



Universidade do Minho

João Manuel Maciel Linhares

**Diversidade cromática de cenários  
complexos digitalizados com imagiografia  
hiperespectral.**

Tese de Doutoramento em Ciências

Área do Conhecimento em Física

Trabalho efectuado sob a orientação do

**Professor Doutor Sérgio Nascimento**

## Declaração

Nome: **João Manuel Maciel Linhares**

Endereço electrónico: **jmlinhares@gmail.com** Telefone: **934736183**

Número do Bilhete de Identidade: **11250148**

Título da tese: **Diversidade cromática de cenários complexos digitalizados com imagiografia hiperespectral.**

Orientador: **Professor Doutor Sérgio Miguel Cardoso Nascimento**

Ano de conclusão: **2011**

**Doutoramento em Ciências, área de conhecimento Física.**

Declaro que concedo à Universidade do Minho e aos seus agentes uma licença não-exclusiva para arquivar e tornar acessível, nomeadamente através do seu repositório institucional, nas condições abaixo indicadas, a minha tese de dissertação, no todo ou em parte, em suporte digital.

Declaro que autorizo a Universidade do Minho a arquivar mais de uma cópia da tese ou dissertação e a, sem alterar o seu conteúdo, converter a tese ou dissertação entregue para qualquer formato de ficheiro, meio ou suporte, para efeitos de preservação e acesso.

Retenho todos os direitos de autor relativos à tese ou dissertação, e o direito de a usar em trabalhos futuros (como artigos ou livros).

Concordo que a minha tese ou dissertação seja colocada no repositório da Universidade do Minho com o seguinte estatuto:

1.  Disponibilização imediata do conjunto do trabalho para acesso mundial.
2. Disponibilização do conjunto do trabalho para acesso exclusivo na Universidade do Minho durante o período de  1 ano,  2 anos ou  3 anos, sendo que após o termo assinalado autorizo o acesso mundial.
3.  Disponibilização do conjunto do trabalho para acesso exclusivo na Universidade do Minho.

Universidade do Minho, 11 de Julho de 2011.

Assinatura: João Manuel Maciel Linhares



*À Luísa, ao Tomás, à Ana, à Lurdes e ao Zeca:*

*Pelo apoio, presença, força, luz e cor que colocam no meu caminho.*



## **Agradecimentos**

Ao meu orientador científico, Professor Doutor Sérgio Nascimento, não só pelos conhecimentos científicos, apoio e incentivo, mas também pela amizade e visão partilhadas ao longo de todos estes anos de convivência.

Aos meus colegas de trabalho na Universidade do Minho por todo o apoio e incentivo para ultrapassar os momentos profissionais mais difíceis. Em especial ao meu colega e amigo Paulo Pinto, pelas longas conversas e acesas discussões que durante todos estes anos me têm ajudado e incentivado nos momentos mais difíceis e ao meu colega e amigo José González-Méijome, não só pela partilha de conhecimentos, mas também pela amizade.

À FCT pelo apoio financeiro através da Bolsa de Doutoramento SFRH BD 35874 2007.



## **Resumo**

Os métodos utilizados presentemente na avaliação da qualidade de fontes luminosas apresentam grandes limitações, em particular, com o aparecimento de fontes luminosas baseadas em LEDs. Alguns dos métodos até agora apresentados (“Colour Rendering Index” - CRI, “Gamut Area Index” - GAI ou o “Colour Quality Scale” - CQS) incluem parâmetros que vão para além da capacidade de reprodução das cores, como, por exemplo, a diversidade cromática que são capazes de gerar. Apesar da diversidade de índices, estes não estão orientadas para a estimativa da diversidade cromática em cenários complexos. Além disso, estão vocacionados para observadores normais, não contemplando observadores com deficiências da visão das cores. O objectivo deste trabalho é estimar a diversidade cromática em cenas naturais complexas a partir de dados obtidos por imagiografia hiperespectral e utilizar imagens hiperespectrais de cenários naturais, pinturas artísticas e cenários de interior para estimar a influência da distribuição espectral de diferentes iluminantes na diversidade cromática de cenários complexos, para observadores normais e deficientes da visão das cores. Pretende-se assim propor um índice que permita auxiliar na escolha de iluminantes com aplicação específica. Verificou-se que a diversidade cromática de cenas naturais é substancialmente inferior à prevista pelo volume do sólido de cor-objecto e que o número de cores discerníveis é um bom indicador desta diversidade, permitindo avaliar a influência de lentes coloridas ou de iluminantes com diferentes distribuições espectrais, em cenários de grande complexidade, para observadores normais ou deficientes da visão das cores. Com base na estimativa da variação da diversidade cromática em cenários complexos, é possível apresentar um índice – o CDI (“Chromatic Diversity Index”) que avalia as alterações cromáticas em tais cenários complexos provocadas por diferentes iluminantes, utilizando um reduzido número de amostras coloridas (1269 amostras de Munsell), para observadores normais e deficientes da visão das cores. Estes resultados permitem sugerir a utilização de determinados iluminantes para a observação de pinturas artísticas e cenários de interior com o objectivo de aumentar a diversidade cromática, para observadores normais e deficientes da visão das cores, resultados que poderão ser do interesse de museus, galerias de arte e utilizadores de ambientes específicos onde a discriminação cromática seja importante.



## **Abstract**

The methods presently available to assess the quality of light sources have several limitations, in particular with the introduction of light sources based on LEDs. Some of the methods available (the Colour Rendering Index - CRI, the Gamut Area Index – GAI or the Colour Quality Scale - CQS) include in its computations parameters that extend the scope of the index beyond the colour reproduction capabilities as, for example, the colour gamut generated by the test illuminant. Although there are several indices they do not provide the assessment of the chromatic diversity on complex scenarios. Apart from this limitation they are only used with normal observers leaving aside the colour deficient observers. The purpose of this work was to estimate the chromatic diversity of complex scenes using data acquired using hyperspectral imaging and to use hyperspectral images of natural scenes, artistic paintings and indoor scenarios to estimate the influence on the chromatic diversity in complex scenes perceived by normal and colour deficient observers of illuminants with different spectral profiles. The aim is to present an index that will assist in the selection of illuminants for a particular task. It was found that the chromatic diversity of natural scenes is considerably inferior when compared to the expected result from the theoretical object colour volume and that the number of discernible colours is a good predictor of this diversity, enabling the estimate of the influence of coloured lens or illuminants with different spectral profiles on complex scenarios for normal and colour deficient observers. The Chromatic Diversity Index – CDI developed in the course of this work uses the computation of the chromatic diversity in complex scenarios to assess the chromatic changes induced by different illuminants by using a small set of coloured samples (the 1269 samples from the Munsell Colour Book), for normal and colour deficient observers. These results assist in the selection of an illuminant to view artistic paintings and indoor scenarios by proposing specific illuminants that will enhance the chromatic diversity of such scenes, not only for normal observers but also for colour deficient observers. The findings of this work could be of the interest of museums, art galleries or users of specific environments where chromatic discrimination is important.





## **I. Índice**

Declaração	2
Agradecimentos	5
Resumo	7
Abstract	9
I. Índice	11
II. Lista de Figuras	13
III. Lista de Tabelas	21
1 Introdução.	22
1.1 A visão das cores.	22
1.1.1 O sistema visual	22
1.2 Colorimetria	41
1.2.1 Representação de cores e estímulos espectrais	45
1.2.2 A representação da cor em observadores deficientes da visão das cores	57
1.3 O espaço de cor, as cores monocromáticas, as cores óptimas e as cores dos objectos naturais	62
1.3.1 O espaço de cor	62
1.4 Iluminação	64
1.4.1 Iluminantes CIE	64
1.4.2 O Índice de Reprodução da Cor – CRI	69
1.4.3 Alternativas ao CRI	73
1.5 Adaptação Cromática	76
1.6 Imagens hiperespectrais	78
1.6.1 Sistema hiperespectral I	78
1.6.2 Sistema hiperespectral II	82
2 Diversidade cromática em cenas naturais para observadores normais.	83
2.1 Introdução	83
2.2 Métodos	84
2.3 Resultados	88
2.4 Discussão	91
3 Diversidade cromática em cenas naturais para observadores normais e dicromatas e a influência de lentes coloridas.	93

3.1	Introdução	93
3.2	Métodos	94
3.3	Resultados	96
3.4	Discussão	100
4	Diversidade cromática em pinturas artísticas para observadores normais e deficientes da visão das cores e a influência de iluminantes CIE.	103
4.1	Introdução	103
4.2	Métodos	104
4.3	Resultados	108
4.4	Discussão	115
5	Diversidade cromática em cenários de interior para observadores normais e deficientes da visão das cores e a influência de iluminantes CIE e fontes de luz LED.	117
5.1	Introdução	117
5.2	Métodos	118
5.3	Resultados	121
5.4	Discussão	125
6	Índice de Diversidade Cromática (CDI) – Uma aproximação baseada em imagens hiperespectrais.	127
6.1	Introdução	127
6.2	Métodos	128
6.3	Resultados	131
6.4	Discussão	134
7	Conclusões	138
8	Bibliografia	140
9	Anexos	150
	Anexo I – Lista de publicações e comunicações em encontros científicos, sujeitas a arbitragem internacional, resultantes do trabalho realizado no âmbito desta tese de Doutoramento	150
	Publicação de artigos em revistas científicas	150
	Publicação de artigos em actas de encontros científicos	150
	Comunicações em encontros científicos	151
	Anexo II – Folhas de dados dos LED utilizados neste trabalho, facultadas pelo fabricante.	152

## II. Lista de Figuras

- Figura 1.1 Secção horizontal de um olho direito visto de cima (adaptado de [1]). 23
- Figura 1.2 Esquema da retina de um mamífero (adaptado de [6]) e correspondente organização e conexões sinápticas. a | 1 & 2 – foto-receptores; 3 – células horizontais; 4 – células bipolares; 5 – células amácrinas; 6 – células ganglionares. C/B – camada de foto-receptores; NE – camada nuclear externa; PE – camada plexiforme externa; NI – camada nuclear interna; PI – camada plexiforme interna; CG – camada de células ganglionares; NO – camada das fibras ópticas ou nervo óptico. b | Terminal sináptico de um cone com ligações a células horizontais (a amarelo), a células bipolares “on” (a azul) e a células bipolares “off” (a violeta). c | Terminal sináptico de um bastonete com ligações a células horizontais (a amarelo), a células bipolares “on” (a azul) e a células bipolares “off” (a violeta). d | conexões de uma célula bipolar (a azul) a inúmeras células amácrinas (a amarelo) e ganglionares (a violeta). A seta vermelha representa o sentido da luz ao percorrer toda a estrutura da retina. 24
- Figura 1.3 Diversidade morfológica e fisiológica das células de uma retina típica de um mamífero (adaptado de [7]). De cima para baixo identificam-se os foto-receptores, as células horizontais, as células bipolares, as células amácrinas e as células ganglionares 25
- Figura 1.4 Diversidade morfológica e fisiológica de células ganglionares da retina de um gato (adaptado de [7]). 26
- Figura 1.5 Morfologia do segmento externo dos bastonetes e dos cones (adaptado de [11]) 27
- Figura 1.6 Eficiência luminosa dos cones (linha contínua a verde e círculos abertos a preto) e dos bastonetes (linha contínua a preto), ou curvas de sensibilidade fotópica e escotópica, respectivamente (adaptado de [13]). As linhas verticais indicam as posições espectrais dos máximos das respectivas curvas. 28
- Figura 1.7 Detalhe da diferença na zona dos azuis entre as duas curvas de sensibilidade fotópicas recomendadas pela CIE, apresentadas na Figura 1.6. A linha contínua a verde representa a função inicial e a linha representada a círculos abertos representa a função actualizada. 29
- Figura 1.8 Sensibilidade espectral relativa dos cones L, M e S (linha a vermelho, verde e azul, respectivamente), considerando um campo de visão de 2°, em unidades lineares de energia (adaptado de [14]). 29
- Figura 1.9 Representação, em cores falsas, da distribuição dos três tipos de cones em diferentes áreas retinianas e entre diferentes observadores considerados com visão das cores normal (adaptado de [15]). Os cones L estão representados a vermelho, os M a verde e os S a azul. 30
- Figura 1.10 Espectro da densidade óptica do pigmento do cristalino e do pigmento macular (adaptado de [14]). A escala vertical é linear em unidades logarítmicas, para melhor representar o espectro da densidade óptica. 31

- Figura 1.11 Sensibilidade espectral relativa dos cones de um observador normal L, M e S, (linha contínua a vermelho, verde e azul, respectivamente), comparadas com a sensibilidade espectral relativa dos cones L' e M' (linhas a tracejado vermelhas e verdes, respectivamente) de um observador anómalo (adaptado de [14,18]). 33
- Figura 1.12 Curvas de sensibilidade espectral relativa dos cones de um observador protanope (esquerda), deuteranope (centro) e tritanope (direita). O cone em ausência é assinalado pela legenda superior (adaptado de [18]). 34
- Figura 1.13 Percurso do sinal eléctrico desde a retina até ao córtex visual primário e respectiva estratificação do sinal. O sinal proveniente da retina temporal é enviado para o córtex visual primário ipsilateral, enquanto que o sinal proveniente da retina nasal cruza no quiasma óptico e é enviado para o córtex visual primário contralateral. Também é visível a conexão das vias parvocelular, magnocelular e koniocelular desde o corpo geniculado lateral até à área visual V1 - adaptado de [24]. 36
- Figura 1.14 Experiência de decomposição (A), decomposição sucessiva (B) e recomposição (C) da luz realizada por Newton (adaptado de [29]). 38
- Figura 1.15 Experiência de Newton de decomposição espectral da luz, recomposição por via de um prisma invertido e de novo decomposição espectral. Imagem obtida da página on-line da "The Royal Society" () e retirada de Optiks de Newton, Livro 1, Parte 2, lâmina IV, figura 16. 38
- Figura 1.16 Experiência de Newton de decomposição espectral sucessiva com dois prismas invertidos, em que a cor resultante final não é a luz branca. Imagem obtida da página on-line da "The Royal Society" () e retirada de uma imagem de uma carta enviada por Newton a Oldenberg, a 6 de Junho de 1672. 39
- Figura 1.17 Curvas de sensibilidade dos três receptores retinianos estimadas por von Helmholtz (adaptado de [27]). 40
- Figura 1.18 Modelo inicial do nível de pós-processamento visual (adaptado de [32]). O S, M e L indicam os cones com a sensibilidade máxima na zona do Azul, Verde e Vermelho do espectro da luz visível, respectivamente. 41
- Figura 1.19 Colorímetro tricromático de Wright com três primários ajustáveis espectralmente (esquema colorido no canto superior esquerdo) (adaptado de [34]). 42
- Figura 1.20 Funções de igualação da cor resultantes do uso de primários monocromáticos, para um estímulo de intensidade luminosa igual em todos os comprimentos de onda. Os primários  $\lambda_B=700$  nm,  $\lambda_G=546.1$  nm e  $\lambda_R=435.8$  nm possuem uma intensidade luminosa relativa de 72.1:1.4:1.0 respectivamente (adaptado de [12]) 43
- Figura 1.21 Funções de reprodução da cor propostas pela CIE para o observador padrão para um campo de 2° de visão (linhas contínuas) e para um campo de 10° de visão (pontos) (adaptado de [13]) 44
- Figura 1.22 Funções de reprodução da cor para o observador padrão CIE 1931 (pontos) e para o observador padrão CIE 1931 modificado por Judd (linhas) – adaptado de [12,13]. 45

- Figura 1.23 Diagrama cromático CIE 1931. A linha azul representa o local onde as cores monocromáticas são representadas. Todas as cores que são representadas pela linha verde são geradas pelas cores monocromáticas M e N. A cor P resulta da combinação da cor M e N em proporções iguais. 47
- Figura 1.24 Falta de uniformidade perceptual no diagrama cromático CIE1931. Cada segmento de recta representa duas cores que tem uma separação perceptualmente igual entre si, para a mesma luminosidade (adaptado de [37]). 47
- Figura 1.25 Efeito no diagrama cromático da utilização das funções de reprodução da cor do Observador padrão CIE 1931 modificado por Judd (linha a vermelho) comparado com o original (linha a azul). 48
- Figura 1.26 Linhas de confusão de observadores dicromatas representadas no diagrama cromático CIE 1931 e pontos de convergência das linhas de confusão (P), (D) e (T) para um protanope (esquerda), deuteranope (centro) e tritanope (direita), respectivamente (adaptado de [12]). 49
- Figura 1.27 Diagrama cromático CIE 1976 ( $u',v'$ ). Cada segmento de recta representa duas cores que tem uma separação perceptualmente igual entre si, para a mesma luminosidade (adaptado de [38]). 50
- Figura 1.28 Representação cromática no espaço CIE 1976. 50
- Figura 1.29 Espaço de cor CIELAB, mostrando a diferença de cor  $\Delta E_{ab}^*$ . 52
- Figura 1.30 Espaço de cor CIELAB considerando o iluminante CIE E (ver Figura 1.39), representando  $L^*$  com  $\Delta L^*$  de 5 unidades, e cada quadrado desenhado com um lado de 20 unidades em  $a^*$  ou  $b^*$  (adaptado de [40]). 52
- Figura 1.31 Sólido de cor representando os limites de Rösch-MacAdam, contendo todas as cores possíveis de gerar por reflexão ou transmissão (ver secção 1.3.1.2), representadas em CIELAB (à esquerda) e em DIN99d (à direita) assumindo o observador padrão CIE 1931 e o iluminante CIE C. Cada linha representa um nível de  $L^*$ , de 5 em 5 unidades. Uma particular chamada de atenção para o facto de a escala associada ao volume CIELAB no eixo  $a^*$  e  $b^*$  ser o dobro da escala associada ao volume DIN99d. No eixo do  $L^*$  a escala é a mesma. 56
- Figura 1.32 Espaço de MacLeod e Boynton de representação cromática da excitação de cones (adaptado de [36]). A recta D representa a linha de confusão do deuteranope e a recta P representa a linha de confusão do protanope. As linhas de confusão do tritanope são linhas representadas paralelas ao eixo  $l/(l+m)$ . A linha azul representa a localização das cores monocromáticas. 57
- Figura 1.33 Representação geométrica do algoritmo que permite a simulação da visão das cores dicromática. Os eixos L, M e S representam a excitação dos três tipos de cones. Neste caso particular os estímulos encontram-se circunscritos ao gamut das cores que é possível representar com o monitor utilizado na experiência descrita por Brettel et al.. W representa o estímulo branco que é possível representar com os canais RGB do monitor no máximo. O E representa o estímulo equi-iluminante mais brilhante que é possível representar no monitor. A linha OE representa o estímulo neutro para observadores normais e dicromatas. A figura (a) representa nas abas de OE em direcção a 475 nm e

