 2010).	7
Figura 3 Representação esquemática da retina externa e das funções de suporte do EPR (adaptada de Lehmann et al., 2014).	9
Figura 4 Distribuição dos cones e dos bastonetes na retina do olho esquerdo. Tanto o olho que se encontra do lado esquerdo e o gráfico do lado direito da figura indicam as localizações dos fotorreceptores, em graus, relativamente à fóvea. A barra castanha representada no gráfico é o ponto cego e está situado a 20°, nasalmente à fóvea. O gráfico da direita indica que na fóvea há apenas cones e nenhum bastonete. Na restante retina há uma combinação dos dois tipos de fotorreceptores, em que a quantidade de bastonetes predomina face à dos cones (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).	10
Figura 5 A. Constituição de um cone e de um bastonete: segmento externo (SE), segmento interno (SI), o talo ou cílio conector (TC), corpo celular (CC) – que possui o núcleo e axónio/terminal sináptico (Sin) (adaptada de Swaroop, Kim, & Forrest, 2010). B. Revelação dos discos no segmento externo de um bastonete, onde os discos internos empurram os discos externos para a extremidade do fotorreceptor. Em (a), ampliando, verifica-se que existe uma molécula de pigmento visual na membrana do disco. A imagem (b) mostra como a proteína opsina, numa molécula de pigmento visual, atravessa sete vezes a membrana do disco (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).	11
Figura 6 Representação esquemática das principais estruturas responsáveis pela refração da luz, representadas a cor vermelha (adaptada de Sung & Chuang, 2010).	12
Figura 7 Passos no processo de perceção visual (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).	14
Figura 8 A mesma quantidade de luz provoca uma maior sensibilidade nos bastonetes face aos cones, pois, há um maior grau de convergência (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).	16
Figura 9 Olho lateral do <i>Limulus polyphemus</i> na imagem A (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013). Na imagem B, vemos a secção do olho lateral de um <i>Limulus</i> adulto, perpendicular à córnea, mostrando as porções pigmentadas da ommatidia ou recetores (rodeadas pelo círculo vermelho), os feixes de fibras nervosas que emergem dos recetores (rodeadas pelo círculo verde) e uma porção do nervo ótico (rodeada pelo círculo amarelo em baixo) (adaptada de Hartline et al., 1956). Por último, na imagem C, podemos ver em pormenor a córnea do olho lateral do <i>Limulus</i> em condições reais. Cada pontinho é uma ommatidia	

(adaptada de (<http://franslanting.photoshelter.com/image/I0000UFIkNRp6Dro>, Frans lanting))

17

Figura 10| Grelha de Hermann. Notar os pontos cinzentos fantasma que aparecem na interseção dos corredores brancos. Se olharmos, diretamente, para a interseção do corredor branco podemos constatar que este ponto em tom cinza não se encontra fisicamente presente (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

18

Figura 11| Na imagem (a), existem pontos verdes alfabetizados de A a E que são os recetores e encontram-se iluminados pelos corredores brancos. Na imagem (b), estão representados os cinco recetores e as respetivas células bipolares, exibidas pelas setas azuis. A resposta de cada recetor é 100, pois, estão os cinco sobre os corredores brancos. A resposta das células bipolares correspondentes é igual em valor à dos recetores adjacentes. A inibição lateral viaja para a célula bipolar A através das setas representadas a vermelho. Por último, na imagem (c), cada célula bipolar também possui uma resposta inicial de 100, assim, as células B, C, D e E enviam uma resposta inibitória para a célula A. Imaginando que, numericamente, a inibição enviada para a célula bipolar A, por cada uma das outras células, é cerca de 10, então, a inibição recebida pela célula bipolar A tem uma totalidade de 40. A resposta final da célula bipolar A, neste caso, vai ser de 60 ($100-40=60$) (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

18

Figura 12| Na imagem (a), os recetores A, D e G estão situados no corredor branco e os recetores F e H estão situados nos quadrados pretos. O foco de interesse é o recetor D que está rodeado pelos recetores A, G, F e H. Porém, os recetores F e H como estão localizados sobre os quadrados pretos, recebem menos luz que os outros recetores. Na imagem (b) a resposta dos recetores A e G é 100, para cada um, e a resposta dos recetores F e H é de 20, cada um. Assim, na imagem (c), é possível verificar que a inibição lateral enviada à célula bipolar D é 20, para os recetores A e G, e 4, para os recetores F e H, dando um total de inibição de 24. Portanto, a resposta final da célula bipolar D é 76 ($100-24=76$) (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

19

Figura 13| Experiência de Hartline. (a) Hartline determinou qual era a área da retina do sapo que provocava uma resposta na fibra nervosa que tinha isolado; (b) sobreposição de campos recetivos de três fibras nervosas (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

21

Figura 14| (a) constituição do nervo ótico; (b) campo recetivo com centro-excitatório (ON) e periferia-inibitória (OFF); (c) campo recetivo com centro-inibitório (OFF) e periferia-excitatória (ON) (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

22

Figura 15| Campo recetivo centro-excitatório (ON) e periferia-inibitória (OFF). (a) Quando um pequeno ponto de luz abrange parte do centro-excitatório do campo recetivo de uma célula, a intensidade de resposta desta aumenta; (b) se o tamanho do estímulo luminoso aumentar, por forma a tornar-se do tamanho do centro-excitatório do campo recetivo, a célula vai apresentar uma intensidade de resposta superior ao caso anterior, perfazendo, assim, o pico máximo de intensidade de resposta; (c) se esse estímulo continuar a aumentar de tamanho, este começa a abranger a área da periferia-inibitória do campo recetivo, resultando

num decréscimo da intensidade de resposta da célula; (d) tal como a resposta da uma célula pode atingir um pico máximo de intensidade também pode atingir um mínimo, ou seja, se o estímulo luminoso compreender todo o campo recetivo de uma célula, a resposta dessa célula vai ser diminuída e, portanto, nestas condições a célula vai apresentar o mínimo de intensidade de resposta possível (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

22

Figura 16| Campos recetivos, convergência e inibição lateral. Os recetores 3, 4 e 5 encontram-se no centro-excitatório do campo recetivo e os recetores 1, 2, 6 e 7 na periferia-inibitória. Os recetores 3, 4 e 5 encontram-se todos a convergir para a célula B, que, por sua vez, recebe inibição lateral proveniente das células A e C. Se o estímulo luminoso for do tamanho do centro do campo recetivo, este só engloba os recetores 3, 4 e 5. Estes recetores estão a enviar sinais convergentes para a célula B, portanto, a célula B vai atingir o máximo de intensidade de resposta possível, por exemplo 100%. No entanto, se o estímulo aumentar de tamanho e começar a abranger a área inibitória do campo recetivo, mais recetores vão entrar ao “barulho”, neste caso, os recetores 1, 2, 6 e 7, que, por sua vez, enviam sinais convergentes para as células A e C. Seguidamente, as células A e C, vão enviar sinais inibitórios para a célula B, diminuindo a sua intensidade de resposta para 60% (supondo que as células A e C transmitem uma inibição de cerca de 20%, cada uma, para a célula B) (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

23

Figura 17| Representação ventral do hemisfério direito do cérebro. A figura à esquerda mostra o caminho da informação visual desde a retina até ao córtex visual primário. Existem 6 lâminas diferentes no NGL: as lâminas de 1 a 4 são constituídas pelas células parvo (P), as lâminas 5 e 6 por células magno (M) e as células konio (K) preenchem o espaço entre as lâminas das células M e P. As células ganglionares da retina temporal e nasal projetam para locais distintos no NGL, ou seja, como representado pela linha a vermelho, as células ganglionares da retina temporal projetam para o NGL ipsilateral e as células ganglionares da retina nasal, como representado pela linha verde, projetam para o NGL contralateral. Por último, os axónios das células do NGL enviam quase exclusivamente informação para a área V1. Pela análise da figura, verifica-se que existem 6 camadas principais na área V1. No entanto, os axónios das células P, M e K terminam unicamente na camada 4 da área V1. Os axónios das células P, M e K terminam em locais diferentes da camada 4, isto é, as células P projetam para a camada $4C\beta$, as células M para a camada $4C\alpha$ e as células K para a camada 4A e 3 (adaptada de Solomon & Lennie, 2007)

26

Figura 18| Espectro eletromagnético. Dentro deste vasto espectro encontra-se uma pequena banda de energia, a luz visível (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

29

Figura 19| Representação das três experiências de Newton com prismas. Na figura A está representada a decomposição da luz solar através de um prisma; na figura B a recomposição da luz solar através de um prisma invertido; na figura C a decomposição sucessiva da luz solar (adaptada de Newton, 1718).

31

Figura 20	Curvas de sensibilidade dos cones calculadas por Helmholtz (adaptada de Helmholtz, 1860).	32
Figura 21	Os três canais oponentes propostos por Hering. O canal Preto (-) e Branco (+) responde positivamente a luz branca e negativamente na ausência de luz. O mesmo acontece para os outros dois canais, ou seja, o canal vermelho (+) e verde (-) responde positivamente a vermelho e negativamente a verde, e o canal azul (-) e amarelo (+), responde positivamente ao amarelo e negativamente ao azul (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).	33
Figura 22	Representação aproximada dos canais oponentes R-G, B-Y e W-B propostos por Jameson & Hurvich em 1955 (adaptada de Schwartz, 2010).	34
Figura 23	Modelo das duas fases de Boynton. Os sinais dos dois tipos de cones combinados produzem um canal acromático correspondente à luminância (L+M) e dois canais cromáticos oponentes (L-M e S- (L+M)) (adaptada de Stockman, 2009).	35
Figura 24	Curvas de sensibilidade relativas para o cone S (curva azul), M (curva verde) e L (curva vermelha) (adaptada de Stockman, 2009).	36
Figura 25	Determinação da curva de sensibilidade fotópica através do método da equalização de percepções. O gráfico (a) e (b) mostra que a sensibilidade fotópica é maior nos comprimentos de onda médios e menor nos comprimentos de onda baixos e altos (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).	37
Figura 26	Curvas de sensibilidade dos cones e bastonetes. As diferentes localizações, das curvas de sensibilidade dos cones e bastonetes no espectro visível, resultam numa diferença perceptual que pode ser notada durante a adaptação ao escuro. Esta diferença perceptual é conhecida por deslocamento de Purkinje. Segundo a CIE, $V(\lambda)$ corresponde à curva de sensibilidade fotópica de um observador padrão e $V'(\lambda)$ à curva de sensibilidade escotópica para um observador padrão (CIE, 2005) (adaptada de Schwartz, 2010).	38
Figura 27	Como os três tipos de dicromatas distinguem as cores (http://www.vischeck.com/).	40
Figura 28	Na deuteranomia, o espectro do cone M está mais deslocado para os comprimentos de onda longos e na protanomia, o espectro do cone L está mais deslocado para os comprimentos de onda médios. As curvas a cheio representam a posição normal do espectro de absorção do cone e as curvas a tracejado mostram a localização do espectro deslocado da posição ótima (adaptada de Schwartz, 2010).	41
Figura 29	Exemplos de transmissão da anomalia através de 4 gerações (adaptada de Schwartz, 2010).	42
Figura 30	Síntese aditiva e síntese subtrativa das cores. Na imagem A, a mistura aditiva de R+G = Y, R+B=M e G+B=C. Na imagem B, a mistura subtrativa de M+Y=R, M+C=B e Y+C=G.	43
Figura 31	(A) É possível com três comprimentos de onda, regular as suas intensidades, de modo a criar a sensação de uma radiação monocromática. (B) A tridimensionalidade da cor. Nesta figura, está	

representado o sistema de Munsell que é um dos sistemas ordenados de cor mais usado (adaptada de Schwartz, 2010).	44
Figura 32 Curvas de sensibilidade espectral dos três tipos de cones - β , Y , e ρ . Os três primários R, G e B com os respectivos comprimentos de onda usados para definir o observador padrão do sistema CIE 1931 da colorimetria: 700.0 nm, 546.1 nm e 435.8 nm respetivamente (adaptada de Hunt & Pointer, 2011).	45
Figura 33 Funções de reprodução cromática para o observador colorimétrico padrão CIE 1931 RGB: $r\lambda$, $g\lambda$ e $b\lambda$, com representação de valores negativos, devido à necessidade de adicionar sinal ao estímulo de referência (adaptada de Hunt & Pointer, 2011).	46
Figura 34 Funções de reprodução cromática para o observador colorimétrico padrão CIE 1931 a 2° (linhas a cheio) e para observador colorimétrico padrão CIE 1964 a 10° (linhas a tracejado) (adaptada de Hunt & Pointer, 2011).	47
Figura 35 A) Diagrama cromático CIE 1931 para um observador padrão de 2° (adaptada de www.efg2.com/lab); B) Diferenças perceptuais entre cores no diagrama cromático CIE 1931 (x, y) (adaptada de Wright, 1943).	49
Figura 36 A) Diagrama cromático CIE 1976 UCS para um observador padrão de 2° (adaptada de www.efg2.com/lab); B) Diferenças perceptuais entre cores no diagrama cromático CIE 1976 (u' , v'). Cada segmento de reta representa diferenças perceptuais iguais. Este espaço é bastante mais uniforme, porque a variação no tamanho dos segmentos de reta, ainda que não totalmente eliminada, foi reduzida. Assim, o rácio do segmento de reta mais longo para o mais curto é agora de 4:1. (adaptada de Hunt & Pointer, 2011).	50
Figura 37 Linhas de confusão num diagrama cromático CIE 1931 para (A) Deuteranopia, (B) Protanopia e (C) Tritanopia e respetivos pontos de convergência (adaptada de Schwartz, 2010).	51
Figura 38 Teste de Ishihara de 38 placas (http://www.color-blindness.com/2012/10/22/ishiharas-test-for-colour-deficiency38-plates-edition/#prettyPhoto).	53
Figura 39 Aspeto dos “C” de Landolt apresentados no CCT. A letra C é o alvo da placa e difere do fundo apenas em termos de cromaticidade (Regan et al., 1994).	54
Figura 40 Elipses de discriminação para um tricromata normal. Num observador normal, as elipses são pequenas e quase circulares (Regan et al., 1994).	55
Figura 41 Na figura A, estão representadas as linhas de confusão isocromáticas no espaço CIE 1976 (u' , v') para os prota, deutera e trita (adaptada de Stephen J. Dain, 2004). Na figura B, estão representadas as respetivas elipses de discriminação conseguidas através do CCT. O que se verifica é que, nos três casos, as elipses alongam-se na mesma direção das linhas de confusão. Isto prova que o CCT é concebido considerando as linhas de confusão dos dicromatas. Da esquerda para a direita: num prota as elipses apresentam-se ligeiramente para baixo e alongadas na horizontal; num deutera as elipses encontram-se ligeiramente para cima e alongadas horizontalmente; num trita as elipses encontram-se	

- alongadas na vertical e ligeiramente inclinadas para a esquerda (adaptada de B. C. Regan et al., 1994). 56
- Figura 42 | Conceção do teste CAD. Os estímulos coloridos em forma de quadrado movem-se nas diagonais de um quadrado de cima para baixo ou de baixo para cima (adaptada de (www.city.ac.uk/avrc/)). 57
- Figura 43 | Representação no diagrama cromático CIE 1931 (x, y) dos limites estatísticos, para o observador normal padrão, no teste CAD. A cruz preta no centro corresponde à cromaticidade de fundo e as suas coordenadas cromáticas (x, y) são (0.305, 0.323). A variabilidade dos limiares para o vermelho-verde (RG) e para o azul-amarelo (BY) está representada pela elipse cinzenta. Esta elipse preenchida a cinzento representa a região do gráfico CIE onde é esperado encontrar 95% dos valores referentes aos tricromatas normais. Os 2.5% e os 97.5% definem as fronteiras da região. A elipse com pontos pretos diz respeito à média dos limiares referentes ao RG e BY medida nos 250 observadores. As linhas de confusão referentes aos protanopes, deuteranopes e tritanopes estão também representadas a vermelho, verde e azul, respetivamente. Alguns dos valores obtidos para um tricromata normal estão representados pelas bolinhas coloridas (verde, amarelo, azul e vermelho) (J Barbur et al., 2009). 58
- Figura 44 | Limiares de deteção cromática referentes a dois observadores com uma deficiência severa na visão das cores. A severidade das suas anomalias está relacionada com o tamanho da elipse ao longo das linhas de confusão. Quanto maior o alongamento da elipse menor é a sensibilidade cromática. As linhas a cinzento representam os limites do ecrã (J Barbur et al., 2009). 59
- Figura 45 | Na figura A está representado o teste F-M 100 e na figura B está representado o teste D15 (<http://www.intermedia.pt/munsell.htm>). 60
- Figura 46 | Campo visual bipartido do anomaloscópio de Nagel. O campo de mistura, metade superior, consiste numa mistura ajustável de vermelho (670nm) e verde (546nm). O campo inferior permite ajustar o brilho da luz monocromática amarela (590nm) e é denominado de campo de teste (adaptada de Schwartz, 2010). 61
- Figura 47 | Representação no diagrama cromático CIE 1931 dos primários utilizados no anomaloscópio de Nagel. Os primários que constituem a equação de Rayleigh ($R(670) + G(546) = Y(590)$) estão sobre uma linha de confusão comum aos deuteranómalos e aos protanómalos. Os primários utilizados na equação de Moreland estão sobre uma curva ($B(436) + G(490) = Cyan(480) + Y(589)$) o que torna mais difícil equalizar ambos os campos de teste (adaptada de Schwartz, 2010). 62
- Figura 48 | Representação dos resultados obtidos pelo anomaloscópio de Nagel. A linha verde mostra que tanto os deuteranómalos como os deuteranopes conseguem igualar o brilho do campo de teste, mas não conseguem igualar em cor o campo de mistura. A linha a vermelho indica que tanto os protanómalos como os protanopes não conseguem igualar os campos em brilho ou em cor (adaptada de Schwartz, 2010). 63
- Figura 49 | Representação do estímulo usado na experiência e o correspondente ângulo visual em graus. O fundo a cinzento representa a área total visível, com discos de tamanho variável e valores de luminância

- aleatórios. A área representada a amarelo é o estímulo de teste. O objetivo deste teste é indicar a posição do estímulo de teste. 66
- Figura 50| Representação das 20 tonalidades utilizadas (quadrados cinzentos) e a cor de fundo (círculo cinzento escuro), exibidas no digrama CIE 1976 UCS (u' , v'). 67
- Figura 51| Resposta típica de um observador durante a experiência assumindo uma condição de 2AEF (duas alternativas de escolha forçada) num procedimento em escada. A linha a azul representa as 25 vezes que o alvo foi mostrado. A linha a verde representa as últimas 15 respostas que serviram para estimar o limiar de discriminação. 68
- Figura 52| Distribuição de frequências dos limiares de discriminação para observadores normais. Em ambas as figuras é possível visualizar que as distribuições para as variáveis RCL estático e RCL dinâmico são assimétricas ou enviesadas, pois o pico está desviado para a esquerda. 72
- Figura 53| Distribuição de frequências dos limiares de discriminação para os observadores protanómalos. Em ambas as figuras é possível visualizar que as distribuições para as variáveis RCL estático e RCL dinâmico são assimétricas ou enviesadas, pois o pico está desviado para a esquerda. 74
- Figura 54| Distribuição de frequências dos limiares de discriminação para os observadores deuteranómalos. Em ambas as figuras é possível visualizar que as distribuições para as variáveis RCL estático e RCL dinâmico são assimétricas ou enviesadas, pois o pico está desviado para a esquerda. 76
- Figura 55| (A) Média dos limiares de discriminação para um observador normal nas duas condições de RCL. Os círculos preenchidos a azul e a vermelho correspondem à condição de teste de RCL estático e dinâmico, respetivamente. Os quadrados cinzentos representam as 20 tonalidades testadas (em que o quadrado cinzento no centro representa a cor de fundo). A linha a azul e a vermelho representam as elipses ajustadas aos dados para um único observador normal na condição de RCL estático e RCL dinâmico, respetivamente. A figura apresentada no canto superior direito representa os mesmos dados que a figura principal, ampliada para melhor visualização. (B) Distância das médias dos limiares de discriminação de cada uma das 20 tonalidades ao branco de fundo para as duas condições de RCL e para todos os observadores normais. 78
- Figura 56| (A) A elipse a azul, os quadrados cinzentos e a elipse a vermelho representam os mesmos dados da Figura 55 A, só que desta vez para um único observador protanómalo e um deuteranómalo, nas duas condições de RCL. Nesta figura é visível o alongamento de um dos eixos da elipse, mostrando valores de limiares de discriminação maiores que no observador normal, em direções específicas. A tonalidade 1 corresponde ao quadrado cinzento representado na figura às 12 horas e continua para a tonalidade 2 no sentido contrário ao movimento dos ponteiros do relógio (a tonalidade 2 corresponde às 11 horas). (B) As barras do histograma representam a média da distância euclidiana a que cada tonalidade se encontra do branco de fundo para ambas as condições de RCL e para todos os observadores protanómalos e deuteranómalos. No caso dos observadores protanómalos, as tonalidades que apresentam uma maior distância euclidiana ao branco

são as cores 6, 7 e 16. Por outro lado, nos observadores deuteranómalos as tonalidades que apresentam uma maior distância euclidiana ao branco são as tonalidades 5,6 e 15.	80
Figura 57 Média dos limiares de discriminação cromáticos para cada observador normal e nas duas condições de RCL. Não existem grandes diferenças nos limiares de discriminação cromáticos entre as duas condições de RCL para um observador normal.	81
Figura 58 Média das diferentes sessões de medida dos limiares de discriminação cromáticos para cada observador protanómalo e nas duas condições de RCL. As diferenças nos valores de discriminação cromática entre observadores pode dever-se à severidade da anomalia que cada um apresenta. Sendo assim, o observador PC apresenta uma anomalia mais severa que os outros dois e o observador SM apresenta uma anomalia mais ligeira. Verifica-se que a discriminação cromática tem tendência a melhorar com o RCL dinâmico para os observadores protanómalos, apesar dos diferentes graus de severidade na deteção do limiar de discriminação.	82
Figura 59 Média das diferentes sessões de medida dos limiares de discriminação cromáticos para cada observador deuteranómalo e nas duas condições de RCL. As diferenças nos valores de discriminação cromática entre observadores pode dever-se à severidade da anomalia que cada um apresenta. Sendo assim, o observador ES apresenta uma anomalia mais severa que os outros cinco e o observador JB apresenta uma anomalia mais ligeira. Verifica-se que a discriminação cromática tem tendência a melhorar com o RCL dinâmico nos observadores protanómalos, apesar dos diferentes graus de severidade na deteção do limiar de discriminação.	83
Figura 60 Resultados da média dos limiares de discriminação nas duas condições de teste e para os observadores normais e anómalos, incluindo todas as tonalidades analisadas. As barras a azul representam a condição de RCL estático e as barras a amarelo a condição de RCL dinâmico. Apenas nos observadores anómalos existe diferenças estatisticamente significativas ($p < 0.05$). As barras de erro representam o erro padrão da média.	84
Figura 61 Elipses de médias de limiares de discriminação cromática de 7 observadores normais (linhas a preto), 6 observadores deuteranómalos (linhas a verde) e 3 protanómalos (linhas a vermelho). As elipses a cheio foram obtidas com o sistema CAD, enquanto que, as linhas a pontilhado foram obtidos com o teste utilizado neste trabalho.	87
Figura 62 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste do anomaloscópio, num observador normal	105
Figura 63 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste do anomaloscópio, num observador deuteranómalo.	106
Figura 64 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste do anomaloscópio, num observador protanómalo.	107
Figura 65 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste CCT, para um observador normal.	108
Figura 66 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste CCT, para um observador deuteranómalo.	109

Figura 67 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste CCT, para um observador protanómalo.	110
Figura 68 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste CAD, para um observador normal.	111
Figura 69 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste CAD, para um observador deuteranómalo.	111
Figura 70 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste CAD, para um observador protanómalo.	112
Figura 71 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste F-Munsell 100 tonalidades, para um observador normal.	113
Figura 72 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste F-Munsell 100 tonalidades, para um observador deuteranómalo.	113
Figura 73 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste F-Munsell 100 tonalidades, para um observador protanómalo.	114
Figura 74 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste Ishihara, para um observador normal.	115
Figura 75 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste Ishihara, para um observador deuteranómalo.	116
Figura 76 Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste Ishihara, para um observador protanómalo.	117
Figura 77 Exemplo do resultado obtido, para um observador normal, após aplicação do teste de cor desenvolvido no Laboratório da Cor da UM.	118
Figura 78 Exemplo do resultado obtido, para um observador deuteranómalo, após aplicação do teste de cor desenvolvido no Laboratório da Cor da UM.	119
Figura 79 Exemplo do resultado obtido, para um observador protanómalo, após aplicação do teste de cor desenvolvido no Laboratório da Cor da UM.	120

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 E corresponde à energia do fóton; h é a constante de Planck (6.626×10^{-37} J/Hz); ν corresponde à frequência.	29
Equação 2 E corresponde à energia do fóton; h é a constante de Planck (6.626×10^{-37} J/Hz); c é a velocidade da luz (3×10^8 m/s); λ é o comprimento de onda.	29
Equação 3 Estas equações indicam como se pode obter as coordenadas cromáticas para o espaço (x, y) .	48
Equação 4 As duas equações indicam como obter as coordenadas cromáticas CIE 1976 UCS, através dos valores dos triestímulos XYZ.	50
Equação 5 Equação para o cálculo da distância euclidiana. A letra d indica o limiar de detecção; $u'1$ e $v'1$ são as coordenadas cromáticas referentes à tonalidade para um dado observador; $u'b$ e $v'b$ são as coordenadas cromáticas do branco e apresentam os seguintes valores: $u'b = 0,1947$ e $v'b = 0,4639$.	70

1. OBJETIVO E HIPÓTESE DE TRABALHO

É sabido que observadores normais podem utilizar outras pistas que não cromáticas para a detecção de estímulos cromáticos sobre fundos uniformes. A utilização de ruído de contraste de luminância e de estímulos cromáticos de diferentes dimensões permitem mascarar estas pistas, por forma a garantir que a detecção é realizada apenas recorrendo a pistas cromáticas (Birch, Barbur, & Harlow, 1992; Regan, Reffin, & Mollon, 1994). A existência de *software* capaz de identificar alterações da visão das cores normal, permite uma avaliação eficaz e detalhada da visão das cores e uma classificação da deficiência face ao seu grau de severidade, permitindo, assim, uma classificação da visão das cores necessária para certas atividades profissionais (J Barbur, M Rodriguez-Carmona, S Evans, & Milburn, 2009). O desenvolvimento, no Laboratório da Cor da Universidade do Minho, de um novo *software* de detecção de alterações à visão das cores normal, baseado em outros já apresentados (Ripamonti, Kalwarowsky, & Nardini, 2014), vem permitir testar os limites da discriminação cromática em vários tipos de observadores pela escalabilidade, flexibilidade e controlo que o *software* permite.

O objetivo deste trabalho foi testar a influência do ruído de contraste de luminância dinâmico (RCL) na discriminação cromática de observadores normais e anómalos, utilizando o *software* desenvolvido no Laboratório da Cor da UM, uma vez que, apenas este permite controlar os diferentes parâmetros necessários à realização da experiência. Os restantes testes de visão das cores disponíveis no mercado não permitem alterar parâmetros fundamentais como o RCL, a sua frequência ou tipo.

Pretendeu-se avaliar, utilizando um novo teste de visão das cores, o grau de discriminação cromática ao longo de 20 tonalidades de cor diferentes, comparando o limiar de discriminação cromática, para um mesmo observador, nas condições de RCL dinâmico e RCL estático. É esperado que a discriminação cromática seja afetada com a introdução de RCL dinâmico em observadores anómalos, algo que ainda não foi demonstrado.

2. INTRODUÇÃO

2.1. O sistema visual

2.1.1. Organização do globo ocular

O globo ocular é composto por três camadas principais: (1) Camada fibrosa, (2) Camada pigmentada vascular e (3) Camada nervosa (Malhotra, Minja, Crum, & Burrowes, 2011; Snell & Lemp, 1998; Willoughby et al., 2010).

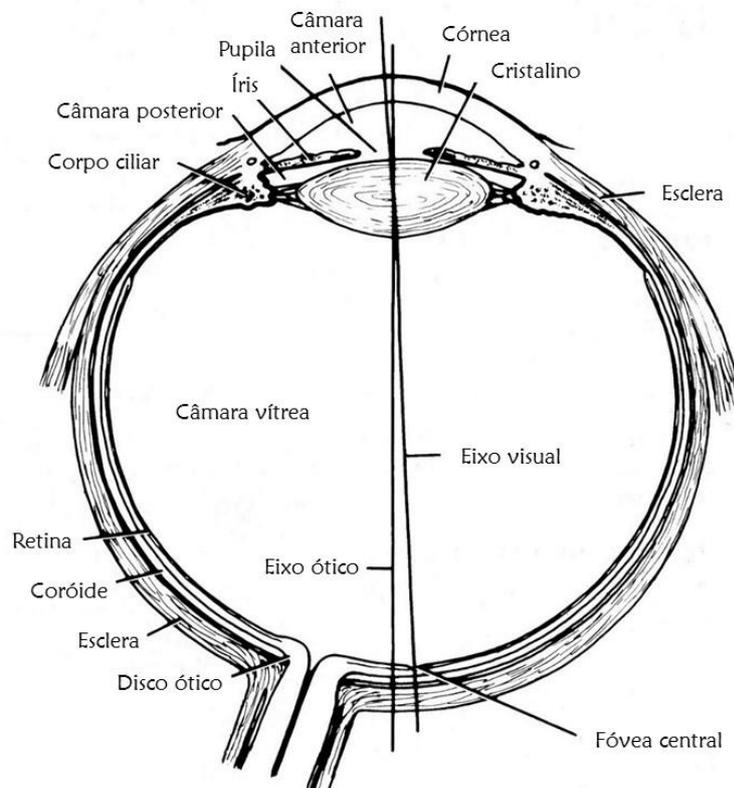


Figura 1 | Secção horizontal do olho direito (adaptada de Snell & Lemp, 1998).

Na Figura 1, o polo anterior do olho é o centro de curvatura da córnea. O polo posterior é o centro de curvatura do globo ocular e está localizado temporalmente em relação ao nervo ótico. Assim, pode-se definir o eixo ótico como uma linha que une estes dois polos, ou seja, uma linha que separa o globo ocular em duas partes iguais. O eixo visual é uma linha imaginária que une a fóvea central da retina com o ponto nodal do olho. Estes dois eixos não coincidem, dado que, a fóvea é uma depressão que se localiza temporalmente em relação ao eixo visual. O olho

também possui duas câmaras: a câmara anterior e a câmara posterior. Ambas as câmaras estão preenchidas com o humor aquoso e comunicam-se através da pupila (Snell & Lemp, 1998).

2.1.1.1. Camada Fibrosa

A camada fibrosa (camada mais externa) é constituída pela esclera, parte posterior e opaca, e a córnea, parte anterior e transparente (Malhotra et al., 2011; Snell & Lemp, 1998; Willoughby et al., 2010).

- A esclera é uma estrutura opaca, avascular, normalmente de tonalidade branca que suporta o globo ocular. Esta tonalidade pode variar com a idade. Nas crianças a esclera é mais fina e, como consequência, vai apresentar uma tonalidade azulada, dado que, as células pigmentares da coróide, camada subjacente, não conseguem ver-se. Por sua vez, nos adultos a esclera apresenta a tonalidade branca normal. Por fim, nos idosos é comum apresentar uma tonalidade mais amarelada, devido à formação de depósitos de gordura. Anatomicamente, a esclera estende-se desde o limbo (junção esclero-corneal) com uma espessura de cerca de 0.8mm, até ao nervo ótico onde já apresenta uma espessura de 1mm. Anteriormente, é coberta pela bainha fascial e a conjuntiva e, posteriormente, é coberta por tecido conetivo. Esta estrutura tem como principal função proteger o globo ocular das lesões e do deslocamento mecânico. Por ser uma estrutura firme e forte, a esclera juntamente com a pressão intraocular, preserva a forma do olho e mantém os diferentes constituintes do sistema ótico na posição correta (Snell & Lemp, 1998; Willoughby et al., 2010).
- A córnea é uma estrutura transparente e avascular responsável pela refração da luz que entra no olho: a córnea separa o ar, com um índice de refração de 1.00, do humor aquoso, com um índice de refração de 1.33. Esta estrutura está separada da esclera através do limbo esclero-corneal. De frente, a córnea é um menisco convexo, mas a sua forma é elíptica. Como é avascular, a córnea é nutrida pelo humor aquoso e nutrida por difusão através de vasos presentes no limbo e na conjuntiva palpebral superior. Quanto ao fornecimento de oxigénio, a córnea recebe oxigénio indiretamente através do oxigénio dissolvido no filme lacrimal, pelo humor aquoso e pelos vasos que a rodeiam. A córnea é uma das principais estruturas

responsáveis pela transmissão e refração da luz e, além disso, tem como função a proteção do olho contra os microrganismos (Snell & Lemp, 1998; Willoughby et al., 2010).

2.1.1.2. Camada pigmentada vascular

A camada pigmentada vascular (camada intermédia), também conhecida por úvea, é constituída pela íris, pelo corpo ciliar e a coróide (Malhotra et al., 2011; Snell & Lemp, 1998; Willoughby et al., 2010).

- A íris é um diafragma fino, contráctil e pigmentado que apresenta uma abertura central, a pupila (Malhotra et al., 2011; Snell & Lemp, 1998). A íris apresenta um diâmetro de 12 mm, no entanto, a pupila pode variar de 1 a 8mm de diâmetro. A capacidade da íris para controlar o tamanho pupilar (contraíndo e dilatando a pupila), permite-lhe controlar a quantidade de luz que atinge a retina. Assim, quando estamos num ambiente com pouca iluminação, a pupila fica dilatada ou em midríase. Por outro lado, quando estamos num ambiente com iluminação excessiva, a pupila encontra-se contraída ou em miose. Por último, durante a acomodação (da visão de longe para a visão de perto) a pupila também contrai restringindo a entrada de luz que atinge a parte central do cristalino, diminuindo, assim, as aberrações esféricas (Snell & Lemp, 1998; Willoughby et al., 2010).
- O corpo ciliar é contínuo, posteriormente, pela coróide e, anteriormente, com a margem periférica da íris. O corpo ciliar é responsável pela suspensão do cristalino, pela produção do humor aquoso (através da parte anterior do processo ciliar) e pelo processo acomodativo. Este último controla o músculo ciliar que durante o processo de acomodação, muda a forma do cristalino (Snell & Lemp, 1998; Willoughby et al., 2010).
- A coróide é uma camada vascular fina de cor castanha que reveste internamente a esclera. Pode ser dividida em 3 principais camadas: 1) camada de vasos, 2) camada capilar e 3) membrana de Bruch. Estende-se desde o corpo ciliar, anteriormente, até ao nervo ótico, posteriormente. A superfície mais externa da coróide é rugosa e está firmemente ligada à esclera, no entanto, a superfície interna é mais suave e está intimamente ligada ao epitélio pigmentar da retina (EPR),

através da membrana de Bruch. A principal função da coróide é nutrir as camadas mais externas da retina (Snell & Lemp, 1998; Willoughby et al., 2010).

2.1.1.3. Camada nervosa ou interna

A camada nervosa ou interna (camada mais interna) é composta pela retina (Malhotra et al., 2011; Snell & Lemp, 1998; Willoughby et al., 2010).

A retina é uma membrana fina, de cor alaranjada, constituída por células responsáveis pela captura e processamento da luz (Snell & Lemp, 1998; Willoughby et al., 2010). A sua superfície interna encontra-se em contacto com o humor vítreo e a sua superfície externa em contacto com a camada mais interna da coróide, a membrana de Bruch. Possui a sua espessura mínima no centro da fóvea. Deste modo, na zona central e posterior da retina, pode encontrar-se uma zona oval amarelada denominada de mácula lútea que dista cerca de 3.5mm do nervo ótico para o lado temporal (Malhotra et al., 2011; Snell & Lemp, 1998). No centro macular existe uma depressão conhecida por fóvea. É nesta área da retina que se obtém melhor resolução visual, pois, é a zona que possui maior densidade de cones (Snell & Lemp, 1998; Willoughby et al., 2010).

Uma das características mais extraordinárias da retina é a sua estrutura extremamente ordenada. Microscopicamente, a retina está decomposta em dez camadas, como representado na Figura 2. No entanto, não existem na realidade camadas, ou seja, os corpos celulares dos cinco tipos diferentes de células estão distribuídos em três camadas celulares e separados por dois estratos sinápticos onde as conexões são limitadas (Malhotra et al., 2011; Snell & Lemp, 1998).

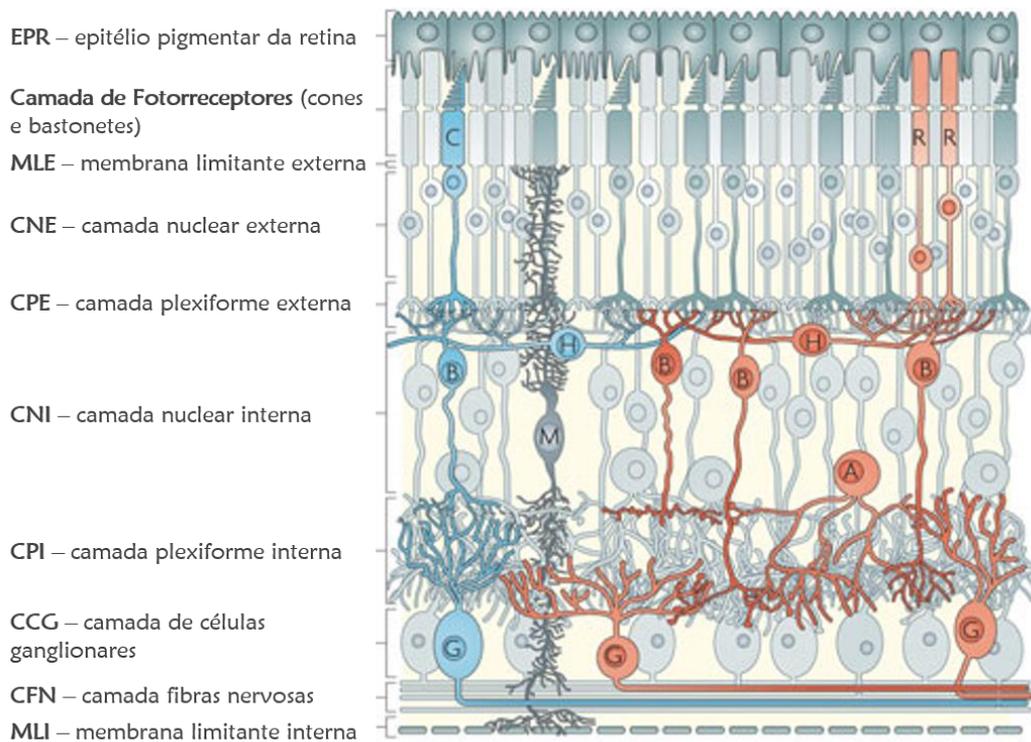


Figura 2 | Camadas e organização da retina: Cones (C), Bastonetes (R), células bipolares (B), células horizontais (H), células de Müller (M), células amácrinas (A) e células ganglionares (G) (adaptada de Swaroop, Kim, & Forrest, 2010).

Como ilustrado pela Figura 2, a primeira camada é o EPR seguida pela camada de fotorreceptores (C e R). Na camada nuclear externa (CNE) encontram-se os núcleos dos fotorreceptores. Os axónios dos fotorreceptores (C ou R) terminam na camada plexiforme externa (CPE) e também é aqui que as suas sinapses entram em contacto com as sinapses das células bipolares (B) e horizontais (H), ou seja, é um espaço onde existe transmissão de informação de umas células para as outras. A camada nuclear interna (CNI), além de conter os núcleos das células bipolares (B) e horizontais (H), possui também as células de suporte denominadas células de Müller (M) e as células amácrinas (A). As células bipolares (B) transmitem sinais elétricos para as células amácrinas (A) e ganglionares (G), através das sinapses que se encontram na camada plexiforme interna (CPI). Na camada de células ganglionares (CCG) encontram-se os núcleos das células ganglionares (G) e na camada de fibras nervosas (CFN) estão os axónios das mesmas. Por último, os axónios das células ganglionares (G) dirigem-se à cabeça do nervo ótico que, posteriormente, leva a informação até ao cérebro (Sung & Chuang, 2010; Swaroop, Kim, & Forrest, 2010; Willoughby et al., 2010).

No entanto, a retina pode ser dividida de forma simplificada em duas camadas principais (Malhotra et al., 2011):

- A camada externa pigmentada ou epitélio pigmentar da retina (EPR), consiste numa única camada de células cuboides epiteliais, com núcleos adjacentes à lâmina basal da coróide (membrana de Bruch), estrategicamente interposta entre a membrana de Bruch e a retina neural. Esta camada apresenta a função de transporte vetorial (água, íões, metabolitos, nutrientes e produtos residuais), regulando a composição do espaço sub-retinal e suportando as funções dos fotorreceptores e das outras células da retina neural. Uma célula do EPR suporta cerca de 30 a 50 fotorreceptores. Assim, o EPR desempenha diversas funções de suporte para a retina neural, como se pode observar pela Figura 3: (1) barreira seletiva para o sangue-retiniano (ao possuir junções apertadas funcionais), (2) absorção da luz difusa, (3) processamento retiniano e reciclagem (fundamental para o ciclo visual), (4) transporte vetorial de nutrientes e metabolitos (essencial para gerar o ambiente iónico ideal para que os fotorreceptores cumpram a sua função de deteção da luz), (5) mediador no processo de renovação dos segmentos externos dos fotorreceptores, ou seja, os fotorreceptores para manterem um comprimento mais ou menos constante, geram continuamente novos segmentos externos, libertando os segmentos maduros que, posteriormente, são eliminados através do processo de fagocitose efetuado pelo EPR (Lehmann, Benedicto, Philp, & Rodriguez-Boulan, 2014).

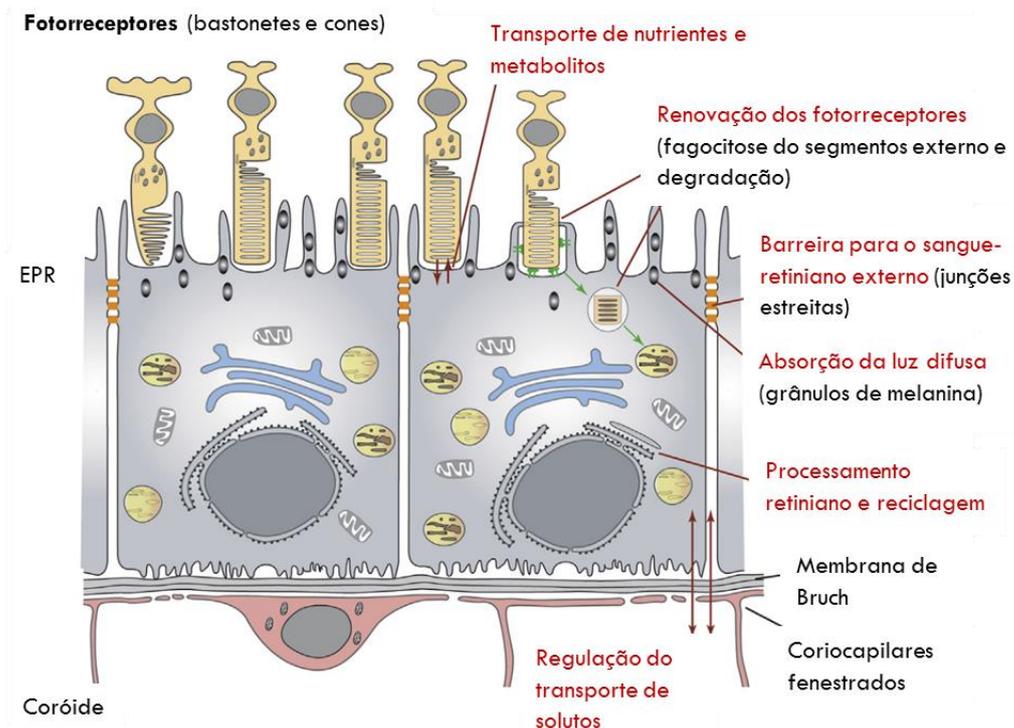


Figura 3 | Representação esquemática da retina externa e das funções de suporte do EPR (adaptada de Lehmann et al., 2014).

- A camada interna neuro-sensorial da retina subdivide-se em três grupos principais de células: (1) fotorreceptores, (2) células bipolares e (3) células ganglionares. Porém, existem outras células importantes como as células horizontais e as células amácrinas, que modulam a sua atividade, e as células de Müller que apresentam uma função de suporte (Snell & Lemp, 1998).

Existem dois tipos de fotorreceptores, os cones e os bastonetes, que são responsáveis pela transdução da luz (conversão da luz em sinais elétricos) (Snell & Lemp, 1998; Sung & Chuang, 2010; Willoughby et al., 2010). Os fotorreceptores encontram-se firmemente alinhados, paralelamente uns aos outros, no EPR (Kennedy & Malicki, 2009). Contudo, os seus nomes não estão atribuídos de uma forma aleatória, isto é, os nomes que lhes estão associados são baseados na forma da sua extremidade livre ou o seu segmento externo: nos cones o segmento externo tem uma forma cónica e nos bastonetes tem uma forma cilíndrica (Kennedy & Malicki, 2009; Snell & Lemp, 1998; Sung & Chuang, 2010). Os fotorreceptores não só diferem na sua forma, visto que, apresentam, também, diferentes distribuições na retina (E. Bruce Goldstein, 2013).

Como representado na Figura 4:

- A fóvea é constituída unicamente por cones, portanto, há uma total ausência de bastonetes nesta área;
- A parte periférica da retina, que inclui toda a área retiniana fora da fóvea, apresenta tanto cones como bastonetes;
- Os bastonetes aumentam muito rapidamente a sua densidade na periferia da retina, voltando a diminuir à medida que se aproximam do limite externo da retina. O mesmo acontece com os cones, desde o centro foveal até à periferia extrema, os cones vão diminuindo a sua densidade;
- Existe uma área na retina que possui uma total ausência de fotorreceptores (ilustrada pela barra castanha), visto que, é o local onde as células ganglionares deixam o olho para formar o nervo ótico. Esta área insensível à luz é denominada ponto cego e situa-se na cabeça do disco ótico (E. Bruce Goldstein, 2013; Snell & Lemp, 1998).

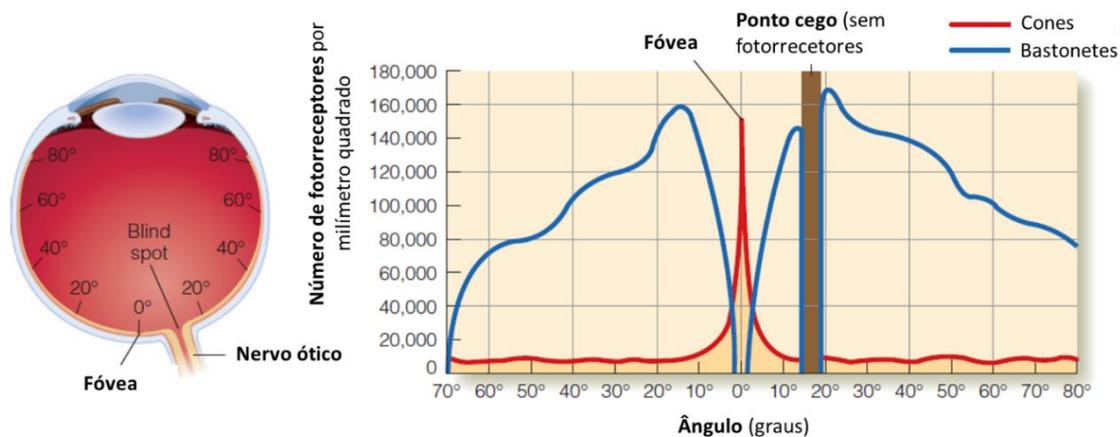


Figura 4 | Distribuição dos cones e dos bastonetes na retina do olho esquerdo. Tanto o olho que se encontra do lado esquerdo e o gráfico do lado direito da figura indicam as localizações dos fotorreceptores, em graus, relativamente à fóvea. A barra castanha representada no gráfico é o ponto cego e está situado a 20°, nasalmente à fóvea. O gráfico da direita indica que na fóvea há apenas cones e nenhum bastonete. Na restante retina há uma combinação dos dois tipos de fotorreceptores, em que a quantidade de bastonetes predomina face à dos cones (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

Existem aproximadamente 120 milhões de bastonetes e 6 milhões de cones, ainda que a sua densidade a nível da retina seja bastante variada (E. Bruce Goldstein, 2013).

A Figura 5 mostra que os fotorreceptores estão divididos em quatro compartimentos morfológicamente distinguíveis (desde o ápice até à base): o segmento externo, o segmento interno, o corpo celular (onde está localizado o núcleo) e o axónio/terminal sináptico (Kennedy & Malicki, 2009). Existe também um talo conector ou cílio conector que funciona como uma ponte

de ligação entre o segmento externo e o interno (Kennedy & Malicki, 2009; Sung & Chuang, 2010).

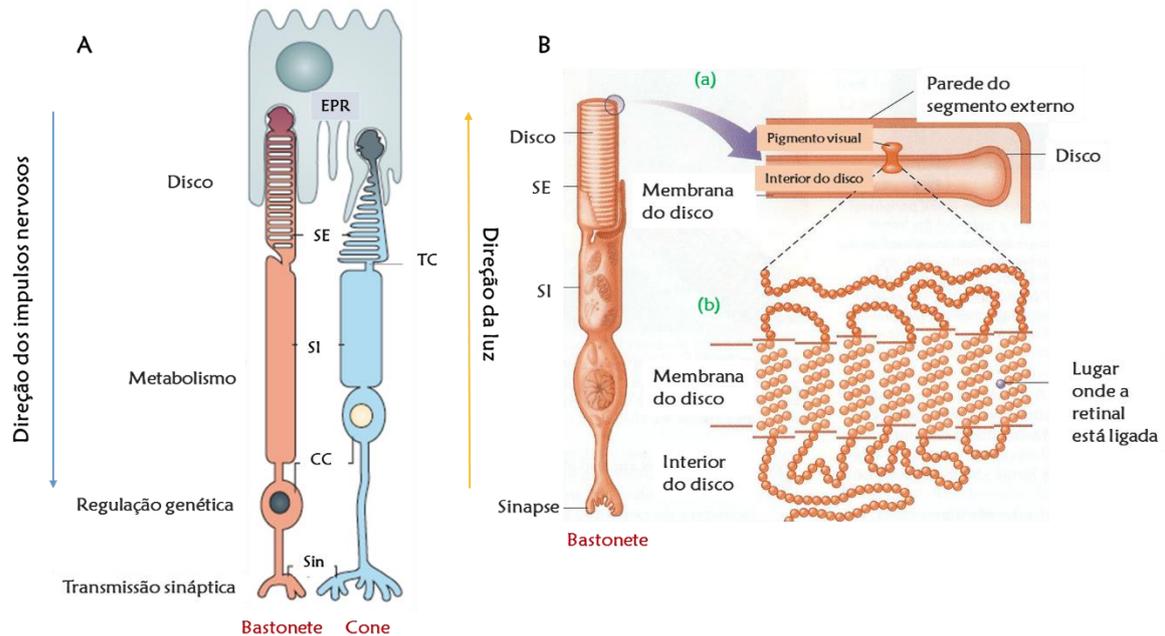


Figura 5| A. Constituição de um cone e de um bastonete: segmento externo (SE), segmento interno (SI), o talo ou cílio conector (TC), corpo celular (CC) – que possui o núcleo e axônio/terminal sináptico (Sin) (adaptada de Swaroop, Kim, & Forrest, 2010). B. Revelação dos discos no segmento externo de um bastonete, onde os discos internos empurram os discos externos para a extremidade do fotorreceptor. Em (a), ampliando, verifica-se que existe uma molécula de pigmento visual na membrana do disco. A imagem (b) mostra como a proteína opsina, numa molécula de pigmento visual, atravessa sete vezes a membrana do disco (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

A parte responsável pela ação dos fotorreceptores é o segmento externo (SE), pois, é nele que a luz é transformada em eletricidade (E. Bruce Goldstein, 2013; Kennedy & Malicki, 2009). Estes segmentos possuem discos achatados (membranas fotossensíveis), que se encontram dispostos perpendicularmente ao eixo do segmento externo e contêm moléculas de pigmento visual (E. Bruce Goldstein, 2013). Estas moléculas têm dois componentes: (1) uma longa proteína chamada opsina e (2) uma pequena molécula sensível à luz chamada retinal (E. Bruce Goldstein, 2013). A retinal é uma forma animal da vitamina A (Kennedy & Malicki, 2009). Resumidamente, a transdução (transformação da luz em impulso nervoso) ocorre quando a retinal liga-se à opsina como resposta a um estímulo luminoso, mais concretamente, quando absorve um fóton de luz (E. Bruce Goldstein, 2013). Quando a retinal absorve um fóton, esta muda a sua forma, resultando num processo chamado isomerização (E. Bruce Goldstein, 2013; Lamb & Pugh Jr, 2004).

Por último, cada fotorreceptor tem uma função distinta na captação da luz, ou seja, os cones estão adaptados à luz brilhante ou a ambientes fotópicos e permitem ver em grande detalhe e a cores, por outro lado, os bastonetes são os responsáveis pela visão noturna ou escotópica, produzindo imagens em vários tons de cinza (Snell & Lemp, 1998; Sung & Chuang, 2010).

2.1.2. Meios de refração do olho

Além da córnea e do humor aquoso, existem mais dois meios transparentes responsáveis pela refração dos raios luminosos que entram no olho: o cristalino e a câmara vítrea (que contém o humor vítreo) – ver Figura 6 (Snell & Lemp, 1998).

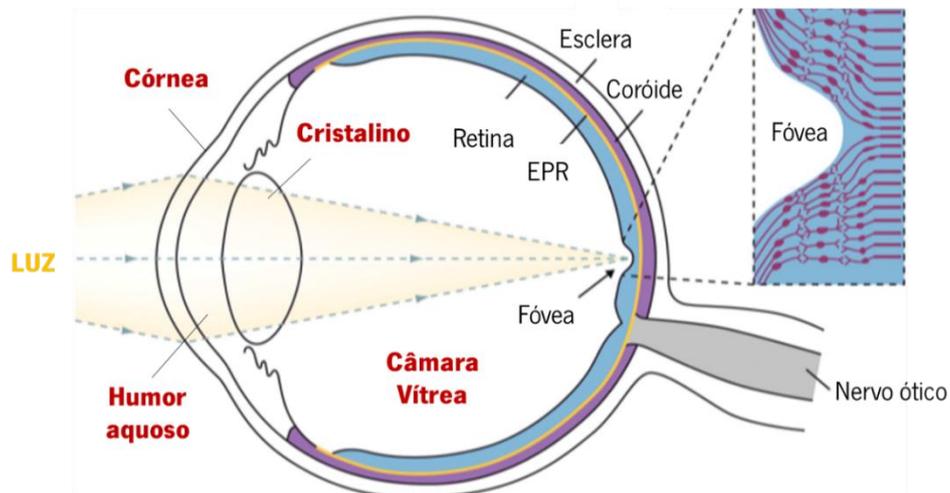


Figura 6 | Representação esquemática das principais estruturas responsáveis pela refração da luz, representadas a cor vermelha (adaptada de Sung & Chuang, 2010).

O cristalino é uma estrutura transparente, biconvexa, situada atrás da íris e à frente da câmara vítrea. Possui um poder dióptrico de cerca de 15D, contudo, o total do poder de refração do olho é cerca de 58D, sendo a córnea a responsável pela maior parte da refração. O cristalino altera a sua forma e ao alterar a sua forma também altera o seu poder dióptrico. Este altera a sua configuração, acomodando/contraindo, quando visualizamos um objeto ao perto e, desacomodando/relaxando, quando estamos a observar um objeto longínquo. Esta adaptação do cristalino às distâncias permite manter uma imagem nítida na retina, independentemente da distância a que esta se encontra. No entanto, com a idade, o cristalino vai-se tornando mais

denso e menos elástico e, como consequência, a capacidade para acomodar fica diminuída (condição conhecida por presbiopia) (Snell & Lemp, 1998).

Outro dos meios transparentes do nosso olho é a câmara vítrea, que é preenchida pelo chamado humor vítreo. O humor vítreo é um gel incolor e transparente, que possui um córtex mais denso e um centro mais líquido (Snell & Lemp, 1998). Este gel é constituído por 98% de água e apresenta um índice de refração semelhante ao do humor aquoso: 1.33 (Malhotra et al., 2011; Snell & Lemp, 1998). O humor vítreo tem como principal função transmitir a luz, porém, também contribui, embora pouco, para o poder refrativo do olho. Além disso, suporta a superfície posterior do cristalino e a retina, mantendo-a no seu sítio. Tal como o cristalino, também sofre alterações com o avançar da idade. É já durante a adolescência que o humor vítreo sofre uma alteração na sua composição: há uma diminuição do volume de gel e um aumento do volume de líquido. Este processo chamado de liquefação do humor vítreo, inicia-se no centro e progride para a periferia com o avanço da idade (Malhotra et al., 2011; Snell & Lemp, 1998).

2.1.3. Bases fisiológicas da percepção visual

O processo de perceber, visualmente, um objeto, desencadeia-se quando a luz refletida por um objeto/superfície atinge o olho, formando uma imagem do mesmo na retina. Esta luz refletida pelo objeto é transformada em sinais com significado biológico pelos fotorreceptores, como ilustrado na Figura 7. Este processo de transformação dos sinais luminosos em sinais elétricos é conhecido por transdução. Estes sinais elétricos viajam dos fotorreceptores até às células ganglionares através de redes de células, descritas na Figura 2. Este percurso não é “linear”, isto é, os sinais elétricos podem sofrer várias alterações ao viajar por esta rede de células (E. Bruce Goldstein, 2013).

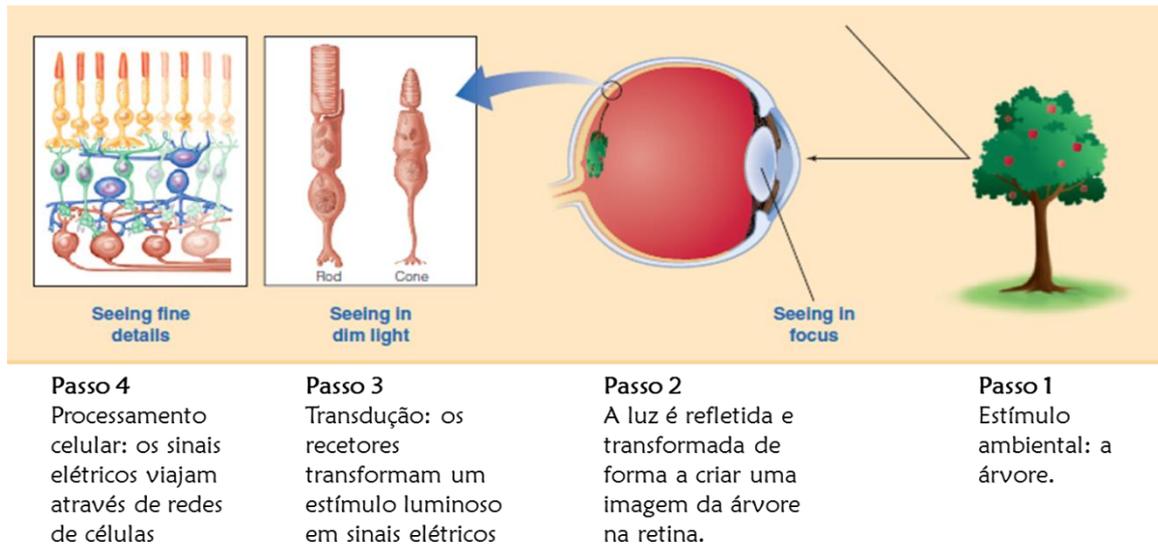


Figura 7 | Passos no processo de percepção visual (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

2.1.3.1. Convergência de sinal

Quando às escuras, no início apercebemo-nos que não conseguimos distinguir nada, mas com o tempo os nossos olhos começam a adaptar-se ao ambiente, neste caso, os nossos bastonetes, e passamos a distinguir o que nos rodeia. Nestas condições de iluminação (escotópica), os bastonetes são mais sensíveis que os cones, pois conseguem detetar estímulos luminosos fracos, necessitando apenas de pouca luz para gerar uma resposta (E. Bruce Goldstein, 2013). É um processo denominado de adaptação ao escuro. Como já foi abordado, a visão dos bastonetes é em tons de cinza e é muito fraca em detalhes. Mas, porque é que os bastonetes são mais sensíveis que os cones à luz fraca? Isto acontece devido a um fenómeno conhecido por convergência. A convergência ocorre quando muitas sinapses de células enviam sinais para uma única célula, mais concretamente, quando temos muitos bastonetes a convergirem para uma única célula ganglionar. Exemplificando, seria de esperar que devida à quantidade de cones relativamente à dos bastonetes que em média (E. Bruce Goldstein, 2013):



Devido ao reduzido número de cones comparativamente com os bastonetes, é de esperar que o número de cones que converge para uma única célula ganglionar também seja reduzido, porém, é necessário ter em consideração que este número não é fixo, pois, varia da fóvea para a periferia. Uma maior convergência dos sinais provenientes dos bastonetes provoca uma maior sensibilidade, como representado pela Figura 8. Em que aspeto a falta de convergência afeta os cones? A fóvea, por sua vez, só possui cones e estes encontram-se compactados. Os cones foveais possuem uma particularidade: usufruem de “linhas privadas” para as células ganglionares, ou seja, uma célula ganglionar recebe sinal de um único cone, sem convergência, resultando numa maior resolução. Esta ausência de convergência resulta num maior detalhe ou definição por parte dos cones, visto que, um sistema com grande convergência nunca pode ter grande resolução. A maior convergência nos bastonetes em relação aos cones origina duas importantes diferenças na percepção: (1) maior sensibilidade nos bastonetes e (2) maior detalhe nos cones. A convergência resulta numa maior sensibilidade e numa pobre acuidade visual, porém, uma menor convergência resulta numa menor sensibilidade e numa maior acuidade visual (capacidade de ver detalhes) (E. Bruce Goldstein, 2013).

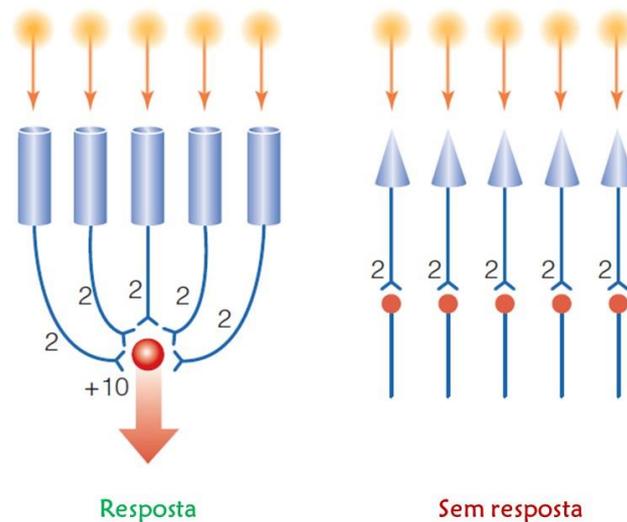


Figura 8| A mesma quantidade de luz provoca uma maior sensibilidade nos bastonetes face aos cones, pois, há um maior grau de convergência (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

A mesma quantidade de luz provoca uma maior resposta nos bastonetes, pois, há um maior grau de convergência. Como os bastonetes convergem tudo para uma única célula ganglionar, existe uma resposta por parte desta, pois, o que ela vai detetar é a soma dos sinais gerados pelos diferentes bastonetes. Quando há resposta da célula ganglionar a luz é percebida. O mesmo não acontece com os cones, dado que, a mesma quantidade de luz recebida por vários cones, não gera resposta na mesma célula ganglionar, pois, não há convergência. É necessário ter em atenção, que esta última afirmação só é válida para os cones foveais. Os bastonetes são mais sensíveis que os cones porque têm uma maior convergência, mas os cones têm uma melhor acuidade visual porque têm menos convergência (E. Bruce Goldstein, 2013).

2.1.3.2. Inibição lateral: como a atividade de uma célula pode diminuir a atividade de outra célula

A inibição da atividade de uma célula ocorre quando uma célula excitada liberta neurotransmissores inibitórios para outra célula (E. Bruce Goldstein, 2013). Para demonstrar como a inibição afeta a resposta de uma célula, foi feita uma experiência por Keffer Hartline, Henry Wagner e Floyd Ratliff em 1956, em que usaram o olho lateral de um animal primitivo chamado *Limulus polyphemus*. Escolheram este animal, dado que, a organização da sua retina é bastante mais simples que a apresentada na retina dos vertebrados e porque possui centenas de estruturas finas, denominadas ommatídias, que funcionam como um “único recetor”(Hartline, Wagner, & Ratliff, 1956). Cada ommatidia possui uma pequena lente na superfície que está localizada sobre um único recetor: cada lente e recetor possuem um

diâmetro igual a uma ponta de um lápis, tornando possível iluminar um único recetor sem correr o risco de iluminar os recetores vizinhos (E. Bruce Goldstein, 2013; Hartline et al., 1956).

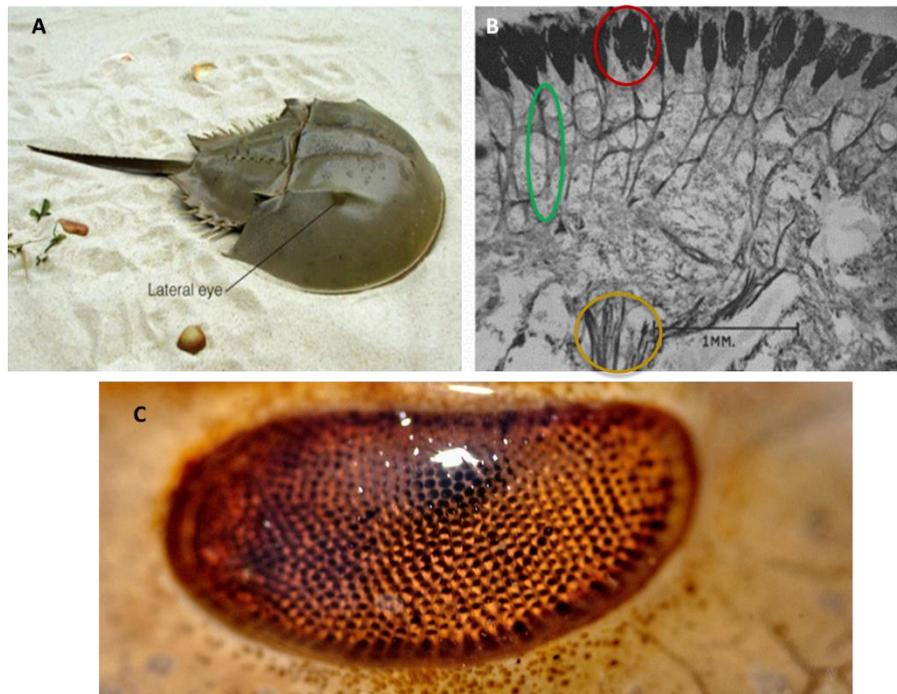


Figura 9| Olho lateral do *Limulus polyphemus* na imagem A (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013). Na imagem B, vemos a secção do olho lateral de um *Limulus* adulto, perpendicular à córnea, mostrando as porções pigmentadas da ommatidia ou recetores (rodeadas pelo círculo vermelho), os feixes de fibras nervosas que emergem dos recetores (rodeadas pelo círculo verde) e uma porção do nervo ótico (rodeada pelo círculo amarelo em baixo) (adaptada de Hartline et al., 1956). Por último, na imagem C, podemos ver em pormenor a córnea do olho lateral do *Limulus* em condições reais. Cada pontinho é uma ommatidia (adaptada de (<http://franslanting.photoshelter.com/image/I0000UFikNRp6Dro>, Frans lanting))

Com esta experiência, concluiu-se que ao iluminar um único recetor este respondia com a sua intensidade máxima, porém, ao iluminar os recetores vizinhos verificou-se que havia uma diminuição na intensidade da resposta do recetor inicial. Esta inibição é chamada de inibição lateral, visto que, é transmitida lateralmente ao longo da retina (E. Bruce Goldstein, 2013; Hartline et al., 1956).

No olho humano, quem transmite os sinais lateralmente na retina, são as células horizontais e as células amácrinas. Para uma melhor compreensão do papel da inibição lateral na percepção visual, ou seja, como esta última pode afetar o modo como percebemos com luz e no escuro, será apresentado um fenómeno que pode ser explicado pela mesma. A explicação de um fenómeno perceptual através da inibição lateral envolve a percepção de luminosidade – a percepção de tons que vão desde o branco, cinza ao preto.

Pode exemplificar-se este fenómeno através da grelha de Hermann, que é uma ilusão ótica (E. Bruce Goldstein, 2013).

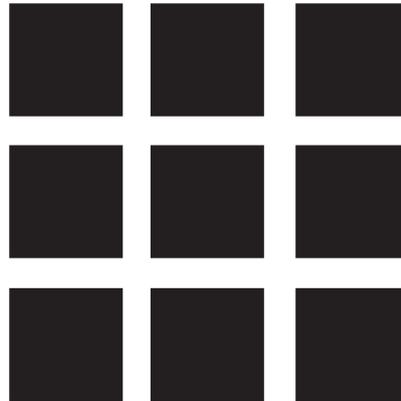


Figura 10| Grelha de Hermann. Notar os pontos cinzentos fantasma que aparecem na interseção dos corredores brancos. Se olharmos, diretamente, para a interseção do corredor branco podemos constatar que este ponto em tom cinza não se encontra fisicamente presente (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

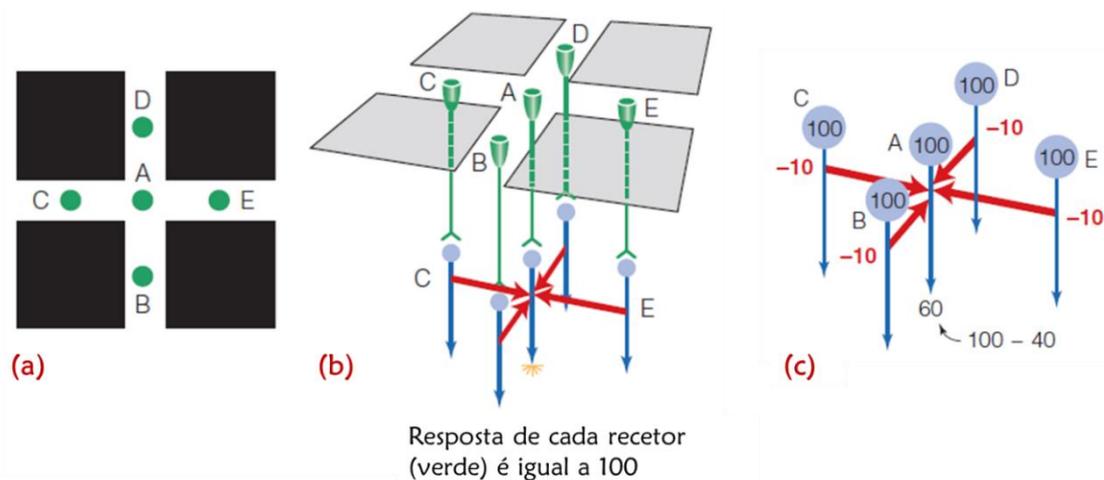


Figura 11| Na imagem (a), existem pontos verdes alfabetizados de A a E que são os recetores e encontram-se iluminados pelos corredores brancos. Na imagem (b), estão representados os cinco recetores e as respetivas células bipolares, exibidas pelas setas azuis. A resposta de cada recetor é 100, pois, estão os cinco sobre os corredores brancos. A resposta das células bipolares correspondentes é igual em valor à dos recetores adjacentes. A inibição lateral viaja para a célula bipolar A através das setas representadas a vermelho. Por último, na imagem (c), cada célula bipolar também possui uma resposta inicial de 100, assim, as células B, C, D e E enviam uma resposta inibitória para a célula A. Imaginando que, numericamente, a inibição enviada para a célula bipolar A, por cada uma das outras células, é cerca de 10, então, a inibição recebida pela célula bipolar A tem uma totalidade de 40. A resposta final da célula bipolar A, neste caso, vai ser de 60 ($100-40=60$) (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

Como representado pela Figura 11, na imagem (a), os pontos verdes alfabetizados de A a E, são os recetores e encontram-se iluminados pelos corredores brancos. Na imagem (b),

estão representados os cinco recetores e as respectivas células bipolares, exibidas pelas setas azuis. A resposta de cada recetor é 100, pois, estão os cinco sobre os corredores brancos. A resposta das células bipolares correspondentes é igual em valor à dos recetores adjacentes. A inibição lateral viaja para a célula bipolar A através das setas representadas a vermelho. Por último, na imagem (c), cada célula bipolar também possui uma resposta inicial de 100, assim, as células B, C, D e E enviam uma resposta inibitória para a célula A. Imaginando que, numericamente, a inibição enviada para a célula bipolar A, por cada uma das outras células, é cerca de 10, então, a inibição recebida pela célula bipolar A tem uma totalidade de 40. A resposta final da célula bipolar A, neste caso, vai ser de 60 ($100-40=60$), sendo essa área correspondente à área branca central, percebida como mais escura (E. Bruce Goldstein, 2013).