575 nm as superfícies reduzidas de sinal de cones associadas à simulação da visão das cores de deuteranopes e protanopes. A figura (b) representa nas abas de OE em direcção a 485 nm e 660 nm as superfícies reduzidas de sinal de cones associadas à simulação da visão das cores de tritanopes. O algoritmo de simulação consiste em substituir o componente desconhecido pelo valor correspondente na superfície reduzida de estímulos. Para uma dada cor  $Q$ , é representada a substituição para um protanope por  $Q'_p$ , para um deuteranope por  $Q'_d$  e para um tritanope por  $Q'_t$  (adaptado de [51]). 60

Figura 1.34 Espaço de cor CIELAB assumindo o iluminante D65 e o observador padrão CIE 1964. O volume interior representa o volume das cores óptimas, onde estão contidas todas as cores dos objectos obtidas apenas por reflexão ou transmissão. O volume exterior, aberto, é formado pelas cores monocromáticas (adaptado de [12]). 62

Figura 1.35 Exemplos de espectros de distribuição de energia (em unidades arbitrárias) para reflexão e transmissão de cores óptimas (linha azul e linha vermelha), cor monocromática (linha laranja) e de reflexão de um objecto de madeira (linha verde). 63

Figura 1.36 Estimativa da distribuição espectral da potência radiante do Sol, para 10 fases da luz do dia, dos 5000 K (avermelhado) aos 20000 K (azulado), normalizado para um valor de 100 a 560 nm (adaptado de [12]). 65

Figura 1.37 Distribuição espectral de energia de um corpo negro, em função do comprimento de onda, normalizada para que seja 1 a 560 nm. As diferentes linhas representam diferentes temperaturas do corpo negro, sendo que quanto mais quente o corpo negro é, mais azulada será a sua cor (adaptado de [12]). 65

Figura 1.38 A linha D representa a localização das coordenadas cromáticas dos iluminantes da luz do dia representados na Figura 1.36. A linha P representa as coordenadas cromáticas da cor da radiação emitida pelo corpo negro a diferentes temperaturas representadas na Figura 1.37. Para uma determinada coordenada D as coordenadas mais próximas da linha P definem a temperatura de cor correlacionada. Todas as coordenadas cromáticas que estão na mesma linha recta possuem a mesma temperatura de cor, indicada no seu topo (adaptado de [12]). 66

Figura 1.39 Distribuição relativa do espectro da energia radiante dos iluminantes D com CCT de 6500, 5500 e 7500, o iluminante A, B, C e E (adaptado de [13]). 67

Figura 1.40 Localização das coordenadas cromáticas dos iluminantes D no diagrama cromático CIE 1931 (linha a rosa). O ponto verde representa a localização no diagrama cromático no iluminante de equo-energia (adaptado de [13]). 68

Figura 1.41 Distribuição espectral relativa de alguns dos iluminantes CIE fluorescentes (FL11\* e FL3.14) e de descarga de alta pressão (HP1, HP2 e HP4), em comparação com as fases extremas da luz do dia (D250 e D36), a luz média do dia (D65) e o iluminante A. 69

- Figura 1.42 Distribuição espectral relativa das amostras coloridas utilizadas pela CIE para o cálculo do CRI (adaptado de [61]) 71
- Figura 1.43 Iluminantes de referência para os iluminantes de teste CIE D65 (em cima à esquerda) e CIE HP1 (em cima à direita) e respectivo efeito do iluminante de teste e do iluminante de referência nas patelas de Munsell utilizadas no cálculo do CRI para o iluminante D65 (em baixo à esquerda) e para o iluminante HP1 (em baixo à direita). 74
- Figura 1.44 Posição das coordenadas cromáticas de várias fases da luz do dia reflectida numa superfície branca, assumindo o observador padrão da CIE 1931, sem considerar a adaptação ao iluminante (à esquerda) e considerando a adaptação ao iluminante (à direita). 77
- Figura 1.45 Esquema do sistema hiperespectral I desenvolvido por Foster e Nascimento [78]. Uma câmara digital monocromática adquire a imagem para o comprimento de onda seleccionado pelo filtro de cristais líquidos de sintonização rápida. 79
- Figura 1.46 Transmissão à luz visível do filtro de cristais líquidos de sintonização rápida, medida com um espectrofotómetro (Shimadzu UV-3101PC, UV-VIS-NIR) (adaptado de [79]). 80
- Figura 1.47 Transmissão de luz infravermelha do filtro de cristais líquidos quando sintonizado para 450 nm, medida com um espectrofotómetro (Shimadzu UV-3101PC, UV-VIS-NIR) (adaptado de [79]). 81
- Figura 2.1 Base de dados das 50 cenas utilizadas neste trabalho. 84
- Figura 2.2 Exemplo de três cenas da base de dados (imagens à esquerda) e correspondente volume CIELAB (imagens à direita). Por forma a facilitar a visualização do volume CIELAB apenas se representa uma parte das coordenadas de cada cena. Os valores inscritos nas imagens da direita representam o número de cores discerníveis estimado utilizando a fórmula de diferença de cor CIEDE2000, enquanto que o valor entre parênteses representa o número de cores discerníveis nas mesmas condições mas ignorando a informação da coordenada  $L^*$ . A primeira imagem representa uma cena com um número de cores discerníveis abaixo da média, a segunda dentro da média e a terceira acima da média. 86
- Figura 2.3 Gamut de cores das 50 imagens da base de dados representada no diagrama de cores CIE ( $a^*, b^*$ ), para apenas um nível de  $L^* = 50$  (à esquerda) e a projecção de todos os níveis de  $L^* < 100$  (à direita). Para comparação representam-se os limites produzidos pelas cores óptimas (linha a contínuo) e o gamut de cores gerada pelas 4089 amostras coloridas tabeladas por M. Pointer [88] (linha a tracejado). Em todos os casos assumiu-se a iluminação das amostras pelo iluminante CIE C. 88
- Figura 2.4 Esquerda - Distribuição do número de cores discerníveis para as 50 cenas analisadas. Os cálculos foram realizados assumindo a fórmula de diferença de cor CIEDE2000. A linha contínua representa um ajuste Gaussiano. Direita – Número total de cores discerníveis em função do número de cenas considerado na análise. Os resultados são também obtidos assumindo a fórmula de diferença de cor CIEDE2000. A linha contínua representa um ajuste exponencial. 90

- Figura 3.1 Espectro de transmissão das 10 lentes coloridas utilizadas neste estudo. Todas as lentes excepto a Lente 8 eram lentes coloridas de óculos de sol comerciais. A Lente 8 era uma lente teórica (ver texto para mais detalhes). 96
- Figura 3.2 À esquerda estão representadas as cores percebidas por um observador normal (A), protanope (B), deuteranope (C) e tritanope (D), quando observa uma das cenas da base de dados. À direita estão representados os volumes CIELAB correspondentes. A cinza estão representadas as projecções do volume CIELAB em CIE ( $a^*, b^*$ ). Por uma questão de melhor visualização apenas parte dos dados estão representados nos volumes CIELAB. 97
- Figura 3.3 Fracção do número de cores discerníveis percebido pelos observadores protanopes, deuteranopes e tritanopes, quando comparado com um observadores tricromata normal observando a mesma cena. Os dados representam a média de todas as cenas da base de dados e as barras de erro representam o desvio padrão. 98
- Figura 3.4 Variações relativas obtidas pela comparação do número de cores discerníveis estimado com e sem lentes coloridas. Os dados representam a média de todas as cenas e as barras de erro o desvio padrão. Os valores negativos indicam uma redução no número de cores discerníveis e os valores positivos um aumento. 99
- Figura 3.5 Representação em CIE ( $a^*, b^*$ ) das 1269 amostras coloridas do Munsell Color Book, assumindo o iluminante E no cálculo, quando observadas sem (esquerda) e com (direita) a Lente 8. 101
- Figura 4.1 Imagens das 11 pinturas a óleo utilizadas neste trabalho (adaptado de [128]). 104
- Figura 4.2 Gamut de cores de cada uma das pinturas, representadas em CIE ( $a^*, b^*$ ) e em CIE ( $C_{ab}^*, L^*$ ), assumindo o iluminante CIE A como fonte luminosa. (a) a (k) representam o gamut de cores em CIE ( $a^*, b^*$ ) das pinturas representadas na Figura 4.1. (m) a (w) representam informação relativa às mesmas pinturas, mas em CIE ( $L^*, C^*$ ). (l) e (x) representam o mesmo tipo de dados mas assumindo todas as cores de todas as pinturas numa só área em CIE ( $a^*, b^*$ ) e em CIE ( $L^*, C^*$ ), respectivamente. As 8 cores utilizadas na estimativa do CRI, iluminadas pelo iluminante CIE A estão representadas pelas cruzes. 105
- Figura 4.3 Distribuição espectral relativa de alguns dos iluminantes CIE utilizados neste trabalho. O iluminante CIE A foi utilizado como iluminante de referência em todas as estimativas aqui apresentadas. 107
- Figura 4.4 Coordenadas cromáticas dos 55 iluminantes CIE utilizados neste trabalho, representados no diagrama cromático CIE 1931. As setas indicam os melhores e os piores iluminantes estimados para os observadores normais e observadores deficientes da visão das cores. 108
- Figura 4.5 Variações relativas do número de cores discerníveis para cada iluminante para observadores normais (a), tritanopes (b), deuteranopes (c), protanopes (d), deuteroanómalos (e) e protoanómalos (f) (símbolos abertos). As estimativas foram efectuadas assumindo como referência o iluminante CIE A. 109



- Cada ponto representa a média de todas as pinturas, e as barras de erro o desvio padrão. As setas indicam, para cada tipo de observador, o iluminante que produz o valor máximo e mínimo do número de cores discerníveis. Os símbolos a cinza representam a razão entre o CRI ( $R_a$ ) de cada um dos iluminantes testados e o CRI do iluminante CIE A ( $R_a^A$ ). 110
- Figura 4.6 Gamut de cores da pintura K (ver Figura 4.1) assumindo a pintura iluminada pelo melhor (símbolos cinza claro) e pelo pior iluminante (símbolos cinza escuro) para todos os tipos de observadores estudados. 111
- Figura 4.7 Razão entre o CRI ( $R_a$ ) de cada um dos iluminantes testado e o CRI ( $R_a^A$ ) do iluminante CIE A em função da variação relativa número de cores discerníveis (em relação ao iluminante CIE A) estimada para os observadores normais (a), tritanopes (b), deuteranopes (c), protanopes (d), deuteranómalos (e) e protoanómalos (f). As linhas rectas representam a regressão linear e a proporção da variância  $R^2$  considerada em cada caso é também representada. 112
- Figura 4.8 Os símbolos abertos representam a média das coordenadas cromáticas CIE ( $a^*, b^*$ ) das pinturas da Figura 4.1 iluminadas por cada um dos 55 iluminantes utilizados neste estudo para observadores normais (a), tritanopes (b), deuteranopes (c), protanopes (d), deuteranómalos (e) e protoanómalos (f). Os símbolos cinza representam a média das coordenadas cromáticas CIE ( $a^*, b^*$ ) para observadores normais. As setas indicam o melhor e o pior iluminante, assim como o iluminante de referência, o iluminante CIE A, utilizado nas estimativas apresentadas. 113
- Figura 4.9 Representa o mesmo que a Figura 4.8 mas representando os dados em CIE( $C_{ab}^*, L^*$ ). 114
- Figura 5.1 Imagens das cenas analisadas. As três imagens representadas à direita fazem parte de uma base de dados pública de imagens hiperespectrais [149], e as outras 12 foram adquiridas no nosso laboratório. 118
- Figura 5.2 Distribuição espectral relativa das 5 fontes de luz LED utilizadas neste trabalho (Luxeon, Philips Lumileds Lighting Company, EUA). Os gráficos foram construídos a partir dos dados disponibilizados pelo fabricante (em anexo). 119
- Figura 5.3 Representação dos efeitos cromáticos nas cores de uma cena, produzidos por iluminantes com distribuição espectral diferente. À esquerda está representado o volume de cor CIELAB produzido pelo iluminante CIE FL3.8 e à direita o volume de cor CIELAB produzido pelo iluminante CIE HP1. 121
- Figura 5.4 Média de todas as cenas do número relativo de cores discerníveis obtido a partir da razão entre o número de cores discerníveis de cada iluminante e o número de cores discerníveis obtido para o iluminante CIE A. A linha circular cinza representa a localização do iluminante CIE A (círculo unitário), os símbolos circulares representam os resultados para as cenas obtidas no nosso laboratório e as cruzes representam os dados para as outras três cenas. A coluna da esquerda representa os iluminantes CIE D, A e C, a coluna central os iluminantes CIE FL e HP e a coluna da direita os LED. Em cada caso o melhor iluminante está assinalado por uma linha recta cinza e sombreado a cinza. 122

- Figura 5.5 Razão entre o GAI obtido para cada iluminante e o GAI obtido para o iluminante CIE A em função da razão entre o número de cores discerníveis de cada iluminante e o número de cores discerníveis obtido para o iluminante CIE A. Os símbolos circulares cinza representam o GAI estimado no espaço de cor CIE 1960 UCS e os símbolos circulares brancos representam o GAI estimado no espaço de cor CIE ( $a^*, b^*$ ). As linhas rectas representam a regressão linear e a proporção da variância  $R^2$  considerada em cada caso está representada na Tabela 5.1. 124
- Figura 6.1 Imagens das pinturas artísticas analisadas neste trabalho. 128
- Figura 6.2 Demonstração do efeito da adaptação cromática e da distribuição espectral do iluminante na diversidade cromática da cena representada: (a) efeito do iluminante CIE FL3.8 sem adaptação, (b) efeito do iluminante CIE HP1 sem adaptação, (c) efeito do iluminante CIE FL3.8 com adaptação, (d) efeito do iluminante CIE HP1 com adaptação. O iluminante CIE D65 foi utilizado como o iluminante de referência. 130
- Figura 6.3 Representação da média para todas as cenas do volume CIELAB (quadrados) e do número de cores discerníveis (círculos) em função do volume CIELAB composto por todas as superfícies de Munsell, para todos os iluminantes da base de dados para observadores normais (a), tritanopes (b), deuteranopes (c), protanopes (d), deuteranómalos (e) e protoanómalos (f). As linhas rectas representam a regressão linear e a proporção da variância  $R^2$  considerada em cada caso é também representada. 132
- Figura 6.4 O mesmo que o descrito na Figura 6.3 mas considerando o efeito da adaptação cromática, tendo como iluminante de referência o iluminante CIE D65. 133
- Figura 6.5 Média do volume CIELAB ocupado pelas cores de todas as cenas representado em função da média do número de cores discerníveis de todas as cenas para os diferentes iluminantes estudados. As linhas rectas representam a regressão linear e a proporção da variância  $R^2$  considerada em cada caso é também representada. 135
- Figura 6.6 O mesmo que o descrito na Figura 6.5, mas neste caso considerando o efeito da adaptação cromática, tendo como iluminante de referência o iluminante CIE D65. 136

### III. Lista de Tabelas

Tabela 1.1 Incidência de deficiência da visão das cores em anómalos caucasianos.	34
Tabela 1.2 Incidência de deficiência da visão das cores em dicromatas caucasianos.	35
Tabela 1.3 Percepção da cor de observadores dicromatas, simuladas para observadores normais, utilizando o algoritmo de Brettel [51].	59
Tabela 1.4 Percepção da cor de observadores anómalos, simuladas para observadores normais, assumindo a sensibilidade espectral dos cones anómalos L' e M' representados na Figura 1.11.	61
Tabela 1.5 Amostras coloridas utilizadas pela CIE para o cálculo do CRI (adaptado de [58]).	71
Tabela 1.6 Valores típicos do CRI $R_a$ para alguns dos iluminantes recomendados pela CIE [13].	73
Tabela 2.1 Estimativas obtidas utilizando a fórmula de diferença de cor CIEDE2000: número médio de cores discerníveis para a base de dados de 5 cenas e valores assintóticos obtidos a partir dos ajustes exponenciais.	90
Tabela 3.1 Mínimo, máximo e média para todas as cenas da variação relativa do número de cores discerníveis obtido com lente e o número de cores discerníveis obtido sem lente para cada tipo de lente colorida e observador.	99
Tabela 5.1 Proporção da variância $R^2$ considerada na regressão linear do $GAI/GAI_A$ , $GAI^{(a^*,b^*)}/GAI_A^{(a^*,b^*)}$ , $R_a/R_a^A$ e $R_b/R_b^A$ em função da variação média do número relativos de cores discerníveis. O A maiúsculo indicado em índice representa os dados obtidos para o iluminante CIE A em cada caso.	123

# **1 Introdução.**

## **1.1 A visão das cores.**

### **1.1.1 O sistema visual**

A visão é um dos cinco sentidos do ser humano e é a principal fonte de informação do mundo exterior. Esta informação chega ao olho em forma de luz, sendo este o responsável pela transformação da luz, na forma de energia electromagnética, em sinais eléctricos capazes de serem percebidos e processados pelo cérebro.