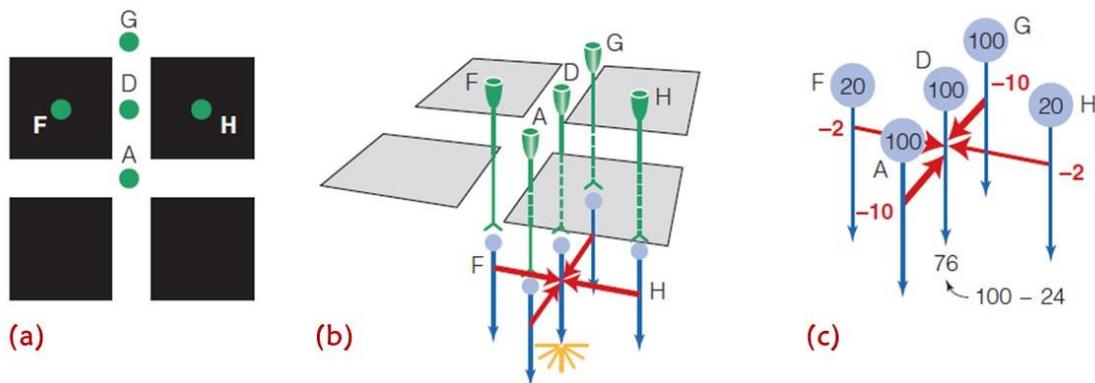


Figura 12| Na imagem (a), os recetores A, D e G estão situados no corredor branco e os recetores F e H estão situados nos quadrados pretos. O foco de interesse é o recetor D que está rodeado pelos recetores A, G, F e H. Porém, os recetores F e H como estão localizados sobre os quadrados pretos, recebem menos luz que os outros recetores. Na imagem (b) a resposta dos recetores A e G é 100, para cada um, e a resposta dos recetores F e H é de 20, cada um. Assim, na imagem (c), é possível verificar que a inibição lateral enviada à célula bipolar D é 20, para os recetores A e G, e 4, para os recetores F e H, dando um total de inibição de 24. Portanto, a resposta final da célula bipolar D é 76 ($100-24=76$) (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

Como representado pela Figura 12, na imagem (a), os recetores A, D e G estão situados no corredor branco e os recetores F e H estão situados nos quadrados pretos. O foco de interesse é o recetor D que está rodeado pelos recetores A, G, F e H. Porém, os recetores F e H como estão localizados sobre os quadrados pretos, recebem menos luz que os outros recetores. Na imagem (b) a resposta dos recetores A e G é 100, para cada um, e a resposta dos recetores F e H é de 20, cada um. Assim, na imagem (c), é possível verificar que a inibição lateral enviada à célula bipolar D é 20, para os recetores A e G, e 4, para os recetores F e H, dando um total de

inibição de 24. Portanto, a resposta final da célula bipolar D é 76 ($100-24=76$), não sendo percebido tão escuro (E. Bruce Goldstein, 2013).

Em conclusão, a intensidade de resposta das células bipolares vai depender da quantidade de estimulação direta, da estimulação proveniente do recetor adjacente e da quantidade proveniente da inibição lateral que recebe das células vizinhas. Como confirmado pelos exemplos anteriores, as células A e D recebem diferentes quantidades de inibição lateral. Isto acontece porque a célula A recebe inibição lateral de células que estão fortemente iluminadas pelos corredores brancos, e a célula D recebe inibição lateral de duas células (F e H) que estão sobre os quadrados pretos, resultando numa estimulação luminosa muito mais fraca. Contudo, a célula bipolar A recebe mais inibição lateral do que a célula bipolar D, portanto, a célula bipolar A vai ter uma resposta inferior à célula bipolar D (E. Bruce Goldstein, 2013).

2.1.3.3. Campos recetivos na retina: células ganglionares

Até agora, foi falado do processamento celular a nível das células retinianas, principalmente dos fotorreceptores. Verificou-se que o processamento celular envolvia interações entre as células, interações estas que afetavam a resposta das células que as precedem: convergência e inibição lateral. Assim, é fácil compreender que este processamento celular também irá afetar a resposta de uma única célula a níveis superiores do sistema visual (E. Bruce Goldstein, 2013).

As células da retina que recebem em último lugar a informação proveniente dos fotorreceptores são as células ganglionares. Os axónios das células ganglionares é que formam as fibras nervosas que se encontram no nervo ótico. Antes da experiência feita com o *Limulus*, Hartline entre 1938 e 1940, estudou o olho de um sapo. Esta experiência consistiu na isolação de uma única fibra do nervo ótico. Assim, Hartline constatou que, ao iluminar diferentes áreas da retina, esta fibra respondia unicamente quando uma pequena área da retina era iluminada, como representado pela Figura 13 (E. Bruce Goldstein, 2013).

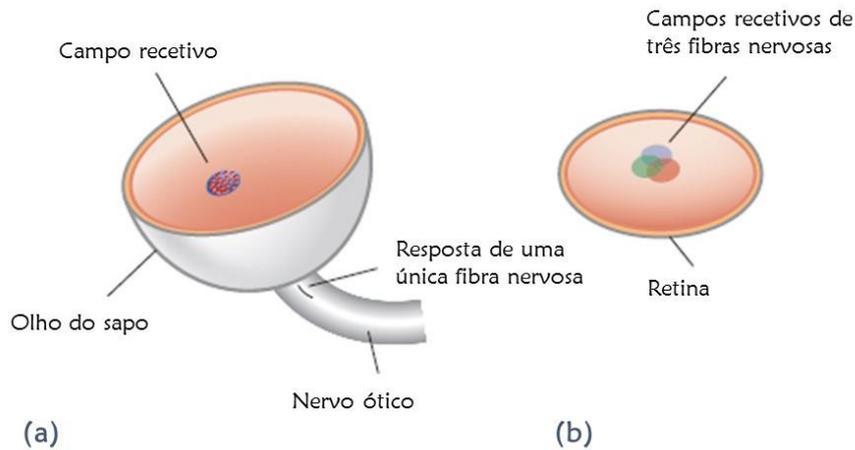


Figura 13| Experiência de Hartline. (a) Hartline determinou qual era a área da retina do sapo que provocava uma resposta na fibra nervosa que tinha isolado; (b) sobreposição de campos recetivos de três fibras nervosas (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

Esta pequena área é chamada de campo recetivo da fibra nervosa, ou seja, a área da retina que, quando iluminada, provoca uma resposta na atividade elétrica de uma célula. Hartline conclui com esta experiência: (1) que o campo recetivo de uma fibra nervosa cobre uma área muito superior à área ocupada por um único recetor, o que é lógico, pois, cada fibra nervosa recebe informação convergente de centenas ou mesmo milhares de recetores (cones e bastonetes); (2) os campos recetivos de várias fibras nervosas sobrepõem-se, ou seja, uma luz brilhante numa particular área da retina ativa várias fibras de células ganglionares (E. Bruce Goldstein, 2013).

Posteriormente, outros investigadores como Barlow em 1957, Hubel & Wiesel em 1965 e Kuffler em 1953, estudaram as retinas de gatos e macacos e descobriram mais uma característica dos campos recetivos: verificaram que os campos recetivos dos gatos tinham um centro e uma periferia que se comportavam de forma oposta, ou seja, o centro respondia à luz de uma forma diferente da periferia. Esta organização centro-periferia dos campos recetivos pode apresentar: (1) um centro excitatório e uma periferia inibitória ou (2) um centro inibitório e uma periferia excitatória (E. Bruce Goldstein, 2013).

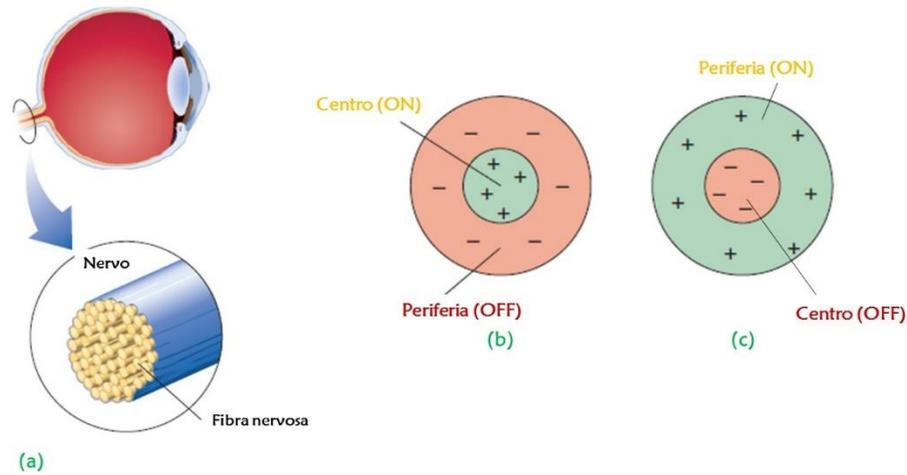


Figura 14 | (a) constituição do nervo óptico; (b) campo receptivo com centro-excitatório (ON) e periferia-inibitória (OFF); (c) campo receptivo com centro-inibitório (OFF) e periferia-excitatória (ON) (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

Em conclusão, as células respondem a específicos padrões de iluminação devido à organização dos seus campos receptivos (E. Bruce Goldstein, 2013). Como se pode verificar pela Figura 15, a intensidade de resposta de um neurónio atinge o seu máximo quando o estímulo luminoso apresentado é do tamanho do centro excitatório do campo receptivo. Por fim, pode incluir-se a inibição lateral e a convergência entre células, de forma a completar este processamento celular.

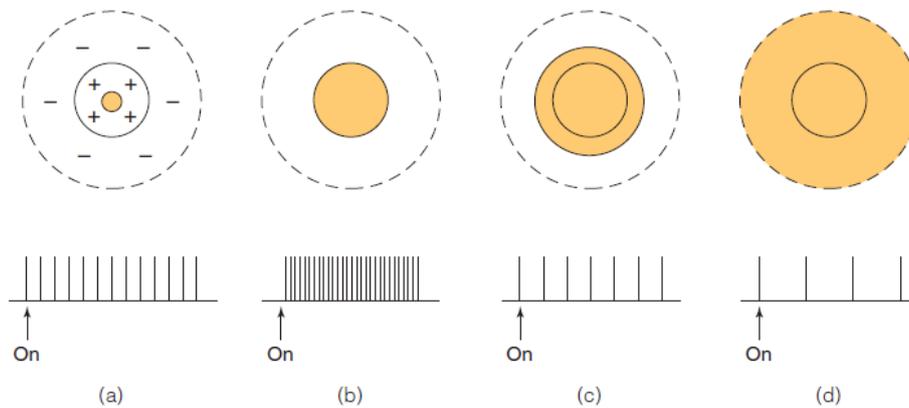


Figura 15 | Campo receptivo centro-excitatório (ON) e periferia-inibitória (OFF). (a) Quando um pequeno ponto de luz abrange parte do centro-excitatório do campo receptivo de uma célula, a intensidade de resposta desta aumenta; (b) se o tamanho do estímulo luminoso aumentar, por forma a tornar-se do tamanho do centro-excitatório do campo receptivo, a célula vai apresentar uma intensidade de resposta superior ao caso anterior, perfazendo, assim, o pico máximo de intensidade de resposta; (c) se esse estímulo continuar a aumentar de tamanho, este começa a abranger a área da periferia-inibitória do campo receptivo, resultando num decréscimo da intensidade de resposta da célula; (d) tal como a resposta de uma célula pode atingir um pico máximo de intensidade também pode atingir um mínimo, ou seja, se o estímulo luminoso compreender todo o campo receptivo de uma célula, a resposta dessa célula vai ser diminuída e,

portanto, nestas condições a célula vai apresentar o mínimo de intensidade de resposta possível (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

Na Figura 15, está representado um campo recetivo com centro-excitatório (ON) e periferia-inibitória (OFF). Na imagem (a), observa-se que, quando um pequeno ponto de luz abrange parte do centro-excitatório do campo recetivo de uma célula, a intensidade de resposta desta aumenta. Na imagem (b), verifica-se que se o tamanho do estímulo luminoso aumentar, por forma a tornar-se do tamanho do centro-excitatório do campo recetivo, a célula vai apresentar uma intensidade de resposta superior ao caso anterior, perfazendo, assim, o pico máximo de intensidade de resposta. Na imagem (c), observa-se que, se esse estímulo continuar a aumentar de tamanho, este começa a abranger a área da periferia-inibitória do campo recetivo, resultando num decréscimo da intensidade de resposta da célula. Por último, na imagem (d), verifica-se que, tal como a resposta da uma célula pode atingir um pico máximo de intensidade, também pode atingir um mínimo, ou seja, se o estímulo luminoso compreender todo o campo recetivo de uma célula, a resposta dessa célula vai ser diminuída e, portanto, nestas condições a célula vai apresentar o mínimo de intensidade de resposta possível (E. Bruce Goldstein, 2013).

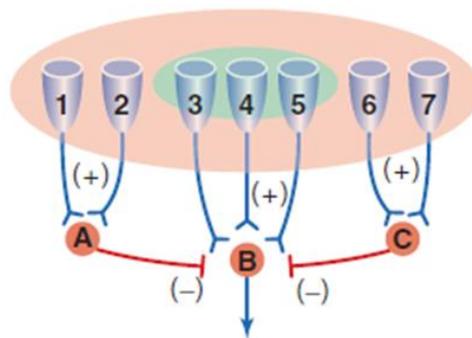


Figura 16| Campos recetivos, convergência e inibição lateral. Os recetores 3, 4 e 5 encontram-se no centro-excitatório do campo recetivo e os recetores 1, 2, 6 e 7 na periferia-inibitória. Os recetores 3, 4 e 5 encontram-se todos a convergir para a célula B, que, por sua vez, recebe inibição lateral proveniente das células A e C. Se o estímulo luminoso for do tamanho do centro do campo recetivo, este só engloba os recetores 3, 4 e 5. Estes recetores estão a enviar sinais convergentes para a célula B, portanto, a célula B vai atingir o máximo de intensidade de resposta possível, por exemplo 100%. No entanto, se o estímulo aumentar de tamanho e começar a abranger a área inibitória do campo recetivo, mais recetores vão entrar ao “barulho”, neste caso, os recetores 1, 2, 6 e 7, que, por sua vez, enviam sinais convergentes para as células A e C. Seguidamente, as células A e C, vão enviar sinais inibitórios para a célula B, diminuindo a sua intensidade de resposta para 60% (supondo que as células A e C transmitem uma inibição de cerca de 20%, cada uma, para a célula B) (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

Na Figura 16, estão incluídos os três conceitos até agora abordados: campos recetivos, convergência e inibição lateral. Os recetores 3, 4 e 5 encontram-se no centro-excitatório do campo recetivo e os recetores 1, 2, 6 e 7 na periferia-inibitória. Os recetores 3, 4 e 5 encontram-se todos a convergir para a célula B, que, por sua vez, recebe inibição lateral proveniente das células A e C. Se o estímulo luminoso for do tamanho do centro do campo recetivo, este só engloba os recetores 3, 4 e 5. Estes recetores estão a enviar sinais convergentes para a célula B, portanto, a célula B vai atingir o máximo de intensidade de resposta possível, por exemplo 100%. No entanto, se o estímulo aumentar de tamanho e começar a abranger a área inibitória do campo recetivo, mais recetores vão entrar ao “barulho”, neste caso, os recetores 1, 2, 6 e 7, que, por sua vez, enviam sinais convergentes para as células A e C. Seguidamente, as células A e C, vão enviar sinais inibitórios para a célula B, diminuindo a sua intensidade de resposta para 60% (supondo que as células A e C transmitem uma inibição de cerca de 20%, cada uma, para a célula B). Os valores percentuais representados são meramente ilustrativos e o número de recetores que abrange o campo recetivo de uma fibra nervosa é também meramente ilustrativo, já que o real é bem mais complexo e superior ao representado (E. Bruce Goldstein, 2013).

2.1.3.4. Processamento desde a retina ao córtex visual

Os fotorreceptores conectam-se com as células ganglionares através das células bipolares. Existe uma rede celular complexa constituída pelas células horizontais, localizadas entre os fotorreceptores e as células bipolares, e as células amácrinas, localizadas entre as células bipolares e as células ganglionares. As células bipolares têm como função agrupar, comparar e transmitir a informação proveniente dos fotorreceptores. As células horizontais e amácrinas assistem no agrupamento e comparação da informação recebida dos fotorreceptores (Yoonessi & Yoonessi, 2011). Assim, a informação gerada nos fotorreceptores é transmitida para as células bipolares que, por sua vez, transmitem a informação para as células ganglionares. As células ganglionares transmitem os sinais elétricos recebidos das células bipolares, através dos seus axónios que deixam o globo ocular, dando origem ao nervo ótico (Jeffries, Killian, & Pezaris, 2014). As fibras nervosas que abandonam o olho através do nervo ótico continuam até ao quiasma ótico onde se cruzam, viajando, seguidamente, ao longo da projeção ótica até chegarem ao NGL (núcleo geniculado lateral) (Jeffries et al., 2014). As células ganglionares da retina temporal e nasal projetam para locais distintos no NGL, ou seja, como representado na Figura 17 pela linha a vermelho, as células ganglionares da retina temporal projetam para o NGL

ipsilateral (isto é, do mesmo lado: as células ganglionares da retina temporal do olho direito enviam informação para o NGL que se encontra também do lado direito do cérebro) e as células ganglionares da retina nasal, como representado pela linha verde, projetam para o NGL contralateral (isto é, do lado oposto: as células ganglionares da retina nasal do olho direito enviam informação para o NGL que se encontra do lado esquerdo do cérebro) (Samuel G. Solomon & Lennie, 2007). Assim, conclui-se, que tanto o NGL direito como o esquerdo recebem informação dos dois olhos: as lâminas 2, 3 e 5 do NGL direito recebem informação visual proveniente do olho ipsilateral (olho direito) e as lâminas 1, 4 e 6 do olho contralateral (olho esquerdo) (Jeffries et al., 2014). Por último, o NGL envia a sua “mensagem” para o lobo occipital do córtex visual, que é a área que recebe a informação visual proveniente da retina e do NGL (E. Bruce Goldstein, 2013; Jeffries et al., 2014). Esta área é também conhecida por córtex visual primário ou V1 e desempenha um papel fundamental na perceção e cognição (E. Bruce Goldstein, 2013). Os axónios das células do NGL enviam quase exclusivamente informação para a área V1 (Samuel G. Solomon & Lennie, 2007).

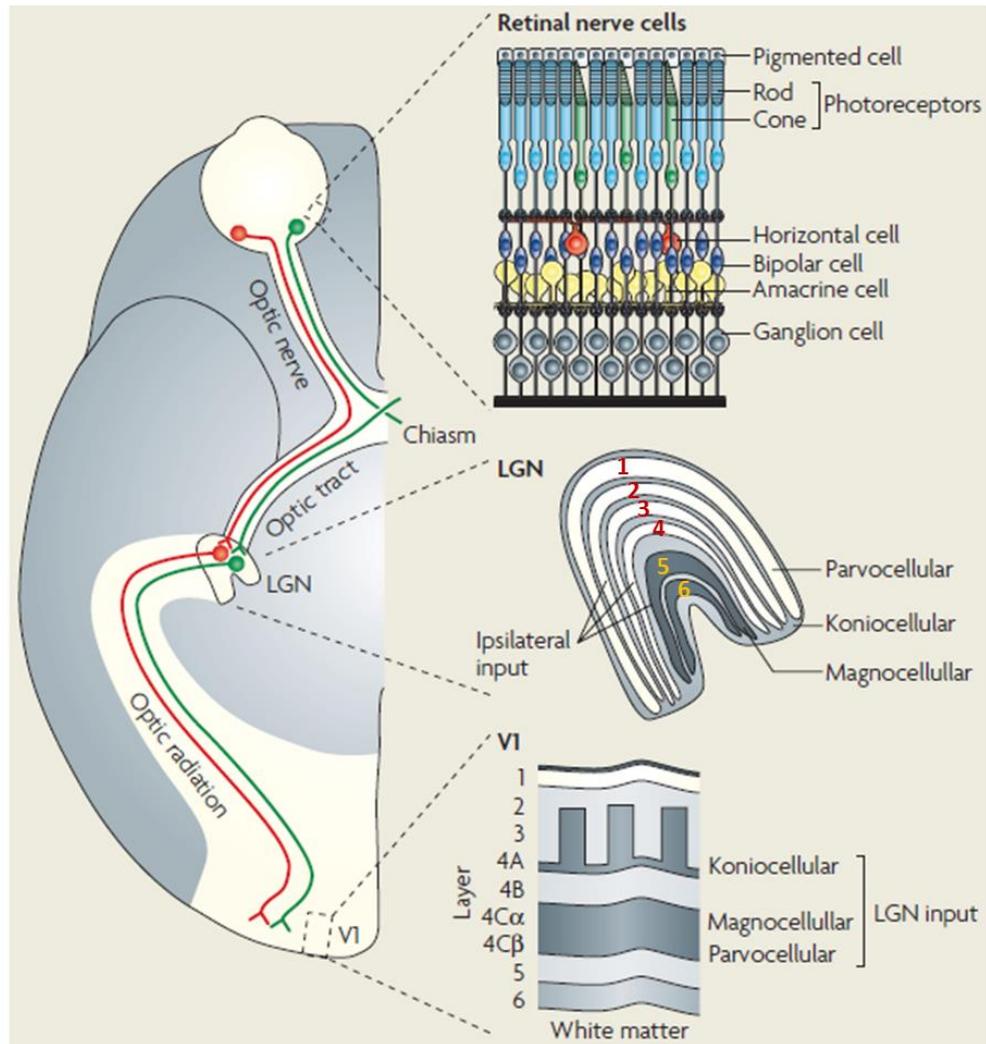


Figura 17 | Representação ventral do hemisfério direito do cérebro. A figura à esquerda mostra o caminho da informação visual desde a retina até ao córtex visual primário. Existem 6 lâminas diferentes no NGL: as lâminas de 1 a 4 são constituídas pelas células parvo (P), as lâminas 5 e 6 por células magno (M) e as células konio (K) preenchem o espaço entre as lâminas das células M e P. As células ganglionares da retina temporal e nasal projetam para locais distintos no NGL, ou seja, como representado pela linha vermelha, as células ganglionares da retina temporal projetam para o NGL ipsilateral e as células ganglionares da retina nasal, como representado pela linha verde, projetam para o NGL contralateral. Por último, os axónios das células do NGL enviam quase exclusivamente informação para a área V1. Pela análise da figura, verifica-se que existem 6 camadas principais na área V1. No entanto, os axónios das células P, M e K terminam unicamente na camada 4 da área V1. Os axónios das células P, M e K terminam em locais diferentes da camada 4, isto é, as células P projetam para a camada 4C β , as células M para a camada 4C α e as células K para a camada 4A e 3 (adaptada de Solomon & Lennie, 2007)

A maior parte da informação proveniente do olho vai para o NGL (cerca de 90%), mas cerca de 10% dos axónios das células ganglionares não enviam informação para o NGL (E. Bruce Goldstein, 2013). O NGL é uma estrutura pequena, bilateral e complexa que contém milhares de células (Jeffries et al., 2014). Através das suas experiências, Hubel e Wiesel em 1961, demonstraram que os campos recetivos do NGL apresentavam uma organização centro-periferia

e que estas áreas funcionavam de forma oposta (centro inibitório com periferia excitatória ou vice-versa), tal como os campos recetivos presentes na retina, mais concretamente, nas células ganglionares. A informação que é gerada nos fotorrecetores é comprimida e transferida para locais de processamento superiores através de três distintos tipos de células ganglionares: magno (M), parvo (P) e konio (K) (Yoonessi & Yoonessi, 2011). Estas células ganglionares que viajam da retina para o NGL e, posteriormente, para o córtex visual primário, apresentam características estruturais e funcionais distintas e estão organizadas em diferentes camadas no NGL e no V1 (Yoonessi & Yoonessi, 2011). O NGL pode ser, então, subdividido em três principais células que segregam a informação visual: as células magno (M), as células parvo (P) e as células konio (K), em que cada uma tem uma função e uma estrutura diferente (Jeffries et al., 2014; Sincich & Horton, 2005; Yoonessi & Yoonessi, 2011). As células M são as que apresentam maior tamanho (possuem campos recetivos maiores) e possuem axónios espessos e cobertos de mielina (a mielina aumenta a rapidez na transmissão dos impulsos nervosos) (Jeffries et al., 2014; Yoonessi & Yoonessi, 2011). Assim, como os seus axónios possuem mielina, estas células possuem uma maior velocidade de resposta a mudanças de estímulo (Sincich & Horton, 2005; Yoonessi & Yoonessi, 2011). As células M são tipicamente acromáticas (não processam cor) e agrupam informação dos bastonetes e de alguns cones (Jeffries et al., 2014; Yoonessi & Yoonessi, 2011). Esta riqueza na informação recebida pelas células M leva a que estas processem diferenças de luminosidade, processem movimento (devido à grande velocidade de resposta), possuam maior sensibilidade ao contraste e uma menor resolução espacial (Jeffries et al., 2014; Sincich & Horton, 2005). As células P, por outro lado, são células mais pequenas (possuem campos recetivos menores) que as células M e os axónios são mais finos e possuem pouca mielina (diminuição na velocidade de resposta) (Yoonessi & Yoonessi, 2011). Os campos recetivos das células P são sensíveis aos comprimentos de onda, mais especificamente, aos comprimentos de onda longos e médios (Jeffries et al., 2014). Apresentam uma baixa sensibilidade ao contraste e uma boa resolução espacial, o que lhes permite processar formas ou contornos (Sincich & Horton, 2005). As células P também são responsáveis pela codificação das cores oponentes (exemplo de um campo recetivo de uma célula P: vermelho no centro e verde na periferia) (Jeffries et al., 2014). Por último, as células K são células ainda mais pequenas que as células P e são as que se encontram em menor número no NGL (Yoonessi & Yoonessi, 2011). Estas células encontram-se intercaladas entre as lâminas de células P e M (Sincich & Horton, 2005). Respondem a comprimentos de onda curtos e os

campos recetivos possuem uma estrutura azul-excitatório (ON) ou azul-inibitório (OFF) (Jeffries et al., 2014; Yoonessi & Yoonessi, 2011). Contudo, para muitos investigadores, o termo konio tornou-se sinónimo de canal azul-amarelo e o termo parvo sinónimo de canal verde-vermelho (Sincich & Horton, 2005).

Pela análise da Figura 17, verifica-se que existem 6 camadas principais na área V1. No entanto, os axónios das células P, M e K terminam praticamente na camada 4 da área V1. A camada 4 também pode ser fragmentada em 4 camadas: 4A, 4B, 4C α e 4C β . Portanto, os axónios das células P, M e K terminam em locais diferentes da camada 4, isto é, as células P projetam para a camada 4C β , as células M para a camada 4C α e as células K para a camada 4A e 3 (Samuel G. Solomon & Lennie, 2007).

2.2. Da luz à cor

2.2.1. A luz como espectro eletromagnético

A visão do ser humano é excitada unicamente por uma pequena porção do espectro eletromagnético, porção esta conhecida por luz visível (E. Bruce Goldstein, 2013; Schwartz, 2010). A luz visível é uma banda de energia compreendida entre os 400 e os 700nm (1nm = 10⁻⁹m) do espectro eletromagnético (E. Bruce Goldstein, 2013; Samuel G. Solomon & Lennie, 2007). O espectro eletromagnético é formado por energia eletromagnética contínua produzida por cargas elétricas e radiada por ondas. A energia do espectro eletromagnético pode, então, ser descrita através do seu comprimento de onda, isto é, através da distância entre os picos das ondas eletromagnéticas. Assim, os comprimentos de onda do espectro eletromagnético podem ser curtos ou longos, dependendo da quantidade de energia que transportam (E. Bruce Goldstein, 2013).

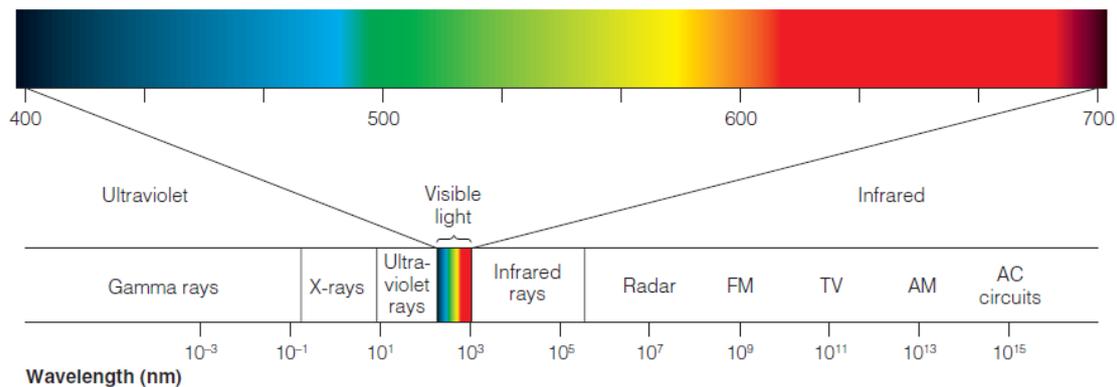


Figura 18 | Espectro eletromagnético. Dentro deste vasto espectro encontra-se uma pequena banda de energia, a luz visível (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

A radiação eletromagnética é formada por pequenos pacotes de energia denominados fótons (E. Bruce Goldstein, 2013; Schwartz, 2010). No entanto, a quantidade de energia que cada fóton de luz apresenta, pode ser dada através das seguintes equações (Schwartz, 2010):

$$E = h\nu$$

Equação 1 | E corresponde à energia do fóton; h é a constante de Planck (6.626×10^{-37} J/Hz); ν corresponde à frequência.

Ou,

$$E = hc/\lambda$$

Equação 2 | E corresponde à energia do fóton; h é a constante de Planck (6.626×10^{-37} J/Hz); c é a velocidade da luz (3×10^8 m/s); λ é o comprimento de onda.

Estas relações mostram que os fótons dos comprimentos de onda curtos apresentam maior quantidade de energia que os fótons de comprimento de onda longos. Logo, esta diferença carrega também algumas consequências, nomeadamente, para os tecidos oculares, visto que, os comprimentos de onda mais curtos, como são mais energéticos, produzem lesões quando absorvidos pelos mesmos (Schwartz, 2010).

Contudo, voltando ao espectro da luz visível, os comprimentos de onda estão associados à percepção de diferentes cores, ou seja, a cor que uma determinada radiação monocromática apresenta, depende da composição do seu comprimento de onda (E. Bruce Goldstein, 2013; Schwartz, 2010). Assim, os comprimentos de onda curtos aparecem azuis, os comprimentos de onda médios aparecem verdes e os longos aparecem vermelhos (E. Bruce Goldstein, 2013).

2.2.2. História da visão das cores

Ao longo dos anos, vários cientistas famosos procuraram explicar os fenômenos envolvidos na percepção das cores. Cientistas como Newton, Young, Helmholtz e Hering demonstraram e propuseram teorias que contribuíram em grande parte para a evolução do conhecimento que tem sido feito na interpretação da visão das cores.

Newton, com o intuito de investigar a composição da luz branca, executou três experiências através de um prisma (como representado na Figura 19) (Newton, 1718):

1. Decomposição da luz solar através de um prisma (Figura 19 A): na primeira experiência, Newton mostrou que um feixe de luz solar branco se decompunha em várias cores ao atravessar um prisma. Isto acontece devido ao facto de diferentes cores apresentarem diferentes índices de refração;
2. Recomposição da luz solar através de um segundo prisma (Figura 19 B): com esta experiência demonstrou que o processo de decomposição é reversível, isto é, ao colocar um prisma invertido a luz colorida é novamente recombinação, resultando na luz branca tal e qual à inicial;
3. Decomposição sucessiva da luz solar (Figura 19 C): por último, nesta experiência, Newton isolou uma dada cor monocromática (com um determinado comprimento de onda), por exemplo, o vermelho, e verificou que esta por si só não se decompunha mais ao atravessar novamente um prisma.

Com estas experiências, Newton concluiu que a luz branca é uma mistura de todas as cores, associou refração com cor e constatou que uma cor monocromática não se decompõe (Newton, 1718).

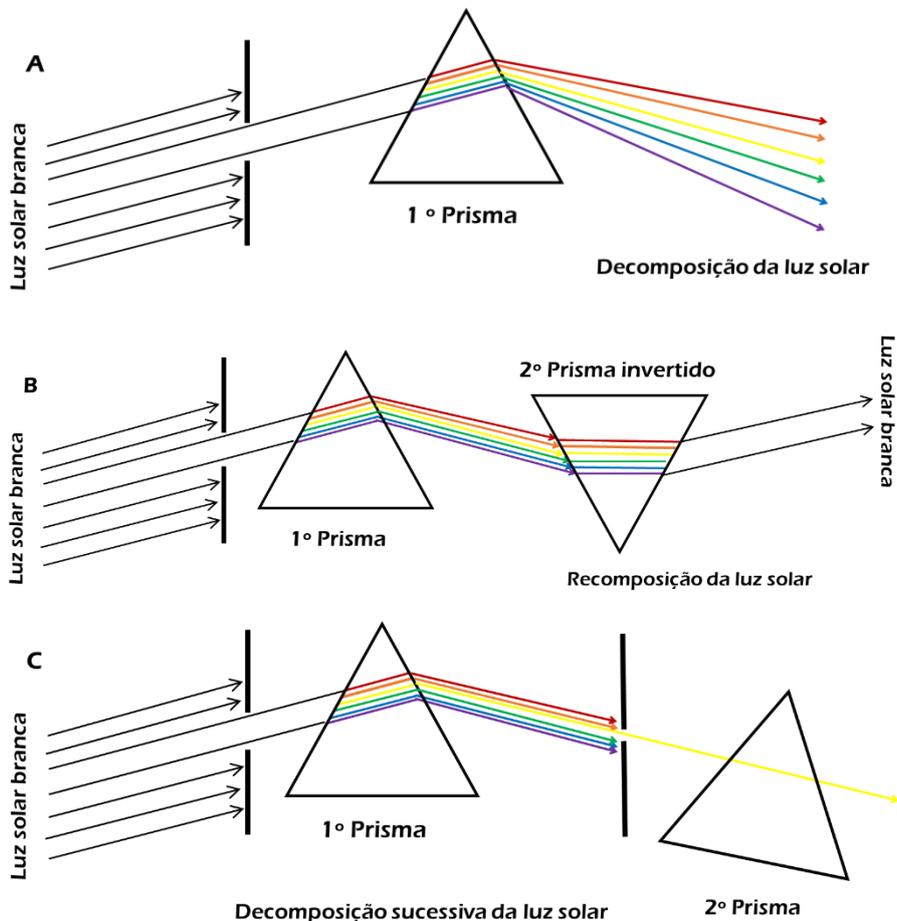


Figura 19| Representação das três experiências de Newton com prismas. Na figura A está representada a decomposição da luz solar através de um prisma; na figura B a recomposição da luz solar através de um prisma invertido; na figura C a decomposição sucessiva da luz solar (adaptada de Newton, 1718).

Em 1777, *George Palmer* no seu livro *“Theory of colours and vision”*, sugeriu a ideia de três sensores na retina: *“A superfície da retina é composta por três diferentes tipos de partículas, análogo aos três raios de luz”*. *George* considerava os fotorreceptores como partículas, pois, um detetor de luz só poderia ser uma partícula para conseguir vibrar com as ondas eletromagnéticas. Sugeriu também que a vibração completa e uniforme das três partículas produziam a sensação de branco (Palmer, 1777).

Young, por sua vez, desenvolveu a teoria ondulatória da luz, introduziu o princípio da interferência e propôs a teoria tricromática da visão das cores, sugerindo que existiam três elementos sensíveis à luz correspondentes às três cores principais: o vermelho, o amarelo e o azul. Defendia que existiam três elementos sensíveis à luz e que a sensação de cor resultava da estimulação diferencial dos mesmos; cada elemento sensitivo respondia a todos os estímulos, embora, mais ou menos intensamente, consoante o tipo de estímulo presente (Young, 1802).

Mais tarde, Helmholtz desenvolveu e divulgou a teoria tricromática de Young, explicando que na retina do olho humano existiam três tipos de fibras nervosas, que respondiam, mais ou menos intensamente, a uma dada radiação, consoante a sua composição espectral. Corrigiu a teoria de Young e defendeu que as três fibras nervosas correspondiam às três principais cores da luz: vermelho, verde e azul. Assim, existia uma fibra nervosa sensível aos comprimentos de onda longos, outra sensível aos comprimentos de onda médios e outra sensível aos comprimentos de onda curtos. Realizou também um esboço das curvas de sensibilidade para cada tipo de cone, sendo a primeira curva respetiva ao cone sensível no vermelho, a segunda curva respetiva ao cone sensível no verde e a terceira curva respetiva ao cone sensível no azul – ver Figura 20. Estas curvas revelam a resposta de todos os cones para todos os comprimentos de onda, sendo mais ou menos intensa a sua resposta, consoante o tipo de cone e o tipo de radiação que se esteja a considerar, isto é, o cone sensível no verde responde a quase todas as cores, porém a sua vibração é maior nos comprimentos de onda médios (Helmholtz, 1860). Esta teoria de natureza tricromática (três recetores) da visão das cores assumia que eram transmitidas ao cérebro três imagens distintas do mundo, formadas pelos três recetores e que, posteriormente, o cérebro comparava esses sinais de forma a obter a aparência da cor (Fairchild, 2005).

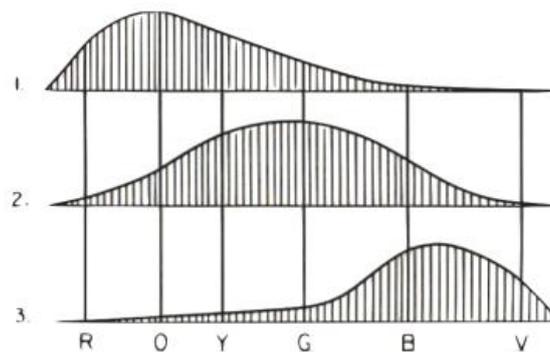


Figura 20 | Curvas de sensibilidade dos cones calculadas por Helmholtz (adaptada de Helmholtz, 1860).