#### **1.1.1.1 O Olho**

O olho humano está organizado em quatro camadas principais: a esclera, a úvea, a córnea e a retina. A Figura 1.1 representa o corte histológico de um olho humano, direito, visto de cima, a direcção e percurso da luz até chegar aos receptores e um corte histológico da retina (adaptado de [1]), evidenciando as suas diferentes camadas.

A esclera possuiu uma forma circular sustentada por uma camada de elevada resistência, mantendo a sua forma esférica devido às pressões intra-oculares [2]. É responsável pela manutenção da estrutura funcional do olho e da protecção primária das estruturas que se encontram no seu interior. É opaca em toda a sua extensão, excepto na parte frontal onde estruturalmente se torna transparente dando lugar à córnea.

A úvea é constituída pelo corpo ciliar, pela íris e pela coróide [3] (pág. 228). O corpo ciliar é um músculo circular que para além da produção do humor aquoso é também responsável pela manutenção do cristalino na sua posição. A alteração da sua forma permite que os raios luminosos próximos e distantes se foquem de igual modo na retina [4]. Quando desacomodado e na sua posição mais plana o cristalino está adaptado à visão de longe; quando acomodado e na sua posição mais convexa o cristalino está adaptado à visão de perto. A íris é uma membrana com uma abertura circular aproximadamente central que se chama pupila (com o centro deslocado ligeiramente para o lado inferior e nasal [3] (pág. 414)). Adapta-se permanentemente à intensidade luminosa ambiente controlando a quantidade de luz que chega à retina alterando o tamanho da

pupila de forma dinâmica. A coróide é uma camada extremamente vascularizada que se situa entre a esclera e a retina com a principal função de as nutrir e permitir assim o seu regular funcionamento ([3,5] pág. 198).

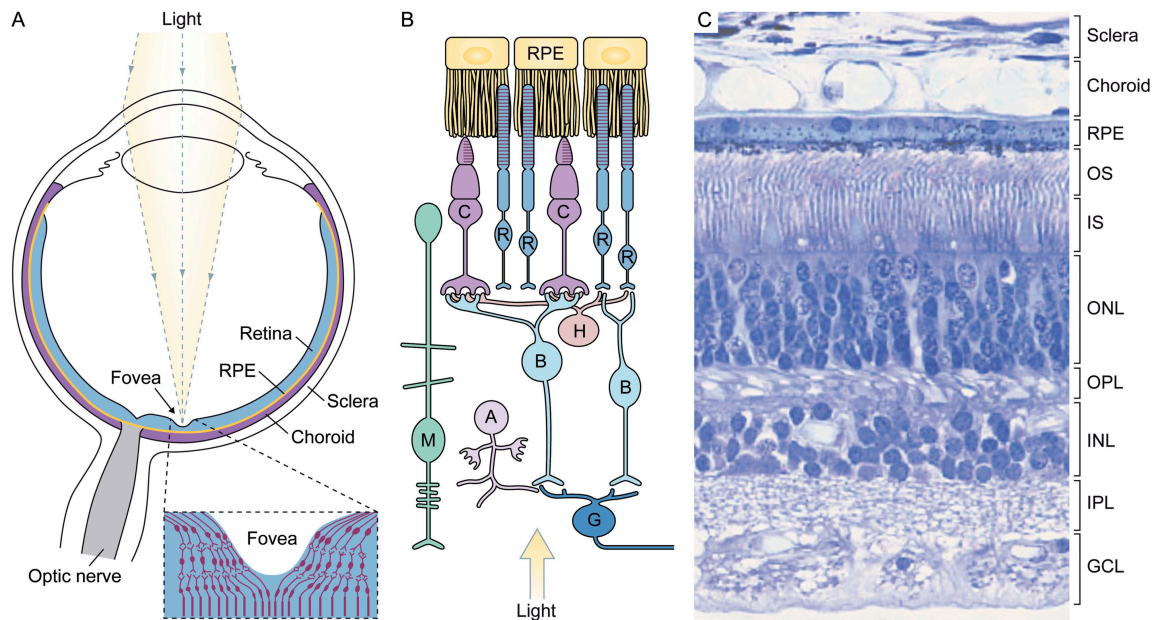


Figura 1.1 Secção horizontal de um olho direito visto de cima (adaptado de [1]).

A córnea é uma estrutura avascular e com uma elevada organização celular, quando comparada com a contígua esclera, o que lhe confere uma completa transparência à luz. Em conjunto com a estrutura lacrimal que a reveste é o componente de maior poder dióptrico no olho e a principal responsável pela correcta focagem dos raios luminosos na retina [3] (pág. 30).

A retina é uma estrutura multicamada sendo uma extensão do próprio cérebro, mantendo-se em ligação permanente a este através do nervo óptico. A Figura 1.1 B e a Figura 1.2 representam um corte histológico da retina de uma mamífero (adaptado de [6]), com características semelhantes à de um ser humano. A estrutura da retina está concebida de tal forma que os raios de luz chegam aos foto-receptores após atravessar toda a sua estrutura, uma vez que estes estão orientados para a esclera, e não para o interior do olho, tal como indicado pela seta vermelha na Figura 1.2. A divisão da retina em camadas perfeitamente estratificadas é meramente indicativa e pouco precisa, uma vez que um sem número de células percorre várias camadas e grandes áreas com as suas ligações [7], em particular as células ganglionares [8]. É no entanto possível identificar áreas da retina onde predomina uma determinada função. De acordo com a Figura 1.2 é visível a camada dos foto-

receptores (C/B) onde a luz é convertida em sinal eléctrico; a camada nuclear externa (NE) onde estão concentrados os núcleos celulares dos foto-receptores; a camada plexiforme externa (PE) onde se dão os primeiros contactos intercelulares de partilha do sinal eléctrico proveniente dos foto-receptores entre as células horizontais e as células bipolares; a camada nuclear interna (NI) onde se concentram a maior parte dos núcleos celulares das células horizontais, bipolares e amácrinas; a camada plexiforme interna (PI) onde se dá a conexão das células bipolares a células amácrinas e ganglionares; a camada de células ganglionares (CG) onde se encontram a maior parte dos núcleos das células ganglionares e de algumas células amácrinas deslocadas; e o nervo óptico (NO) onde se concentram as fibras nervosas provenientes das células ganglionares em direcção à saída do interior do olho pelo nervo óptico [3] (pags. 583-84).

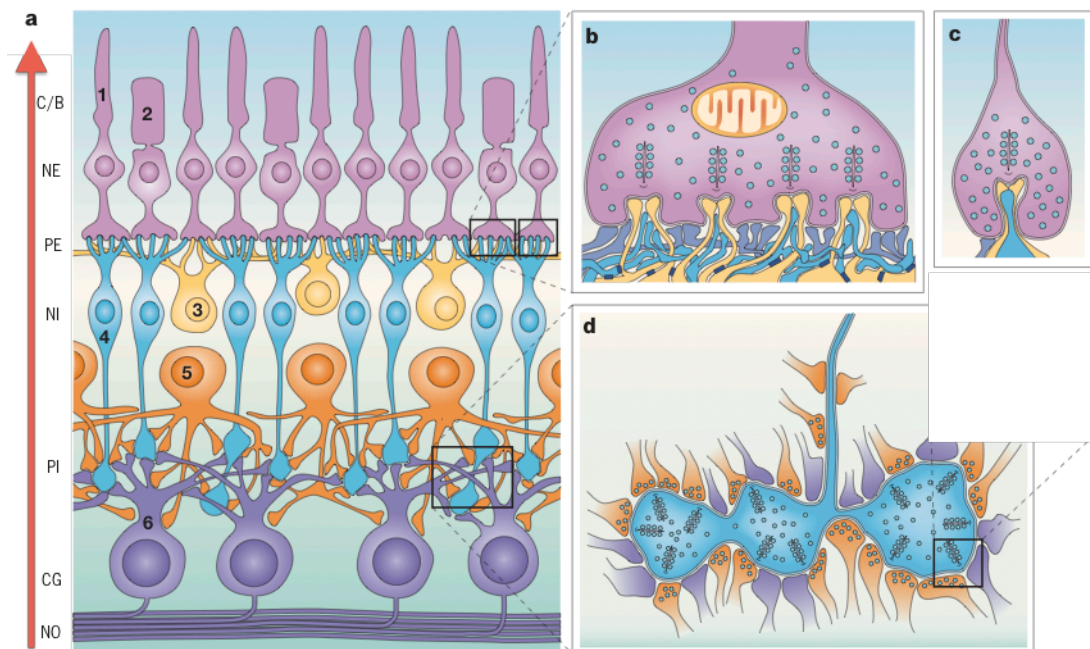


Figura 1.2 Esquema da retina de um mamífero (adaptado de [6]) e correspondente organização e conexões sinápticas.

a | 1 & 2 – foto-receptores; 3 – células horizontais; 4 – células bipolares; 5 – células amácrinas; 6 – células ganglionares. C/B – camada de foto-receptores; NE – camada nuclear externa; PE – camada plexiforme externa; NI – camada nuclear interna; PI – camada plexiforme interna; CG – camada de células ganglionares; NO – camada das fibras ópticas ou nervo óptico. b | Terminal sináptico de um cone com ligações a células horizontais (a amarelo), a células bipolares “on” (a azul) e a células bipolares “off” (a violeta). c | Terminal sináptico de um bastonete com ligações a células horizontais (a amarelo), a células bipolares “on” (a azul) e a células bipolares “off” (a violeta). d | conexões de uma célula bipolar (a azul) a inúmeras células amácrinas (a amarelo) e ganglionares (a violeta). A seta vermelha representa o sentido da luz ao percorrer toda a estrutura da retina.

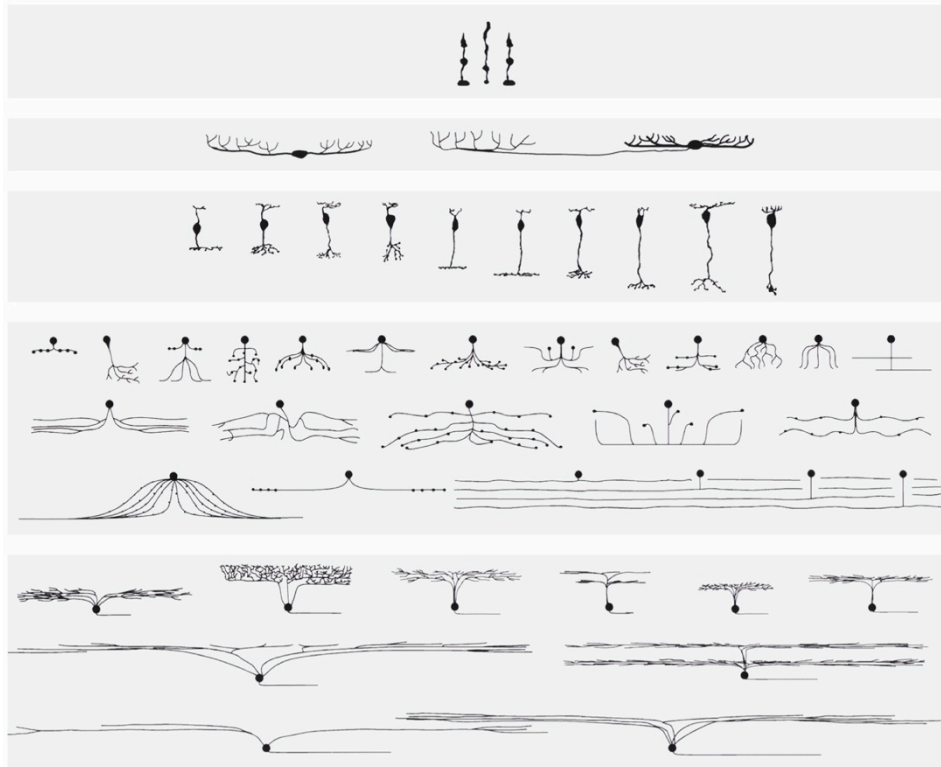


Figura 1.3 Diversidade morfológica e fisiológica das células de uma retina típica de um mamífero (adaptado de [7]). De cima para baixo identificam-se os foto-receptores, as células horizontais, as células bipolares, as células amácrinas e as células ganglionares

A separação das células retinianas não ocorre apenas ao nível fisiológico. Células que possuem a mesma função podem ter morfologias distintas levando o mesmo tipo de sinal a diferentes tipos de conexões e a diferentes camadas retinianas e, conseqüentemente, a diferentes áreas cerebrais. A Figura 1.3 e a Figura 1.4 mostram a diversidade morfológica e fisiológica dos 5 grupos de células até agora descritos. Em particular, as células amácrinas e as células ganglionares apresentam elevadas variações morfológicas desde sinapses curtas e pequenas áreas de acção até sinapses compridas e uma grande área de acção [7]. É no entanto possível atribuir uma função principal a cada um dos tipos de células existindo desta forma uma divisão fisiológica em detrimento de uma divisão morfológica. Os foto-receptores são os responsáveis pela conversão do sinal luminoso em sinal eléctrico diferenciado. As células bipolares agregam informação dos foto-receptores e enviam a informação comprimida e em paralelo para as células ganglionares. As células horizontais são responsáveis por integrar a informação de vários foto-receptores de vários pontos da retina e auxiliar todo o sistema visual a dar uma resposta conjunta. As células amácrinas estão envolvidas em processos de regulação da passagem de informação de células bipolares para células ganglionares, assim como na regulação da resposta dada por células ganglionares. As células ganglionares estão

divididas em vários subgrupos, existindo mais de 15 tipos. São as últimas responsáveis pela recolha da totalidade da informação obtida pelos foto-receptores e seu envio para o cérebro. Existem também células ganglionares sensíveis à luz, devido à existência de melanina na sua composição, responsáveis pelo ritmo circadiano, pelo reflexo pupilar à luz e possivelmente na detecção da intensidade da iluminação ambiente [6].

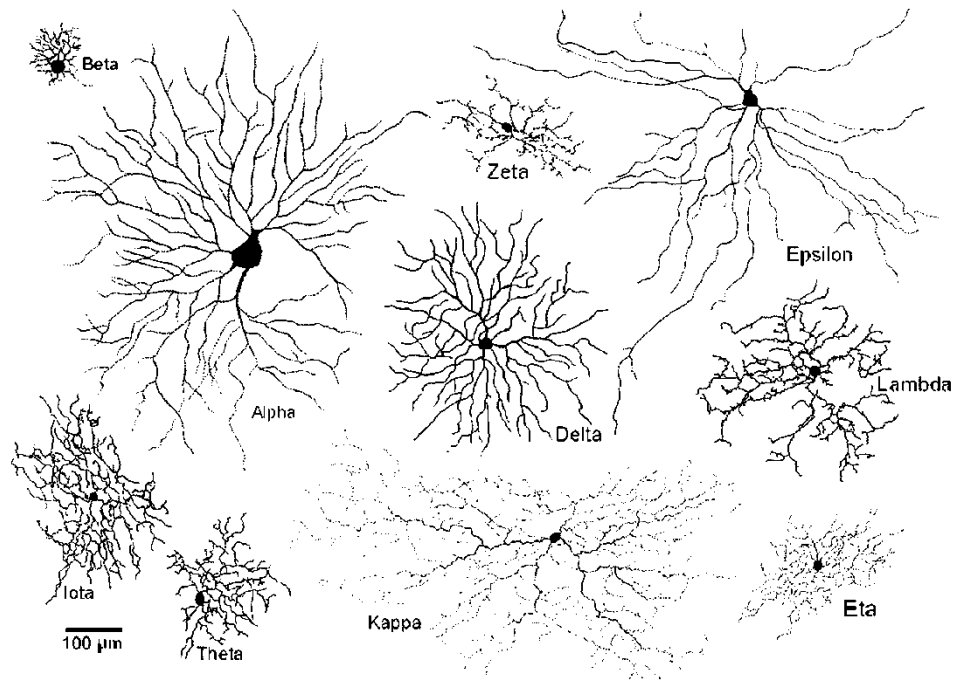


Figura 1.4 Diversidade morfológica e fisiológica de células ganglionares da retina de um gato (adaptado de [7]).