Por último, Hering propôs a teoria dos canais oponentes baseada em observações subjetivas, - aparência das cores, contraste simultâneo, pós-imagens (a pós-imagem do vermelho é o verde) e deficiências na visão das cores - observações estas que não conseguiam ser explicadas pela teoria tricromática (Fairchild, 2005). Esta ideia surgiu, então, em contradição à teoria tricromática, visto que, esta última não conseguia explicar a aparência das cores, ou seja,

o porquê de o verde e o vermelho ou o azul e amarelo não aparecerem simultaneamente na mesma cor (por exemplo, não existirem verdes avermelhados ou azuis amarelados) (E. Bruce Goldstein, 2013; Fairchild, 2005; Schwartz, 2010). Hering explicava os resultados da mistura das cores, assumindo que deveriam existir três canais oponentes: o canal vermelho- verde (R-G), o canal azul- amarelo (B-Y) e o canal branco-preto (W-B) – ver Figura 21 (E. Bruce Goldstein, 2013; Schwartz, 2010).

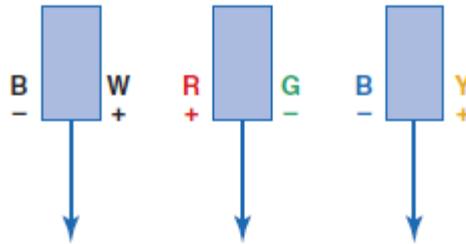


Figura 21 | Os três canais oponentes propostos por Hering. O canal Preto (-) e Branco (+) responde positivamente a luz branca e negativamente na ausência de luz. O mesmo acontece para os outros dois canais, ou seja, o canal vermelho (+) e verde (-) responde positivamente a vermelho e negativamente a verde, e o canal azul (-) e amarelo (+), responde positivamente ao amarelo e negativamente ao azul (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

O canal oponente R-G (vermelho-verde) consegue produzir ou só vermelho ou só verde, mas nunca verde e vermelho simultaneamente. O mesmo acontece para o canal B-Y (azul-amarelo) (Schwartz, 2010).

A descoberta de células que respondem de forma oposta na retina e NGL providenciaram evidências fisiológicas para a teoria dos canais oponentes (E. Bruce Goldstein, 2013; Fairchild, 2005): Svaetichin em 1958, através das suas medições eletrofisiológicas na retina de um peixe, descobriu a existência de sinais oponentes; DeValois em 1993 descobriu respostas fisiológicas oponentes semelhantes às da retina, nas células do LGN de um macaco (Stockman, 2009); Jameson e Hurvich em 1955, através das suas experiências de cancelamento da cor, mediram as sensibilidades relativas dos canais oponentes em observadores humanos – ver Figura 22 (Schwartz, 2010).

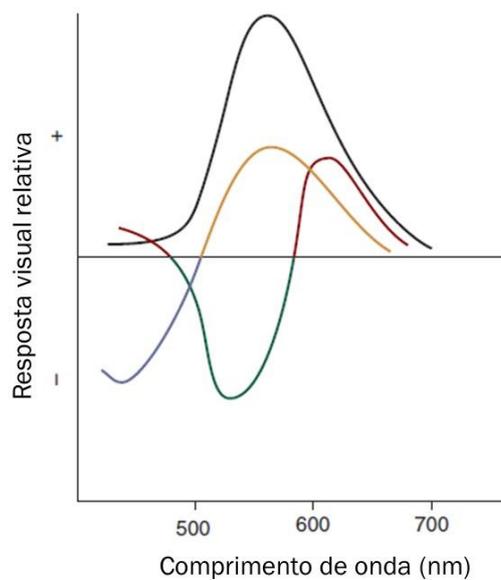


Figura 22 | Representação aproximada dos canais oponentes R-G, B-Y e W-B propostos por Jameson & Hurvich em 1955 (adaptada de Schwartz, 2010).

Todas estas experiências e outras mais levaram ao desenvolvimento da teoria moderna da visão das cores. Se, anteriormente, a teoria tricromática e a teoria dos canais oponentes contradiziam-se, atualmente, ambas são aceites, pois, as descobertas alcançadas a nível psicofísico, tendo como base cada uma das teorias, revelaram que a atividade fisiológica que cada uma suporta ocorre em diferentes locais do sistema visual (E. Bruce Goldstein, 2013; Fairchild, 2005). A teoria moderna da visão das cores inclui tanto a teoria dos canais oponentes como a tricromática e é denominada de teoria das fases ou zonas (Fairchild, 2005). Segundo esta teoria, os mecanismos responsáveis pela aparência da cor encontram-se na segunda fase ou zona, denominada de fase pós-recetores (Stockman, 2009). O processamento da cor é iniciado nos fotorreceptores que se encontram na primeira fase, particularmente, nos cones. Posteriormente, os sinais gerados pelos cones são transmitidos para as células da retina adjacentes e, mais tarde, das células da retina para o cérebro (Fairchild, 2005). O modelo de duas fases foi proposto por Boynton em 1960. Este modelo referia a existência de dois canais cromáticos, o L-M e o S- (L+M), e um canal acromático (L+M). Na primeira fase do processamento da cor, ocorre a deteção de um estímulo luminoso pelos cones e na segunda fase ocorre a interação dos sinais provenientes de cada cone. Na Figura 23, observa-se que o cone S não contribui para o canal acromático, isto é, não tem influência na percepção de luminância (Stockman, 2009).

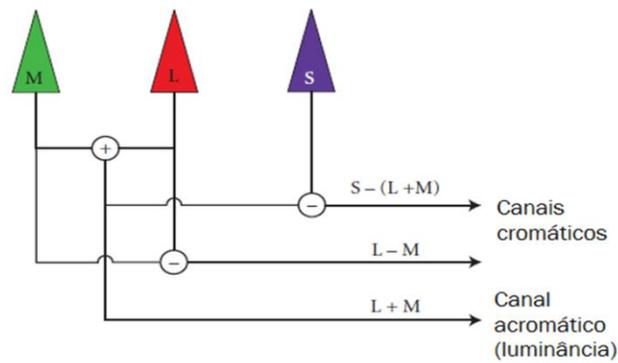


Figura 23 | Modelo das duas fases de Boynton. Os sinais dos dois tipos de cones combinados produzem um canal acromático correspondente à luminância (L+M) e dois canais cromáticos oponentes (L-M e S- (L+M)) (adaptada de Stockman, 2009).

Existem modelos mais recentes a ser desenvolvidos. Por exemplo, existem modelos propostos por DeValois e DeValois em 1993, que já incluem três fases distintas no processamento da cor: uma fase cone-oponente (segunda fase) e outra cor-oponente (terceira fase) (Stockman, 2009). Isto prova que o modelo representado na Figura 23 ainda está em desenvolvimento e não é definitivo.

2.2.3. Curvas de sensibilidade dos cones e bastonetes

O ser humano com uma visão das cores normal é capaz de distinguir milhares de cores (J. Linhares, Pinto, & Cardoso Nascimento, 2008; Pointer & Attridge, 1998; Samuel G. Solomon & Lennie, 2007). Nem todos os fotorreceptores conseguem diferenciar modulações espectrais, isto é, não são capazes de detetar cor. Existem dois tipos de fotorreceptores, os cones e os bastonetes, que se comportam de forma diferente perante diferentes condições de luminosidade. Assim, os bastonetes, devido à sua alta sensibilidade, conseguem detetar um único fóton em ambientes com pouca luz, porém, em ambientes com boa iluminação, saturam e ficam não funcionais, não contribuindo para a visão. Por outro lado, os cones, em ambientes com boa iluminação, são capazes de responder seletivamente a fótons de diferentes regiões do espectro visível, tornando possível visualizar a cores. No entanto, são inúteis em condições de intensidade luminosa baixa, onde funcionam os bastonetes (Wässle, 2004). Esta distinção cromática só é possível, porque a retina possui três diferentes tipos de cones com diferentes pigmentos, sensíveis a diferentes comprimentos de onda, como representado pela Figura 24: o cone S (S do inglês “*short*”) sensível aos comprimentos de onda curtos (com a máxima absorção aos 445nm), o cone M (M do inglês “*medium*”) sensível aos comprimentos de onda médios

(com a máxima absorção aos 545nm) e o cone L (L do inglês “*long*”) sensível aos comprimentos de onda longos (com a máxima absorção aos 570nm) (E. Bruce Goldstein, 2013; Stockman, 2009; Wässle, 2004; Yoonessi & Yoonessi, 2011).

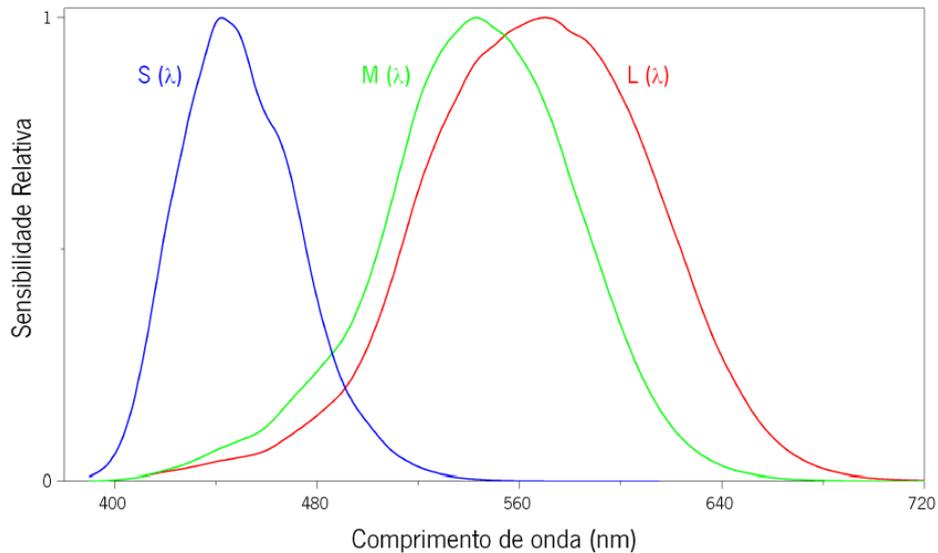


Figura 24 | Curvas de sensibilidade relativas para o cone S (curva azul), M (curva verde) e L (curva vermelha) (adaptada de Stockman, 2009).

Os bastonetes atuam em baixos níveis de iluminação e fornecem apenas uma visão monocromática. Esta visão é conhecida por visão escotópica. Há medida que o nível de luminância aumenta, começam também a contribuir os cones para a visão. A esta visão, resultante da mistura da atividade dos cones e bastonetes, denomina-se visão mesópica. Se o nível de luminância continuar a aumentar, irá chegar uma altura em que apenas os cones estarão ativos e os bastonetes ficam não funcionais. Nesta situação a visão denomina-se visão fotópica (Fu et al., 2012).

A determinação da sensibilidade visual pode ser obtida pelo método da equalização de percepções. Neste método, é utilizado um alvo bipartido, como mostra na Figura 25 (a), contendo, numa das partes, um branco de comparação fixo e na outra parte radiação monocromática de teste, com comprimento de onda variável e luminância ajustável. Esta experiência consiste em determinar a energia mínima necessária para equalizar o brilho das duas metades do alvo. Assim, repetindo a experiência para cada comprimento de onda do espectro visível, obtém-se o gráfico da energia em função do comprimento de onda - Figura 25 (b). Por fim, sabendo que a sensibilidade é o inverso da energia ($\text{sensibilidade}(\lambda) = 1/\text{Energia}$

(λ) obtemos o gráfico da Figura 25 (c) - curva de sensibilidade fotópica (E. Bruce Goldstein, 2013). Para esta curva contribuem os cones L, M e S em simultâneo.

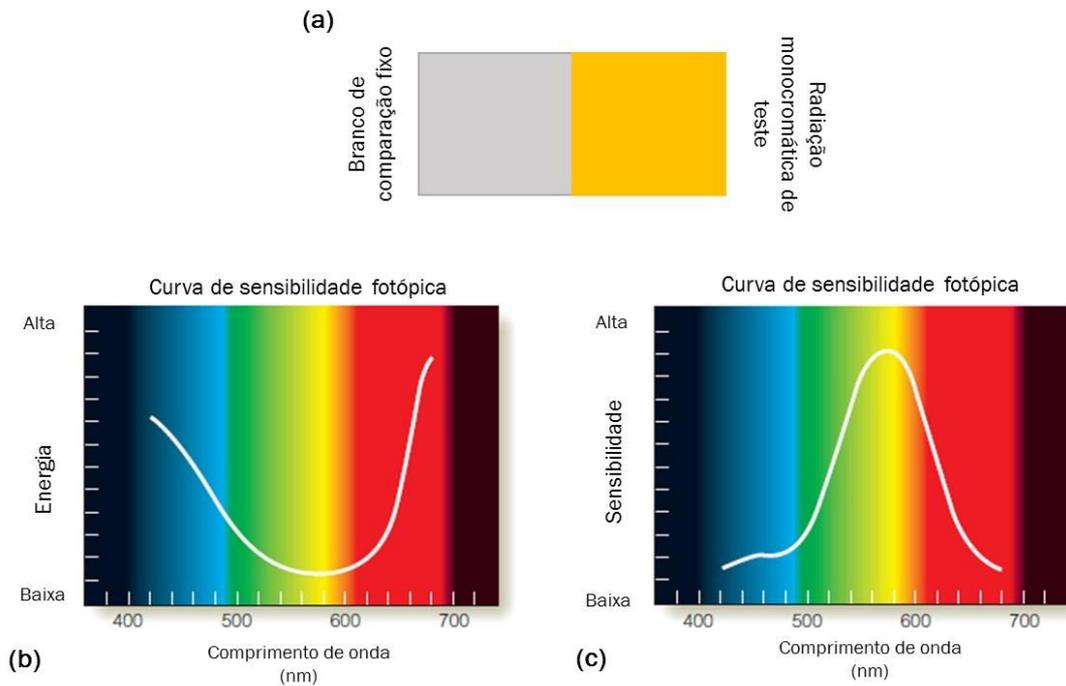


Figura 25 | Determinação da curva de sensibilidade fotópica através do método da equalização de percepções. O gráfico (a) e (b) mostra que a sensibilidade fotópica é maior nos comprimentos de onda médios e menor nos comprimentos de onda baixos e altos (adaptada de E. Bruce Goldstein, 2013).

Os gráficos da Figura 25 (a) e (b), mostram que a sensibilidade fotópica é maior nos comprimentos de onda médios e menor nos comprimentos de onda baixos e altos. Isto acontece, porque a energia necessária para equalizar o brilho no verde é muito menor do que a necessária para equalizar o brilho no vermelho ou no azul (E. Bruce Goldstein, 2013).

As curvas de sensibilidade dos cones e bastonetes encontram-se em diferentes zonas do espectro visível, como representado no gráfico da Figura 26. Estas curvas de sensibilidade mostram que os bastonetes são mais sensíveis aos comprimentos de onda curtos em relação aos cones, apresentando um pico de sensibilidade nos 500nm e os cones um pico de sensibilidade nos 560nm (E. Bruce Goldstein, 2013). Esta diferença perceptual entre as curvas de sensibilidade fotópica e escotópica é conhecida por deslocamento de Purkinje, pois, foi Johann Purkinje que descreveu este fenómeno em 1825. Este deslocamento tem uma consequência perceptual que pode ser notada durante a adaptação ao escuro, comparando o brilho dos objetos de diferentes colorações. Na visão escotópica, os objetos azuis tornam-se mais brilhantes que os vermelhos e verdes. A sensibilidade fotópica depende apenas dos cones M e dos cones L. Os

cones S, como se encontram em menor quantidade na retina em relação aos cones verdes e vermelhos, têm pouca influência na sensibilidade fotópica. Segundo a CIE (Commission Internationale de L'Eclairage), $V(\lambda)$ corresponde à curva de sensibilidade fotópica de um observador padrão (média de vários observadores) e $V'(\lambda)$ à curva de sensibilidade escotópica de um observador padrão (CIE, 2005; Schwartz, 2010).

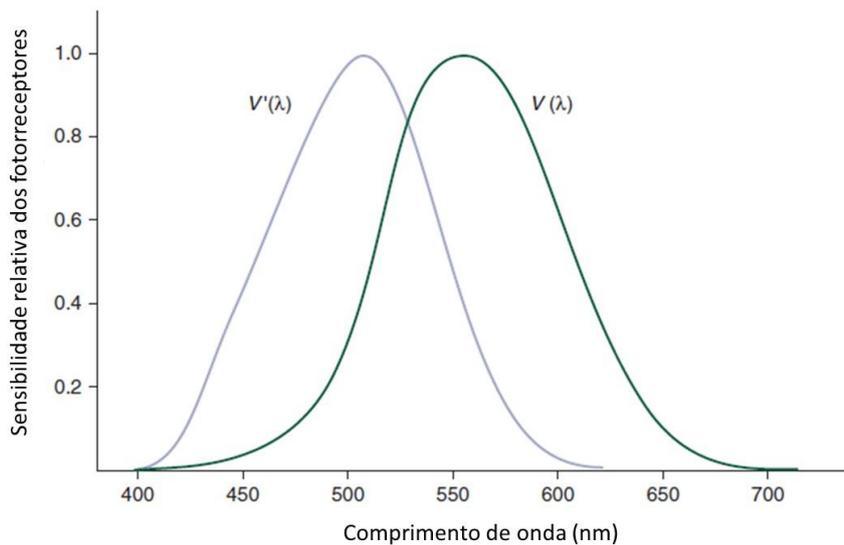


Figura 26 | Curvas de sensibilidade dos cones e bastonetes. As diferentes localizações, das curvas de sensibilidade dos cones e bastonetes no espectro visível, resultam numa diferença perceptual que pode ser notada durante a adaptação ao escuro. Esta diferença perceptual é conhecida por deslocamento de Purkinje. Segundo a CIE, $V(\lambda)$ corresponde à curva de sensibilidade fotópica de um observador padrão e $V'(\lambda)$ à curva de sensibilidade escotópica para um observador padrão (CIE, 2005) (adaptada de Schwartz, 2010).

2.2.4. Tipos de deficiências na visão das cores

Indivíduos com uma visão das cores anômala processam a informação cromática de maneira diferente dos indivíduos com visão normal das cores. As anomalias que ocorrem ao nível da visão das cores podem ser de dois tipos: adquiridas (patologias oculares, drogas ou medicamentos e lesões cerebrais) ou hereditárias (E. Bruce Goldstein, 2013; Schwartz, 2010; Simunovic, 2010). As anomalias hereditárias afetam 8% dos homens e 0.5% das mulheres (Simunovic, 2010). Na linguagem corrente, é usado o termo daltonismo para ambas as situações, porém, este termo refere-se estritamente às alterações a nível hereditário. O termo daltonismo surgiu em homenagem a John Dalton. John Dalton foi o primeiro a descrever a sua anomalia na visão das cores (E. Bruce Goldstein, 2013; Fairchild, 2005). Ele pensava que a sua deficiência na visão das cores tinha como causa o facto de o seu humor vítreo ser azul (Fairchild, 2005).

Na Tabela 1, pode fazer-se a distinção entre anomalias adquiridas e hereditárias (Schwartz, 2010):

Tabela 1 | Diferenças entre deficiências na visão das cores hereditárias e adquiridas.

Deficiências hereditárias	Deficiências adquiridas
1. Estão presentes desde o nascimento;	1. Aparecem durante a vida
2. O tipo e a severidade é igual ao longo da vida;	2. O tipo e a severidade variam ao longo da vida;
3. O tipo de deficiência pode ser classificado exatamente;	3. Não se consegue classificar exatamente o tipo de deficiência;
4. Ambos os olhos são identicamente afetados;	4. Podem não afetar igualmente os dois olhos;
5. A acuidade visual não é afetada (excepto no monocromatismo – sem cones a AV é afetada) e os campos visuais são normais;	5. A AV é reduzida e os campos visuais podem ser também afetados;
6. Deficiências no verde-vermelho;	6. Deficiências no azul;
7. Maior incidência nos homens.	7. Igual incidência nos homens e nas mulheres.

As deficiências na visão das cores podem ter origem na ausência de um ou mais pigmentos nos fotorreceptores, bem como, na mistura anómala de pigmentos num dado fotorreceptor (Schwartz, 2010). Pode considerar-se três tipos de daltonismo: monocromacia, dicromacia e tricromacia (E. Bruce Goldstein, 2013).

- Monocromacia: um indivíduo monocromata vê apenas níveis de intensidade de luz com o fotorreceptor disponível. Podem apresentar apenas um só cone (o azul é o único presente nos monocromatas) mais bastonetes ou só bastonetes e nenhum cone. A monocromacia é uma forma rara de anomalia na visão das cores e é usualmente hereditária. A monocromacia baseada em bastonetes é a mais limitadora, uma vez que, a ausência de cones leva a uma acentuada sensibilidade à luz e a uma acuidade visual reduzida (E. Bruce Goldstein, 2013; Simunovic, 2010).
- Dicromacia: a dicromacia resulta da ausência de um tipo específico de cones, portanto, a visão das cores é o resultado da mistura apenas de dois tipos de pigmentos (Schwartz, 2010; Simunovic, 2010). Dependendo do cone em falta, pode distinguir-se três tipos de dicromacia. Como se pode averiguar pela Figura 27, existe uma diminuição acentuada nas cores percebidas, que em certos casos pode chegar a cerca de 90% (J. M. M. Linhares, Pinto, & Nascimento, 2008):

1. Deuteranopia: é uma forma rara da dicromacia e resulta da ausência do cone M. Não apresenta alterações significativas no brilho e os verdes apresentam-se mais escuros.
2. Protanopia: resulta na ausência do cone L. Os vermelhos apresentam-se com pouco brilho e mais escuros.
3. Tritanopia: resulta na ausência do cone S. Sem alterações significativas no brilho, pois este cone não contribui para a sensibilidade fotópica.

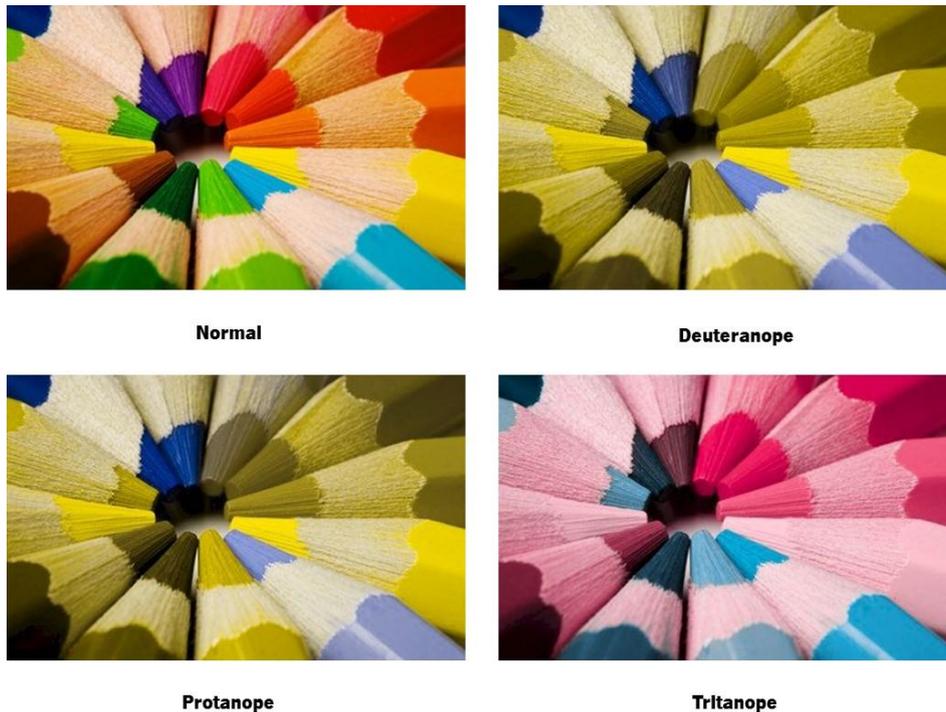


Figura 27 | Como os três tipos de dicromatas distinguem as cores (<http://www.vischeck.com/>).

- Tricromacia anómala: é caracterizada por estarem presentes os três tipos de cones, porém, um é anormal (há uma mutação no pigmento do fotorreceptor em questão), ou seja, o seu espectro de absorção está deslocado da posição normal – ver Figura 28 (Hunt & Pointer, 2011; Schwartz, 2010; Simunovic, 2010). Manifesta-se em duas anomalias distintas (Hunt & Pointer, 2011; Simunovic, 2010):
 1. Protanómia: presença de uma mutação no pigmento do cone L (cone sensível aos comprimentos de onda longos). Resulta numa menor sensibilidade na zona do vermelho e num escurecimento das cores na zona dos comprimentos de onda longos.

2. Deuteranómia: presença de uma mutação no pigmento do cone M (cone sensível aos comprimentos de onda médios). Resulta numa maior dificuldade em discriminar o verde. Representa cerca de metade dos casos de daltonismo.

O deslocamento dos pigmentos dos cones das suas posições ótimas resulta numa deficiência na visão das cores. Quanto maior o deslocamento do pigmento, mais severa se torna a anomalia. Indivíduos prota ou deuta confundem os verdes e vermelhos e, normalmente, são referidos como daltónicos ou anómalos no vermelho-verde (Schwartz, 2010).

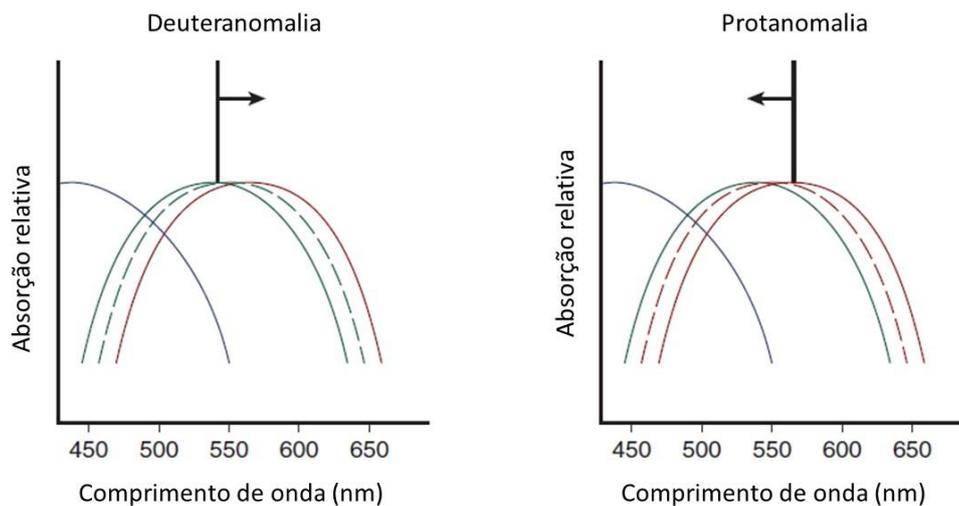


Figura 28| Na deuteranomalia, o espectro do cone M está mais deslocado para os comprimentos de onda longos e na protanomalia, o espectro do cone L está mais deslocado para os comprimentos de onda médios. As curvas a cheio representam a posição normal do espectro de absorção do cone e as curvas a tracejado mostram a localização do espectro deslocado da posição ótima (adaptada de Schwartz, 2010).

2.2.4.1. Explicação genética para a incidência masculina das deficiências no vermelho-verde

A anomalia na visão das cores está ligada ao cromossoma sexual X e manifesta-se quando o gene recessivo afetado está presente nesse cromossoma. Como os homens possuem um cromossoma X e um Y, mais facilmente manifestam a anomalia (Fairchild, 2005). Por outro lado, como as mulheres possuem dois cromossomas X, se um estiver afetado, esta não manifesta a doença apenas a transmite, ou seja, é portadora da anomalia mas não a manifesta (Fairchild, 2005). A anomalia só se manifesta nas mulheres se, esta última, possuir ambos os cromossomas X afetados, ou seja, se ambos os cromossomas tiverem o gene recessivo afetado (Fairchild, 2005; Schwartz, 2010) – ver Figura 29.

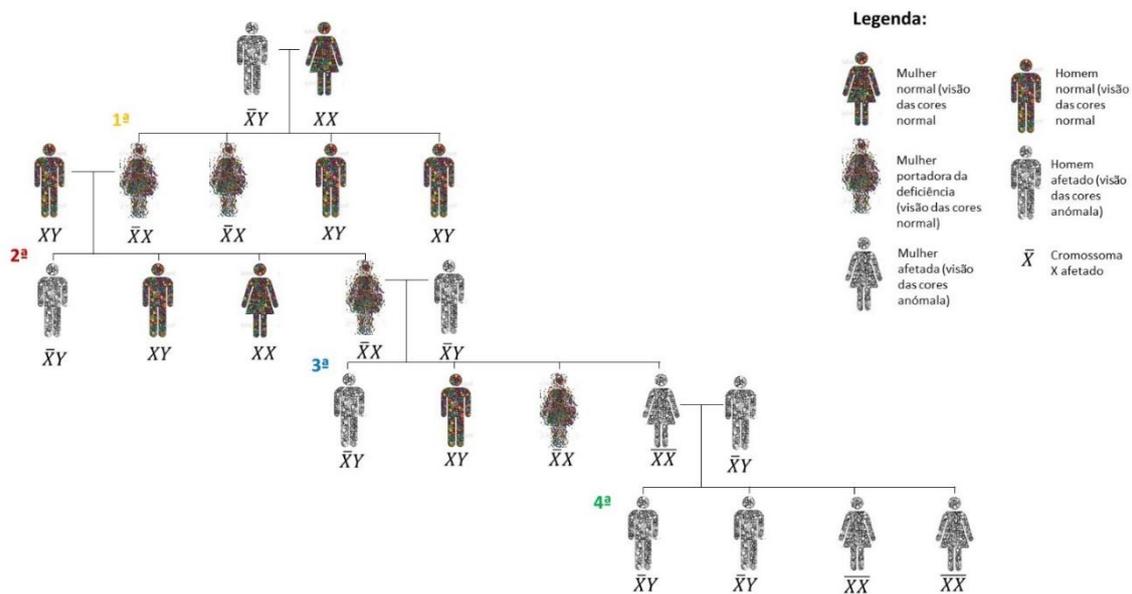


Figura 29 | Exemplos de transmissão da anomalia através de 4 gerações (adaptada de Schwartz, 2010).

2.2.5. Colorimetria: medindo a cor

Existem dois processos distintos na mistura das cores: a síntese aditiva e a síntese subtrativa. Na síntese aditiva, ao adicionar duas cores obtém-se uma cor mais luminosa e na mistura de todas as cores obtém-se o branco. Assim, sempre que se adiciona cor também se adiciona luz. As três cores primárias da mistura aditiva são o vermelho (R), verde (G) e o azul (B). A partir da mistura de duas cores primárias, obtém-se três cores secundárias que são mais luminosas que as que lhes deram origem: magenta, amarelo e azul ciano, ver Figura 30 A. Os monitores, por exemplo, usam um sistema aditivo de cores formado pelos primários RGB. Por outro lado, na síntese subtrativa não se trabalha com luzes, mas com pigmento. Neste processo, a mistura das cores (tintas) resulta em cores cada vez mais escuras e, portanto, menos luminosas. Portanto, o resultado da mistura de todas as cores resulta no preto. As três cores primárias das tintas são o magenta (M), o amarelo (Y) e o azul ciano (C) e a mistura subtrativa destes primários resulta em três cores secundárias: o vermelho, verde e azul, ver Figura 30 B (Hunt & Pointer, 2011). As impressoras utilizam tintas, logo, os primários utilizados para a mistura de cores é formado pelos primários CMYK.

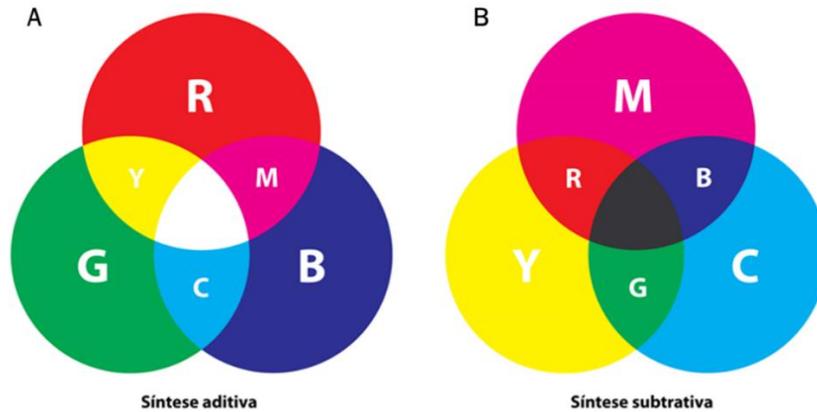


Figura 30 | Síntese aditiva e síntese subtrativa das cores. Na imagem A, a mistura aditiva de $R+G = Y$, $R+B=M$ e $G+B=C$. Na imagem B, a mistura subtrativa de $M+Y=R$, $M+C=B$ e $Y+C=G$.

A colorimetria consiste na atribuição de um número a uma dada distribuição espectral (cor), de tal modo que, estímulos que têm a mesma especificação numérica produzem a mesma sensação de cor (e vice-versa). É também uma medida independente do observador. A colorimetria tem como base a teoria tricromática, ou seja, com três comprimentos de onda monocromáticos distintos, conseguimos regular cada uma das suas intensidades, de forma a criar a sensação de uma dada radiação monocromática arbitrária. Deste modo, através da mistura de três primários consegue-se obter múltiplas sensações de cor. Uma cor é considerada primária se tiver um espectro constante e for independente, isto é, nenhuma cor considerada primária pode ser obtida através da mistura das outras duas. Indivíduos tricromatas só conseguem reproduzir diferentes cores a partir de três primários, não sendo capazes de obter a mesma diversidade cromática se apenas forem utilizadas duas cores primárias para a mistura. Os indivíduos dicromatas não conseguem perceber todas as cores do espectro visível, dado que, só possuem duas cores primárias para misturar em diferentes quantidades. No caso dos tricromatas anómalos, estes fazem a mistura de três cores primárias como os tricromatas normais, porém, de forma diferente do normal (Hunt & Pointer, 2011).

Na Figura 31 A, mostra como se pode obter uma determinada cor através de três estímulos luminosos. Existe um campo bipartido, em que numa das metades está a cor que se pretende reproduzir e, na outra metade, encontra-se uma mistura aditiva das três cores primárias da luz (vermelho, verde e azul). Posteriormente, as três cores primárias da luz são ajustadas até obter a cor de teste em brilho, tonalidade e saturação. O brilho (quantidade de energia radiante emitida por um corpo, varia de 0 a 100 e corresponde ao eixo dos z), a tonalidade (está relacionada com o comprimento de onda dominante e corresponde ao eixo dos

x e y (distância angular)) e a saturação (quantidade de branco que uma dada cor tem, isto é, quanto mais branco tiver menos saturada é essa cor; as cores monocromáticas são todas saturadas; a saturação varia de 0 (acromática) a 14 (máximo de saturação) e corresponde ao eixo dos x ou y) são as três principais propriedades da cor – ver Figura 31 B (Schwartz, 2010).

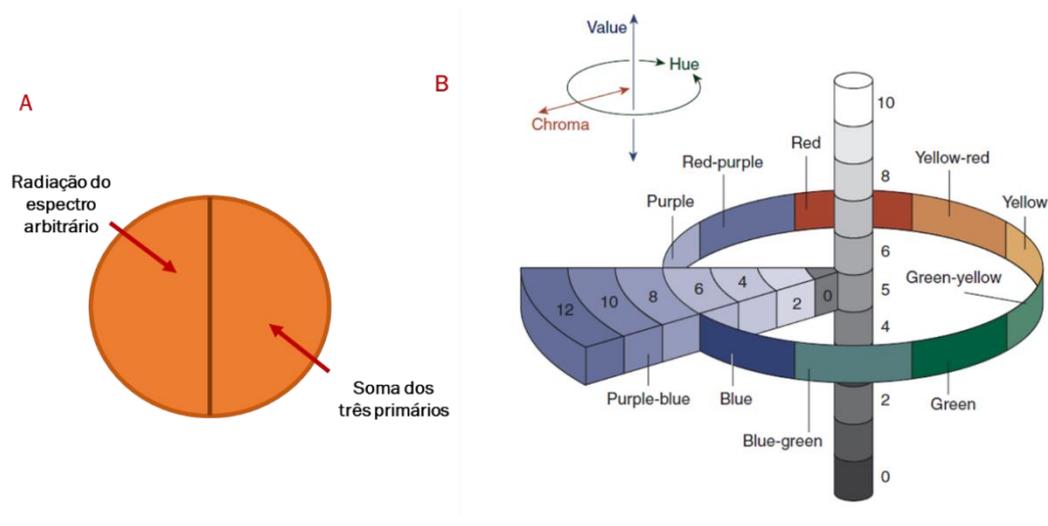


Figura 31 | (A) É possível com três comprimentos de onda, regular as suas intensidades, de modo a criar a sensação de uma radiação monocromática. (B) A tridimensionalidade da cor. Nesta figura, está representado o sistema de Munsell que é um dos sistemas ordenados de cor mais usado (adaptada de Schwartz, 2010).

As cores podem ser obtidas usando apenas três estímulos, porque existem apenas três diferentes tipos de cones na retina. Contudo, não é possível reproduzir todas as cores apenas com três primários, devido às propriedades apresentadas pelos fotorreceptores. Há uma zona de grande sobreposição espectral entre a curva do cone M e L, ou seja, como os cones M e L apresentam zonas espectrais muito semelhantes, ao estimular o cone L, o M é também estimulado em simultâneo, não sendo possível estimulá-los de forma independente. Se estes dois cones possuísem zonas espectrais um pouco mais afastadas, a gama de espectros que seria possível reproduzir aumentaria – ver Figura 24.