Morfologicamente, a retina não é uniforme em toda a sua extensão. O disco óptico ou a papila corresponde ao ponto de saída do feixe óptico e não existe sensibilidade à luz nesta área. A fóvea é uma ligeira depressão localizada a cerca de  $5^\circ$  no lado temporal da retina (ver destaque na Figura 1.1 A). Na sua área central existe uma zona onde não existem vasos sanguíneos chamada de foveola, que é a zona de máxima acuidade visual na retina. Assim sendo a zona de máxima visão na retina não está no eixo óptico do olho, mas afastado para o lado temporal cerca de  $5^\circ$ , ângulo este chamado de ângulo alfa [9].

Existem dois tipos de foto-receptores, os bastonetes e os cones. A Figura 1.5 representa as suas estruturas morfológicas. A Figura 1.2 a| 1 & 2 representa a sua estrutura global, a sua posição na retina e posteriores ligações. Os bastonetes possuem uma forma cilíndrica e na sua porção externa possuem uma estrutura laminar de vesículas achatadas, empilhadas entre si, que não contactam



com a membrana exterior nem entre si, excepto na sua base onde as vesículas são invaginações da membrana exterior [10]. Os cones possuem uma forma cônica e na sua porção externa possuem também uma estrutura laminar de vesículas achatadas, empilhadas entre si, mas que ao contrário dos bastonetes, estas vesículas são, em toda a extensão do segmento exterior do cone, invaginações da sua membrana exterior [10].

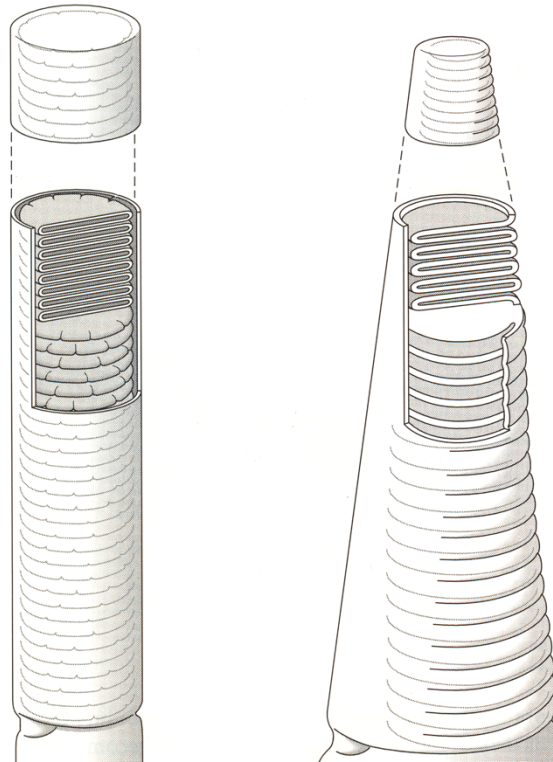


Figura 1.5 Morfologia do segmento externo dos bastonetes e dos cones (adaptado de [11])

A sua proporção varia de sujeito para sujeito assim como da zona da retina avaliada. Em média, uma retina humana possui cerca de 4.6 milhões de cones e cerca de 92 milhões de bastonetes [9]. Na zona de melhor visão da retina, a fovola, existem apenas cones com uma densidade de aproximadamente 199 000 cones por  $mm^2$ ; à medida que se afasta da zona central para a retina periférica o número de cones diminui cerca de uma ordem de magnitude por 1 mm de distância do centro e aumenta o número de bastonetes, até que, na retina periférica, praticamente só existem bastonetes e muito poucos cones [9].

É função dos foto-receptores transformar a luz incidente na retina em informação possível de ser interpretada pelo cérebro sobre a forma de impulsos eléctricos e enviar esta informação pelas respectivas vias até que cheguem às correspondentes áreas visuais no cérebro.

Os bastonetes são os responsáveis pela visão em baixos níveis de luminosidade e proporcionam uma visão monocromática - visão escotópica, enquanto que os cones funcionam em altos níveis de luminosidade proporcionando visão a cores - visão fotópica. A transição de visão escotópica para visão fotópica acontece progressivamente - visão mesópica, onde tanto os cones como os bastonetes estão em funcionamento. Os limites que definem a transição entre os diferentes estádios de visão dependem da composição da luz, do tamanho do estímulo e da sua localização na retina ([12] pág. 406).

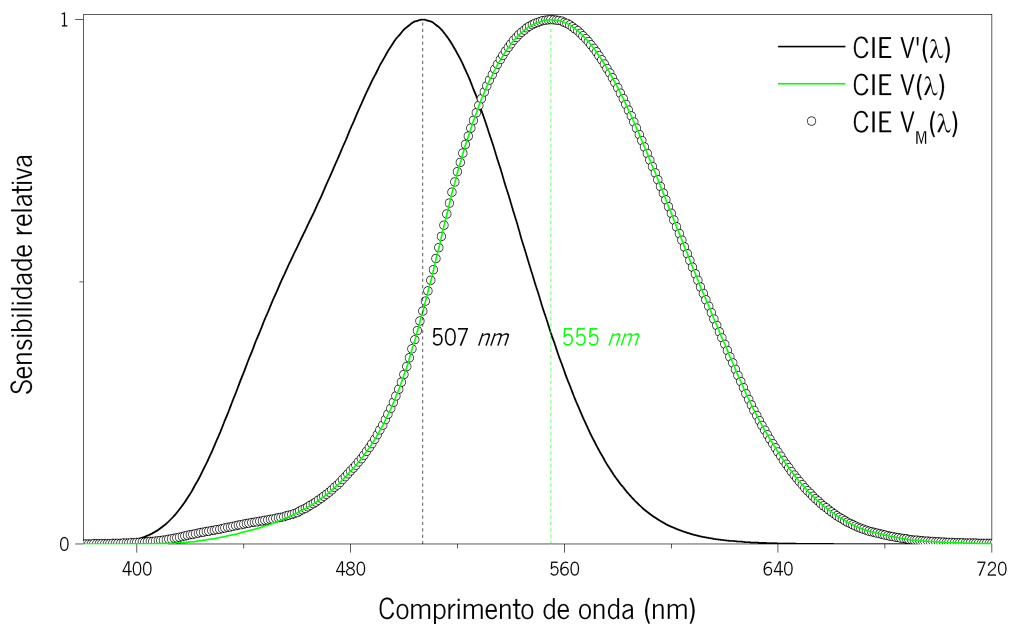


Figura 1.6 Eficiência luminosa dos cones (linha contínua a verde e círculos abertos a preto) e dos bastonetes (linha contínua a preto), ou curvas de sensibilidade fotópica e escotópica, respectivamente (adaptado de [13]). As linhas verticais indicam as posições espectrais dos máximos das respectivas curvas.

A Figura 1.6 representa a eficiência luminosa dos cones e dos bastonetes, ou as chamadas curvas de sensibilidade escotópicas ( $V'(\lambda)$  - linha contínua preta) e fotópicas ( $V(\lambda)$  - linha contínua verde), ou seja, a sensibilidade espectral ocular quando a visão é dominada pelos bastonetes e a sensibilidade espectral ocular quando a visão é mediada pelos cones, tal como definido pela Commission Internationale de l'Eclairage – CIE [13]. Existe apenas um tipo de bastonetes e possuem uma sensibilidade escotópica máxima aos 507 nm, enquanto que a sensibilidade fotópica é máxima aos 555 nm, considerando um observador padrão e um campo de visão de 2°. É no entanto reconhecido pela própria CIE que a função  $V(\lambda)$  não representa correctamente a sensibilidade fotópica na zona dos azuis ([13] pág. 55). De forma a corrigir a sensibilidade nessa zona, a CIE

aceitou uma nova função de sensibilidade fotópica denominada de  $V_M(\lambda)$ , representada na Figura 1.6 (círculos abertos a preto) e com maior detalhe na Figura 1.7.

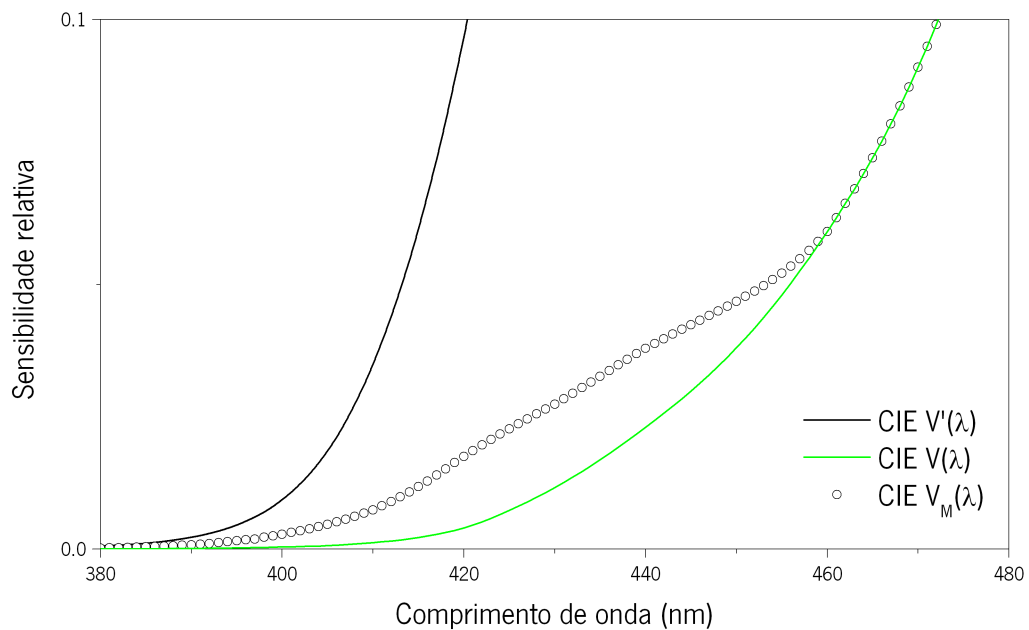


Figura 1.7 Detalhe da diferença na zona dos azuis entre as duas curvas de sensibilidade fotópicas recomendadas pela CIE, apresentadas na Figura 1.6. A linha contínua a verde representa a função inicial e a linha representada a círculos abertos representa a função actualizada.

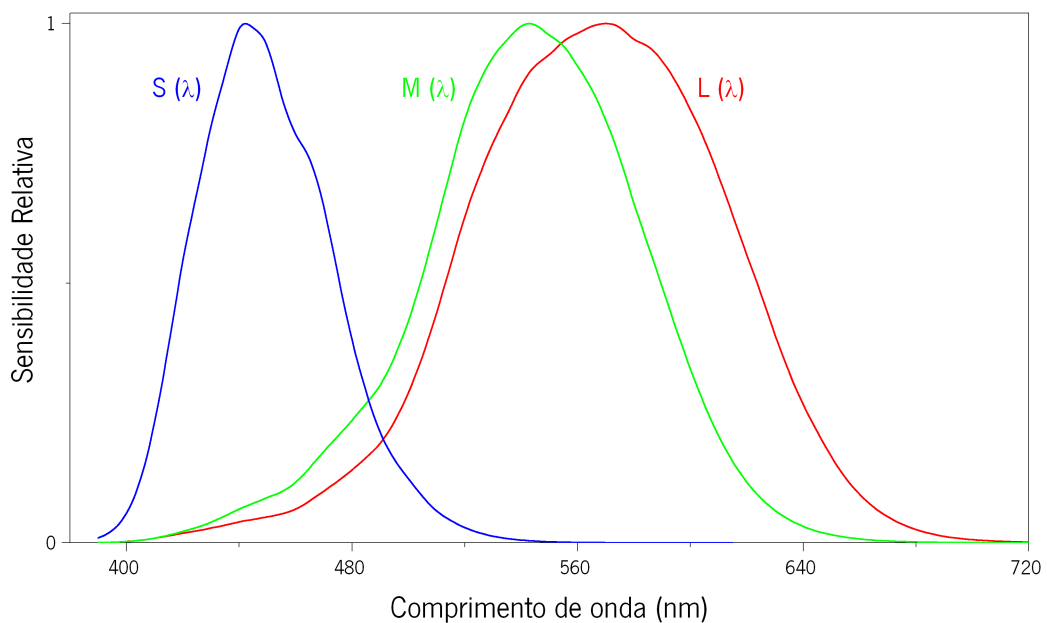


Figura 1.8 Sensibilidade espectral relativa dos cones L, M e S (linha a vermelho, verde e azul, respectivamente), considerando um campo de visão de  $2^\circ$ , em unidades lineares de energia (adaptado de [14]).

A sensibilidade espectral dos cones ao espectro da luz visível não é uniforme. Existem três tipos de cones na retina humana e classificam-se em função da sua sensibilidade ao espectro da luz visível. Cones com sensibilidade máxima na zona dos comprimentos de onda altos, ou cones L (do Inglês “Long”), cones com sensibilidade máxima na zona dos comprimentos de onda médios, ou cones M (do Inglês “Medium”) e cones com sensibilidade máxima na zona dos comprimentos de onda curtos, ou cones S (do Inglês “Short”).

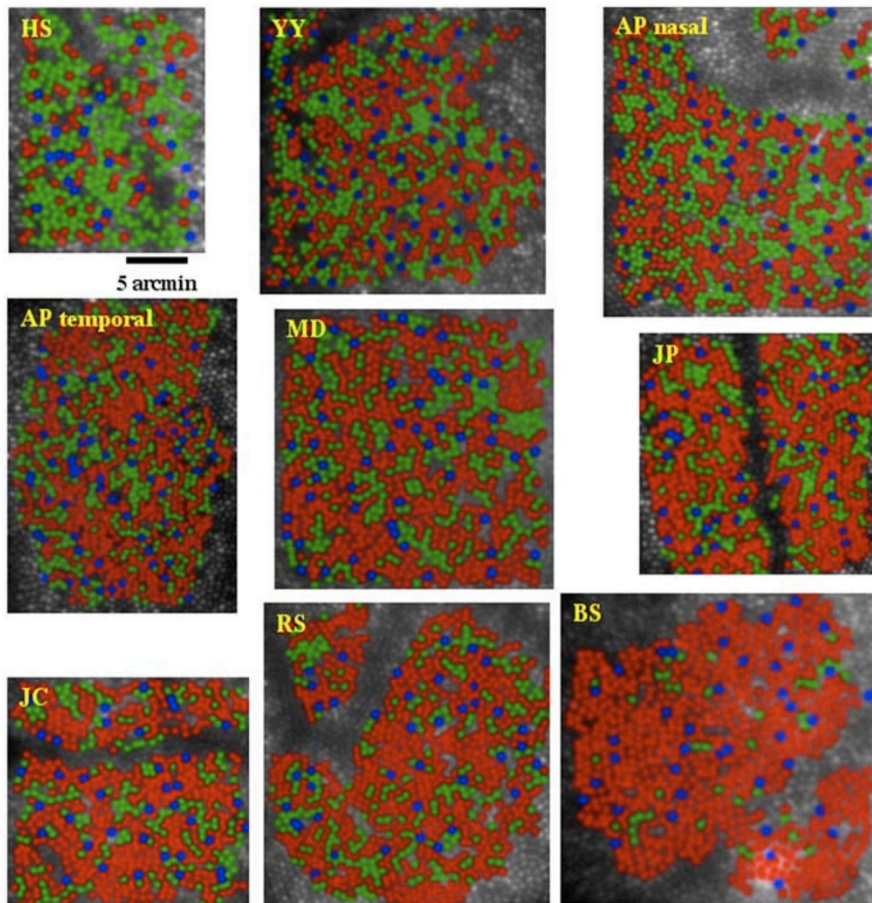


Figura 1.9 Representação, em cores falsas, da distribuição dos três tipos de cones em diferentes áreas retinianas e entre diferentes observadores considerados com visão das cores normal (adaptado de [15]). Os cones L estão representados a vermelho, os M a verde e os S a azul.

A Figura 1.8 representa a sensibilidade espectral relativa dos três tipos de cones assumindo um campo de visão de  $2^\circ$  (adaptado de [14]). A distribuição dos três tipos de cones na retina não é uniforme em toda a sua extensão como varia de sujeito para sujeito, como representado na Figura 1.9 [15,16], onde os cones L, M e S estão representados a vermelho, a verde e a azul, respectivamente.

Por norma, a sensibilidade dos cones apresentada na Figura 1.8 é relativa à energia que chega à córnea. No entanto, entre o olho e os foto-receptores existe o cristalino e o pigmento macular que filtram parcialmente os comprimentos de onda baixos. A Figura 1.10 representa a absorvância destes dois elementos em função do comprimento de onda assumindo um observador padrão [14].