Devido às propriedades apresentadas pela retina, a percepção da cor vai depender do tamanho da amostra que se pretende reproduzir. Portanto, para amostras pequenas o campo de visão utilizado não é o mesmo que para amostras grandes. Por este motivo, atualmente, o observador padrão para a visão fotópica $V(\lambda)$ pode ser definido para 2° , quando se pretende reproduzir amostras pequenas, e para 10° , quando se pretende reproduzir amostras de cor superiores a 4° . Os 2° e os 10° referem-se ao ângulo visual ou ao campo de observação utilizado na retina. No entanto, o sistema original para o observador colorimétrico padrão CIE

1931, é baseado num campo de visão de 2° e, portanto, será o abordado neste trabalho (Hunt & Pointer, 2011).

A Figura 32 mostra o valor dos primários monocromáticos, para o observador padrão com um campo de visão de 2° : $\lambda_r = 700.0$ nm, $\lambda_g = 546.1$ nm e $\lambda_b = 435.8$. Estes primários são utilizados numa experiência equivalente à descrita na Figura 31 A (rever descrição).

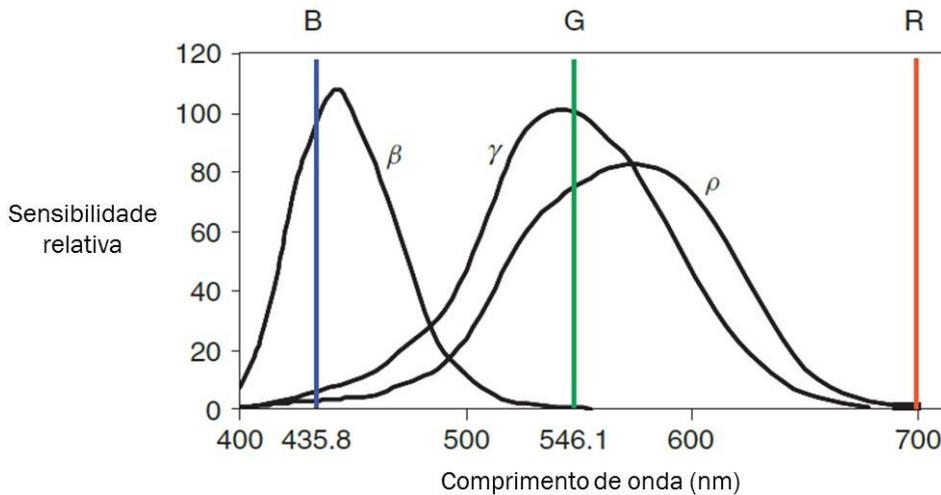


Figura 32| Curvas de sensibilidade espectral dos três tipos de cones - β , γ , e ρ . Os três primários R, G e B com os respectivos comprimentos de onda usados para definir o observador padrão do sistema CIE 1931 da colorimetria: 700.0 nm, 546.1 nm e 435.8 nm respectivamente (adaptada de Hunt & Pointer, 2011).

Na colorimetria, a quantidade de cada um dos primários necessária para reproduzir um dado espectro arbitrário é chamada de triestímulo (Hunt & Pointer, 2011).

Para um indivíduo com uma visão das cores normal (tricromata), é possível, com uma mistura aditiva de três estímulos, com espectros constantes (primários), produzir a mesma sensação de cor que uma distribuição espectral arbitrária. Porém, em determinadas situações poderá ser necessário adicionar um primário à amostra que se pretende reproduzir e, neste caso, a equalização das amostras é conseguida através da mistura aditiva no sentido lacto ou negativo. Na verdade o que acontece é que é “subtraído” um primário da mistura dos três e, seguidamente, esse primário é adicionado à amostra que se pretende reproduzir. O primário que é misturado ao espectro arbitrário, passa a ser representado com um valor negativo – ver Figura 33 (Hunt & Pointer, 2011).

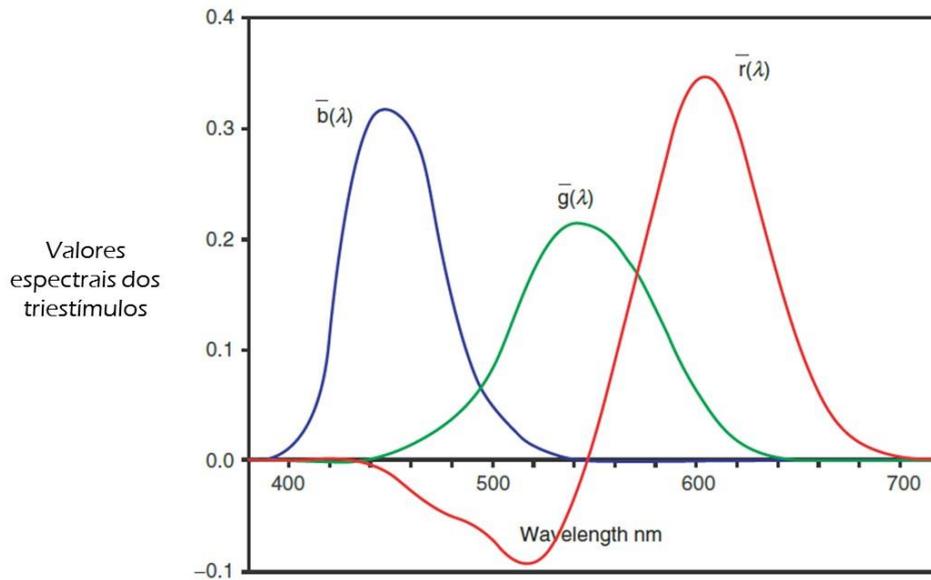


Figura 33 | Funções de reprodução cromática para o observador colorimétrico padrão CIE 1931 RGB: $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$, com representação de valores negativos, devido à necessidade de adicionar sinal ao estímulo de referência (adaptada de Hunt & Pointer, 2011).

Na Figura 33, estão representadas as quantidades dos primários R, G e B necessárias para reproduzir uma dada radiação de espectro arbitrário. As curvas representadas são denominadas de funções de reprodução e são designadas pelos símbolos $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$. A curva $\bar{r}(\lambda)$ indica a quantidade do primário vermelho (R) necessária para reproduzir qualquer comprimento de onda do espectro visível. Do mesmo modo, as curvas $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$ indicam a quantidade de verde (G) e azul (B), respectivamente (Hunt & Pointer, 2011).

A quantidade representada pelas curvas de cada primário RGB necessária para obter qualquer cor do espectro, é baseada em resultados experimentais conseguidos através de 10 observadores, na investigação de Wright, mais 7 observadores, na investigação de Guild. Os dois investigadores obtiveram resultados similares e a média dos dois experimentos resultou nas curvas representadas pela Figura 33. Esta média refere-se apenas a um campo de observação de 2° (Hunt & Pointer, 2011).

Posteriormente, de forma a evitar valores negativos na especificação das cores, a CIE definiu novos valores de triestímulos (X, Y, Z), de forma a substituir os valores dos triestímulos R, G, B. Estes novos primários X, Y, Z são denominados de primários imaginários. Deste modo, as funções de reprodução passam agora a ser designadas pelos símbolos: $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$. O sistema XYZ possui propriedades diferentes do RGB, nomeadamente – ver Figura 34 (Hunt & Pointer, 2011):

1. As áreas sob as curvas são agora idênticas, isto é, $A_1 = A_2 = A_3$;
2. Todos os valores são positivos;
3. Os primários correspondentes são imaginários;
4. A função de reprodução cromática $\bar{y}(\lambda)$ foi escolhida de forma a ser idêntica à curva de sensibilidade fotópica $V(\lambda)$, porque os valores de Y são proporcionais à luminância.

Como referido anteriormente, dependendo do tamanho da amostra que se quer reproduzir, a percepção da cor vai divergir. Por este motivo, a CIE em 1964, recomendou outra série de funções de reprodução cromática para amostras com campos de observação superiores a 4° . Estas funções de reprodução $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$ e $\bar{z}_{10}(\lambda)$ estão representadas na Figura 34 pelas linhas a tracejado e as funções $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ pelas linhas a cheio (CIE, 2005; Hunt & Pointer, 2011).

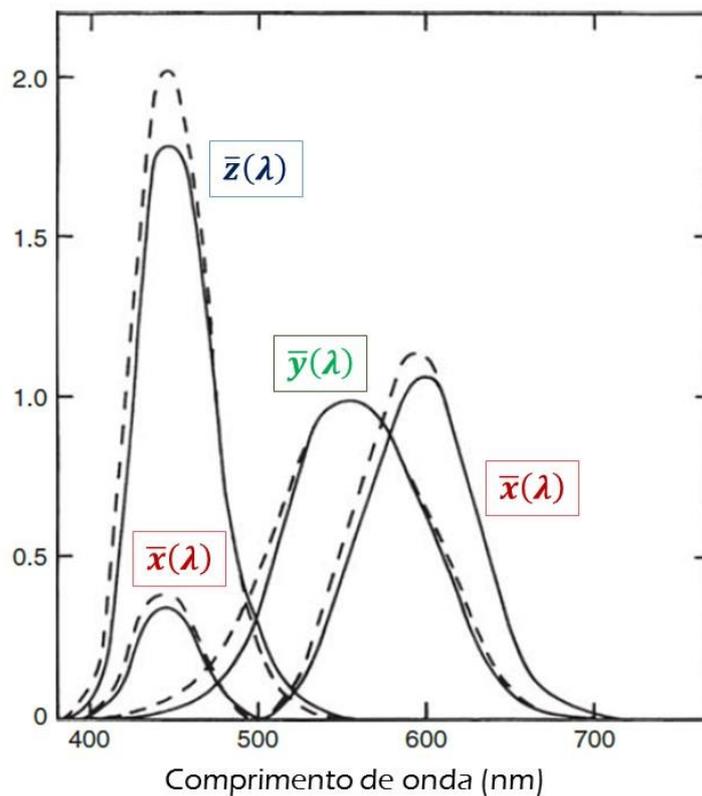


Figura 34 | Funções de reprodução cromática para o observador colorimétrico padrão CIE 1931 a 2° (linhas a cheio) e para observador colorimétrico padrão CIE 1964 a 10° (linhas a tracejado) (adaptada de Hunt & Pointer, 2011).

2.2.6. Diagramas cromáticos

Os diagramas cromáticos são espaços de cor que fornecem uma espécie de mapa de cores, em que as cromaticidades das mesmas podem ser representadas. O diagrama cromático mostra a quantidade relativa das cores primárias imaginárias necessária para obter qualquer cor real (Hunt & Pointer, 2011).

2.2.6.1. *Diagrama cromático CIE 1931 (x, y)*

As cores podem ser representadas indicando o valor dos triestímulos ou das coordenadas cromáticas. As coordenadas cromáticas são unidades relativas, que resultam da conversão dos valores dos triestímulos e, por sua vez, podem ser calculadas através das seguintes equações - ver Equação 3 - para o espaço (x, y) (CIE, 2005; Hunt & Pointer, 2011):

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$
$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Equação 3 | Estas equações indicam como se pode obter as coordenadas cromáticas para o espaço (x, y).

Pela forma como x, y e z são calculados, pode afirmar-se que $x + y + z = 1$ e que se x e y forem conhecidos, o valor de z é deduzido pela equação $z = 1 - x - y$. Assim, com apenas duas variáveis é possível construir diagramas cromáticos a duas dimensões – ver Figura 35 A. Quando ambos os triestímulos apresentam o mesmo valor, ou seja, 0.33, obtém-se o branco. O branco é definido no ponto $x = y = z = 1/3$ (CIE, 2005; Hunt & Pointer, 2011).

A linha que contorna o diagrama representa as cores produzidas para estímulos monocromáticos - cores puras que correspondem a um único comprimento de onda. Todas as cores que estão dentro da curva são policromáticas, isto é, cores que são obtidas através da mistura aditiva de duas ou mais cores monocromáticas. O interior e o contorno do diagrama cromático representam todas as cores visíveis ao olho humano, criadas por reflexão ou transmissão, ficando ausentes cores criadas por difração, fluorescência ou iridescência, por exemplo. Como representado na Figura 35 A, a cor (C3) resultante da mistura de duas cores (C1 e C2) encontra-se algures no meio destas. Quanto mais próxima estiver essa cor de umas das cores que lhe deu origem, significa que tem mais quantidade dessa cor. No caso ilustrado na

Figura 35 A, a cor C3 apresenta maior quantidade de C1, pois encontra-se mais próxima dessa cor (Hunt & Pointer, 2011).

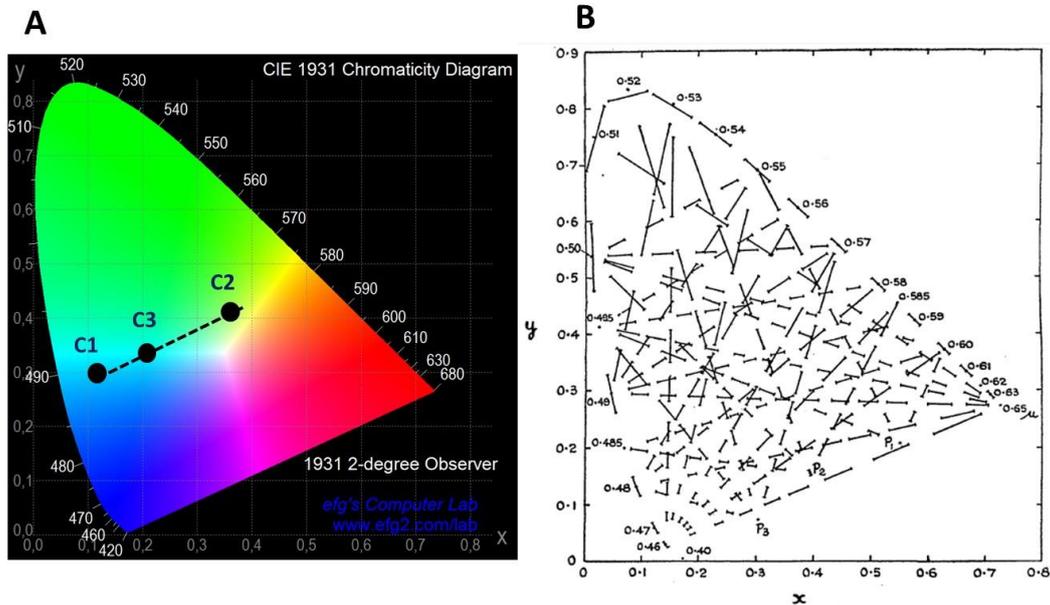


Figura 35| A) Diagrama cromático CIE 1931 para um observador padrão de 2° (adaptada de www.efg2.com/lab); B) Diferenças perceptuais entre cores no diagrama cromático CIE 1931 (x, y) (adaptada de Wright, 1943).

Porém, representar uma cor num diagrama a duas dimensões não é suficiente, dado que, na maioria dos casos o que se pretende medir é a diferença perceptual entre cores. E é neste aspeto que o diagrama cromático CIE 1931 (x, y) apresenta a sua maior desvantagem, visto que, a mesma diferença perceptual corresponde a espaços físicos diferentes – ver Figura 35 B. Assim, a distribuição das cores neste espaço não é uniforme. Como ilustrado na Figura 35 B, cada par de pontos representa duas cores, com diferenças perceptuais iguais e com a mesma magnitude. Idealmente, estas diferenças de cor similares deveriam estar representadas por espaços físicos iguais (Wright, 1943).

2.2.6.2. Diagrama cromático CIE 1976 (u' , v') – diagrama cromático uniforme

O diagrama cromático CIE 1976 é a transformação do espaço CIE 1931 (x, y) num espaço de representação da cor bastante mais uniforme, embora, não satisfaça totalmente as condições de uniformidade – ver Figura 36 A e B. Este espaço cromático é conhecido como CIE 1976 UCS (*uniform chromaticity scale diagram*) ou simplesmente diagrama (u' , v'). Este

diagrama pode ser obtido através das coordenadas cromáticas CIE 1931 (x , y) ou através dos valores dos triestímulos XYZ, ver Equação 4 (CIE, 2005; Hunt & Pointer, 2011).

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

Equação 4 | As duas equações indicam como obter as coordenadas cromáticas CIE 1976 UCS, através dos valores dos triestímulos XYZ.

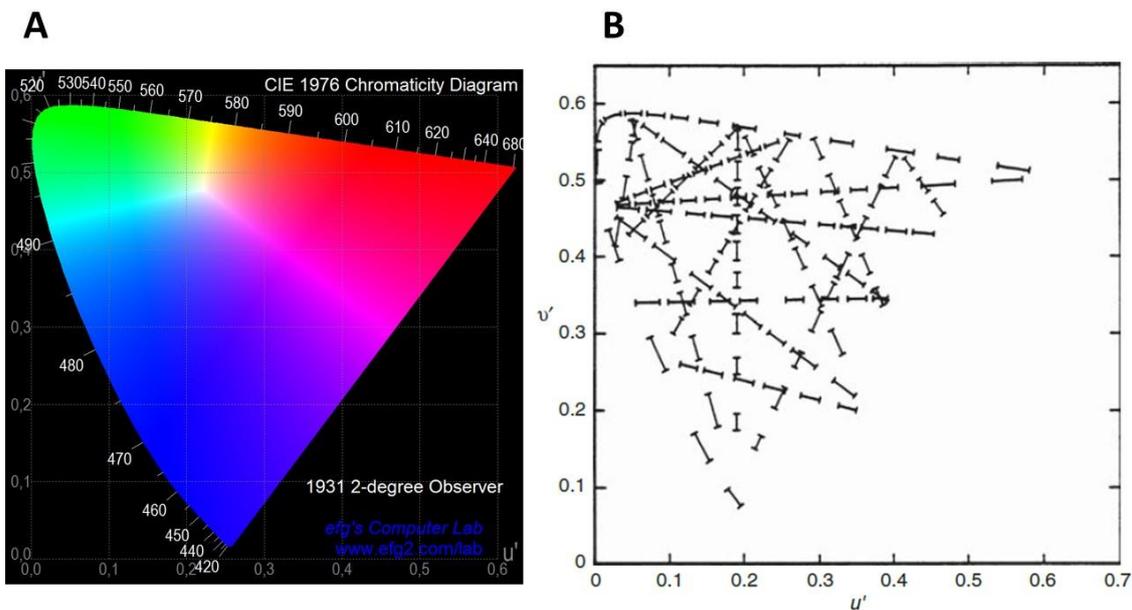


Figura 36 | A) Diagrama cromático CIE 1976 UCS para um observador padrão de 2° (adaptada de www.efg2.com/lab); B) Diferenças perceptuais entre cores no diagrama cromático CIE 1976 (u' , v'). Cada segmento de reta representa diferenças perceptuais iguais. Este espaço é bastante mais uniforme, porque a variação no tamanho dos segmentos de reta, ainda que não totalmente eliminada, foi reduzida. Assim, o rácio do segmento de reta mais longo para o mais curto é agora de 4:1. (adaptada de Hunt & Pointer, 2011).

A Figura 36 mostra que o espaço cromático CIE 1976 (u' , v') é bastante mais uniforme em relação ao CIE 1931. A variação no tamanho dos segmentos de reta, correspondentes a percepções de cor semelhantes no espaço CIE 1976 (u' , v'), foi bastante reduzida, porém, não totalmente eliminada. Assim, o espaço cromático da Figura 36 B apresenta agora uma variação de 4:1, do segmento de reta maior para o mais pequeno, em oposição ao da Figura 35, que apresenta uma variação de 20:1 (Hunt & Pointer, 2011).

2.2.6.3. Linhas de confusão dos dicromatas

Como abordado anteriormente, os dicromatas são indivíduos a quem falta um dos três cones, logo, a mistura das cores é conseguida apenas com dois cones. As cores que os dicromatas confundem podem ser representadas num diagrama cromático CIE como o representado na Figura 37. Todas as cores que se encontram sobre as linhas de confusão são indistinguíveis para um dicromata. O objetivo não é representar o que eles veem, mas sim o que eles confundem (Oleari, Baratta, Lamedica, & Macaluso, 1996; Schwartz, 2010). Estas linhas estão desenhadas sobre um diagrama cromático para tricromatas normais. Os pontos que estão representados nos gráficos A, B e C da Figura 37, são os pontos de convergência das linhas de confusão, em que o ponto de convergência do dicromata é imaginário (Oleari et al., 1996).

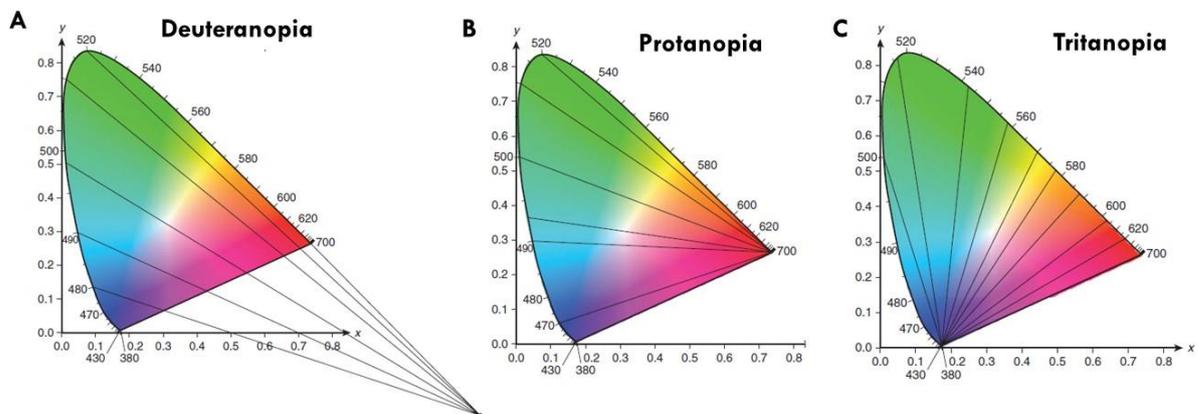


Figura 37 | Linhas de confusão num diagrama cromático CIE 1931 para (A) Deuteranopia, (B) Protanopia e (C) Tritanopia e respetivos pontos de convergência (adaptada de Schwartz, 2010).

As linhas de confusão dos dicromatas são usadas para desenhar testes clínicos de visão das cores (Schwartz, 2010).

2.2.7. Testes de visão das cores

Existe uma bateria de testes clínicos para avaliar a visão das cores. Todavia, torna-se importante avaliar a necessidade e os objetivos de cada teste. Os testes podem ser divididos em três categorias distintas (Stephen J. Dain, 2004):

1. Testes de despistagem ou de rastreio: são testes que permitem apenas distinguir se um indivíduo apresenta uma visão das cores normal ou deficiente, não especificando que tipo de deficiência apresenta ou a sua severidade.

2. Testes de classificação e de gradação: permitem classificar a deficiência na visão das cores, isto é, distinguir se um indivíduo é deuterano ou protano e saber o grau de severidade da anomalia.
3. Testes de diagnóstico: são testes que permitem uma identificação clara da anomalia, ou seja, permitem distinguir dicromatas de tricromatas anômalos.

Como explicado anteriormente, os testes clínicos de visão das cores são construídos tendo em consideração as linhas de confusão dos dicromatas. É possível distinguir três tipos de testes para avaliar a visão das cores, tendo em consideração a forma como o teste é concebido: testes de placas pseudoisocromáticas, testes de ordenação da cor e, por fim, testes de correspondência (Stephen J. Dain, 2004).

2.2.7.1. Placas pseudoisocromáticas

Uma placa pseudoisocromática é formada por uma dada figura (número, letra ou forma) que se encontra incorporada num fundo. O objetivo é conseguir identificar essa figura do fundo tendo em consideração apenas a sua diferença de tonalidade e saturação. Existem vários tipos de placas pseudoisocromáticas: placas com a figura desaparecida - um indivíduo com uma visão das cores normal consegue ver a figura, mas um deficiente não consegue; placas com figuras transformadas - um indivíduo com deficiência na visão das cores irá ver uma figura diferente do indivíduo com uma visão das cores normal; placas com dígitos escondidos - apenas os indivíduos com deficiência na visão das cores conseguem ver a figura, os normais não conseguem; placas de classificação - usadas para diferenciar indivíduos com deficiência no vermelho de indivíduos com deficiências no verde (Stephen J. Dain, 2004).

Indivíduos com visão das cores normal conseguem identificar a figura do fundo, baseando-se apenas em diferenças cromáticas. Por outro lado, indivíduos com deficiência na visão das cores apresentam dificuldades em distinguir a figura do fundo, dado que, as cores que formam a figura e o fundo se encontram ambas na mesma linha de confusão dicromática (Schwartz, 2010). Variações na impressão e diferenças individuais na sensibilidade espectral levam a que existam diferenças inevitáveis na refletância luminosa entre a figura e o fundo. Para contornar este problema, foi introduzido, nestes testes, uma variação na refletância luminosa na figura e no fundo, de forma a mascarar qualquer diferença sistemática (Stephen J. Dain, 2004).

O teste mais conhecido e utilizado devido à sua rápida e fácil administração é o de *Ishihara*, mas existem também outros, como por exemplo, o *Cambridge Colour Test (CCT)* e o *Colour Assessment and Diagnosis (CAD)*.

2.2.7.1.1. Teste de Ishihara

O teste de Ishihara foi publicado em 1906 e foi o primeiro teste a ser comercializado. É um dos testes mais usados ao nível de despistagem ou rastreio. As figuras de cada placa estão integradas num fundo aleatório com pontos de tamanho variável. A edição mais usada contém números e é formada por 38 ou 24 placas – ver Figura 38 (Stephen J. Dain, 2004).

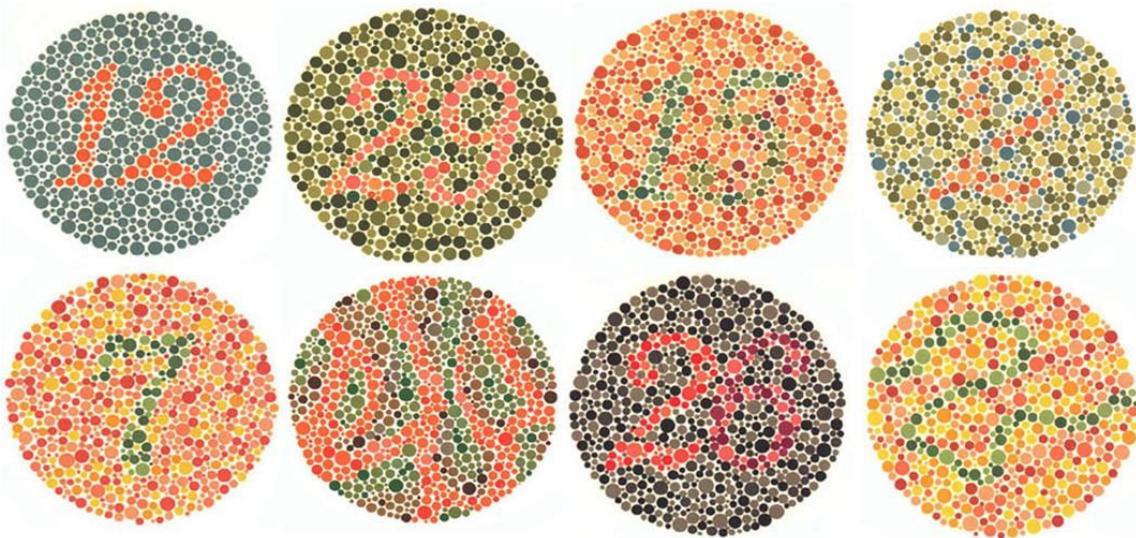


Figura 38 | Teste de Ishihara de 38 placas (<http://www.color-blindness.com/2012/10/22/ishiharas-test-for-colour-deficiency38-plates-edition/#prettyPhoto>).

O teste de Ishihara é considerado o teste “*gold standard*” na rápida identificação de deficiências hereditárias no vermelho-verde. Este teste de despistagem possui uma sensibilidade (capacidade do teste para detetar indivíduos com deficiência na visão das cores) de 85% e uma especificidade (capacidade do teste para detetar indivíduos normais) de 95% (Stephen J. Dain, 2004). Este teste não permite distinguir dicromatas de tricromatas anómalos, nem permite distinguir se a deficiência na visão das cores é adquirida ou hereditária (Schwartz, 2010).

2.2.7.1.2. Cambridge Colour Test (CCT)

O Cambridge Colour Test não permite distinguir dicromatas de tricromatas anómalos severos. O CCT, além de ser um teste de despistagem, também permite classificar (prota ou deuteria) e obter o grau de severidade da deficiência. É usado também para examinar, com maior detalhe, as mudanças de discriminação cromática que ocorrem em resultado de condições hereditárias ou adquiridas, ou seja, permite acompanhar a evolução da deficiência (Regan et al., 1994).

No CCT são utilizadas placas pseudoisocromáticas como estímulos, sendo a figura ou o alvo a letra C. A letra C difere em termos de cromaticidade do círculo de fundo. O fundo e o alvo são formados por vários discos, cada um com o seu próprio contorno e a luminância de cada disco é aleatória. Estas características asseguram que o indivíduo detete o alvo apenas através da cor e não usando outras pistas, tais como as diferenças de luminância. O alvo é sempre a letra C e pode ser apresentada, aleatoriamente, em quatro orientações diferentes. A realização do teste é cognitivamente simples: é fornecido ao observador um comando com quatro botões (abertura do C para cima, para baixo, para a direita ou para a esquerda) e cabe a este carregar no botão correspondente à orientação da letra C representada no ecrã. No início do teste, o C é saturado em cor, mas essa saturação vai diminuindo gradualmente conforme as respostas dadas pelo observador. Assim, é possível estabelecer a diferença de cromaticidade necessária para que o observador em questão identifique a orientação do C, ou seja, o seu limiar de discriminação (Regan et al., 1994).

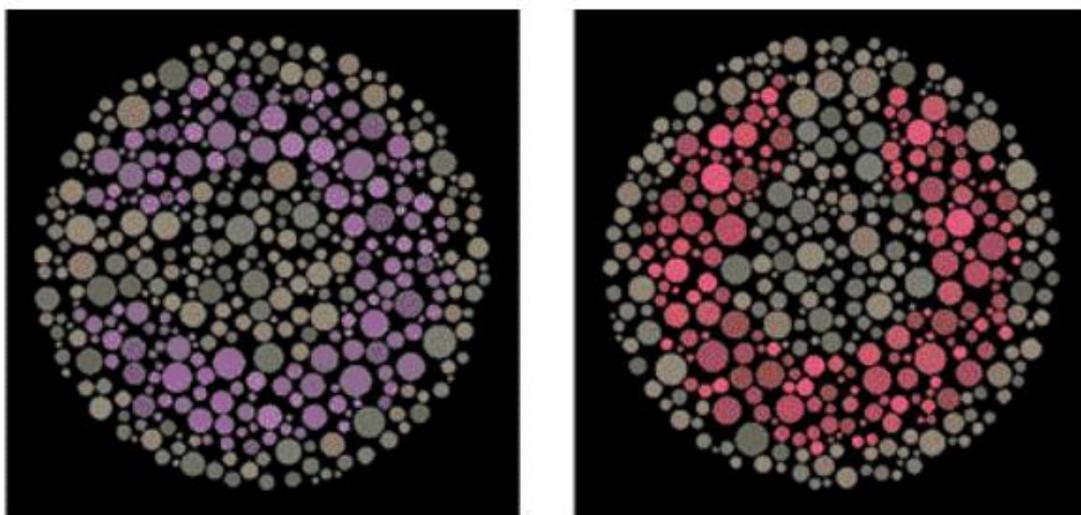


Figura 39 | Aspeto dos “C” de Landolt apresentados no CCT. A letra C é o alvo da placa e difere do fundo apenas em termos de cromaticidade (Regan et al., 1994).

O CCT apresenta duas principais vantagens em relação ao teste de Ishihara: permite testar um número elevado de direções no espaço cromático e consegue adaptar-se ao grau de deficiência. O espaço cromático utilizado é o CIE 1976 (u' , v') (Regan et al., 1994).

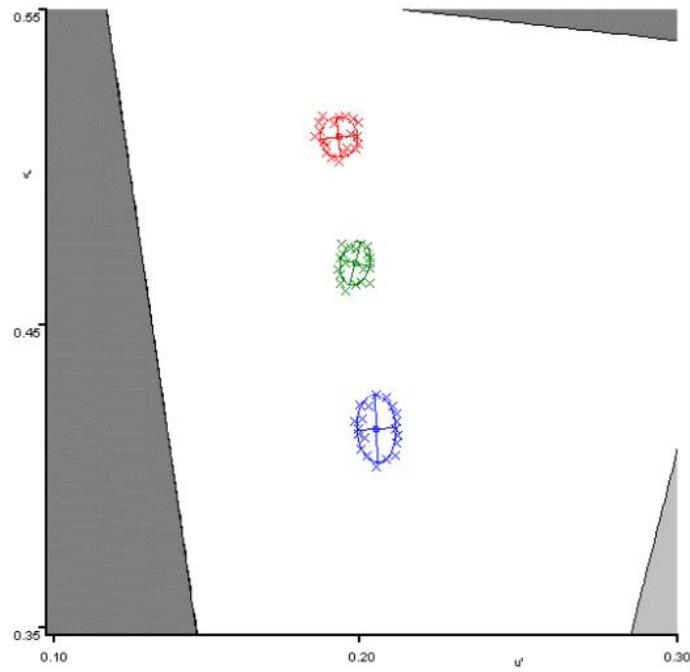


Figura 40 | Elipses de discriminação para um tricromata normal. Num observador normal, as elipses são pequenas e quase circulares (Regan et al., 1994).

As elipses de discriminação representam a diferença perceptual entre duas cores (fundo e estímulo) necessária para que, o observador que está a ser avaliado as consiga distinguir (Regan et al., 1994).

Na Figura 41 B, estão representadas as elipses de discriminação para os diferentes tipos de deficiência na visão das cores: prota, deutera e trita (da esquerda para a direita) obtidas através do CCT. Neste caso, pode classificar-se o tipo de deficiência e, através do tamanho da elipse, determinar a sua severidade. Contudo, surge sempre a dúvida se os casos apresentados, na Figura 41, são casos referentes a dicromatas ou a tricromatas anómalos severos, devido à limitação do monitor. A orientação de cada elipse indica o tipo de anomalia, dado que, estas são mais alongadas na linha de confusão. O grau de severidade da anomalia é dado pela extensão das elipses ao longo da linha de confusão. Num prota as elipses apresentam-se ligeiramente para baixo e alongadas na horizontal; num deutera as elipses encontram-se ligeiramente para

cima e alongadas horizontalmente; num trita as elipses encontram-se alongadas na vertical e ligeiramente inclinadas para a esquerda (Regan et al., 1994).

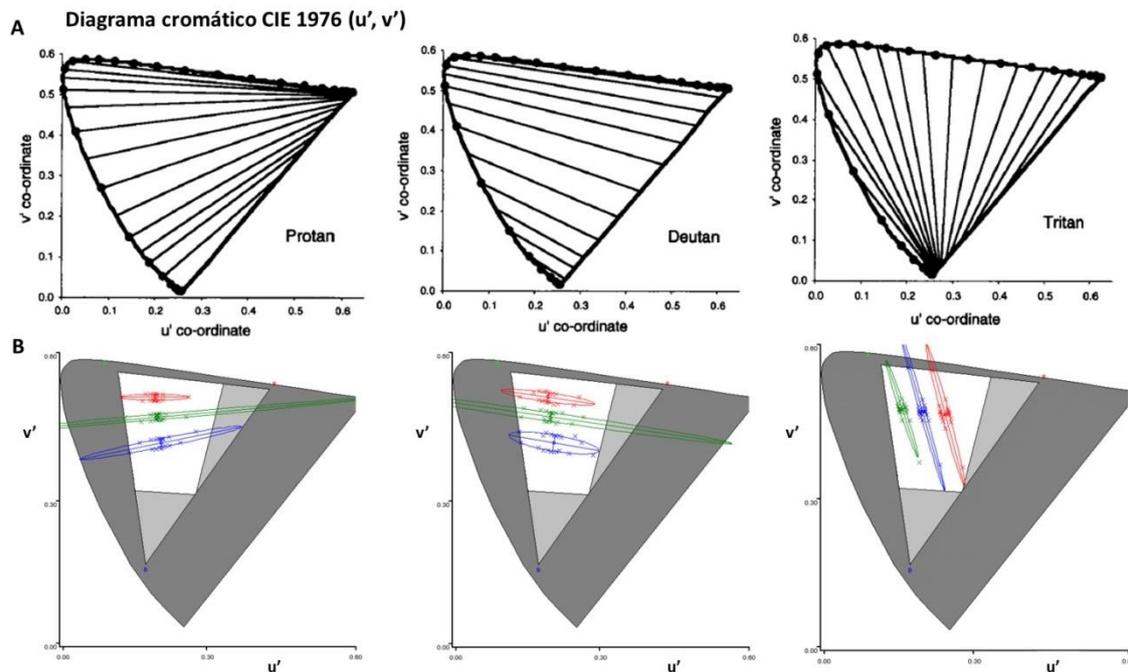


Figura 41 | Na figura A, estão representadas as linhas de confusão isocromáticas no espaço CIE 1976 (u' , v') para os prota, deutera e trita (adaptada de Stephen J. Dain, 2004). Na figura B, estão representadas as respectivas elipses de discriminação conseguidas através do CCT. O que se verifica é que, nos três casos, as elipses alongam-se na mesma direção das linhas de confusão. Isto prova que o CCT é concebido considerando as linhas de confusão dos dicromatas. Da esquerda para a direita: num prota as elipses apresentam-se ligeiramente para baixo e alongadas na horizontal; num deutera as elipses encontram-se ligeiramente para cima e alongadas horizontalmente; num trita as elipses encontram-se alongadas na vertical e ligeiramente inclinadas para a esquerda (adaptada de B. C. Regan et al., 1994).

2.2.7.1.3. Colour Assessment and Diagnosis (CAD)

O teste CAD é executado num ecrã calibrado e consiste em estímulos coloridos, normalmente, em forma de quadrados, que se movem ao longo das diagonais de um fundo com forma quadrada (podem mover-se nas diagonais do quadrado de cima para baixo ou de baixo para cima) – ver Figura 42. O fundo quadrado, por sua vez, é composto por ruído dinâmico de contraste de luminância. Neste teste, o observador apenas tem de reportar a direção do estímulo colorido que se encontra em movimento, premindo um dos quatro botões disponíveis (J Barbur et al., 2009).

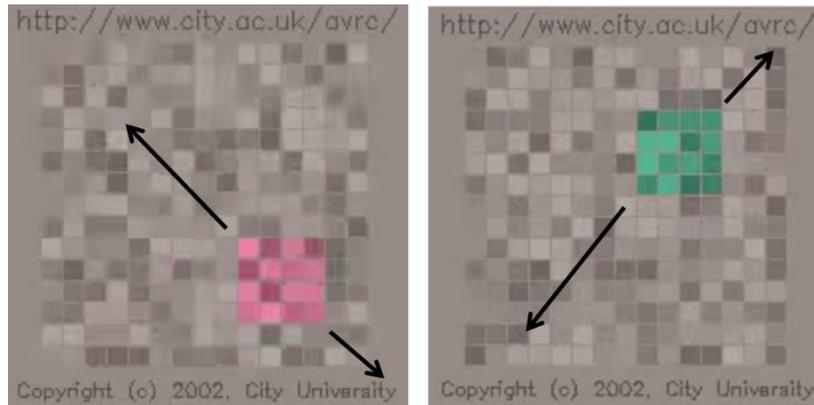


Figura 42 | Conceção do teste CAD. Os estímulos coloridos em forma de quadrado movem-se nas diagonais de um quadrado de cima para baixo ou de baixo para cima (adaptada de (www.city.ac.uk/avrc/)).

O CAD é um teste que permite fazer o diagnóstico preciso do tipo de deficiência envolvida. Tal como o CCT, o CAD adapta-se à deficiência do observador. Além disso, apresenta três novas vantagens em relação aos outros testes convencionais: permite isolar os estímulos de cor e possui uma sensibilidade e precisão mais elevadas. Isolar os estímulos coloridos é muito importante, pois, permite encobrir qualquer pista conseguida através da luminância. Por este motivo, o teste CAD usa ruído de contraste de luminância dinâmico, dado que, permite mascarar com maior eficiência a deteção de qualquer estímulo de contraste de luminância que possa estar presente no alvo de teste colorido. Portanto, o ruído de contraste de luminância dinâmico não afeta o limiar de discriminação dos estímulos de cor, mas mascara com eficácia a deteção de sinais de contraste de luminância (J Barbur et al., 2009).

O procedimento deste teste consiste em quatro alternativas de escolha forçada, isto é, o observador tem sempre que dar uma resposta para o teste avançar. O CAD permite a medição do limiar de discriminação cromática, ao longo de dezasseis direções no espaço cromático CIE 1931 (x, y). Assim, é possível avaliar a sensibilidade cromática tanto no vermelho-verde (RG) como no azul-amarelo (BY). As elipses resultantes da medição do limiar de discriminação cromática são calculadas e representadas usando o diagrama cromático CIE 1931 (x, y) (J Barbur et al., 2009).

De forma a obter os valores médios esperados para o limiar de discriminação cromática, referentes a um indivíduo com visão das cores normal, foram medidos os limiares de discriminação cromática a 450 observadores: em que 250 eram observadores normais e 200 eram observadores anómalos. Na Figura 43, estão representados os valores estatísticos para um observador normal no teste CAD. A elipse a cinzento representa a variabilidade dos limiares de

discriminação cromática para o vermelho-verde e para o azul-amarelo, ou seja, representa a zona do diagrama cromático CIE onde é esperado encontrar 95% dos valores referentes aos tricromatas normais. Também as linhas de confusão referentes aos protanopes, deuteranopes e tritanopes estão representadas a vermelho, verde e azul, respetivamente (J Barbur et al., 2009).

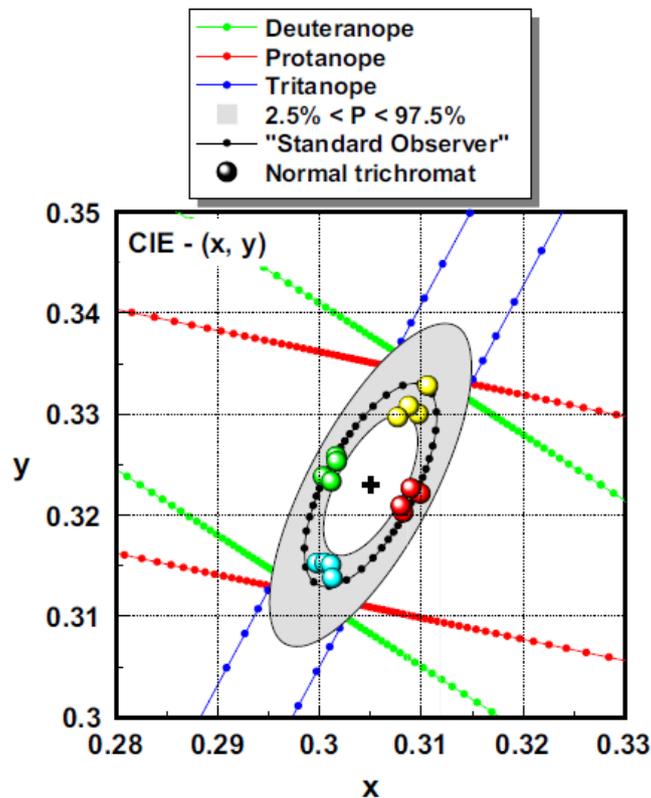


Figura 43 | Representação no diagrama cromático CIE 1931 (x, y) dos limites estatísticos, para o observador normal padrão, no teste CAD. A cruz preta no centro corresponde à cromaticidade de fundo e as suas coordenadas cromáticas (x, y) são (0.305, 0.323). A variabilidade dos limiares para o vermelho-verde (RG) e para o azul-amarelo (BY) está representada pela elipse cinzenta. Esta elipse preenchida a cinzento representa a região do gráfico CIE onde é esperado encontrar 95% dos valores referentes aos tricromatas normais. Os 2.5% e os 97.5% definem as fronteiras da região. A elipse com pontos pretos diz respeito à média dos limiares referentes ao RG e BY medida nos 250 observadores. As linhas de confusão referentes aos protanopes, deuteranopes e tritanopes estão também representadas a vermelho, verde e azul, respetivamente. Alguns dos valores obtidos para um tricromata normal estão representados pelas bolinhas coloridas (verde, amarelo, azul e vermelho) (J Barbur et al., 2009).

Como os limiares são medidos ao longo de várias direções no espaço cromático, é possível obter informação suficiente para classificar mínimas deficiências na visão das cores, o que já não acontece com os testes clínicos convencionais. O teste CAD permite, também, a identificação clara do tipo de deficiência envolvida, através da alongação apresentada pelas elipses ao longo das linhas de confusão. Por sua vez, a severidade da deficiência na visão das cores é tanto maior quanto mais elevados forem os limiares de discriminação, pois, limiares de

discriminação elevados correspondem a sensibilidades cromáticas reduzidas. A severidade pode ser quantificada tomando como referência os valores apresentados por um observador normal – ver Figura 44. A perda de sensibilidade é maior nos protanómalos que nos deuteranómalos (J Barbur et al., 2009).

Os resultados referentes ao limiar de discriminação no vermelho-verde variam muito, ou seja, tanto podem estar muito perto dos valores normais como podem tomar valores muito extremos. O mesmo já não acontece com os limiares de discriminação no azul-amarelo, visto que, apresentam uma variação muito reduzida (J Barbur et al., 2009).

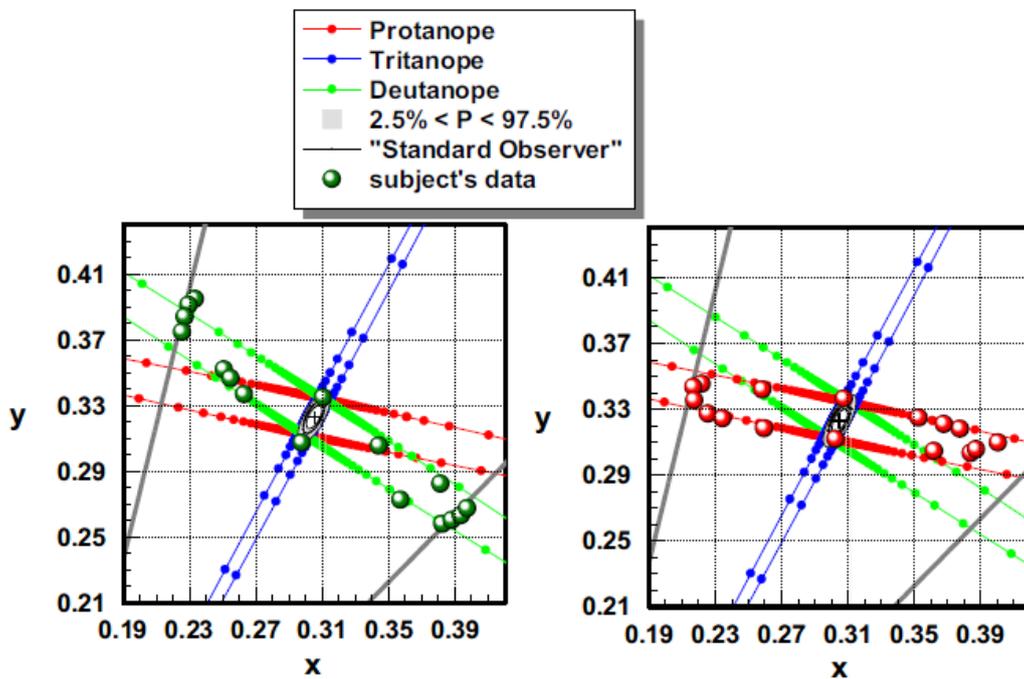


Figura 44 | Limiares de deteção cromática referentes a dois observadores com uma deficiência severa na visão das cores. A severidade das suas anomalias está relacionada com o tamanho da elipse ao longo das linhas de confusão. Quanto maior o alongamento da elipse menor é a sensibilidade cromática. As linhas a cinzento representam os limites do ecrã (J Barbur et al., 2009).

2.2.7.2. Testes de ordenação da cor

Neste tipo de testes é pedido ao observador para ordenar uma série de amostras, a partir de uma peça de referência, e de acordo com a sua tonalidade. Os testes mais conhecidos são o D15 (Farnsworth D15) e o F-M 100 (Farnsworth-Munsell das 100 tonalidades) (Stephen J. Dain, 2004).

O teste das 100 tonalidades foi desenvolvido por Farnsworth na década de 40. No entanto, no teste de F-M 100 não existem 100 tonalidades, dado que, Farnsworth na tentativa de tornar o espaço cromático mais uniforme removeu 15 tonalidades. Assim, Farnsworth dividiu as 85 cores em quatro caixas, em que a primeira peça de cada caixa é igual à última peça da caixa anterior – ver Figura 45 A. O objetivo deste teste é ordenar as peças de forma a criar uma progressão de cor entre as duas peças fixas (Stephen J. Dain, 2004).

A visão das cores altera-se com a idade e, por este motivo, o teste de F-M 100 é dependente da idade do observador, ou seja, a performance neste teste atinge o auge aos 20 anos de idade e a partir daí vai diminuindo. Por esta razão, é necessário referenciar a idade neste teste. A seleção do iluminante usado para fazer o teste é também crítica nos resultados finais (Stephen J. Dain, 2004). Não permite distinguir dicromatas de tricromatas anómalos severos, mas permite classificar a deficiência e determinar o grau de severidade da mesma. Atualmente, não é muito utilizado na prática clínica devido ao tempo que consome a sua aplicação (Schwartz, 2010).

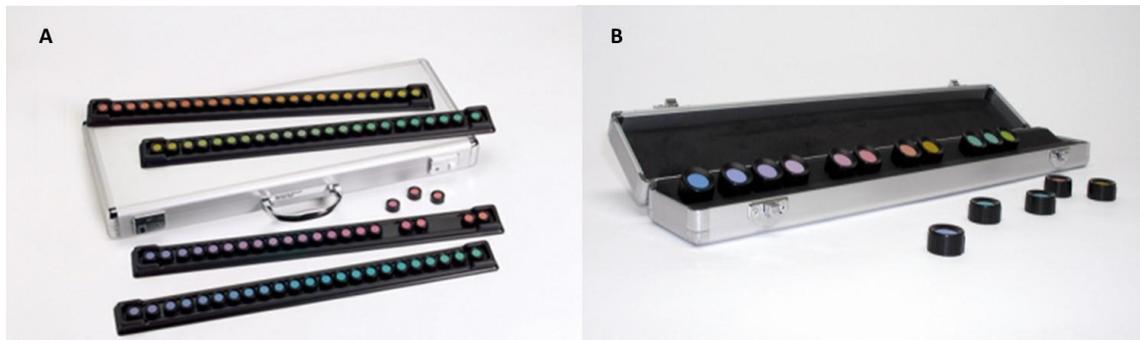


Figura 45| Na figura A está representado o teste F-M 100 e na figura B está representado o teste D15 (<http://www.intermedia.pt/munsell.htm>).

De forma a facilitar a sua aplicação, este teste foi reduzido a 15 tonalidades. Nesta configuração, o teste é denominado de D15, sendo um teste mais rápido e mais fácil para usar na prática clínica. Possui uma peça fixa e 15 peças soltas ou móveis – ver Figura 45 B. O objetivo do teste é ordenar as peças móveis tendo como ponto de partida a peça fixa (Stephen J. Dain, 2004). Este teste não permite distinguir dicromatas de tricromatas anómalos (Schwartz, 2010).

2.2.7.3. *Testes de correspondência*

O teste de correspondência mais conhecido é o realizado com o anomaloscópio de Nagel. O anomaloscópio de Nagel possibilita a identificação clara da anomalia, permitindo, assim, saber se o observador em questão é dicromata ou tricromata anômalo e a sua severidade. A anomaloscopia é uma técnica de diagnóstico de anomalias na visão das cores, que se baseia na reprodução de uma determinada cor através de dois conjuntos de luzes diferentes. O observador vê um campo dividido em duas áreas com cor e brilho diferentes – ver Figura 46. Uma das áreas, a inferior, é iluminada por luz monocromática amarela (590nm) e a outra, a superior, recebe uma mistura de luzes monocromáticas vermelha (670nm) e verde (546nm). O objetivo deste teste é igualar os dois campos, alterando a razão entre as intensidades das luzes vermelha e verde, bem como reduzir ou aumentar o brilho da luz amarela. O anomaloscópio possui dois botões, um que regula a cor da metade superior (campo de mistura de verde e vermelho) e outro que regula o brilho da metade inferior (campo de teste amarelo) (Schwartz, 2010).

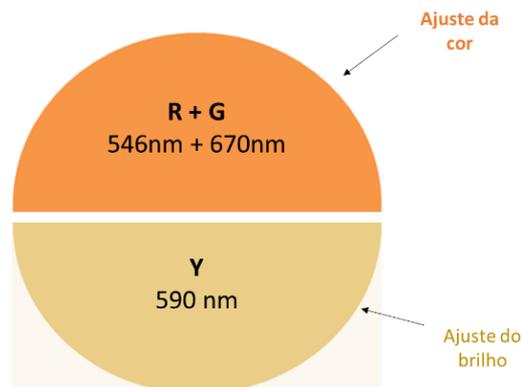


Figura 46| Campo visual bipartido do anomaloscópio de Nagel. O campo de mistura, metade superior, consiste numa mistura ajustável de vermelho (670nm) e verde (546nm). O campo inferior permite ajustar o brilho da luz monocromática amarela (590nm) e é denominado de campo de teste (adaptada de Schwartz, 2010).

Nas proporções adequadas de verde e vermelho, consegue-se obter o amarelo. Na Figura 47, está representado, no diagrama cromático CIE 1931, as três cores monocromáticas tradicionalmente utilizadas no anomaloscópio de Nagel. Estas três cores encontram-se na linha das cores monocromáticas e, portanto, encontram-se sobre a linha de confusão comum aos observadores prota e aos deutera (Schwartz, 2010).

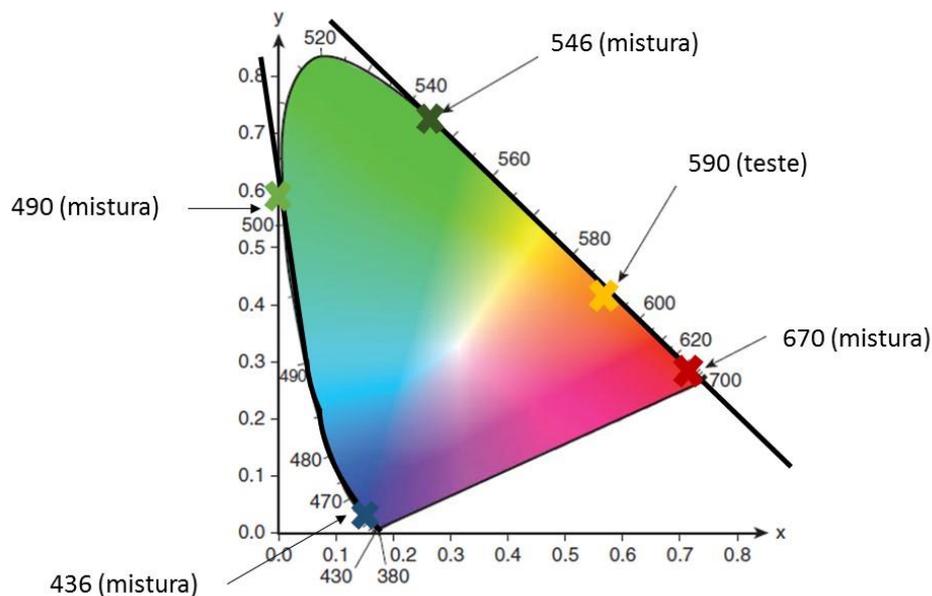


Figura 47 | Representação no diagrama cromático CIE 1931 dos primários utilizados no anomaloscópio de Nagel. Os primários que constituem a equação de Rayleigh ($R (670) + G (546) = Y (590)$) estão sobre uma linha de confusão comum aos deuteranopes e aos protanopes. Os primários utilizados na equação de Moreland estão sobre uma curva ($B (436) + G (490) = Cyan (480) + Y (589)$) o que torna mais difícil equalizar ambos os campos de teste (adaptada de Schwartz, 2010).

Os três primários do anomaloscópio encontram-se sobre uma linha de confusão de dicromatas, levando a que as cores sobre esta linha apareçam idênticas independentemente do ajuste que se faça. Dos 546nm aos 700nm, aproximadamente, indivíduos deuteranopes ou protanopes possuem visão monocromática, pois, só possuem um único cone sensível para estes comprimentos de onda (Schwartz, 2010).

Na Figura 48, está representado o resultado esperado neste teste, para as diferentes condições. Nos deuteranopes, o resultado obtido no campo de teste referente ao brilho é praticamente igual aos indivíduos tricromatas normais. No campo referente à mistura, igualam o amarelo com verde puro (para eles o verde puro é igual ao amarelo), sendo necessário ajustar apenas o brilho do campo de teste. Assim, um deuteranope não consegue equalizar os dois campos em cor, mas consegue em brilho tal e qual um observador normal. Por outro lado, nos protanopes o brilho é afetado devido à ausência do cone sensível aos comprimentos de onda longos (cone L). Como consequência, os protanopes necessitam de diminuir o brilho para fazer ajuste com vermelho (670nm) e aumentar o brilho para fazer ajuste com verde (546nm). Assim, os protanopes não conseguem equalizar os campos nem em cor nem em brilho. Para eles o

campo de mistura (R+G) é conseguido com vermelho puro (670nm) e o campo de teste com valores elevados de brilho (Schwartz, 2010).

Os tricromatas anómalos são mais específicos que os dicromatas. No caso dos deuteranómalos, como o espectro de absorção do pigmento do cone M está deslocado da sua posição normal, estes conseguem igualar o campo de teste em cor misturando mais verde. Dependendo da severidade da deficiência, os deuteranómalos vão usar mais ou menos verde para igualar o campo de teste amarelo. Tal como os deuteranopes, os deuteranómalos conseguem igualar os dois campos em brilho, mas não em cor. Os protanómalos, por sua vez, não conseguem igualar os campos nem em brilho nem em cor. Como o espectro de absorção do pigmento referente ao cone L está deslocado da sua posição ótima, os protanómalos misturam mais ou menos vermelho conforme a severidade da sua anomalia. Quanto ao ajuste do brilho este também varia com a severidade da anomalia (Schwartz, 2010).

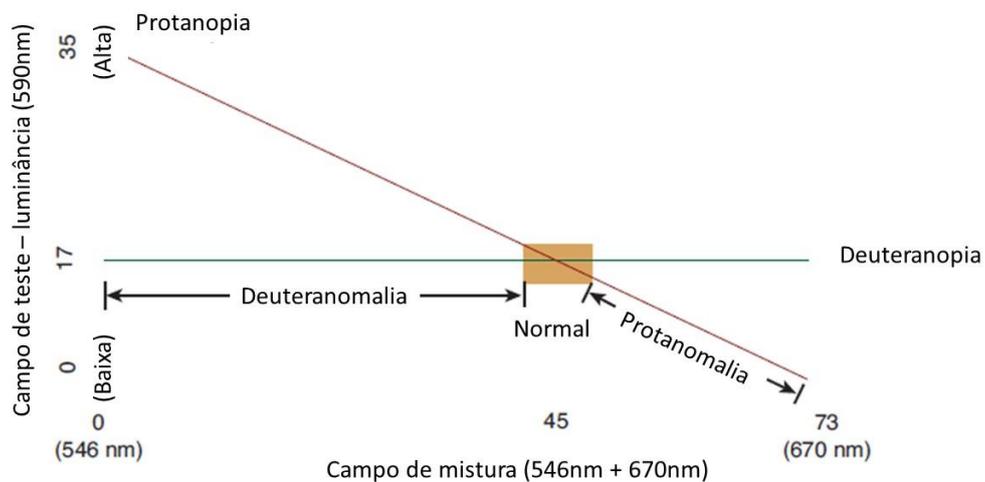


Figura 48 | Representação dos resultados obtidos pelo anomaloscópio de Nagel. A linha verde mostra que tanto os deuteranómalos como os deuteranopes conseguem igualar o brilho do campo de teste, mas não conseguem igualar em cor o campo de mistura. A linha a vermelho indica que tanto os protanómalos como os protanopes não conseguem igualar os campos em brilho ou em cor (adaptada de Schwartz, 2010).

Até agora, apenas se abordou como se diagnostica deficiências no vermelho-verde com o anomaloscópio de Nagel. Este teste é baseado na equação de Rayleigh: $R (670nm) + G (546nm) = Y (590nm)$. A escala do vermelho-verde varia de 0 (verde puro) a 73 (vermelho puro). A equação de Rayleigh no anomaloscópio permite a classificação integral de uma deficiência na visão das cores, isto é, permite distinguir tricromatas anómalos de tricromatas normais,

dicromatas de tricromatas anómalos e identifica tricromatas anómalos severos. É também possível com o anomaloscópio de Nagel o diagnóstico de deficiências no azul-amarelo usando a equação de Moreland: $B (436\text{nm}) + G (490\text{nm}) = \text{Cyan} (480\text{nm}) + Y (590\text{nm})$ (Stephen J. Dain, 2004). Porém, é mais complicado fazer qualquer diagnóstico com o teste de Moreland, dado que, não é possível ter luzes monocromáticas em todo o segmento no diagrama cromático, dada a falta de linearidade nesta área, o que implica uma maior dificuldade na equalização – ver Figura 47.

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1. Ruído de contraste de luminância

Os testes clínicos construídos através de placas pseudoisocromáticas usam ruído de contraste de luminância. Existem atualmente dois testes clínicos computadorizados bastante utilizados em ambiente clínico: o CCT e o CAD. Nestes testes a área do estímulo é definida por um padrão de pequenos quadrados ou discos, dependendo do teste em questão (Barbur, 2004; Regan et al., 1994) Cada quadrado/disco é independente e pode ser modulado em luminância ou cromaticidade, dando origem à percepção de ruído de contraste de luminância com ou sem cromaticidade. O estímulo de teste possui também um alvo constituído por quadrados/discos que podem variar de tamanho e podem assumir diferentes saturações da mesma cor associado a ruído de contraste de luminância. Assim, é possível assegurar que o observador detete o alvo apenas através da cor e não através de pistas de luminância, dado que, o ruído mascara qualquer pista conseguida através da mesma (Barbur, 2004).

A distribuição espacial da luminância e da cor do estímulo pode permanecer constante no tempo, permitindo gerar ruído de contraste de luminância estático, ou pode mudar continuamente no tempo causando ruído de contraste de luminância dinâmico (J. Jason McAnany & Kenneth R. Alexander, 2010).

3.2. Metodologia

3.2.1. Configuração experimental do teste

Neste estudo, foi criado um novo teste para avaliar a visão das cores. Este teste é composto por um ecrã a cores CRT (Sony – GDM F520, Sony Corporation, Japan) controlado por um sistema VisaGe MKII (Cambridge Research Systems, Kent, UK). O ecrã foi calibrado em cor e luminância utilizando um espectroradiómetro (SpectraColorimeter, Model PR-650; Photo Research Inc., Chatsworth, California). A distância do observador ao ecrã do computador era de 1 metro, resultando num campo de visão de 17 graus.

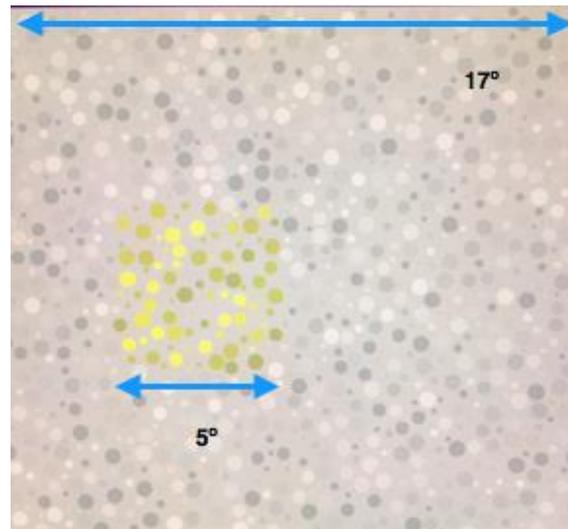


Figura 49 | Representação do estímulo usado na experiência e o correspondente ângulo visual em graus. O fundo a cinzento representa a área total visível, com discos de tamanho variável e valores de luminância aleatórios. A área representada a amarelo é o estímulo de teste. O objetivo deste teste é indicar a posição do estímulo de teste.

3.2.2. O estímulo

O estímulo foi concebido numa área branca uniforme com 11cd/m^2 de forma a preencher toda a área do ecrã. A cor da área uniforme tem as seguintes coordenadas cromáticas: $u'=0.1947$ e $v'=0.4639$, quando representada no diagrama cromático uniforme CIE 1976 (diagrama UCS). A área uniforme foi preenchida por discos com tamanho variável, ocupando cerca de 1 a 4% da área total do ecrã, em posições aleatórias. Cada disco tem valores de luminância aleatórios que podem variar de 6 a 16cd/m^2 e possuem a mesma cor que a área uniforme branca. Esta distribuição abrange o fundo e vai remover pistas de luminância que possam ser usadas pelo observador para identificar o estímulo de teste. O estímulo de teste pode aparecer tanto do lado direito como do lado esquerdo do ecrã e sempre por cima do fundo. A área do alvo está deslocada do centro do ecrã cerca de 0.3 graus e possui uma área de 5 graus de ângulo visual. A Figura 49 descreve a distribuição do fundo e do alvo. Cada disco que está na área do alvo manteve o seu valor de luminância, apesar de, nessa área existir alterações de cor. Foram testadas 20 tonalidades cuja saturação mínima corresponde à cor de fundo. Cada cor possuía uma distância máxima à cor de fundo de $0.03\ u', v'$ no diagrama cromático CIE 1976 UCS. O valor individual de cada cor pode ser ajustado desde a sua posição máxima até à cor apresentada pelo fundo.

Na Figura 50, as 20 tonalidades utilizadas nesta experiência, estão representadas por quadrados a cinzento e a cor do fundo por um círculo cinzento. Quando comparado com os

limites do diagrama cromático uniforme CIE 1976 (u' , v'), as coordenadas cromáticas estão longe da saturação máxima, mas dentro do gamut do monitor utilizado. Por sua vez, estão todas à mesma distância da cor de fundo. Quando cada disco altera a sua luminância aleatoriamente de 6 a 16 cd/m² a cada 100ms, o ruído de contraste de luminância (RCL) passa a ser dinâmico com uma frequência de 10Hz. Em contraposição, quando cada disco mantém a sua luminância constante (mas, diferente de disco para disco) durante a apresentação do estímulo, o RCL passa a ser estático.

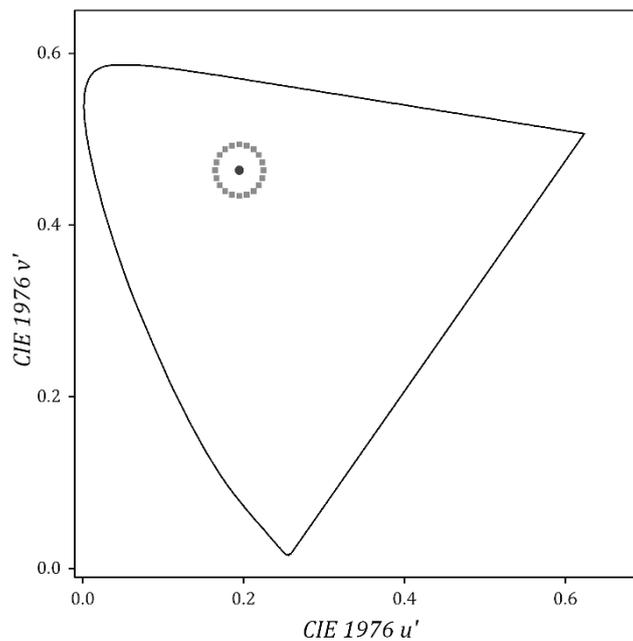


Figura 50 | Representação das 20 tonalidades utilizadas (quadrados cinzentos) e a cor de fundo (círculo cinzento escuro), exibidas no digrama CIE 1976 UCS (u' , v').

A experiência foi, assim, dividida em duas condições, uma em que o RCL é estático e a outra em que o RCL é dinâmico. Todas as outras condições da experiência foram mantidas.

3.2.3. Observadores

Fizeram parte desta experiência 15 observadores. Todos os observadores foram avaliados, diagnosticados e caracterizados como normais ou deficientes na visão das cores (DVC) usando diferentes tipos de testes de visão das cores: o teste das 100 tonalidades de Farnsworth-Munsell (FM-100), o anomaloscópio, o Cambridge Colour Test (CCT) e o Colour Assessment and Diagnosis (CAD). Seis observadores foram distinguidos como tendo uma visão das cores normal, enquanto que, os restantes nove foram caracterizados como observadores

deficientes na visão das cores (DVC). Os observadores normais eram três homens e três mulheres com uma média de idades de 28 anos (± 10 anos). Os observadores deuteranómalos eram cinco homens e uma mulher com uma média de idades de 32 anos (± 12 anos). Os observadores protanómalos eram 2 homens e 1 mulher com uma média de idades de 35 anos (± 9 anos). Todos os observadores tinham os meios oculares normais e realizaram o teste com a sua melhor correção visual. Todos os observadores tiveram acesso e assinaram um consentimento informado onde todo o procedimento experimental foi explicado (ver anexo 1).

3.2.4. Protocolo de teste

A tarefa dos observadores era indicar a posição do alvo no lado direito ou no lado esquerdo do ecrã. O alvo tinha a forma de um quadrado, cuja cor era distinguida do fundo. Cada observador executou três repetições do mesmo teste nas duas condições distintas. A primeira condição de teste era baseada em RCL estático e a segunda condição de teste em RCL dinâmico.

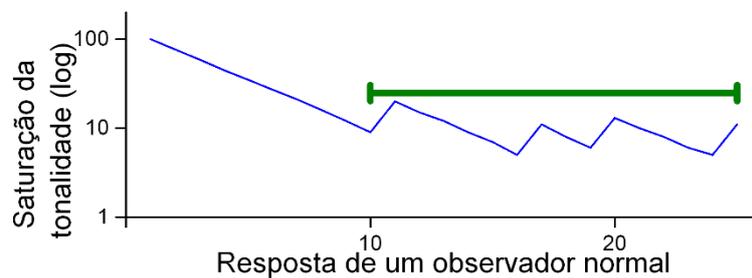


Figura 51 | Resposta típica de um observador durante a experiência assumindo uma condição de 2AEF (duas alternativas de escolha forçada) num procedimento em escada. A linha a azul representa as 25 vezes que o alvo foi mostrado. A linha a verde representa as últimas 15 respostas que serviram para estimar o limiar de discriminação.

Em cada caso tanto o fundo como o alvo eram visíveis apenas durante 1 segundo, permanecendo um fundo uniforme com uma luminância de 11cd/m^2 durante o tempo restante, para garantir a adaptação cromática do observador ao estímulo. Foi selecionado um par de tonalidades oponentes, aleatoriamente, para primeiro estímulo. A primeira tonalidade a ser testada foi também selecionada, aleatoriamente deste par, e apresentada na sua máxima saturação. As duas alternativas de resposta eram de escolha forçada, isto é, só era apresentado um novo estímulo após a resposta do observador. O estímulo a apresentar após a resposta do observador, era definido através de um procedimento em escada e aleatoriamente de um dos braços, sendo menos saturada sempre que o observador acertava na posição do alvo e mais

saturada sempre que falhava a posição do alvo. Cada tonalidade foi apresentada 25 vezes, mas apenas as últimas 15 respostas foram usadas para calcular os limiares de detecção, como representado na Figura 51 (resposta típica de um observador normal): a linha azul representa as 25 vezes que cada cor foi apresentada e a linha a verde as 15 últimas respostas de cada observador. O par seguinte de tonalidades oponentes foi, então, selecionado, aleatoriamente, até todas as 20 tonalidades serem testadas. As duas condições de teste foram executadas em semanas diferentes e as três repetições de cada condição de teste foram testadas em diferentes dias, para prevenir memória de cor e possíveis efeitos de aprendizagem.

3.3. Resultados

Das respostas obtidas em cada sessão, foi utilizado o valor médio das últimas 15 (das 25 totais) respostas como métrica do limiar de discriminação cromático para cada tonalidade. O valor médio dos limiares de discriminação obtidos nas três repetições realizadas foi, então, estimado para cada uma das 20 tonalidades analisadas. Este procedimento foi aplicado nas duas condições experimentais (com RCL estático e com RCL dinâmico). No fim, obtiveram-se as coordenadas u' , v' finais, como se pode averiguar pela Tabela 2.

Tabela 2 | Representação dos resultados finais utilizados para a análise dos resultados.

		RCL estático			RCL dinâmico		
		Média das coordenadas cromáticas		Distância ao branco	Média das coordenadas cromáticas		Distância ao branco
Observador	Tonalidade	u'	v'		u'	v'	
A	1	0,1947	0,4659	0,0020	0,1947	0,4671	0,0032
A	2	0,1939	0,4663	0,0025	0,1939	0,4663	0,0026
A	3	0,1932	0,4660	0,0026	0,1930	0,4662	0,0028
A	4	0,1920	0,4658	0,0033	0,1923	0,4656	0,0030
A	5	0,1923	0,4647	0,0025	0,1934	0,4643	0,0013
A	6	0,1911	0,4639	0,0036	0,1923	0,4639	0,0024
A	7	0,1851	0,4608	0,0101	0,1844	0,4606	0,0108
A	8	0,1864	0,4579	0,0102	0,1853	0,4571	0,0116
A	9	0,1886	0,4555	0,0104	0,1870	0,4533	0,0131
A	10	0,1902	0,4500	0,0146	0,1885	0,4449	0,0200
A	11	0,1947	0,4555	0,0084	0,1947	0,4566	0,0073
A	12	0,1955	0,4615	0,0025	0,1964	0,4587	0,0054
A	13	0,1961	0,4620	0,0024	0,1967	0,4611	0,0034
A	14	0,1960	0,4630	0,0016	0,1970	0,4622	0,0028
A	15	0,1964	0,4633	0,0018	0,1967	0,4632	0,0021
A	16	0,1957	0,4639	0,0010	0,1972	0,4639	0,0025
A	17	0,1961	0,4644	0,0015	0,1964	0,4645	0,0018
A	18	0,1965	0,4652	0,0022	0,1957	0,4646	0,0012
A	19	0,1955	0,4650	0,0014	0,1965	0,4664	0,0031
A	20	0,1954	0,4661	0,0023	0,1955	0,4664	0,0026

Para melhor facilitar a visualização e estimativa algébrica do limiar de discriminação, este foi, posteriormente, calculado tendo como base a Equação 5 para a distância euclidiana:

$$d = \sqrt{(u'_1 - u'_b)^2 + (v'_1 - v'_b)^2}$$

Equação 5 | Equação para o cálculo da distância euclidiana. A letra d indica o limiar de detecção; u'_1 e v'_1 são as coordenadas cromáticas referentes à tonalidade para um dado observador; u'_b e v'_b são as coordenadas cromáticas do branco e apresentam os seguintes valores: $u'_b = 0,1947$ e $v'_b = 0,4639$.