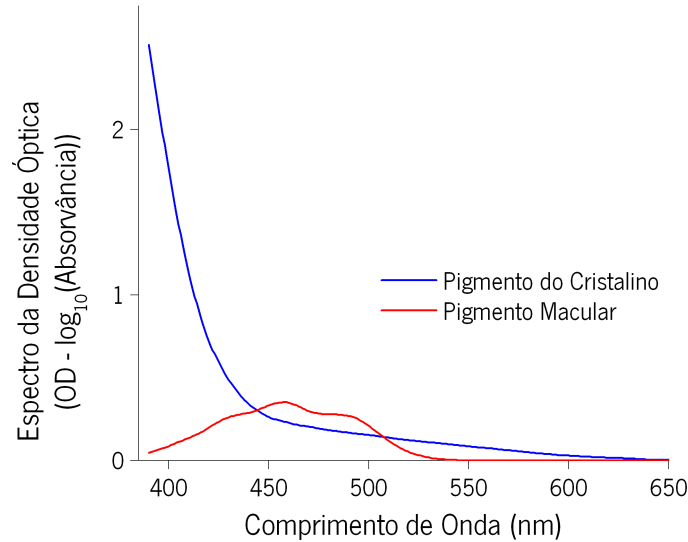


Figura 1.10 Espectro da densidade óptica do pigmento do cristalino e do pigmento macular (adaptado de [14]). A escala vertical é linear em unidades logarítmicas, para melhor representar o espectro da densidade óptica.

É por vezes necessário obter a sensibilidade dos cones independentemente da densidade óptica do pigmento cristalino e do pigmento macular, para se poder ajustar a sensibilidade média dos cones a observadores individuais. Assim, para se obter a sensibilidade dos foto-receptores ao nível da retina, será necessário retirar o efeito destes pigmentos e corrigir para a densidade óptica do pigmento do foto-receptor. Se a densidade óptica do pigmento do cristalino for  $d_{cris}(\lambda)$  e do pigmento macular for  $d_{mac}(\lambda)$  e as constantes de ajuste  $k_{cris}$  e  $k_{mac}$ , respectivamente e  $\bar{c}(\lambda)$  a sensibilidade espectral do cone em análise, na córnea, em quantas, a sensibilidade do foto-receptor na retina,  $\bar{c}_F(\lambda)$ , é [17]:

$$\log_{10}(\bar{c}_F(\lambda)) = \log_{10}(\bar{c}(\lambda)) + k_{cris} \cdot d_{cris}(\lambda) + k_{mac} \cdot d_{mac}(\lambda)$$

O contrário é também possível, ou seja, sabendo-se a sensibilidade dos foto-receptores ao nível da retina, a sensibilidade dos cones ao nível da córnea é:

$$\log_{10}(\bar{c}(\lambda)) = \log_{10}(\bar{c}_F(\lambda)) - k_{cris} \cdot d_{cris}(\lambda) - k_{mac} \cdot d_{mac}(\lambda)$$

Curvas espectrais da densidade óptica do pigmento do cristalino e do pigmento macular podem ser encontradas em [12,14,18].

A densidade óptica do pigmento do foto-receptor influencia a sua curva de sensibilidade espectral. Um aumento na sua concentração fará com que a curva de sensibilidade alargue, aumentando a sua sensibilidade, uma diminuição na sua concentração fará com que a curva de sensibilidade espectral estreite, diminuindo a sua sensibilidade espectral [17]. A densidade óptica do pigmento do foto-receptor  $\bar{c}_{OD}(\lambda)$  pode ser calculada a partir da sensibilidade espectral do foto-receptor ao nível da retina  $\bar{c}_F(\lambda)$ :

$$\bar{c}_{OD}(\lambda) = \frac{-\log_{10}(1 - \bar{c}_F(\lambda))}{D_{m\acute{a}x}}$$

Sendo que  $D_{m\acute{a}x}$  é a densidade óptica máxima do pigmento do foto-receptor. Para que  $\bar{c}_{OD}(\lambda)$  tenha um valor máximo de 1, a  $\bar{c}_F(\lambda)$  deverá ser normalizada antes da aplicação da equação [17].

Invertendo a equação anterior, é possível obter a sensibilidade espectral do foto-receptor ao nível da retina  $\bar{c}_F(\lambda)$  a partir da curva espectral normalizada da densidade óptica do pigmento do foto-receptor:

$$\bar{c}_F(\lambda) = 1 - 10^{-D_{m\acute{a}x} \cdot \bar{c}_{OD}(\lambda)}$$

Se necessário, é possível realizar ajustes espectrais na posição do máximo do pigmento do foto-receptor, desde que tal ajuste seja realizado numa escala que não altere a forma da sua curva espectral. A escala normalmente utilizada [17-19] propõe que o deslocamento seja realizado numa escala de frequências ( $1/\lambda$  em unidades de  $cm^{-1}$ ). Existem outros tipos de abordagem para o mesmo problema, mas dada a simplicidade deste método, tal como descrito em [18], e se os ajustes forem de pouca magnitude, este método apresenta uma elevada performance, ou seja, pequenos ajustes nesta escala não alteram significativamente a forma da sua curva.

### **1.1.1.2 Deficiências na visão das cores**

A sensibilidade espectral dos três tipos de cones representados na Figura 1.8 proporcionam a visão tricromática considerada normal, ou seja, capaz de reproduzir todas as cores do espectro da luz

visível recorrendo apenas a três estímulos monocromáticos (ver Figura 1.20), denominado de tricromata normal (1).

Existem casos em que, mesmo recorrendo a três estímulos monocromáticos, não é possível obter o resultado esperado para um observador normal (ver Figura 1.20), sendo que, as curvas resultantes do ajuste são diferentes das de um observador normal. Nestes casos, o observador possui três foto-receptores, mas um deles poderá ser anómalo, quando comparado com um observador normal. Neste caso o observador é chamado de protoanómalo ou deuteroanómalo caso a anomalia se encontre no cone vermelho ou verde, respectivamente. A Figura 1.11 representa a sensibilidade espectral relativa dos cones destes observadores [14,18].

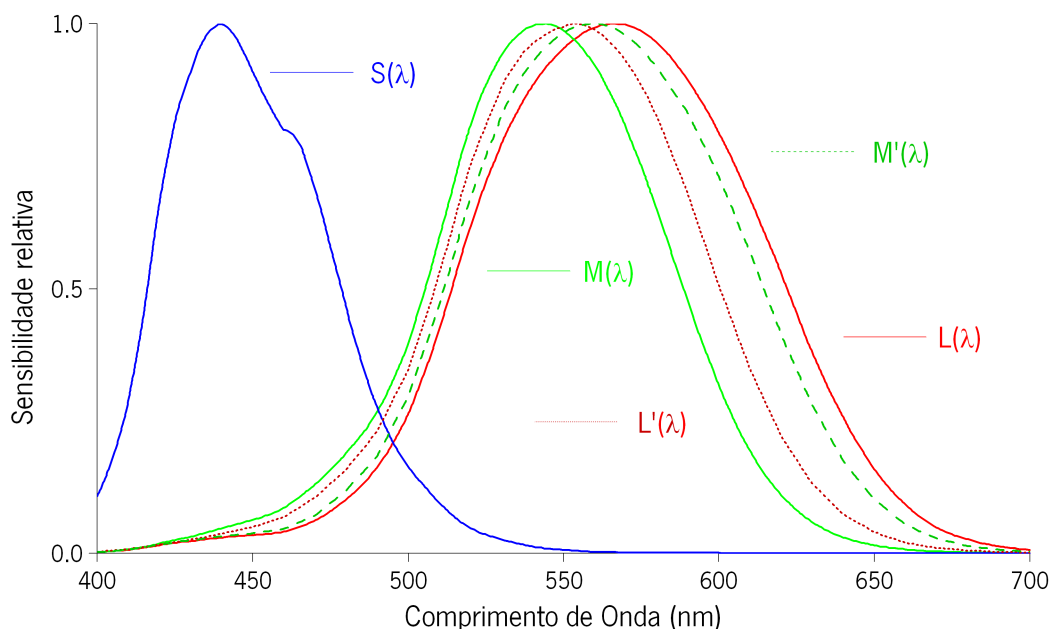


Figura 1.11 Sensibilidade espectral relativa dos cones de um observador normal L, M e S, (linha contínua a vermelho, verde e azul, respectivamente), comparadas com a sensibilidade espectral relativa dos cones L' e M' (linhas a tracejado vermelhas e verdes, respectivamente) de um observador anómalo (adaptado de [14,18]).

Um observador que com apenas dois estímulos monocromáticos consiga reproduzir todas as cores do espectro da luz visível é chamado de dicromata. Tal acontece no caso em que o observador possui apenas dois foto-receptores. No caso de faltar o cone sensível no espectro vermelho, verde

---

1 Casos há em que não é suficiente a condição aqui enumerada, sendo necessário adicionar um dos estímulos à cor em teste (ver secção 1.2).

ou azul, a sua designação é protanope, deuteranope ou tritanope, respectivamente [20]. A Figura 1.12 representa a sensibilidade espectral relativa dos cones destes observadores [14].

Existe ainda um outro tipo de observador que possuiu uma anomalia da visão das cores ainda mais extrema. Conseguir realizar o ajuste de todas as cores do espectro luminoso com apenas um estímulo monocromático, sendo apelidado do monocromata. Possui apenas um cone e apenas distingue níveis de intensidade luminosos.

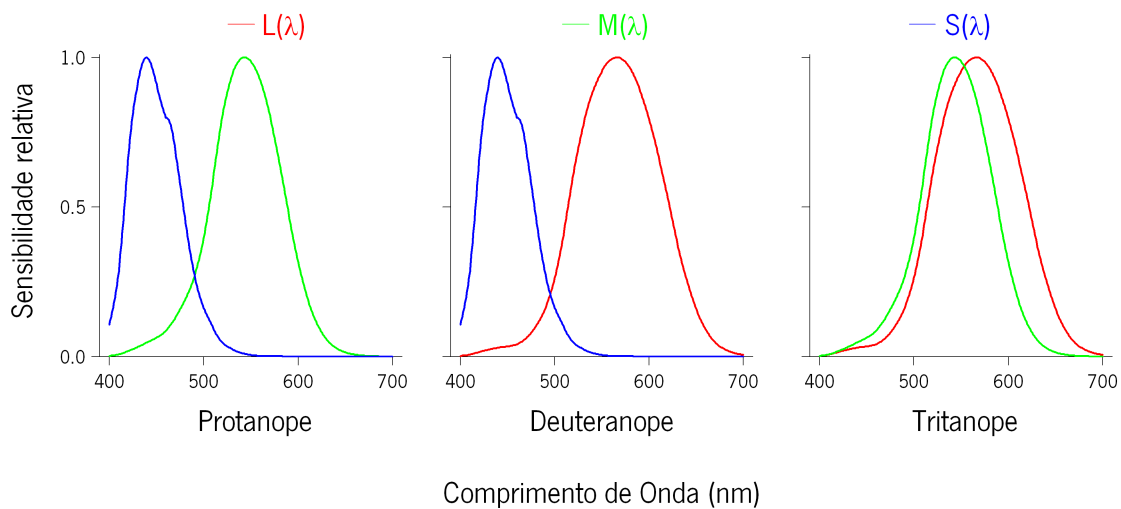


Figura 1.12 Curvas de sensibilidade espectral relativa dos cones de um observador protanope (esquerda), deuteranope (centro) e tritanope (direita). O cone em ausência é assinalado pela legenda superior (adaptado de [18]).

Tabela 1.1 Incidência de deficiência da visão das cores em anómalos caucasianos.

Anómalos			
Incidência	Género	Protoanómalo	Deuteroanómalo
Wyszecki e Stiles [12]	Homens	1%	4.9%
	Mulheres	0.02%	0.38%
Sharpe <i>et al.</i> [21]	Homens	1.08%	4.63%
	Mulheres	0.03%	0.36%

A incidência destas anomalias não é completamente conhecida e variando com a raça, técnica de amostragem utilizada e com a população escolhida para realizar a amostragem. As Tabela 1.1 e



Tabela 1.2 apresentam a percentagem da incidência de anómalos e dicromatas, respectivamente, em comparação com observadores normais para uma população caucasiana. Em geral os homens são mais afectados do que as mulheres, dada a ligação da anomalia ao cromossoma X (ver secção 1.1.1.3), e a deficiência mais abundante é a deuteranomia.

Tabela 1.2 Incidência de deficiência da visão das cores em dicromatas caucasianos.

Dicromatas				
Incidência	Género	Protanope	Deuteranope	Tritanope
Wyszecki e Stiles [12]	Homens	1.0%	1.1	0.002%
	Mulheres	0.02%	0.01	0.001%
Sharpe <i>et al.</i> [21]	Homens	1.01%	1.27%	-
	Mulheres	0.02%	0.01%	-

Por norma a detecção dos observadores deficientes da visão das cores pode ser levada a cabo recorrendo à comparação de cores que são confundidas por observadores deficientes da visão das cores, mas não por observadores normais. Existem testes desenhados com tal fim como o livro das patelas de Ishihara onde o objectivo é identificar o número desenhado, ou o teste das 100 tonalidades de Farnsworth-Munsell que consiste na ordenação de patelas coloridas com uma determinada escala colorimétrica. O método mais preciso para a identificação de observadores com deficiência na visão das cores e a sua classificação em função do grau da anomalia é o anomaloscópio de Nagel que compara uma cor de referência com uma cor de teste cuja cor e luminosidade pode ser alterada pelo observador.

### 1.1.1.3 A genética da visão das cores

Os genes responsáveis pela tradução genética dos cones sensíveis na zona dos comprimentos de onda longos e médios (L e M, respectivamente) situam-se no cromossoma X, e os responsáveis pela tradução dos cones sensíveis na zona dos comprimentos de onda curtos (S) situam-se no cromossoma autossómico 7 [22]. A opsina é uma molécula e constitui o pigmento responsável pelas reacções químicas que ocorrem nos foto-receptores na presença de luz [21]. Os genes da opsina L e M são constituídos por 6 exões (364 codões), sendo que variações no exão 5 são as que mais contribuem para as diferenças espectrais entre os pigmentos dos cones L e M [22,23]. O gene

da opsina S é constituído por 5 exões (348 codões). Enquanto que os genes do pigmento L e M são idênticos em cerca de 96% ao longo dos seus 6 exões, a semelhança entre o pigmento S e M/L é de apenas 43% [21]. A diminuta semelhança entre o cone S e os cones M e L, e a elevada semelhança entre estes dois últimos, permite especular a evolução dos genes do pigmento, sendo que pigmento M será o mais antigo, seguido do S e posteriormente e bastante mais recente o L [21].

#### 1.1.1.4 O percurso da luz: do olho ao cérebro.

A luz que chega ao olho, chega aos foto-receptores passando pela córnea, pelo humor aquoso, pela pupila, pelo cristalino, pelo humor vítreo e por toda a estrutura retiniana. Nos foto-receptores é convertida em sinais eléctricos que são enviados para o cérebro.

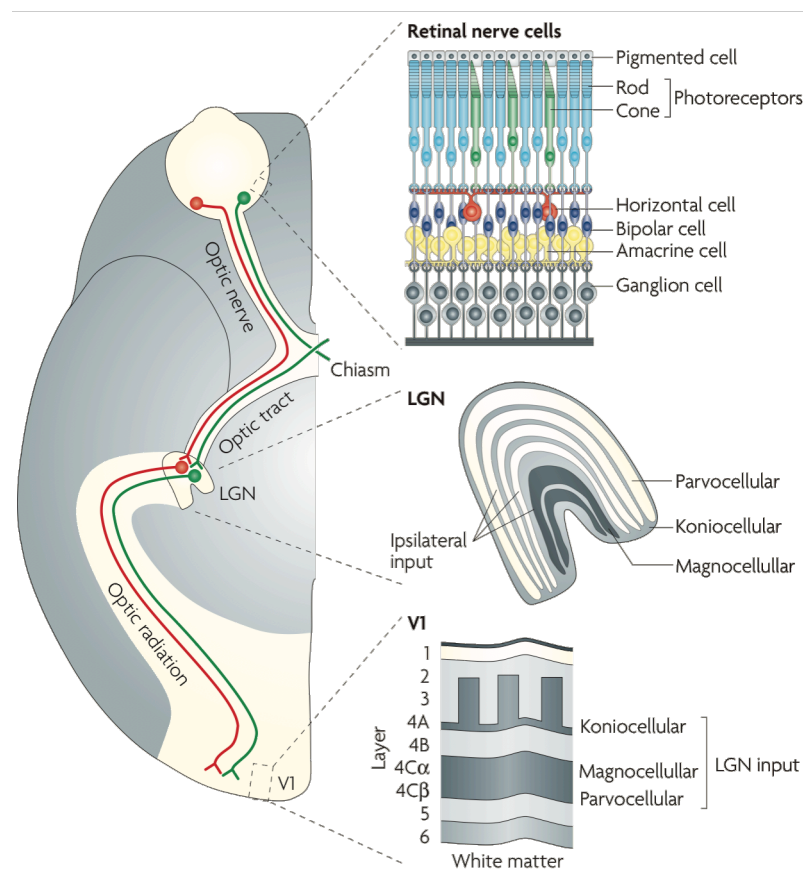


Figura 1.13 Percurso do sinal eléctrico desde a retina até ao córtex visual primário e respectiva estratificação do sinal. O sinal proveniente da retina temporal é enviado para o córtex visual primário ipsilateral, enquanto que o sinal proveniente da retina nasal cruza no quiasma óptico e é enviado para o córtex visual primário contralateral. Também é visível a conexão das vias parvocelular, magnocelular e koniocelular desde o corpo geniculado lateral até à área visual V1 - adaptado de [24].