Assim, para cada tonalidade, a distância que separa o limiar de discriminação e o branco, passou a ser assumida como o limiar de discriminação para cada tonalidade.

3.3.1. Comparação das variáveis RCL estático e RCL dinâmico entre os observadores normais, protanómalos e deuteranómalos

3.3.1.1. *Observadores normais*

Como os testes paramétricos pressupõem a normalidade em amostras de dimensão igual ou inferior a 30, é necessário testar se a amostra possui uma distribuição normal. Foram executados dois testes de normalidade no IBM SPSS Statistics v21 (IBM Corporation, New York,

United States): o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Shapiro-Wilk (este teste é considerado o mais robusto no caso em análise). Nos observadores normais, foram avaliadas 20 tonalidades para 6 observadores (n=120). Na Tabela 3, são revelados os resultados obtidos a partir dos dois testes.

Tabela 3| Foram executados dois testes de normalidade no IBM SPSS, com o objetivo de averiguar se as variáveis RCL estático e RCL dinâmico, em observadores normais, seguiam uma distribuição normal: o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Shapiro-Wilk. Como o valor de $p < 0,05$, a hipótese nula foi rejeitada para ambas as variáveis, logo, as distribuições não são normais em ambos os testes.

Testes de Normalidade

	Kolmogorov-Smirnov ¹			Shapiro-Wilk		
	Estatística	gl	Sig.	Estatística	gl	Sig.
RCL estático	,213	120	,000	,602	120	,000
RCL dinâmico	,269	120	,000	,558	120	,000

1. Correlação de Significância de Lilliefors

A hipótese nula (H0) é: “a distribuição de RCL estático ou RCL dinâmico é normal” e a hipótese alternativa (H1) é: “a distribuição de RCL estático ou RCL dinâmico não é normal”. Como o valor de $p < 0,05$ a hipótese nula é rejeitada, ou seja, rejeita-se a hipótese de que tanto a variável RCL estático como a variável RCL dinâmico seguem uma distribuição normal.

Na Figura 52, é possível averiguar que as distribuições das duas variáveis, RCL estático e RCL dinâmico, são assimétricas ou enviesadas para a esquerda, para a população normal.

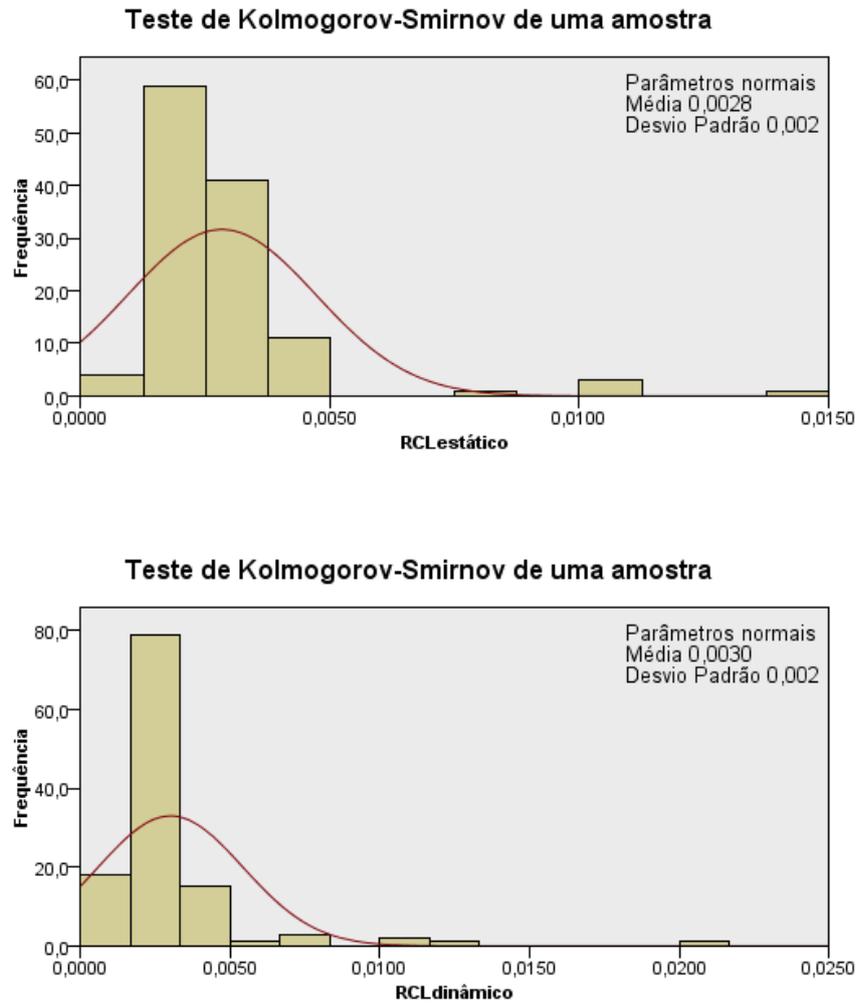


Figura 52 | Distribuição de frequências dos limiares de discriminação para observadores normais. Em ambas as figuras é possível visualizar que as distribuições para as variáveis RCL estático e RCL dinâmico são assimétricas ou enviesadas, pois o pico está desviado para a esquerda.

Como ambas as distribuições das variáveis RCL estático e RCL dinâmico não seguem uma distribuição normal para os observadores normais, foi realizado um teste não paramétrico (Teste dos postos sinalizados de Wilcoxon) com o objetivo de perceber se existiam diferenças estatisticamente significativas entre as duas variáveis – ver Tabela 4.

Tabela 4 | Teste não paramétrico dos postos sinalizados de Wilcoxon para observadores normais. Como o valor de $p > 0.05$, a hipótese nula é retida. Assim, conclui-se que não existem diferenças estatisticamente significativas entre as duas variáveis para os observadores normais.

Sumarização de Teste de Hipótese

	Hipótese nula	Teste	Sig.	Decisão
1	A mediana das diferenças entre RCL estático e RCL dinâmico é igual a 0.	Teste dos postos sinalizados de Wilcoxon de Amostras Relacionadas	,485	Retar a hipótese nula.

São exibidas significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

A hipótese nula (H_0) é: “a mediana das diferenças entre RCL estático e RCL dinâmico é igual a 0” e a hipótese alternativa (H_1) é: “a mediana das diferenças entre RCL estático e RCL dinâmico é diferente de 0”. Uma vez que, $p > 0.05$, a hipótese nula é retida. Portanto, não existem diferenças estatisticamente significativas entre as duas variáveis para os observadores normais.

3.3.1.2. *Observadores protanómalos*

Nos observadores protanómalos, foram avaliadas 20 tonalidades para 3 observadores ($n=60$). Foram, novamente, realizados dois testes de normalidade no IBM SPSS: o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Shapiro-Wilk (este teste é considerado o mais robusto no caso em análise). Na Tabela 5, são revelados os resultados obtidos a partir dos dois testes.

Tabela 5 | Foram executados dois testes de normalidade no IBM SPSS, com o objetivo de averiguar se as variáveis RCL estático e RCL dinâmico, em observadores protanómalos, seguiam uma distribuição normal: o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Shapiro-Wilk. Como o valor de $p < 0.05$, a hipótese nula foi rejeitada para ambas as variáveis, logo, as distribuições de RCL estático e RCL dinâmico não são normais em ambos os testes.

Testes de Normalidade

	Kolmogorov-Smirnov ¹			Shapiro-Wilk		
	Estatística	gl	Sig.	Estatística	gl	Sig.
RCL estático	,204	60	,000	,778	60	,000
RCL dinâmico	,243	60	,000	,716	60	,000

1. Correlação de Significância de Lilliefors

A hipótese nula (H_0) é: “a distribuição de RCL estático ou RCL dinâmico é normal” e a hipótese alternativa (H_1) é: “a distribuição de RCL estático ou RCL dinâmico não é normal”.

Como o valor de $p < 0.05$ a hipótese nula é rejeitada, ou seja, rejeita-se a hipótese de que tanto a variável RCL estático como a variável RCL dinâmico seguem uma distribuição normal.

Na Figura 53, é possível verificar que as distribuições das duas variáveis, RCL estático e RCL dinâmico, são assimétricas ou enviesadas para a esquerda, para os observadores protanómalos.

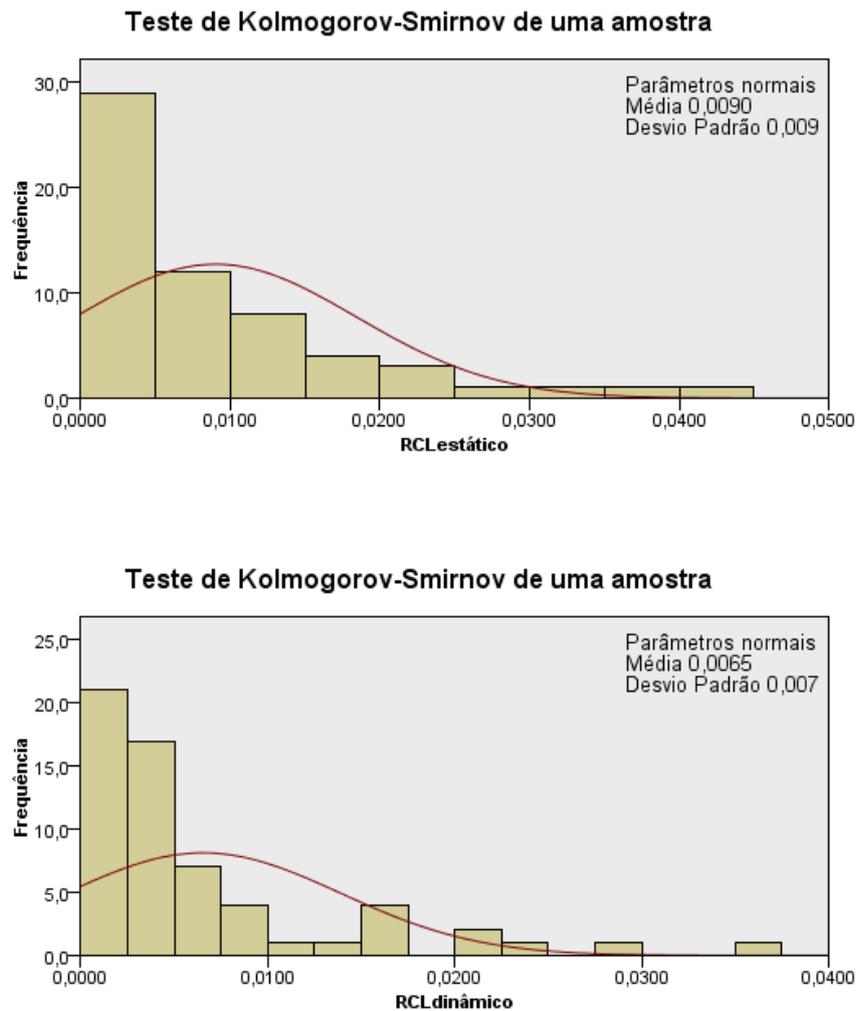


Figura 53| Distribuição de frequências dos limiares de discriminação para os observadores protanómalos. Em ambas as figuras é possível visualizar que as distribuições para as variáveis RCL estático e RCL dinâmico são assimétricas ou enviesadas, pois o pico está desviado para a esquerda.

Como ambas as distribuições das variáveis RCL estático e RCL dinâmico não seguem uma distribuição normal para a os observadores protanómalos, foi realizado um teste não paramétrico (Teste dos postos sinalizados de Wilcoxon) com o objetivo de perceber se existiam diferenças estatisticamente significativas entre as duas variáveis – ver Tabela 6.

Tabela 6 | Teste não paramétrico dos postos sinalizados de Wilcoxon para observadores protanómalos. Como o valor de $p < 0.05$, a hipótese nula é rejeitada. Assim, verifica-se que existem diferenças estatisticamente significativas entre as duas variáveis.

Sumarização de Teste de Hipótese

	Hipótese nula	Teste	Sig.	Decisão
1	A mediana das diferenças entre RCLestático e RCLdinâmico é igual a 0.	Teste dos postos sinalizados de Wilcoxon de Amostras Relacionadas	,000	Rejeitar a hipótese nula.

São exibidas significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

A hipótese nula (H_0) é: “a mediana das diferenças entre RCL estático e RCL dinâmico é igual a 0” e a hipótese alternativa (H_1) é: “a mediana das diferenças entre RCL estático e RCL dinâmico é diferente de 0”. Uma vez que, $p < 0.05$, a hipótese nula é rejeitada. Assim, conclui-se que existem diferenças estatisticamente significativas entre as duas variáveis para os observadores protanómalos.

3.3.1.3. Observadores deuteranómalos

Nos observadores deuteranómalos, foram avaliadas 20 tonalidades para 6 observadores ($n=120$). Foram, novamente, realizados dois testes de normalidade no IBM SPSS: o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Shapiro-Wilk (este teste é considerado mais robusto no caso em análise). Na Tabela 7, são revelados os resultados adquiridos a partir dos dois testes.

Tabela 7 | Foram executados dois testes de normalidade no IBM SPSS, com o objetivo de averiguar se as variáveis RCL estático e RCL dinâmico seguiam uma distribuição normal, em observadores deuteranómalos: o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Shapiro-Wilk. Como o valor de $p < 0.05$, a hipótese nula foi rejeitada para ambas as variáveis, logo, as distribuições não são normais em ambos os testes.

Testes de Normalidade

	Kolmogorov-Smirnov ¹			Shapiro-Wilk		
	Estatística	gl	Sig.	Estatística	gl	Sig.
RCL estático	,227	120	,000	,741	120	,000
RCL dinâmico	,183	120	,000	,769	120	,000

1. Correlação de Significância de Lilliefors

A hipótese nula (H_0) é: “a distribuição de RCL estático ou RCL dinâmico é normal” e a hipótese alternativa (H_1) é: “a distribuição de RCL estático ou RCL dinâmico não é normal”.

Como o valor de $p < 0.05$ a hipótese nula é rejeitada, ou seja, rejeita-se a hipótese de que tanto a variável RCL estático como a variável RCL dinâmico seguem uma distribuição normal.

Na Figura 54, é possível verificar que as distribuições das duas variáveis, RCL estático e RCL dinâmico, são assimétricas ou enviesadas para a esquerda, para os observadores deuteranómalos.

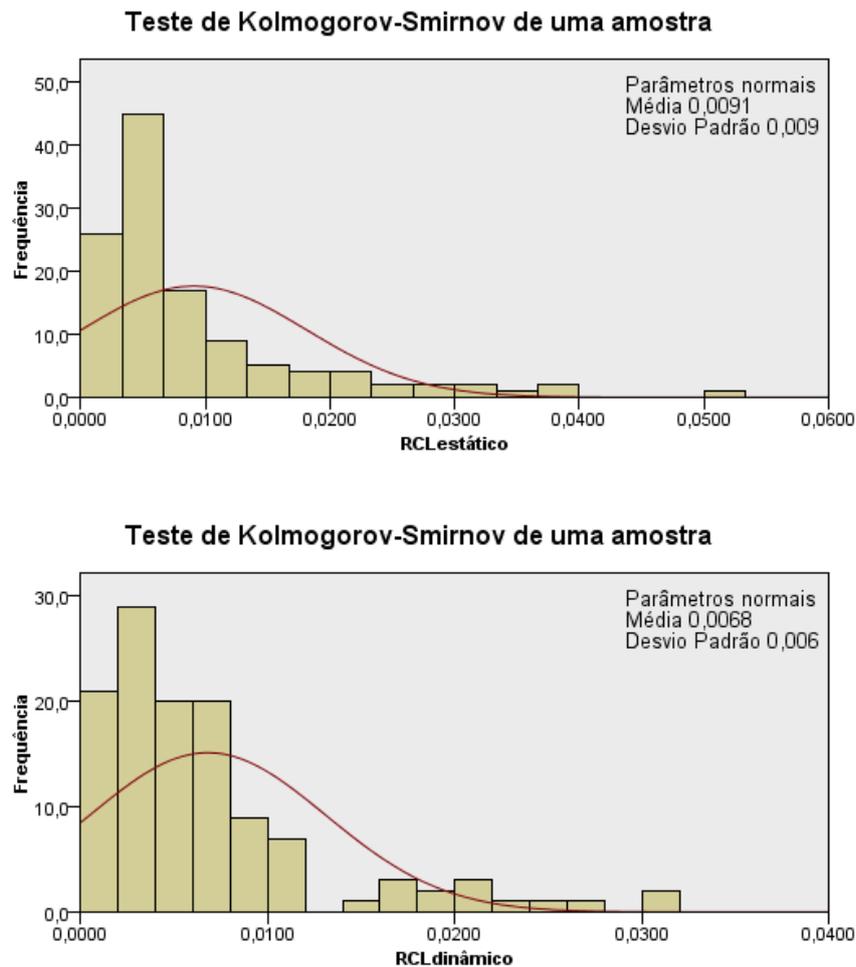


Figura 54 | Distribuição de frequências dos limiares de discriminação para os observadores deuteranómalos. Em ambas as figuras é possível visualizar que as distribuições para as variáveis RCL estático e RCL dinâmico são assimétricas ou enviesadas, pois o pico está desviado para a esquerda.

Como ambas as distribuições das variáveis RCL estático e RCL dinâmico não seguem uma distribuição normal para os observadores protanómalos, foi realizado um teste não paramétrico (Teste dos postos sinalizados de Wilcoxon) com o objetivo de entender se existiam diferenças estatisticamente significativas entre as duas variáveis – ver Tabela 8.

Tabela 8 | Teste não paramétrico dos postos sinalizados de Wilcoxon para os observadores deuteranómalos. Como o valor de $p < 0.05$, a hipótese nula é rejeitada. Assim, verifica-se que existem diferenças estatisticamente significativas entre as duas variáveis.

Sumarização de Teste de Hipótese

	Hipótese nula	Teste	Sig.	Decisão
1	A mediana das diferenças entre RCLestático e RCLdinâmico é igual a 0.	Teste dos postos sinalizados de Wilcoxon de Amostras Relacionadas	,000	Rejeitar a hipótese nula.

São exibidas significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

A hipótese nula (H_0) é: “a mediana das diferenças entre RCL estático e RCL dinâmico é igual a 0” e a hipótese alternativa (H_1) é: “a mediana das diferenças entre RCL estático e RCL dinâmico é diferente de 0”. Dado que, $p < 0.05$, a hipótese nula é rejeitada, logo, conclui-se que existem diferenças estatisticamente significativas entre as duas variáveis para os observadores protanómalos.

3.3.2. Análise dos limiares de discriminação cromática por cor nas duas condições de RCL

3.3.2.1. *Observadores normais*

A Figura 55 B representa a média da distância euclidiana dos limiares de discriminação obtidos para cada uma das 20 tonalidades ao branco de fundo, para todos os observadores normais. Nos observadores normais, as barras do histograma que representam ambas as condições de RCL, apresentam uma distribuição aproximadamente constante pelas 20 tonalidades, não existindo grandes oscilações. Esta uniformidade demonstra que os limiares de discriminação são aproximadamente os mesmos nas 20 tonalidades e nas duas condições testadas.

Os círculos a azul e a vermelho, na Figura 55 A, representam a média das três repetições do teste com a condição de RCL estático e dinâmico, respetivamente, para todas as 20 tonalidades e para um único observador com a visão das cores normal. As 20 tonalidades estão representadas pelos quadrados cinzentos e o disco central cinzento corresponde à cor de fundo. Para melhor visualização dos dados, foi ajustada uma elipse sobre os valores do limiar de discriminação. As linhas a azul e a vermelho da Figura 55 A representam esse mesmo ajuste. O

gráfico inserido no canto superior direito, apresenta uma escala aumentada para permitir uma melhor visualização dos dados. Os dados obtidos para um único observador normal, estão todos muito concentrados e próximos do quadrado cinzento correspondente ao branco de fundo, para ambas as condições de RCL, denotando uma boa discriminação cromática.

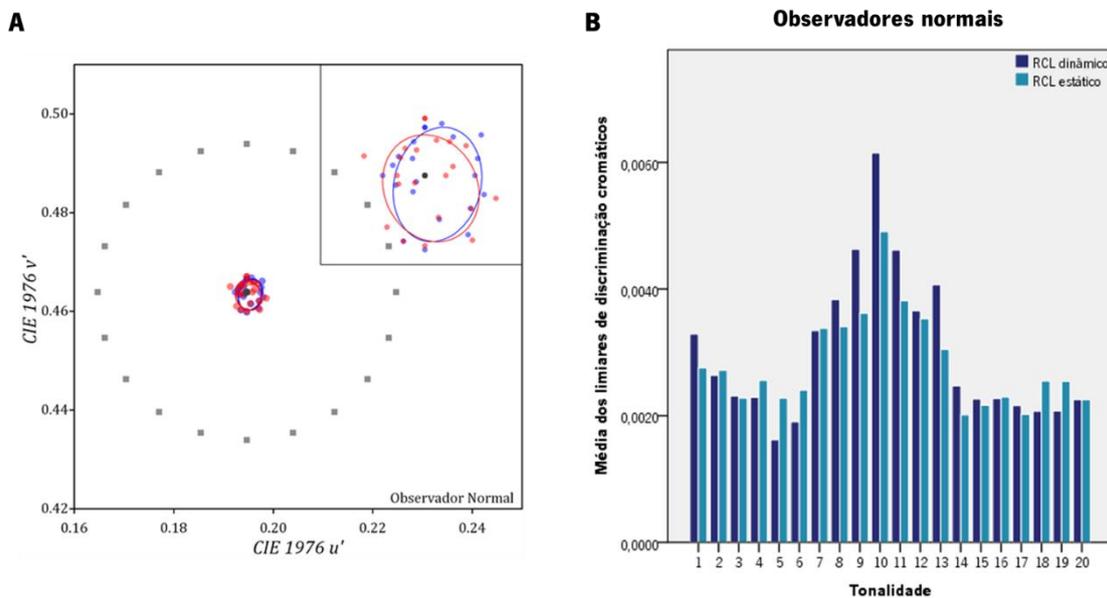


Figura 55| (A) Média dos limiares de discriminação para um observador normal nas duas condições de RCL. Os círculos preenchidos a azul e a vermelho correspondem à condição de teste de RCL estático e dinâmico, respetivamente. Os quadrados cinzentos representam as 20 tonalidades testadas (em que o quadrado cinzento no centro representa a cor de fundo). A linha a azul e a vermelho representam as elipses ajustadas aos dados para um único observador normal na condição de RCL estático e RCL dinâmico, respetivamente. A figura apresentada no canto superior direito representa os mesmos dados que a figura principal, ampliada para melhor visualização. (B) Distância das médias dos limiares de discriminação de cada uma das 20 tonalidades ao branco de fundo para as duas condições de RCL e para todos os observadores normais.

3.3.2.2. Observadores protanómalos e deuteranómalos

Nos observadores protanómalos e deuteranómalos existem dois picos que correspondem ao eixo mais alongado da elipse ajustada aos dados que está representada na Figura 56 A, para um único observador. Estes picos, representados na Figura 56 B, correspondem a valores dos limiares de discriminação maiores, ou seja, correspondem a zonas de confusão com uma distância euclidiana maior ao branco do fundo, para todos os observadores anómalos. Os valores de discriminação cromáticos para as duas condições de RCL, apresentam grandes diferenças ao longo das 20 tonalidades. O aumento do valor do limiar de discriminação cromático face aos observadores normais indica uma pior discriminação cromática – o valor máximo apresentado pelos limiares de discriminação cromáticos para os

observadores anómalos é bastante superior aos observadores normais. Uma distância euclidiana maior ao branco revela uma pior discriminação cromática naquela tonalidade. Assim, as duas tonalidades que representam os braços maiores da elipse são as que apresentam pior discriminação por parte destes dois tipos de observadores anómalos, ou seja, o valor do limiar de discriminação cromático para estes casos é elevado.

Na Figura 56 B, as barras do histograma representam a média da distância euclidiana a que cada tonalidade se encontra do branco de fundo, para ambas as condições de RCL. No caso dos observadores protanómalos, as tonalidades que apresentam uma maior distância euclidiana ao branco são as tonalidades 6, 7 e 16. Por outro lado, nos observadores deuteranómalos as tonalidades que apresentam uma maior distância euclidiana ao branco são as tonalidades 5,6 e 15, o que coincide com os braços alongados das elipses apresentadas para um único observador deuteranómalo.

Na Figura 56 A, a elipse a azul, os quadrados cinzentos e a elipse a vermelho representam os mesmos dados da Figura 55 A, só que desta vez para um observador protanómalo e um observador deuteranómalo, nas duas condições de RCL. Nesta figura é visível o alongamento de um dos eixos da elipse, revelando valores de limiares de discriminação maiores que no observador normal, em direções específicas. A tonalidade 1 corresponde ao quadrado cinzento representado na figura às 12 horas e continua para a tonalidade 2 no sentido contrário ao movimento dos ponteiros do relógio (a tonalidade 2 corresponde às 11 horas).

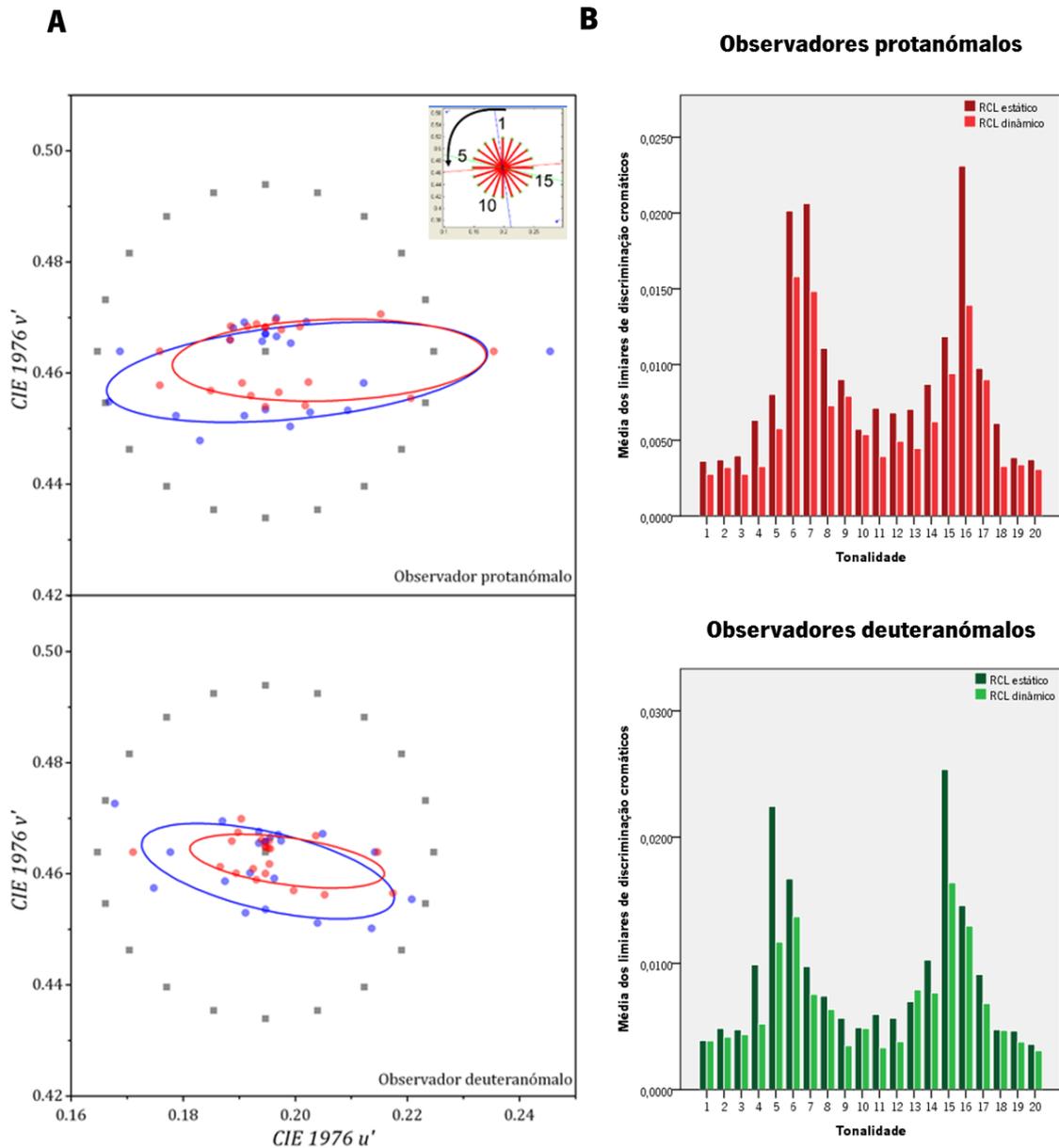


Figura 56| (A) A elipse a azul, os quadrados cinzentos e a elipse a vermelho representam os mesmos dados da Figura 55 A, só que desta vez para um único observador protanómalo e um deuteranómalo, nas duas condições de RCL. Nesta figura é visível o alongamento de um dos eixos da elipse, mostrando valores de limiares de discriminação maiores que no observador normal, em direções específicas. A tonalidade 1 corresponde ao quadrado cinzento representado na figura às 12 horas e continua para a tonalidade 2 no sentido contrário ao movimento dos ponteiros do relógio (a tonalidade 2 corresponde às 11 horas). (B) As barras do histograma representam a média da distância euclidiana a que cada tonalidade se encontra do branco de fundo para ambas as condições de RCL e para todos os observadores protanómalos e deuteranómalos. No caso dos observadores protanómalos, as tonalidades que apresentam uma maior distância euclidiana ao branco são as cores 6, 7 e 16. Por outro lado, nos observadores deuteranómalos as tonalidades que apresentam uma maior distância euclidiana ao branco são as tonalidades 5,6 e 15.

3.3.3. Análise intra-observadores

3.3.3.1. *Observadores normais*

Na Figura 57, está representada a média de todas as tonalidades do desempenho demonstrado por cada observador normal nas duas condições de RCL. As barras que representam ambas as condições de RCL apresentam valores muito próximos para cada observador normal. Portanto, mais uma vez, conclui-se que, analisando observador a observador, não existem diferenças significativas no desempenho do teste com a condição de RCL dinâmico ou com a condição de RCL estático. Logo, o facto de o RCL ser estático ou dinâmico não tem influência na discriminação cromática para os observadores normais.

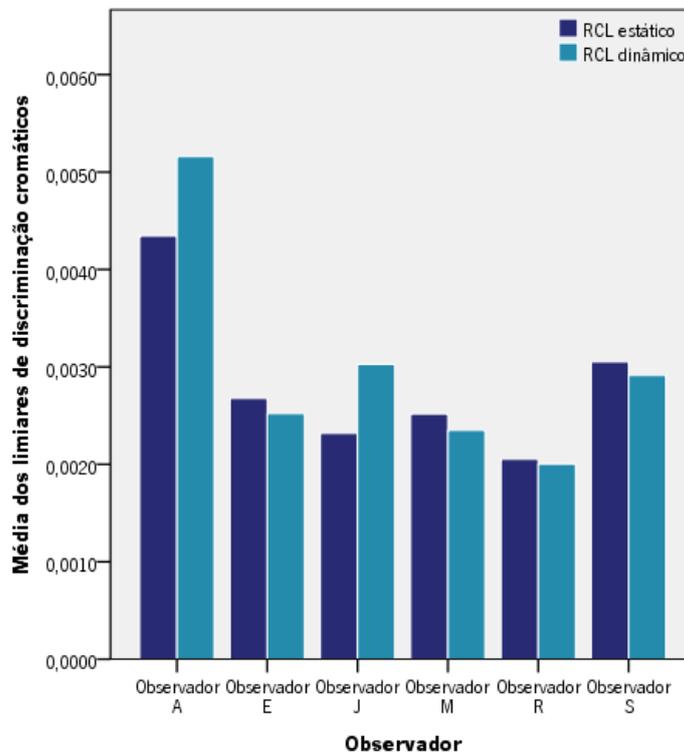


Figura 57 | Média dos limiares de discriminação cromáticos para cada observador normal e nas duas condições de RCL. Não existem grandes diferenças nos limiares de discriminação cromáticos entre as duas condições de RCL para um observador normal.

3.3.3.2. *Observadores protanómalos*

Na Figura 58, está representado o desempenho demonstrado por cada observador protanómalo nas duas condições de RCL. Comparando os três observadores, conclui-se que o observador PC é o que mostra pior discriminação cromática em relação aos outros dois. Isto pode significar que o observador PC apresenta uma anomalia mais severa e o SM uma anomalia

mais ligeira. Mais uma vez, verifica-se que a discriminação cromática tem tendência a melhorar com o RCL dinâmico.

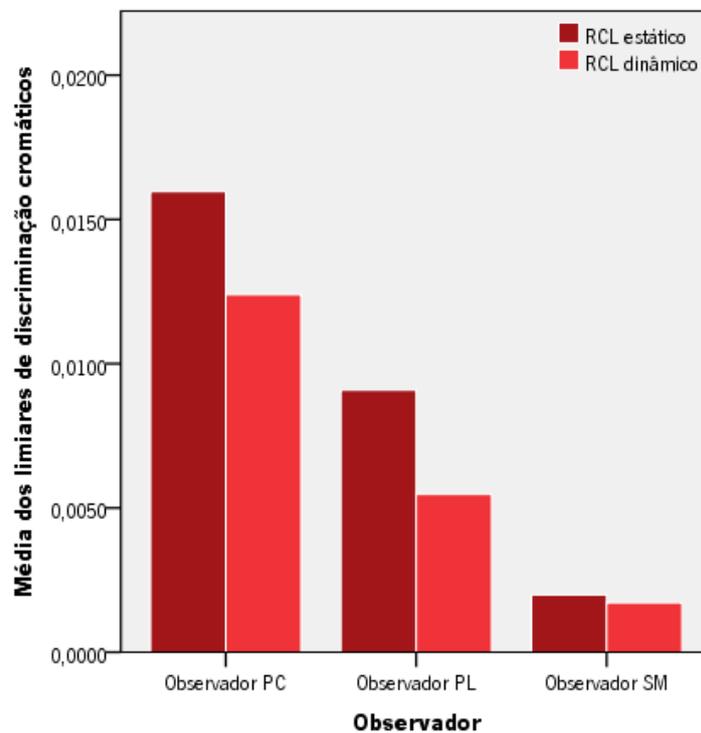


Figura 58| Média das diferentes sessões de medida dos limiares de discriminação cromáticos para cada observador protanômalo e nas duas condições de RCL. As diferenças nos valores de discriminação cromática entre observadores pode dever-se à severidade da anomalia que cada um apresenta. Sendo assim, o observador PC apresenta uma anomalia mais severa que os outros dois e o observador SM apresenta uma anomalia mais ligeira. Verifica-se que a discriminação cromática tem tendência a melhorar com o RCL dinâmico para os observadores protanómalos, apesar dos diferentes graus de severidade na detecção do limiar de discriminação.

3.3.3.3. Observadores deuteranómalos

Na Figura 59, está representado o desempenho demonstrado por cada observador deuteranômalo nas duas condições de RCL. Mais uma vez, existem vários observadores que possuem diferentes severidades. Os observadores que possuem pior discriminação cromática, ou seja, os observadores que obtiveram valores de limiares de discriminação elevados são os que apresentam uma anomalia na visão das cores mais severa. Neste caso, o observador ES é o que apresenta valores mais elevados e o observador JB valores menos elevados. Verifica-se, novamente, que a discriminação cromática tem tendência a melhorar com o RCL dinâmico.

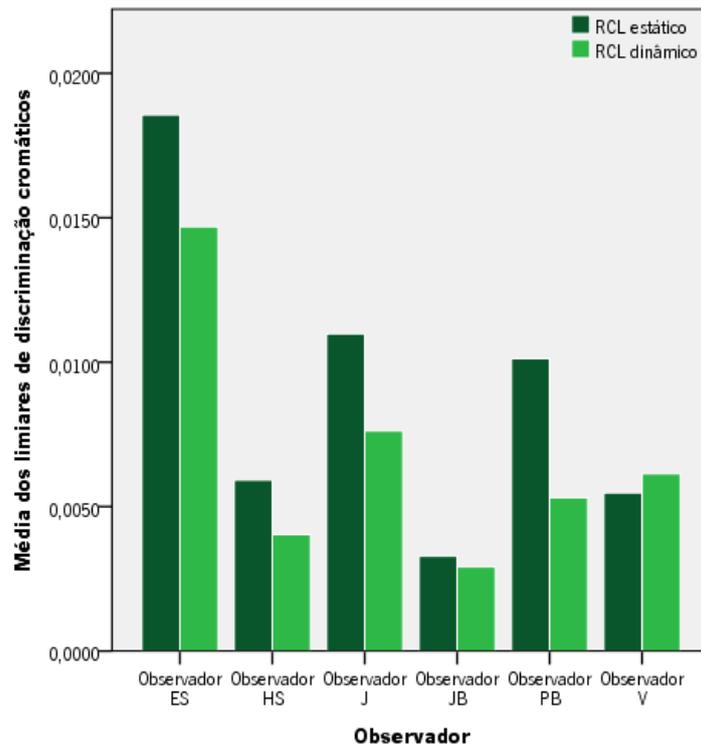


Figura 59 | Média das diferentes sessões de medida dos limiares de discriminação cromáticos para cada observador deuteranômalo e nas duas condições de RCL. As diferenças nos valores de discriminação cromática entre observadores pode dever-se à severidade da anomalia que cada um apresenta. Sendo assim, o observador ES apresenta uma anomalia mais severa que os outros cinco e o observador JB apresenta uma anomalia mais ligeira. Verifica-se que a discriminação cromática tem tendência a melhorar com o RCL dinâmico nos observadores protanômalos, apesar dos diferentes graus de severidade na detecção do limiar de discriminação.