A Figura 1.13 representa o percurso do sinal eléctrico. O sinal enviado pelos foto-receptores é processado pelas diferentes camadas de células retinianas, enviado pelo nervo óptico até ao quiasma óptico, passando pelo tracto óptico até ao corpo geniculado lateral e daí até ao córtex visual primário através da radiação óptica. Se o foto-receptor se encontra na retina temporal, o seu sinal é enviado para o córtex visual primário ipsilateral. Se o foto-receptor se encontra na retina nasal, o seu sinal cruza no quiasma óptico e é enviado para o córtex visual primário contralateral.

Existem três vias anatomicamente independentes que levam o sinal da retina ao córtex visual primário – a via magnocelular, parvocelular e koniocelular sendo estas as principais responsáveis pela transmissão da informação relativa ao movimento e à estereopsia, à cor e forma (ou visão espacial) e à cor, respectivamente [25,26]. A via magnocelular recebe o seu sinal de células bipolares difusas e projecta o seu sinal maioritariamente na camada  $4C\alpha$  da área V1 do córtex visual primário; a via parvocelular recebe o seu sinal de células bipolares curtas e projecta o seu sinal maioritariamente na camada  $4C\beta$  da área V1 do córtex visual primário; a via koniocelular recebe o seu sinal de células bipolares especializadas em transportar o sinal de cones S e projecta o seu sinal maioritariamente na camada 4A, 2 e 3 da área V1 do córtex visual primário.

#### **1.1.1.5 Teoria da visão das cores**

“Previous to the time of Newton, the theory of colour consisted chiefly of vague hypotheses.” [27]

“There is no kind of rays that alone can exhibit white. White is always a mixture, and to its composition are requisite all of the aforesaid primary colours, mixed in due proportions.”[28].

A Figura 1.14 representa uma série de experiências realizadas por Newton com o propósito de investigar a composição da luz branca. Ao fazer incidir um feixe de luz num prisma de vidro verificou que esta se decompunha em vários componentes (Figura 1.14 – A de decomposição da luz). Para testar o efeito do prisma no raio de luz, seleccionou apenas um componente do espectro luminoso decomposto pelo primeiro prisma e colocou no seu percurso um segundo prisma (Figura 1.14 – B e Figura 1.16 de decomposição sucessiva da luz), observando que este não alterava a sua cor [29]. Com o intuito de verificar se os prismas adicionavam qualidades à luz que por eles passava, Newton colocou um segundo prisma invertido em frente ao primeiro (Figura 1.14 – C e Figura 1.15 de recomposição da luz) observando que do conjunto óptico emergia luz branca,

concluindo que os prismas não coloriam a luz branca mas decompunham-na. Se o prisma de vidro fosse o responsável pela coloração da luz projectada na parede após passar pelo prisma, a luz saída do conjunto óptico seria colorida e não branca.

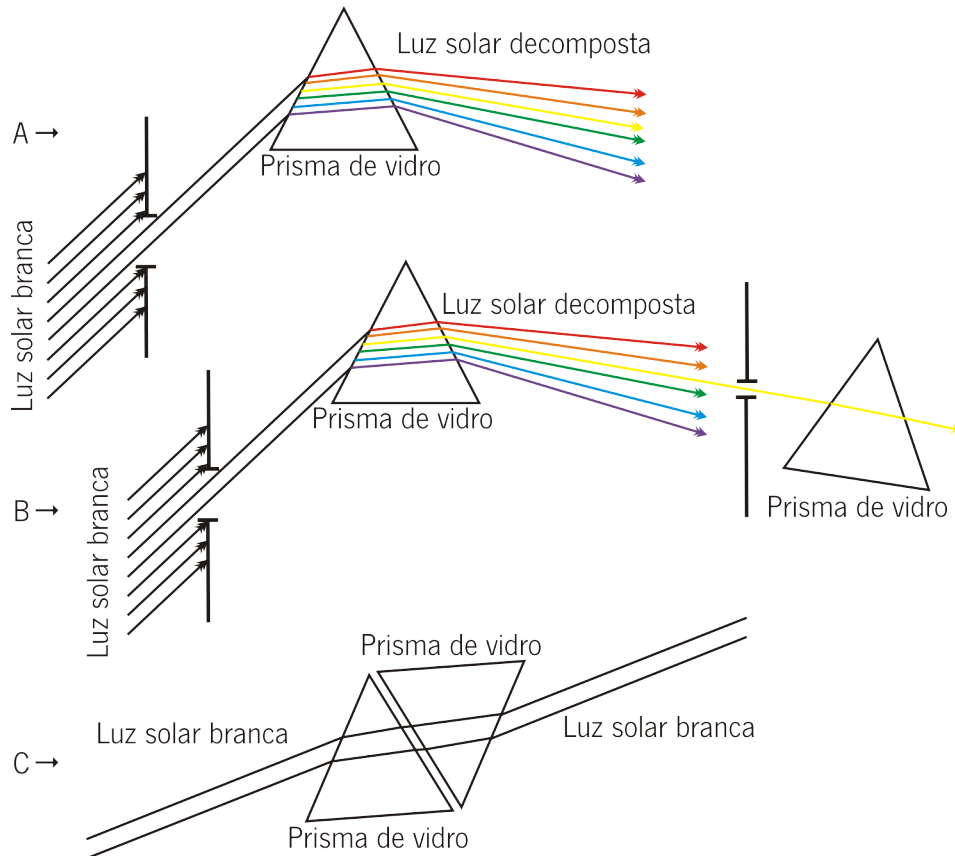


Figura 1.14 Experiência de decomposição (A), decomposição sucessiva (B) e recomposição (C) da luz realizada por Newton (adaptado de [29]).

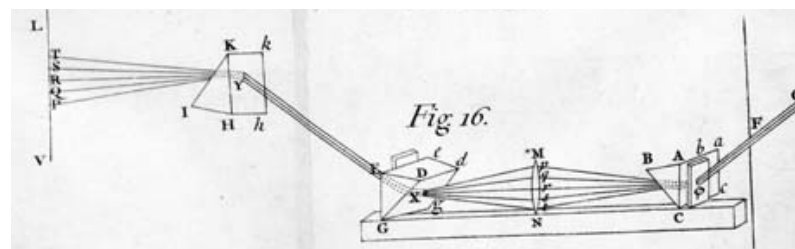


Figura 1.15 Experiência de Newton de decomposição espectral da luz, recomposição por via de um prisma invertido e de novo decomposição espectral. Imagem obtida da página on-line da "The Royal Society" (2) e retirada de Optiks de Newton, Livro 1, Parte 2, lâmina IV, figura 16.

2 [http://royalsociety.org/PhotoGallery\\_WF.aspx?pageid=8264](http://royalsociety.org/PhotoGallery_WF.aspx?pageid=8264) - acedida em 19-05-2011.

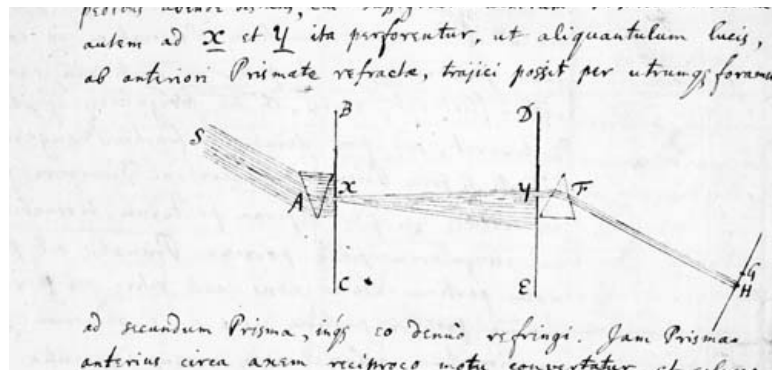


Figura 1.16 Experiência de Newton de decomposição espectral sucessiva com dois prismas invertidos, em que a cor resultante final não é a luz branca. Imagem obtida da página on-line da “The Royal Society” (3) e retirada de uma imagem de uma carta enviada por Newton a Oldenberg, a 6 de Junho de 1672.

George Palmer abordou em 1777 a possibilidade de só existirem três receptores na retina correspondentes aos três tipos de raios de luz principais que compõe a luz branca:

“The surface of the retina is compounded of particles of three different kinds, analogous to the three rays of light; and each of these particles is moved by its own ray.” [30].

Em 1801, Thomas Young, perante a Royal Society, procurou demonstrar que o olho não poderia ter tantos receptores à luz quantas as cores do espectro da luz visível, argumentando a dificuldade biológica e fisiológica de tal arranjo, enfatizando a teoria ondulatória da luz, à semelhança do som, e referiu que o número de receptores à luz no olho seria de três, sugerindo um para cada cor principal: o vermelho, o amarelo e o azul:

“As it is almost impossible to conceive each sensitive point of the retina to contain an infinite number of particles, each capable of vibrating in perfect unison with every possible undulation, it becomes necessary to suppose the number limited, for instance, to the three principal colours, red, yellow, and blue...”[31].

Foi apenas em 1866 que Hermann von Helmholtz conseguiu, de forma intuitiva, estimar a sensibilidade dos três tipos de receptores retinianos - Figura 1.17 [27].

3 [http://royalsociety.org/PhotoGallery\\_WF.aspx?pageid=8264](http://royalsociety.org/PhotoGallery_WF.aspx?pageid=8264) - acedida em 19-05-2011.

Apesar de serem apenas estimativas, as curvas de sensibilidade sugeridas por von Helmholtz são bastante próximas das que actualmente conhecemos.

A teoria tricromática da visão das cores assume, assim, a existência de três foto-receptores, com sensibilidades diferentes ao espectro da luz e independentes entre si, cujo sinal é enviado directamente ao cérebro, e é verificada experimentalmente recorrendo à mistura aditiva de luzes, em particular na fóvea ([12] pág. 583).

No entanto, no final do século XIX, Hering observou que as cores verde e vermelha ou as cores azul e amarela nunca eram percebidas em simultâneo por um observador com a visão das cores normais. Observou também que a pós-imagem de um estímulo vermelho era verde e de um estímulo azul era amarelo.

Estas observações de Hering eram inconsistentes com a teoria tricromática, o que sustentou a apresentação, mais tarde, da teoria oponente da cor. Esta teoria assumia a existência de processos visuais capazes de codificar a informação de uma forma oponente, contrariando a ligação directa dos foto-receptores ao cérebro assumida pela teoria tricromática. Perante um determinado estímulo apenas a informação relativa ao vermelho ou ao verde e ao azul ou amarelo seria transmitida; da mesma forma a informação relativa aos níveis de luz, como representado na Figura 1.18.

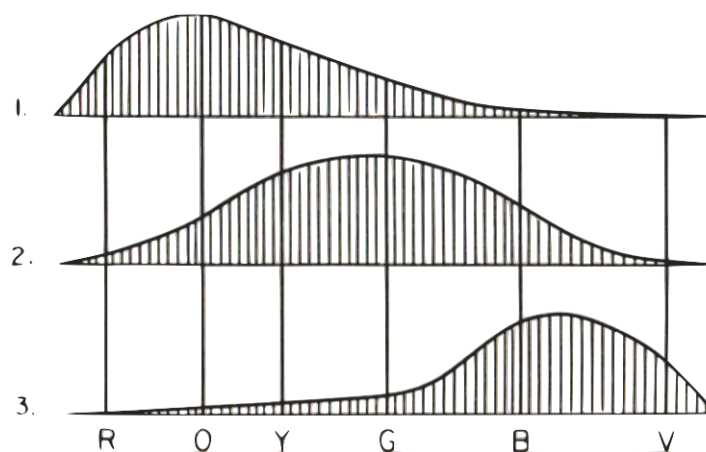


Figura 1.17 Curvas de sensibilidade dos três receptores retinianos estimadas por von Helmholtz (adaptado de [27]).

As teorias da cor modernas reconhecem a teoria tricromática da cor e a teoria oponente da cor de Hering, uma vez que uma permite explicar o número limitado de foto-receptores que o olho humano

tem face ao amplo espectro luminoso e como são utilizados para conseguir a visão a cores, e a outra como é que a informação é processada depois da transformação de um sinal luminoso em sinal eléctrico pronto a ser enviado para o cérebro.

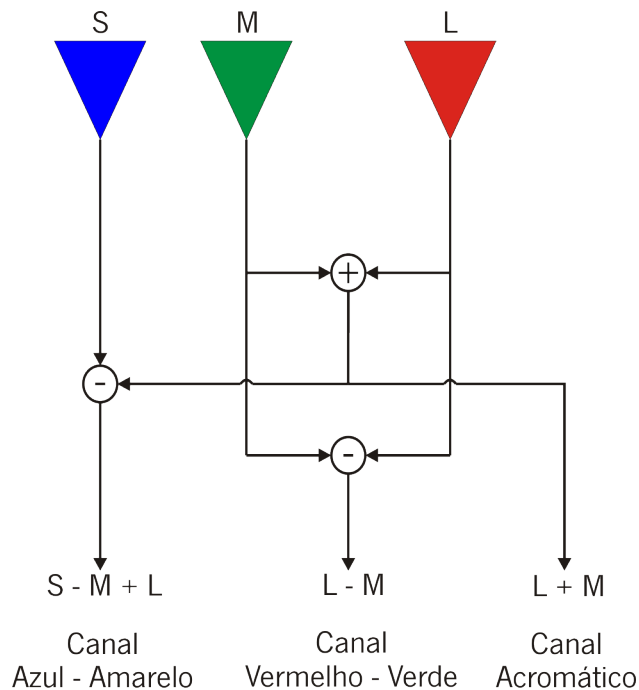


Figura 1.18 Modelo inicial do nível de pós-processamento visual (adaptado de [32]). O S, M e L indicam os cones com a sensibilidade máxima na zona do Azul, Verde e Vermelho do espectro da luz visível, respectivamente.

As vias magnocelular e parvocelular são espectralmente oponentes. Enviam sinais excitatórios se o sinal espectral corresponde a uma determinada zona do espectro, sinais inibitórios se o sinal espectral corresponde à outra zona do espectro ou uma resposta nula se o sinal se situar na zona espectral intermédia, onde a excitação e a inibição se anulam [33].

## 1.2 Colorimetria

O olho humano é sensível ao espectro da luz visível dos 400 aos 720 nm, aproximadamente [17]. É possível, considerando os limites do intervalo do espectro da luz visível, e num leque alargado de condições de observação, fazer com que a cor de um determinado estímulo colorido seja similar à cor de uma amostra gerada, utilizando apenas a mistura aditiva de três estímulos primários em quantidades adequadas. Cada um dos primários terá de ser escolhido de tal forma que os outros dois combinados não o consigam reproduzir. Em certas condições será, no entanto, necessário adicionar ao estímulo colorido um dos primários para que a comparação seja idêntica [12].

A Figura 1.19 demonstra um aparelho construído por Wright [34] com base no princípio de que três estímulos luminosos, na proporção correcta, podem reproduzir outra cor. Possui três primários, um vermelho (R), um verde (G) e um azul (B), ajustáveis independentemente em intensidade e com a possibilidade de adicionar qualquer um deles à cor da amostra para facilitar o ajuste.

Se  $Q_\lambda$  for uma cor monocromática,  $R$ ,  $G$  e  $B$  os primários vermelho, verde e azul, respectivamente, e  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  e  $\bar{b}(\lambda)$  a intensidade luminosa de cada um dos primários necessária para igualar a cor monocromática  $Q_\lambda$ , então:

$$Q_\lambda = \bar{r}(\lambda) \cdot R + \bar{g}(\lambda) \cdot G + \bar{b}(\lambda) \cdot B$$

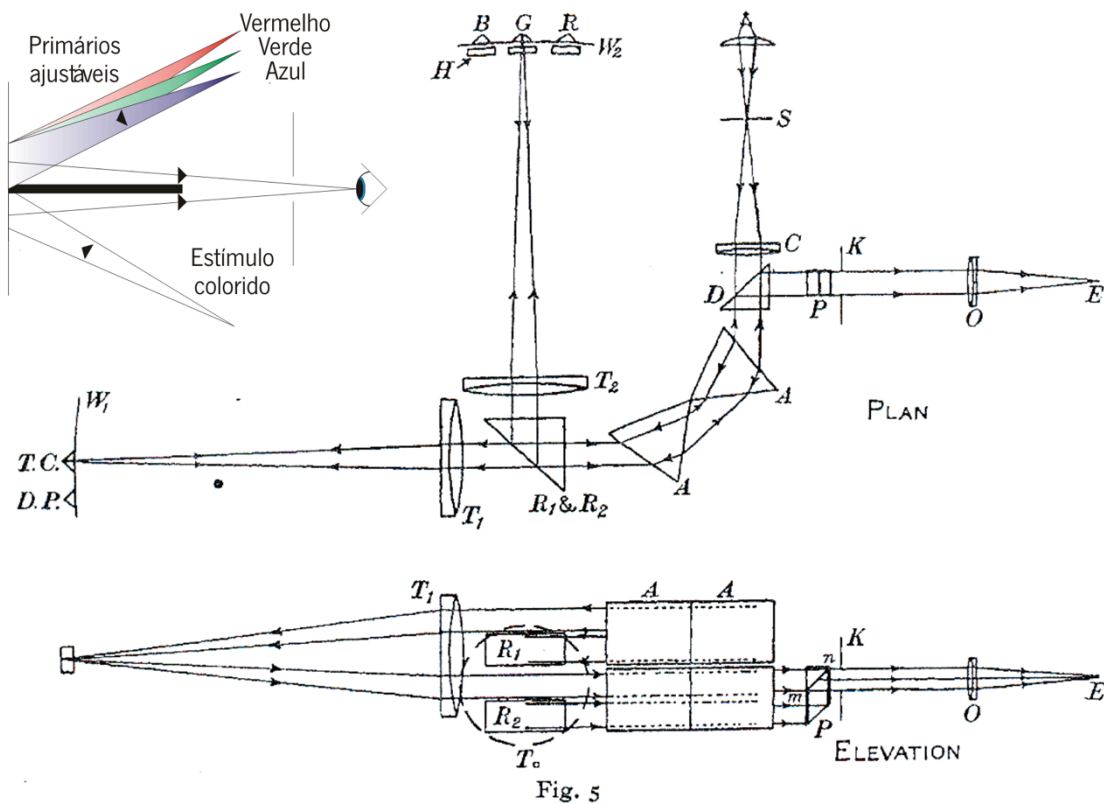


Figura 1.19 Colorímetro tricromático de Wright com três primários ajustáveis espectralmente (esquema colorido no canto superior esquerdo) (adaptado de [34]).

A Figura 1.20 representa as curvas de equalização da cor obtidas por este método, assumindo como primários o  $\lambda_R=700$  nm, o  $\lambda_G= 546.1$  nm e o  $\lambda_B=435.8$  nm, com intensidades luminosas relativas de 72.1:1.4:1, respectivamente e um campo de visão de 2° [12]. Estas curvas permitem determinar as quantidades de cada um dos primários necessárias para equalizar a cor da amostra



monocromática, chamadas de valores triestímulos. É de realçar o valor negativo na curva vermelha entre os primários azul e verde, o que significa que houve necessidade de adicionar primário vermelho à amostra para que o ajuste fosse conseguido.

Para evitar valores triestímulos negativos a CIE propôs um novo conjunto de funções de reprodução da cor, resultantes de uma transformação linear das funções de reprodução da cor  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  e  $\bar{b}(\lambda)$ . As novas funções de reprodução de cor  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  e  $\bar{z}(\lambda)$  não possuem valores triestímulos negativos, as áreas sob as suas curvas são iguais, a função  $\bar{y}(\lambda)$  é igual à função de sensibilidade fotópica do olho  $V(\lambda)$  e representam o observador colorimétrico padrão CIE 1931 recorrendo a valores triestímulos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  [13].

Estas funções de reprodução da cor baseiam-se num campo de visão de  $2^\circ$ . Para ultrapassar esta limitação a CIE propôs, em 1964, um novo conjunto de funções baseado num campo de observação de  $10^\circ$ , para serem utilizadas sempre que o campo de visualização fosse superior a  $4^\circ$ , definindo assim o observador colorimétrico padrão CIE 1964 [13]. A Figura 1.21 representa as funções de reprodução da cor para um campo de visão de  $2^\circ$  (linhas contínuas) e de  $10^\circ$  (pontos).

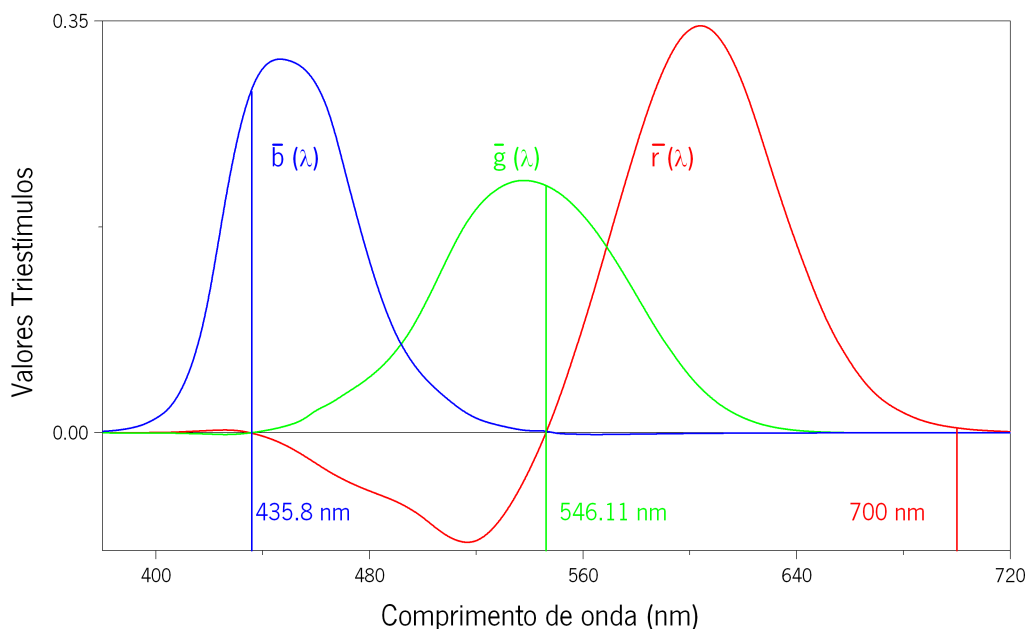


Figura 1.20 Funções de igualação da cor resultantes do uso de primários monocromáticos, para um estímulo de intensidade luminosa igual em todos os comprimentos de onda. Os primários  $\lambda_R=700$  nm,  $\lambda_G=546.1$  nm e  $\lambda_B=435.8$  nm possuem uma intensidade luminosa relativa de 72.1:1.4:1.0 respectivamente (adaptado de [12])

Em 1951, Judd ([12] - Tabela I (5.5.2), pág. 331) apresentou uma nova versão das funções de reprodução da cor baseadas na função de sensibilidade fotópica da CIE  $V(\lambda)$ , com o objectivo de colmatar algumas das falhas que as anteriores funções possuíam na zona dos menores comprimentos de onda (zona dos azuis). A Figura 1.22 apresenta as funções de reprodução da cor para o observador padrão CIE 1931 e para o observador padrão CIE 1931 modificado por Judd. É notória a diferença na zona dos menores comprimentos de onda.

É no entanto possível converter as funções de reprodução da cor do observador padrão CIE 1931 no observador padrão CIE 1931 modificado por Judd utilizando [35]:

$$x'_\lambda = \frac{1.0271x_\lambda - 0.00008y_\lambda - 0.00009}{0.03845x_\lambda + 0.01496y_\lambda + 1}$$

$$y'_\lambda = \frac{0.00376x_\lambda + 1.0072y_\lambda + 0.00764}{0.03845x_\lambda + 0.01496y_\lambda + 1}$$

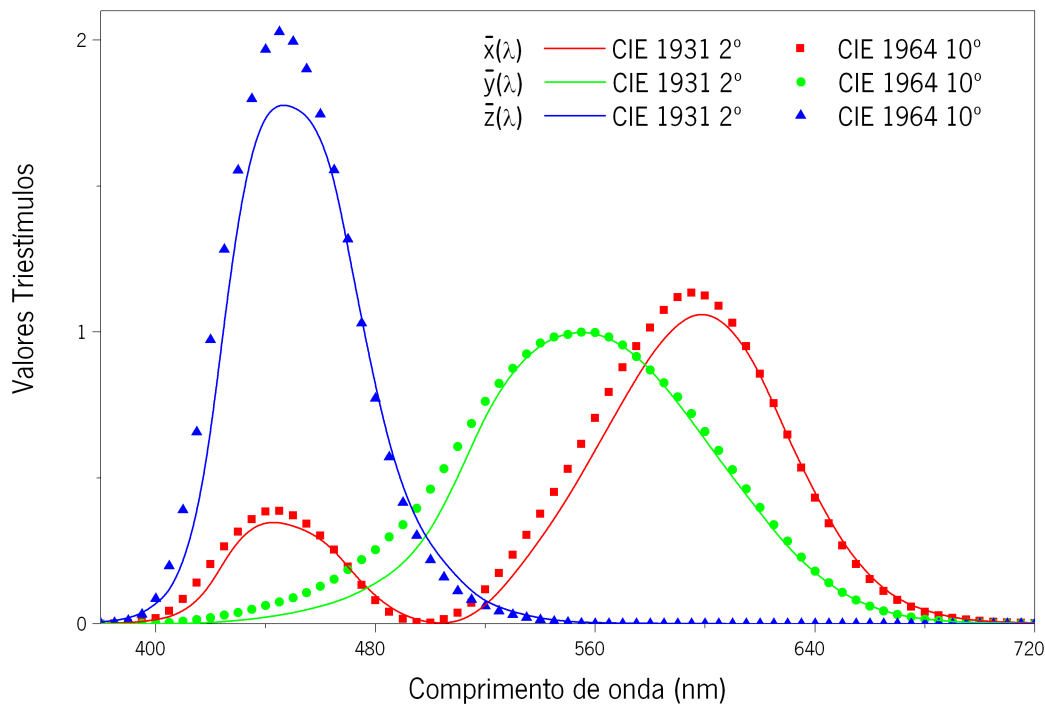


Figura 1.21 Funções de reprodução da cor propostas pela CIE para o observador padrão para um campo de 2° de visão (linhas contínuas) e para um campo de 10° de visão (pontos) (adaptado de [13])

As funções de reprodução da cor de Judd e a possibilidade de conversão para o sistema CIE são importantes na criação de espaços de representação de coordenadas cromáticas baseadas em estímulos de cones [36].

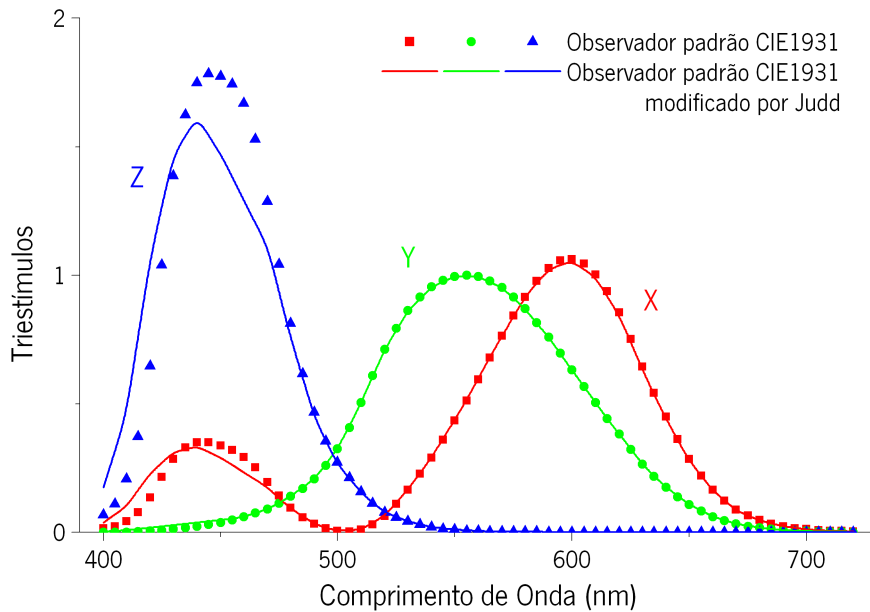


Figura 1.22 Funções de reprodução da cor para o observador padrão CIE 1931 (pontos) e para o observador padrão CIE 1931 modificado por Judd (linhas) – adaptado de [12,13].

### 1.2.1 Representação de cores e estímulos espectrais

É assim possível, utilizando as funções de reprodução da cor, caracterizar uma cor monocromática com apenas três variáveis, ou seja, os valores triestímulos. No entanto, no caso de o estímulo em análise não se tratar de um estímulo monocromático mas de uma distribuição espectral  $R(\lambda)$ , associado a uma iluminação com uma distribuição espectral  $I(\lambda)$  a caracterização pode ser realizada utilizando as seguintes fórmulas:

$$X = k \cdot \int_{\lambda} R(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d(\lambda)$$

$$Y = k \cdot \int_{\lambda} R(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d(\lambda)$$

$$Z = k \cdot \int_{\lambda} R(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d(\lambda)$$

em que  $k = 100 / \int_{\lambda} I(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d(\lambda)$ , considerando que  $Y = 100$  no caso em que  $R(\lambda) = 1$  para todos os comprimentos de onda.

Ou para o caso em que a distribuição espectral não é contínua, mas discreta, como no caso dos resultados obtidos ao utilizar aparelhos de medida:

$$X = k \cdot \sum_{\lambda} R(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \Delta(\lambda)$$

$$Y = k \cdot \sum_{\lambda} R(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \Delta(\lambda)$$

$$Z = k \cdot \sum_{\lambda} R(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \Delta(\lambda)$$

em que  $k = 100 / \sum_{\lambda} I(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \Delta(\lambda)$ , considerando que  $Y = 100$  no caso em que  $R(\lambda) = 1$  para todos os comprimentos de onda.

### 1.2.1.1 O diagrama cromático CIE 1931

Para melhorar a visualização dos valores triestímulos enquanto descritores de uma distribuição espectral, a CIE introduziu o diagrama cromático CIE 1931 [13]. Esta representação bidimensional de um estímulo colorido é possível uma vez que as coordenadas cromáticas estão relacionadas com os valores triestímulos por:

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

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

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

A representação bidimensional é possível e suficiente uma vez que as coordenadas cromáticas se relacionam de tal forma que  $x + y + z = 1$ .

A Figura 1.23 representa o diagrama cromático CIE 1931, onde todas as cores representadas no canto superior direito são resultantes da combinação em proporções adequadas de duas cores monocromáticas, representadas na linha azul. Por exemplo, todas as cores representadas pela recta a verde resultam da combinação em proporções adequadas das cores monocromáticas M e N. A cor P resulta da combinação da cor M e N em igualdade de proporções.

Já a combinação em proporções adequadas das cores K e L produzem a cor E com coordenadas cromáticas  $x = 0.33$  e  $y = 0.33$  representando o branco relativo a um espectro equiluminante, ou seja, a distribuição espectral é constante para todos os comprimentos de onda (ver Figura 1.39). As cores cujas linhas de ligação passam por este ponto denominam-se de cores complementares, uma vez que uma determinada proporção das mesmas resulta na cor branca.

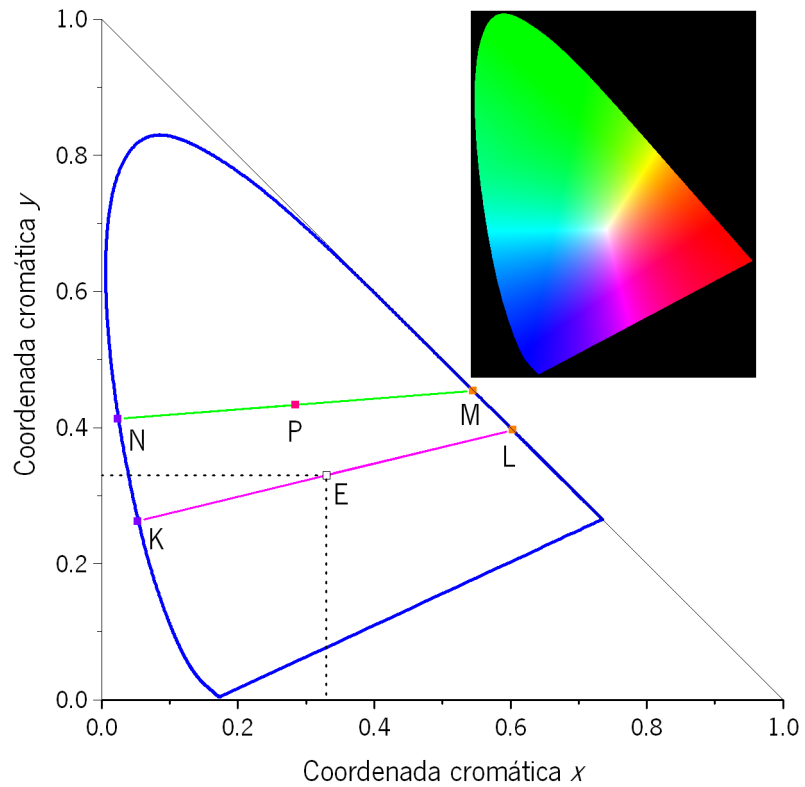


Figura 1.23 Diagrama cromático CIE 1931. A linha azul representa o local onde as cores monocromáticas são representadas. Todas as cores que são representadas pela linha verde são geradas pelas cores monocromáticas M e N. A cor P resulta da combinação da cor M e N em proporções iguais.

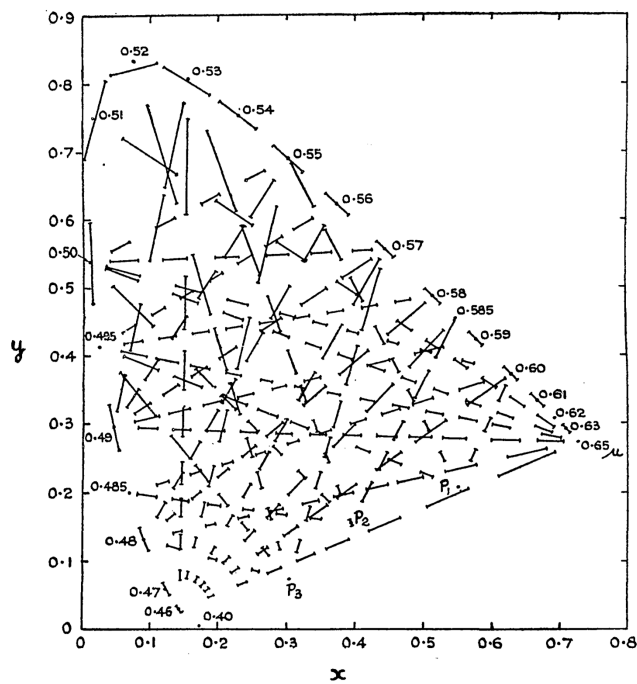


Figura 1.24 Falta de uniformidade perceptual no diagrama cromático CIE1931. Cada segmento de recta representa duas cores que tem uma separação perceptualmente igual entre si, para a mesma luminosidade (adaptado de [37]).