3.3.4. Resultados globais

Na Figura 60, estão representados os resultados das médias dos limiares de discriminação cromática nas duas condições de RCL, para os três tipos de observadores avaliados. As barras a azul representam a condição de RCL estático e as barras a amarelo representam a condição de RCL dinâmico. Apenas os observadores anômalos (protanômalos e deuteranômalos) apresentam diferenças estatisticamente significativas ($p < 0.05$) entre as duas condições de RCL, revelando uma melhor discriminação cromática com a condição de RCL dinâmico. Nos observadores normais não há qualquer diferença estatisticamente significativa ($p > 0.05$) entre as duas condições, o que mostra que a discriminação cromática não altera com a utilização de RCL dinâmico quando comparado com o RCL estático. A barra de erros representa o erro padrão da média. A análise estatística encontra-se descrita nas tabelas 4, 6 e 8.

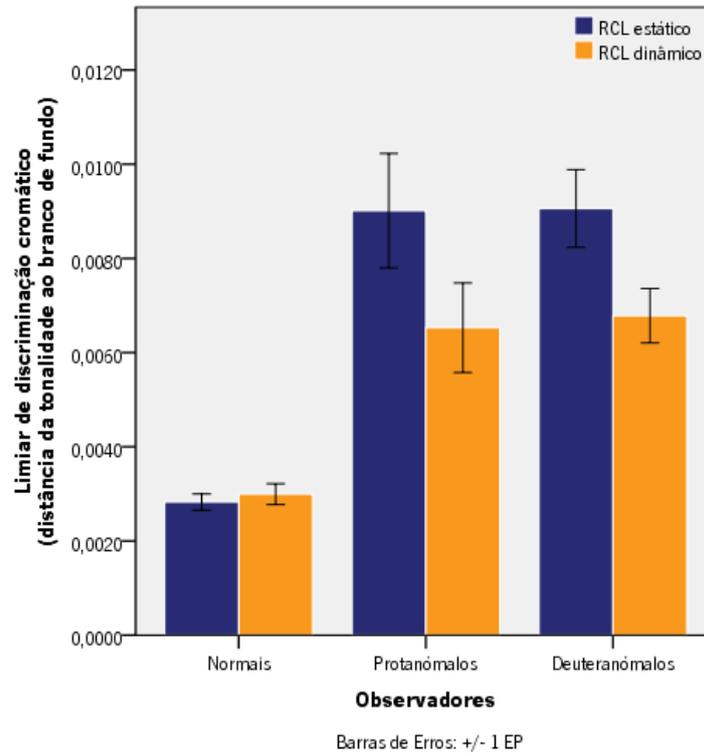


Figura 60| Resultados da média dos limiares de discriminação nas duas condições de teste e para os observadores normais e anômalos, incluindo todas as tonalidades analisadas. As barras a azul representam a condição de RCL estático e as barras a amarelo a condição de RCL dinâmico. Apenas nos observadores anômalos existe diferenças estatisticamente significativas ($p < 0.05$). As barras de erro representam o erro padrão da média.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos neste estudo poderão ter sido influenciados por vários fatores relacionados quer com os observadores quer com o teste/estímulo utilizado. Tal como se verificou nas figuras 58 e 59, existem observadores anómalos que apresentarem diferentes severidades da deficiência da visão das cores. Esta diferença de severidade poderá ter um impacto diferenciado nas duas condições de RCL testadas, que, apesar de estatisticamente significativas, poderiam ser diferentes do esperado se os observadores anómalos avaliados tivessem todos o mesmo grau de severidade da anomalia. A amostra utilizada para este estudo poderia ser maior (para além dos 6 observadores normais, 3 observadores protanómalos e 6 observadores deuteranómalos), mas foi manifestamente difícil encontrar observadores com deficiência na visão das cores, mais concretamente, tricromatas anómalos. Apesar desta limitação a amostra é representativa e segue uma tendência verificada em outros trabalhos apresentados na área (Baraas, Foster, Amano, & Nascimento, 2006; Baraas, Foster, Amano, & Nascimento, 2010). A variabilidade dos tipos de observadores e diferentes severidades representadas valorizam a representatividade da amostra, pelo que não será de esperar uma alteração nos resultados finais pelo aumento do número de observadores. Tal variedade entre os diferentes observadores poderá ser observada nas Figuras 58 e 59, para observadores protanómalos e deuteranómalos, respetivamente. As diferenças de transmitância dos meios oculares entre os diferentes observadores não deverá, também, alterar significativamente o resultado final, uma vez que, o teste é avaliado intra-observadores (o mesmo observador realiza as duas condições de teste). Portanto, este fator está contemplado nas diferenças individuais da visão das cores já abordadas no ponto anterior.

A perceção da cor depende, também, do tamanho do alvo utilizado. Neste teste, o campo de observação para o estímulo alvo foi de 5° e este estava deslocado do centro do ecrã 2°. Este tamanho do alvo estimula, certamente, partes da retina periférica que poderá ter comportamentos diferentes da retina central, quer na deteção de estímulos cromáticos, quer na deteção de RCL e movimento (Foster, Snelgar, & Heron, 1985; S. G. Solomon, Lee, White, Rüttiger, & Martin, 2005; Strasburger, Rentschler, & Juttner, 2011; Swanson, Ueno, Smith, &

Pokorny, 1987; To, Gilchrist, Troscianko, & Tolhurst, 2011). Porém, outros estudos (Barbur, 2004; Birch et al., 1992) que compararam as condições de RCL estático e dinâmico utilizaram um estímulo de 4° centrado em relação ao fundo, o que implica um campo visual menor do que o utilizado aqui. No entanto os resultados obtidos para observadores normais neste trabalho são comparáveis com esses resultados, não sendo possível comparar os resultados obtidos para os observadores dicromatas, uma vez que, não foram analisados neste trabalho.

A frequência utilizada neste teste para gerar RCL dinâmico também pode ter impacto no resultado final. Existem evidências que diferentes frequências afetam a percepção de luminância e cromaticidade do estímulo de teste em observadores tricromatas normais e dicromatas (Sharpe, de Luca, Hansen, Jägle, & Gegenfurtner, 2006; Swanson et al., 1987). A frequência utilizada neste teste foi de 10Hz, ou seja, cada disco mudava o seu valor de luminância 10 vezes por segundo, ficando exposto 100 milissegundos, criando a condição de RCL dinâmico. Este valor de frequência poderá, também, estimular as células magnocelulares, que, não dependendo do mecanismo oponente vermelho-verde, podem favorecer mecanismos pós-recetoriais em tricromatas anómalos, levando a uma possível alteração no mecanismo de oponência dos cones L-M, melhorando a discriminação cromática (S. J. Dain & King-Smith, 1981; Gegenfurtner & Kiper, 1992; Sharpe et al., 2006). Não só a frequência utilizada, mas também a sua distribuição espacial têm impacto na sensibilidade espacial ao contraste, o que poderá influenciar o resultado final (Chen et al., 2014; Gegenfurtner & Kiper, 1992; J. J. Mcanany & K. R. Alexander, 2010).

A utilização de 20 tonalidades pretendeu abranger a análise no máximo de tonalidades sem tornar a avaliação da visão das cores exaustiva, ao ponto de saturar o observador. A utilização de um número de tonalidades, em análise, superior ou ligeiramente inferior, não alteraria o resultado efetivo, permitindo apenas obter um menor/maior ruído, respetivamente, na determinação da elipse que descreve a discriminação cromática.

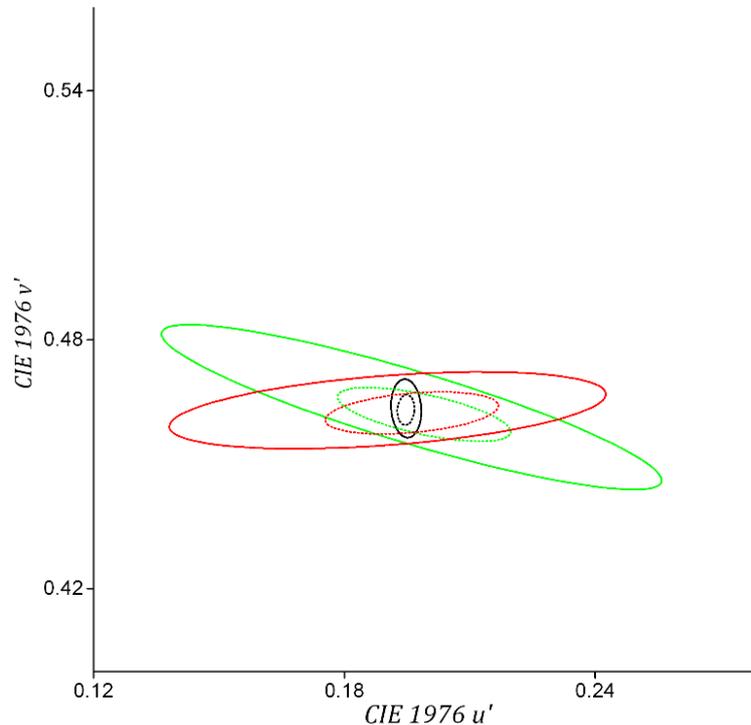


Figura 61 | Elipses de médias de limiares de discriminação cromática de 7 observadores normais (linhas a preto), 6 observadores deuteranómalos (linhas a verde) e 3 protanómalos (linhas a vermelho). As elipses a cheio foram obtidas com o sistema CAD, enquanto que, as linhas a pontilhado foram obtidos com o teste utilizado neste trabalho.

Os resultados obtidos na aplicação deste teste em observadores normais foram, também, comparados com os resultados obtidos por métodos mais estabelecidos, como o CCT e o CAD. A Figura 61 apresenta a comparação do teste utilizado neste trabalho (linhas a pontilhado), com o CAD (linhas a cheio). As elipses representam os limiares de discriminação cromática de uma média de 7 observadores normais (linhas a preto), 6 observadores deuteranómalos (linhas a verde) e 4 observadores protanómalos (linhas a vermelho). Apesar de os limiares de discriminação cromáticos estimados serem maiores no CAD do que no teste aqui utilizado, estes são comparáveis entre os diferentes testes e para os diferentes tipos de observadores, uma vez, que as elipses possuem a mesma orientação e proporcionalidade, demonstrando que este teste pode ser utilizado na deteção de anomalias da visão das cores. Uma vez que, a análise é realizada entre sessões do mesmo teste, não será de esperar que a utilização de um teste diferente, em que as condições de visualização são ajustadas por forma a tornar os testes comparáveis em RCL estático e dinâmico, altere os resultados aqui encontrados.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho pretendeu-se testar a influência de RCL dinâmico na discriminação cromática em observadores tricromatas normais e tricromatas anómalos utilizando um novo teste de visão das cores. Este teste desenvolvido no laboratório da cor da Universidade do Minho permitiu avaliar os limiares de discriminação cromática ao longo de 20 direções no espaço de cor e para duas condições de RCL: estático e dinâmico. Nos observadores tricromatas normais não foram encontradas diferenças nos limiares de discriminação cromáticos, entre as duas condições de RCL testadas. Nos observadores tricromatas anómalos verificou-se uma melhoria nos limiares de discriminação cromáticos com a condição de RCL dinâmico face ao RCL estático.

Os resultados aqui obtidos para os observadores tricromatas normais são equivalentes aos já apresentados noutros estudos (Birch et al., 1992). Para os tricromatas anómalos, mais especificamente, nos protanómalos e deuteranómalos, não se verificou o mesmo resultado relatado em observadores deficientes da visão das cores, mais especificamente nos dicromatas. No caso dos tricromatas anómalos, o RCL dinâmico influencia positivamente os limiares de discriminação cromática, apresentando um efeito distinto ao apresentado pelos observadores dicromatas (Birch et al., 1992).

6. TRABALHO FUTURO

Dados os resultados encontrados no decorrer deste trabalho, em particular, a melhoria do limiar de detecção cromático em observadores anómalos com a utilização de RCL dinâmico e a incapacidade de explicar claramente a razão pela qual tal acontece ou o mecanismo que lhe é associado, não faltarão oportunidades de trabalho futuro. Em particular será desejável:

1. Alargar a base de dados de observadores, não para verificar se o resultado se alterará, mas para incluir ainda mais diferentes graus de severidade de deficiência da visão das cores;
2. Testar o efeito do tamanho (5°) e localização (a 2° do centro do ecrã) do alvo utilizado no resultado final;
3. Testar o efeito de diferentes tipos (sinusoidais ou triangulares) e frequências (maiores e menores que 10Hz) de RCL dinâmico no resultado final.

A análise dos resultados obtidos pela manipulação dos parâmetros experimentais aqui utilizados permitirá, certamente, aumentar a base do conhecimento aqui obtido e tentar avançar com uma explicação mais efetiva do efeito do RCL dinâmico da percepção do limiar de detecção cromático de observadores anómalos

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baraas, R. C., Foster, D. H., Amano, K., & Nascimento, S. M. C. (2006). Anomalous trichromats' judgments of surface color in natural scenes under different daylights. *Vis Neurosci* 23, 629–635.
- Baraas, R. C., Foster, D. H., Amano, K., & Nascimento, S. M. C. (2010). Color constancy of red-green dichromats and anomalous trichromats. *Invest Ophth Vis Sci* 51, 2286–2293.
- Barbur, J. L. (2004). 'Double-blindsight' revealed through the processing of color and luminance contrast defined motion signals. *Applied Vision Research Centre, City University, Northampton Square, London EC1V 0HB, UK*.
- Birch, J., Barbur, J. L., & Harlow, A. f. (1992). New method based on random luminance masking for measuring isochromatic zones using high resolution colour displays. *Ophthai. Physiol. Opt.*, 1992, Vol. 12, April.
- Chen, G., Hou, F., Yan, F.-F., Zhang, P., Xi, J., Zhou, Y., . . . Huang, C.-B. (2014). Noise provides new insights on contrast sensitivity function. *PLoS ONE* 9, e90579.
- CIE. (2005). Colorimetry. *CIE* 15, 1–82.
- Dain, S. J. (2004). Clinical colour vision tests. *Clinical and Experimental Optometry*, 87(4-5), 276-293. doi: 10.1111/j.1444-0938.2004.tb05057.x
- Dain, S. J., & King-Smith, P. E. (1981). Visual thresholds in dichromats and normals; the importance of post-receptoral processes. *Vision Res* 21, 573–580.
- E. Bruce Goldstein, t. E. (2013). *Sensation and Perception*
- Fairchild, M. D. (2005). Color Appearance Models, Second Edition.
- Foster, D. H., Snelgar, R. S., & Heron, J. R. (1985). Nonselective losses in foveal chromatic and luminance sensitivity in multiple sclerosis. *Invest Ophth Vis Sci* 26, 1431–1441.
- Fu, C., Li, C., Cui, G., Luo, M. R., Hunt, R. G., & Pointer, M. R. (2012). An investigation of colour appearance for unrelated colours under photopic and mesopic vision. *Color Research and Application*, 37(4), 238-254. doi: 10.1002/col.20691
- Gegenfurtner, K. R., & Kiper, D. C. (1992). Contrast detection in luminance and chromatic noise. *J Opt Soc Am A* 9, 1880–1888.
- Hartline, H. K., Wagner, H. G., & Ratliff, F. (1956). Inhibition in the eye of Limulus. *The Journal of general physiology*, 39(5), 651-673.

Helmholtz, H. V. (1860). *Physiological Optics Originally published in Proceedings of the Royal Society of London, vol. 10, pp. 404-409 (1860); reprinted from Sources of Colour Science pp. 73-74, MIT Press (1970).*

<http://www.color-blindness.com/2012/10/22/ishiharas-test-for-colour-deficiency38-plates-edition/#prettyPhoto>.

<http://www.intermedia.pt/munsell.htm>.

<http://www.vischeck.com/>.

Hunt, R. W. G., & Pointer, M. R. (2011). *Measuring Colour - Fourth Edition*.

J Barbur, M Rodriguez-Carmona, S Evans, & Milburn, N. (2009). *Minimum Colour Vision Requirements for Professional Flight Crew. Recommendations for new colour vision standards*. Paper 04/2009 (Civil Aviation Authority, UK)

Jeffries, A. M., Killian, N. J., & Pezaris, J. S. (2014). Mapping the primate lateral geniculate nucleus: A review of experiments and methods. *Journal of Physiology-Paris*, 108(1), 3-10. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphysparis.2013.10.001>

Kennedy, B., & Malicki, J. (2009). What Drives Cell Morphogenesis: A Look Inside the Vertebrate Photoreceptor. *Developmental Dynamics*, 238(9), 2115-2138. doi: 10.1002/dvdy.22010

Lamb, T. D., & Pugh Jr, E. N. (2004). Dark adaptation and the retinoid cycle of vision. *Progress in Retinal and Eye Research*, 23(3), 307-380. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.preteyeres.2004.03.001>

Lehmann, G. L., Benedicto, I., Philp, N. J., & Rodriguez-Boulan, E. (2014). Plasma membrane protein polarity and trafficking in RPE cells: Past, present and future. *Experimental Eye Research*, 126(0), 5-15. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.exer.2014.04.021>

Linhares, J., Pinto, P. D., & Cardoso Nascimento, S. M. (2008). The number of discernible colors in natural scenes. *J Opt Soc Am A* 25, 2918–2924.

Linhares, J. M. M., Pinto, P. D., & Nascimento, S. M. C. (2008). The number of discernible colors perceived by dichromats in natural scenes and the effects of colored lenses. *Vis Neurosci* 25, 493–499.

Malhotra, A., Minja, F. J., Crum, A., & Burrowes, D. (2011). Ocular Anatomy and Cross-Sectional Imaging of the Eye. *Seminars in Ultrasound Ct and Mri*, 32(1), 2-13. doi: 10.1053/j.sult.2010.10.009

McAnany, J. J., & Alexander, K. R. (2010). Spatial contrast sensitivity in dynamic and static additive luminance noise. *Vision Research* 50 (2010) 1957–1965.

Mcanany, J. J., & Alexander, K. R. (2010). Spatial contrast sensitivity in dynamic and static additive luminance noise. *Vision Res* 50, 1957–1965.

Newton, S. I. (1718). *Opticks: or a Treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. LONDON: Printed for W. and J. Innys, Printer to the Royal Society, at the Prince's-Arms in St. Paul's Church-Yard.

- Oleari, C., Baratta, G., Lamedica, A., & Macaluso, C. (1996). Confusion Points and Constant-luminance Planes for Trichromats, Protanopes and Deuteranopes. *Vision Research*, 36(21), 3501-3505. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(96\)00089-2](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(96)00089-2)
- Palmer, G. (1777). *Theory of Colours and Vision London*.
- Pointer, M. R., & Attridge, G. G. (1998). The Number of Discernible Colours. *Color Res Appl* 23, 52-54.
- Regan, B. C., Reffin, J. P., & Mollon, J. D. (1994). Luminance noise and the rapid determination of discrimination ellipses in colour deficiency. *Vision Res* 34, 1279-1299.
- Ripamonti, C., Kalwarowsky, S., & Nardini, M. (2014). A Novel Colour Discrimination Test Suitable for Low Vision Observers. *pp. 1-4*.
- Schwartz, S. H. (2010). *Visual Perception - A clinical orientation (Fourth edition)*.
- Sharpe, L. T., de Luca, E., Hansen, T., Jägle, H., & Gegenfurtner, K. R. (2006). Advantages and disadvantages of human dichromacy. *JOV* 6, 213-223
- Simunovic, M. P. (2010). Colour vision deficiency. *Eye*, 24(5), 747-755. doi: 10.1038/eye.2009.251
- Sincich, L. C., & Horton, J. C. (2005). THE CIRCUITRY OF V1 AND V2: Integration of Color, Form, and Motion. *Annual Review of Neuroscience*, 28(1), 303-326. doi: doi:10.1146/annurev.neuro.28.061604.135731
- Snell, R. S., & Lemp, M. A. (1998). *Clinical Anatomy of the eye (Vol. Cpitulo 6)*.
- Solomon, S. G., Lee, B. B., White, A. J. R., Rüttiger, L., & Martin, P. R. (2005). Chromatic organization of ganglion cell receptive fields in the peripheral retina. *J Neurosci* 25, 4527-4539.
- Solomon, S. G., & Lennie, P. (2007). The machinery of colour vision. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(4), 276-286. doi: 10.1038/nrn2094
- Stockman, A., & Brainard, D. H. (2009). COLOR VISION MECHANISMS. HANDBOOK OF OPTICS, Volume III Vision and Vision Optics, 3rd Ed., Bass, M., Enoch, J., Lakshminarayanan, V. editors., OPTICAL SOCIETY OF AMERICA.
- Strasburger, H., Rentschler, I., & Juttner, M. (2011). Peripheral vision and pattern recognition: A review. *JOV* 11, 13-13.
- Sung, C.-H., & Chuang, J.-Z. (2010). The cell biology of vision. *Journal of Cell Biology*, 190(6), 953-963. doi: 10.1083/jcb.201006020
- Swanson, W. H., Ueno, T., Smith, V. C., & Pokorny, J. (1987). Temporal-Modulation Sensitivity and Pulse-Detection Thresholds for Chromatic and Luminance Perturbations. *J Opt Soc Am A* 4, 1992-2005 (1987).
- Swaroop, A., Kim, D., & Forrester, D. (2010). Transcriptional regulation of photoreceptor development and homeostasis in the mammalian retina. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(8), 563-576. doi: 10.1038/nrn2880

- To, M. P. S., Gilchrist, I. D., Troscianko, T., & Tolhurst, D. J. (2011). Discrimination of natural scenes in central and peripheral vision. *Vision Res* 51, 1686–1698.
- Wässle, H. (2004). Parallel processing in the mammalian retina. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(10), 747-711. doi: 10.1038/nrn1497
- Willoughby, C. E., Ponzin, D., Ferrari, S., Lobo, A., Landau, K., & Omid, Y. (2010). Anatomy and physiology of the human eye: effects of mucopolysaccharidoses disease on structure and function - a review. *Clinical and Experimental Ophthalmology*, 38, 2-11. doi: 10.1111/j.1442-9071.2010.02363.x
- Wright, W. D. (1943). The Graphical Representation of Small Color Differences. *Journal of the Optical Society of America*, VOLUME 33, NUMBER 11.
- Yoonessi, A., & Yoonessi, A. (2011). Functional Assessment of Magno, Parvo and Konio-Cellular Pathways; Current State and Future Clinical Applications. *Journal of Ophthalmic & Vision Research*, 6(2), 119-126.
- Young, T. (1802). The Bakerian Lecture: On the Theory of Light and Colours. . *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 92(0), 12–48. doi:10.1098/rstl.1802.0004.

ANEXO 1

Exemplo do consentimento informado entregue a todos os observadores que realizaram o teste



Campus de Gualtar
4710-057 Braga -
Portugal

Universidade do Minho
Escola de Ciências

INFORMAÇÃO AOS VOLUNTÁRIOS E CONSENTIMENTO INFORMADO

Estudo: Modelização da perceção cromática de tricromatas anómalos e otimização da sua discriminação de objetos naturais com lentes coloridas

Responsável: Sérgio Nascimento, Departamento de Física, smcn@fisica.uminho.pt, 253604328/20

Este documento tem como objetivo informar sobre as experiências psicofísicas que vai realizar no âmbito do projeto acima indicado e obter o seu consentimento informado de acordo com a Declaração de Helsínquia.

Este estudo pretende estudar de forma comparativa a visão das cores dos daltónicos com a visão dos observadores normais. As experiências enquadram-se num projeto financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (Modelização da perceção cromática de tricromatas anómalos e otimização da sua discriminação de objetos naturais com lentes coloridas, PTDC/MHC-PCN/4731/2012), têm objetivos científicos e não têm fins comerciais.

As experiências serão realizadas através da visualização de estímulos num monitor calibrado em cor e luminância e numa caixa de luzes standard. Dada a sua natureza não constituem qualquer risco para a saúde.

Eu, _____ declaro:

- Que me foram explicados todos os aspetos relevantes sobre as experiências a serem realizadas;
- Tive oportunidade questionar o investigado, tendo sido respondida de modo satisfatório;
- Posso recusar a qualquer momento a participação ou continuidade no estudo sem quaisquer consequências;
- Autorizo a que os dados sejam publicados de forma anónima com os fins científicos.

Braga, _____ de _____ de 2014

Assinatura: _____

ANEXO 2

Exemplos dos resultados obtidos nos diferentes testes da visão das cores aplicados a todos os observadores para avaliar a sua visão das cores



OCULUS
Made in Germany

HMC ANOMALOSKOP

Red/Green Color Vision

Name: Silva

First name: Eva

Date of birth: 91 /09/ 25

Anomaly Quotient(absolute matching range)

R 0.75 - 0.58

L _____ - _____

Remarks: _____

Matching range
(assumed equations from - to)

R 46.4 - 49.4

12.7 - 19.2


L _____ - _____

_____ - _____

City, date: _____

Stamp, signature: _____

OCULUS Optikgeräte GmbH Dutenhofen · 35582 Wetzlar · Tel. ++49/641/2005-0 · Fax ++49/641/2005-255



Norm 34 - 46 / 15
Normal match 40 / 15

Standard examination
 ABS = absolute matching range

Additional examination
 REL = relative matching range (especially for acquired color vision deficiencies)

Figura 62| Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste do anomaloscópio, num observador normal



HMC ANOMALOSKOP

Red/Green Color Vision

Name: A

First name: J

Date of birth: 93 /05/ 10

Anomaly Quotient(absolute matching range)

R 4.12 - 1.57

L _____ - _____

Remarks: _____


Matching range
(assumed equations from - to)

R 16.6 - 31.8

14.1 - 12.9

L _____ - _____

_____ - _____



Norm 34 - 46 / 15
Normal match 40 / 15

Standard examination
 ABS = absolute matching range

Additional examination
 REL = relative matching range (especially for acquired color vision deficiencies)

City, date: _____

Stamp, signature: _____

OCULUS Optikgeräte GmbH Dutenhofen · 35582 Wetzlar · Tel. ++49/641/2005-0 · Fax ++49/641/2005-255

Figura 63| Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste do anomaloscópio, num observador deuteranómalo.



OCULUS
Made in Germany

HMC ANOMALOSKOP

Red/Green Color Vision

Name: C First name: P

Date of birth: 67 /08/ 20

Anomaly Quotient(absolute matching range)

R 0.33 - 0.21

L _____ - _____

Remarks: _____


Matching range
(assumed equations from - to)

R 62.4 - 62.4

5.8 - 5.9

L _____ - _____

_____ - _____



Color mix

Norm 34 - 46 / 15
Normal match 40 / 15

Standard examination
 ABS = absolute matching range

Additional examination
 REL = relative matching range (especially for acquired color vision deficiencies)

City, date: _____

Stamp, signature: _____

OCULUS Optikgeräte GmbH Dutenhofen · 35582 Wetzlar · Tel. ++49/641/2005-0 · Fax ++49/641/2005-255



Figura 64| Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste do anomaloscópio, num observador protanómalo.

Cambridge Colour Test Results

Subject Details	
Name	Eva Silva,
Gender	Male
Date of Birth	25/09/1991
Test Date	22/01/2015 16:34:54

Test Type	Ellipse	
Field Point 1	0.195	0.464
Field Point 2	0.193	0.509
Field Point 3	0.204	0.416

Results	Field 1
Length	0.0082
Axis ratio	1.09
Angle (deg)	84.7



Vector	Field 1
1	0.0041
2	0.0041
3	0.0041
4	0.0041
5	0.0041
6	0.0041
7	0.0041
8	0.0019
9	0.0041
10	0.0040
11	0.0041
12	0.0063
13	0.0061
14	0.0019
15	0.0056
16	0.0054
17	0.0041
18	0.0041
19	0.0063
20	0.0041

Copyright (C) 2000 - Cambridge Research Systems Ltd



Figura 65| Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste CCT, para um observador normal.

Cambridge Colour Test Results

Subject Details	
Name	J
Gender	Male
Date of Birth	01/01/1980
Test Date	05/06/2014 16:11:06

Test Type	Ellipse	
Field Point 1	0.195	0.464
Field Point 2	0.193	0.509
Field Point 3	0.204	0.416

Results	Field 1
Length	0.3134
Axis ratio	12.53
Angle (deg)	168.5



Vector	Field 1
1	0.0620
2	0.0154
3	0.0096
4	0.0260
5	0.0579
6	0.0187
7	0.0061
8	0.0204

Copyright (C) 2000 - Cambridge Research Systems Ltd

Figura 66| Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste CCT, para um observador deuteranômalo.

Cambridge Colour Test Results

Subject Details



Name P
 Gender Male
 Date of Birth 20/08/1967
 Test Date 05/12/2014 11:12:55

Test Type

Ellipse
 Field Point 1 0.195 0.464
 Field Point 2 0.193 0.509
 Field Point 3 0.204 0.416

Results

Field 1
 Length 0.2023
 Axis ratio 13.47
 Angle (deg) 3.8



Vector	Field 1
1	0.0490
2	0.0262
3	0.0099
4	0.0076
5	0.0109
6	0.0118
7	0.0102
8	0.0061
9	0.0189
10	0.0294
11	0.1100
12	0.0431
13	0.0223
14	0.0073
15	0.0053
16	0.0053
17	0.0134
18	0.0127
19	0.0154
20	0.0166

Copyright (C) 2000 - Cambridge Research Systems Ltd

Figura 67| Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste CCT, para um observador protanômalo.




Figura 68| Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste CAD, para um observador normal.




Figura 69| Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste CAD, para um observador deuteranômalo.




Figura 70| Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste CAD, para um observador protanómalo.




Figura 71 | Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste F-Munsell 100 tonalidades, para um observador normal.




Figura 72 | Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste F-Munsell 100 tonalidades, para um observador deuteranômalo.




Figura 73 | Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste F-Munsell 100 tonalidades, para um observador protanômalo.

TESTE ISHIHARA

Fonte de Luz D-65

Número da placa	Pessoa normal	Pessoa com deficiências vermelho-verde		Pessoa sem visão das cores	Resposta	
1	12	12		12	12	
2	8	3		×	8	
3	6	5		×	6	
4	29	70		×	29	
5	57	35		×	57	
6	5	2		×	5	
7	3	5		×	3	
8	15	17		×	15	
9	74	21		×	74	
10	2	×		×	2	
11	6	×		×	6	
12	97	×		×	97	
13	45	×		×	45	
14	5	×		×	5	
15	7	×		×	7	
16	16	×		×	16	
17	73	×		×	73	
18	×	5		×	×	
19	×	2		×	×	
20	×	45		×	×	
21	×	73		×	×	
		Prota		Deuta		
		Severo	Suave	Severo	Suave	
22	26	6	(2)6	2	2(6)	26
23	42	2	(4)2	4	4(2)	42
24	35	5	(3)5	3	3(5)	35
25	96	6	(9)6	9	9(6)	96

Figura 74| Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste Ishihara, para um observador normal.

TESTE ISHIHARA

Fonte de Luz D-65

Número da placa	Pessoa normal	Pessoa com deficiências vermelho-verde		Pessoa sem visão das cores	Resposta	
1	12	12		12	12	
2	8	3		×	8	
3	6	5		×	x	
4	29	70		×	x	
5	57	35		×	x	
6	5	2		×	x	
7	3	5		×	3	
8	15	17		×	17	
9	74	21		×	21	
10	2	×		×	x	
11	6	×		×	x	
12	97	×		×	x	
13	45	×		×	x	
14	5	×		×	x	
15	7	×		×	x	
16	16	×		×	x	
17	73	×		×	x	
18	×	5		×	4	
19	×	2		×	x	
20	×	45		×	45	
21	×	73		×	X	
		Prota		Deuta		
		Severo	Suave	Severo	Suave	
22	26	6	(2)6	2	2(6)	2
23	42	2	(4)2	4	4(2)	42
24	35	5	(3)5	3	3(5)	3
25	96	6	(9)6	9	9(6)	9

Figura 75| Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste Ishihara, para um observador deuteranômalo.

TESTE ISHIHARA

Fonte de Luz D-65

Número da placa	Pessoa normal	Pessoa com deficiências vermelho-verde		Pessoa sem visão das cores		Resposta
1	12	12		12		12
2	8	3		×		3
3	6	5		×		6
4	29	70		×		10
5	57	35		×		x
6	5	2		×		x
7	3	5		×		x
8	15	17		×		x
9	74	21		×		x
10	2	×		×		x
11	6	×		×		x
12	97	×		×		x
13	45	×		×		x
14	5	×		×		x
15	7	×		×		x
16	16	×		×		x
17	73	×		×		x
18	×	5		×		5
19	×	2		×		8
20	×	45		×		45
21	×	73		×		X
		Prota		Deuta		
		Severo	Suave	Severo	Suave	
22	26	6	(2)6	2	2(6)	x
23	42	2	(4)2	4	4(2)	x
24	35	5	(3)5	3	3(5)	x
25	96	6	(9)6	9	9(6)	x

Figura 76| Exemplo do resultado obtido após aplicação do teste Ishihara, para um observador protanômalo.






Figura 77 | Exemplo do resultado obtido, para um observador normal, após aplicação do teste de cor desenvolvido no Laboratório da Cor da UM.

Max number of trials	25
Step if right	1.3000
Step if wrong (right^3)	2.1970
Show image for (s)	1
Number of disks per size	300
Size disk 1 (% screen)	3
Size disk 2 (% screen)	2.5000
Size disk 3 (% screen)	1.5000
Size disk 4 (% screen)	1
Number of hues	20
Number of Saturations	100
u'0 N	0.2500
v'0 N	0.3500
N radius CIE u'v' 1976	0.0300
u'd0 D	0.1472
v'd0 D	0.3848
u'p0 P	0.1774
v'p0 P	0.3276
u't0 T1	0.2512
v't0 T1	0.3505
u'd0 D1	0.2496
v'd0 D1	0.3540
u'p0 P1	0.2497
v'p0 P1	0.3531
N of last trials to analyze	15
Minimum L (cd/m2)	8
Maximum L cd/m2)	16
Observer distance (m)	1
Size screen (H / m)	0.3850
Size of test stimuli (deg)	5
Gap from centre (px)	20
Height (px)	768
Width (px)	1024
Bk colour (% of Lmean)	100
Deutero Step (6nm)	6
Prota Step (10nm)	10
Deutero Lk = La/Ln	1
Prota Lk = La/Ln	1
Show adapt. bk. (Y-1/N-0)	1
Adaptation time (s)	120



Observer type to represent

Normal obs

Deuteranomalous obs

Protanomalous obs

Tritanope obs

Deuteranope obs

Protanope obs

Define new starting stimuli

Test monitor gamut

Update

VISAGE Calibration File in use

VSG 71.02.025Esony_f520_07_2014.VSG

Name of the file to save!

joel_j_13.met

Observer's Answers

Trial n :	500
Hue	8
Set pos	99
L mean	10.9967
CIE1976u'	0.2203
CIE1976v'	0.3500
L(0) / R(1)	1
Sum p out	0
Obs ans	1
H(1) / F(0)	1

Start PR650



Run test colours

Reset Program

RUN

Figura 78| Exemplo do resultado obtido, para um observador deuteranômalo, após aplicação do teste de cor desenvolvido no Laboratório da Cor da UM.

Max number of trials	25
Step if right	1.3000
Step if wrong (right^3)	2.1970
Show image for (s)	1
Number of disks per size	300
Size disk 1 (% screen)	3
Size disk 2 (% screen)	2.5000
Size disk 3 (% screen)	1.5000
Size disk 4 (% screen)	1
Number of hues	20
Number of Saturations	100
u'0 N	0.2500
v'0 N	0.3500
N radius CIE u'v' 1976	0.0300
u'd0 D	0.2018
v'd0 D	0.3688
u'p0 P	0.2180
v'p0 P	0.3398
u't0 T1	0.2512
v't0 T1	0.3505
u'd0 D1	0.2496
v'd0 D1	0.3540
u'p0 P1	0.2497
v'p0 P1	0.3531
N of last trials to analyze	15
Minimum L (cd/m2)	6
Maximum L (cd/m2)	16
Observer distance (m)	1
Size screen (H / m)	0.3850
Size of test stimuli (deg)	5
Gap from centre (px)	20
Height (px)	768
Width (px)	1024
Bk colour (% of Lmean)	100
Deutero Step (6nm)	6
Prota Step (10nm)	10
Deutero Lk = La/Ln	1
Prota Lk = La/Ln	1
Show adapt. bk. (Y-1/N-0)	1
Adaptation time (s)	120



Observer type to represent

Normal obs

Deuteranomalous obs

Protanomalous obs

Tritanope obs

Deuteranope obs

Protanope obs


VISAGE Calibration File in use

VSG 71.02.025E\sony_f520_07_2014.VSG

Name of the file to save!

pcoutinho_ji_12.met

Observer's Answers



Total n :	500
Hue	3
Sat pos	34
L mean	10.9100
CIE1976u'	0.2441
CIE1976v'	0.3581
L(0) / R(1)	1
Sum p out	0
Obs ans	1
H(1) / F(0)	1

Figura 79 | Exemplo do resultado obtido, para um observador protanômalo, após aplicação do teste de cor desenvolvido no Laboratório da Cor da UM.