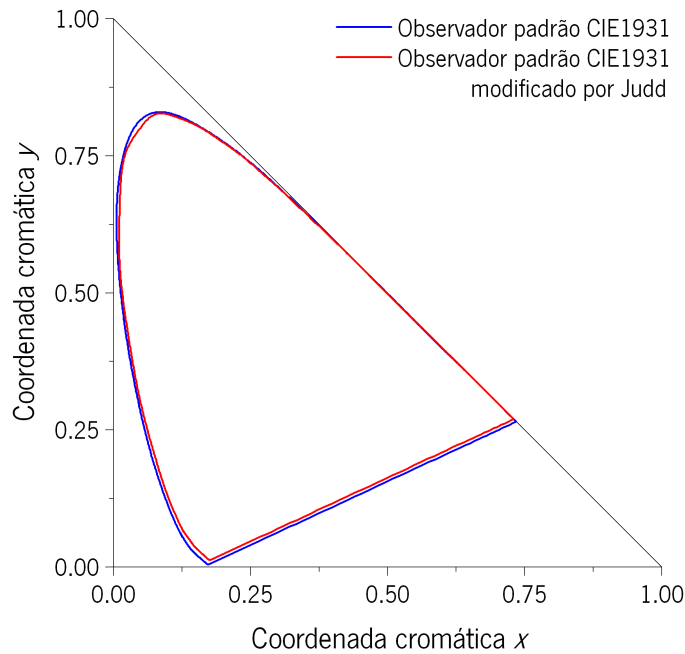


Figura 1.25 Efeito no diagrama cromático da utilização das funções de reprodução da cor do Observador padrão CIE 1931 modificado por Judd (linha a vermelho) comparado com o original (linha a azul).

Apesar da ampla aplicabilidade deste diagrama cromático, a sua falta de uniformidade perceptual dificulta a sua utilização em aplicações onde é necessário determinar a percepção associada a uma determinada variação colorimétrica. A Figura 1.24 demonstra essa falta de uniformidade. Cada segmento de recta representa duas cores com uma distância perceptualmente uniforme entre si, para a mesma luminosidade [37]. Idealmente, cada um destes segmentos de recta deveria ser igual em magnitude, são, no entanto, maiores na zona verde do diagrama e menores na zona azul do diagrama.

A Figura 1.25 evidencia as diferenças no diagrama cromático quando são utilizadas as funções de reprodução da cor do observador padrão da CIE 1931 modificado por Judd [12] (linha a vermelho) em detrimento do observador padrão definido pela CIE [13] (linha a azul).

### 1.2.1.2 O diagrama cromático CIE 1931 e as linhas de confusão de dicromatas

Tal como discutido na secção 1.1.1.2 os observadores protanopes, deuteranopes e tritanopes são aqueles a quem falta o cone sensível no vermelho, verde e azul, respectivamente. Estes observadores possuem uma discriminação cromática reduzida, confundindo algumas cores, uma vez que são suficientes dois primários para conseguirem igualar todas as cores monocromáticas do

espectro da luz visível. Estas cores concentram-se em linhas de confusão quando apresentadas num diagrama cromático, como o diagrama cromático CIE 1931, que se concentram em pontos de confusão específicos de cada tipo de observador. A Figura 1.26 representa estas linhas de confusão, assim como o seu ponto de convergência, sendo que no caso do deuteranopes o ponto de convergência é virtual.

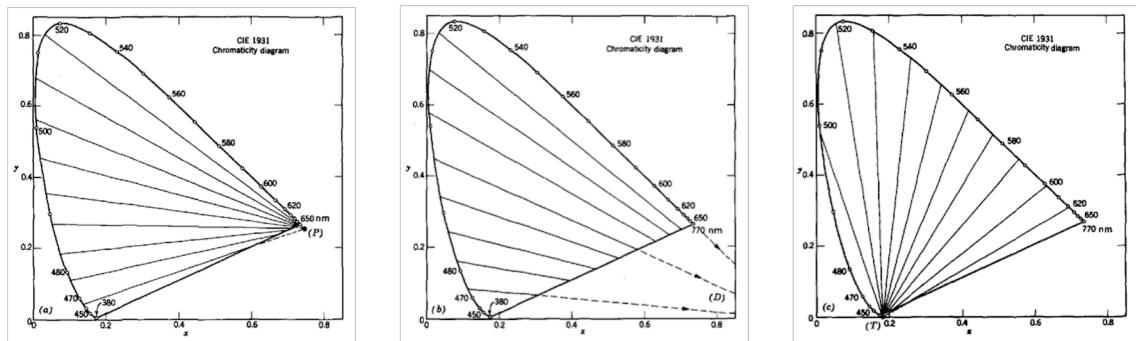


Figura 1.26 Linhas de confusão de observadores dicromatas representadas no diagrama cromático CIE 1931 e pontos de convergência das linhas de confusão (P), (D) e (T) para um protanope (esquerda), deuteranope (centro) e tritanope (direita), respectivamente (adaptado de [12]).

O ponto de convergência de um protanope (P) é  $x_p = 0.747$  e  $y_p = 0.253$ , de um deuteranope (D) é  $x_d = 1.080$  e  $y_d = -0.080$  e de um tritanope (T) é  $x_t = 0.171$  e  $y_t = 0.0$  [12]. Assim, todas as cores que se concentram nas linhas representadas na Figura 1.26 não são distinguíveis pelos respectivos observadores dicromatas.

### 1.2.1.3 O diagrama cromático CIE 1976

Em 1976 a CIE apresentou o espaço cromático CIE 1976, numa tentativa de melhorar as não uniformidades do espaço cromático CIE 1931. A Figura 1.27 representa as melhorias na uniformidade da percepção, existindo um tamanho médio aproximado entre todos os segmentos de recta.

Apesar de ser notória a ainda falta de completa uniformidade, este espaço provou ser efectivamente superior em uniformidade quando comparado com o espaço cromático CIE 1931. A Figura 1.28 mostra a representação cromática deste espaço que pode ser obtido a partir dos valores triestímulos, ou das coordenadas cromáticas, CIE 1931, a partir de:

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

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

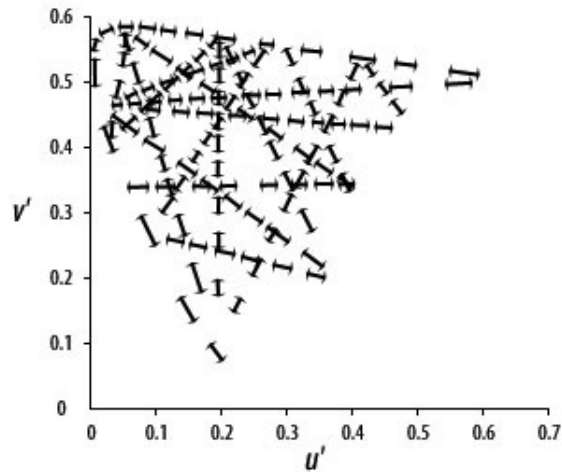


Figura 1.27 Diagrama cromático CIE 1976 ( $u',v'$ ). Cada segmento de recta representa duas cores que tem uma separação perceptualmente igual entre si, para a mesma luminosidade (adaptado de [38]).

Por forma a incluir o valor da luminosidade na representação gráfica das coordenadas cromáticas a CIE apresentou dois novos espaços, o CIELUV e o CIELAB. O CIELUV foi desenvolvido especialmente para representar coordenadas cromáticas relacionadas com processos de cor aditivos, como por exemplo monitores de computadores ou televisores, enquanto que o CIELAB foi desenvolvido para representar coordenadas cromáticas relacionadas com processos de cor substractivos, como por exemplo impressoras ou processos utilizados na indústria têxtil [39].

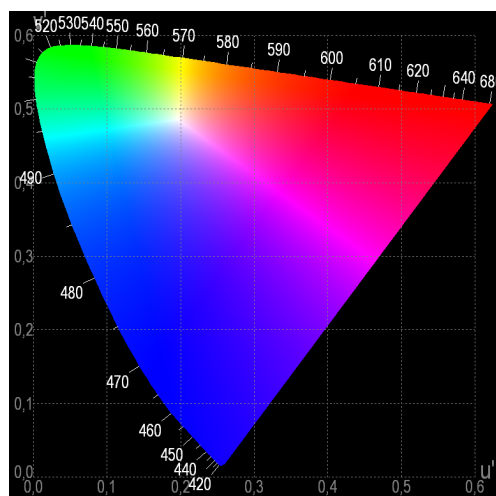


Figura 1.28 Representação cromática no espaço CIE 1976.



#### 1.2.1.4 O espaço CIELUV

O espaço CIELUV é obtido a partir das coordenadas  $(u', v')$  do espaço cromático CIE 1976, por:

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad \text{se} \quad Y/Y_n > (24/116)^3$$

ou

$$L^* = 903.3 \frac{Y}{Y_n} \quad \text{se} \quad Y/Y_n \leq (24/116)^3$$
$$u^* = 13L^*(u' - u'_n) \quad \text{e} \quad v^* = 13L^*(v' - v'_n)$$

Onde  $Y$  e  $Y_n$  representam os valores triestímulos da amostra a ser testada e do branco de referência, respectivamente, e  $u', v'$  e  $u'_n, v'_n$  as coordenadas cromáticas estimadas no espaço de cor CIE 1976 para a amostra e para o branco de referência, respectivamente. Os valores triestímulos do branco de referência são estimados assumindo a reflexão do iluminante no branco de referência.

#### 1.2.1.5 O espaço CIELAB

O espaço CIELAB é obtido a partir dos valores triestímulos, por:

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16$$
$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)]$$
$$b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)]$$

Onde:

$$f(X/X_n) = (X/X_n)^{1/3} \quad \text{se} \quad (X/X_n) > (24/116)^3$$
$$f(X/X_n) = (841/108)(X/X_n) + 16/116 \quad \text{se} \quad (X/X_n) \leq (24/116)^3$$

$$f(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{1/3} \quad \text{se} \quad (Y/Y_n) > (24/116)^3$$
$$f(Y/Y_n) = (841/108)(Y/Y_n) + 16/116 \quad \text{se} \quad (Y/Y_n) \leq (24/116)^3$$

$$f(Z/Z_n) = (Z/Z_n)^{1/3} \quad \text{se} \quad (Z/Z_n) > (24/116)^3$$
$$f(Z/Z_n) = (841/108)(Z/Z_n) + 16/116 \quad \text{se} \quad (Z/Z_n) \leq (24/116)^3$$

Onde  $X, Y, Z$  e  $X_n, Y_n, Z_n$  representam os valores triestímulos da amostra a ser testada e do branco de referência, respectivamente.

As Figura 1.29 e Figura 1.30 representam a distribuição cromática do espaço CIELAB num espaço tridimensional, obtido a partir das transformações executadas anteriormente.

Associado ao espaço CIELAB existe uma fórmula que permite estimar a diferença entre dois estímulos coloridos aí representados, e define-se por:

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

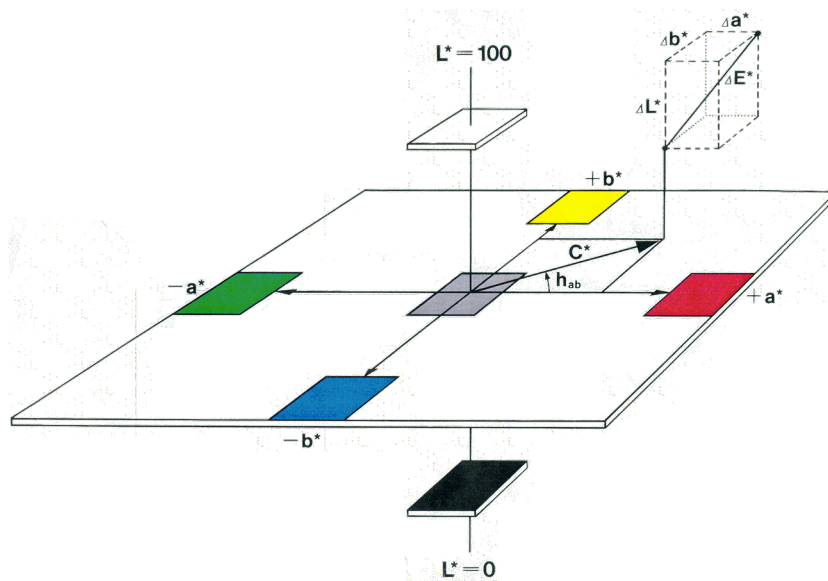


Figura 1.29 Espaço de cor CIELAB, mostrando a diferença de cor  $\Delta E_{ab}^*$ .

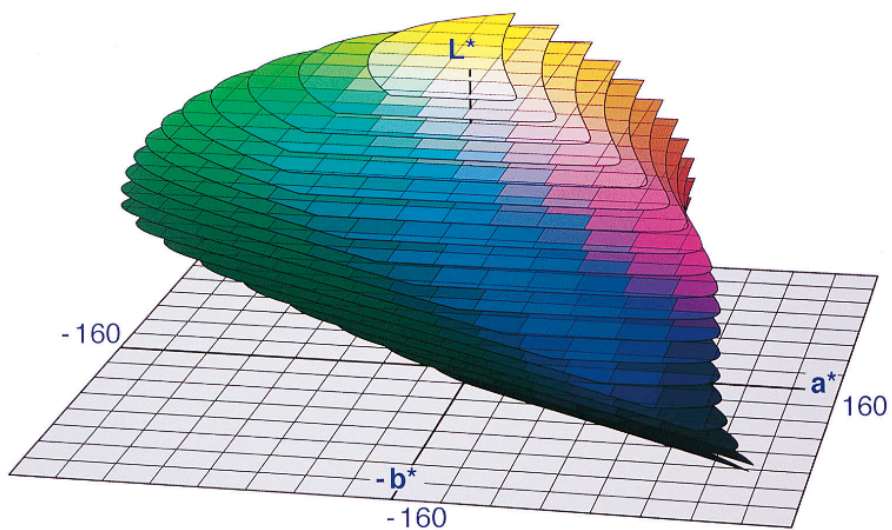


Figura 1.30 Espaço de cor CIELAB considerando o iluminante CIE E (ver Figura 1.39), representando  $L^*$  com  $\Delta L^*$  de 5 unidades, e cada quadrado desenhado com um lado de 20 unidades em  $a^*$  ou  $b^*$  (adaptado de [40]).

A distância Euclidiana  $\Delta E_{ab}^*$  pode ser utilizada para representar, aproximadamente, a magnitude da percepção da diferença da variação de cor entre duas amostras coloridas, desde que possuam o mesmo tamanho e forma, sejam visualizadas nas mesmas condições de iluminação padrão (por exemplo sobre um fundo cinza ou branco) e sobre um iluminante não muito diferente da média da luz do dia [13]. É comum assumir que 1 unidade de  $\Delta E_{ab}^*$  é o limite mínimo da percepção da diferença [40,41].

É também possível transformar o espaço CIELAB de coordenadas cartesianas para coordenadas polares, conseguindo desta forma uma melhor percepção da saturação ( $C_{ab}^*$ ) e da tonalidade ( $h_{ab}$ ) associados a um determinado estímulo colorido, por:

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

$$h_{ab} = \arctan(b^*/a^*)$$

Para compensar as não uniformidades associadas ao espaço CIELAB e conseqüentemente à respectiva fórmula de diferença de cor, a CIE apresentou uma nova fórmula de diferença de cor, ainda baseada no espaço CIELAB, mas com manifestas melhorias no que diz respeito a uma melhor relação entre a métrica utilizada e a variação de cor percebida [39], podendo ser estimada, assumindo duas cores representadas em CIELAB por  $L_1^*, a_1^*, b_1^*$  e  $L_2^*, a_2^*, b_2^*$ , por [13,42]:

$$C_{i,ab}^* = \sqrt{(a_i^*)^2 + (b_i^*)^2}, i = 1,2$$

$$\bar{C}_{ab}^* = \frac{C_{1,ab}^* + C_{2,ab}^*}{2}$$

$$G = 0.5 \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^{*7}}{\bar{C}_{ab}^{*7} + 25^7}} \right)$$

$$a_i' = (1 + G)a_i^*, i = 1,2$$

$$C_i' = \sqrt{(a_i')^2 + (b_i^*)^2}, i = 1,2$$

$$h_i' = \begin{cases} 0 & b_i^* = a_i' = 0 \\ \tan^{-1}(b_i^*/a_i') & \text{outros casos} \end{cases}, i = 1,2$$

$$\Delta L' = L_2^* - L_1^*$$

$$\Delta C' = C_2' - C_1'$$

$$\Delta h' = \begin{cases} 0 & C_1' C_2' = 0 \\ h_2' - h_1' & C_1' C_2' \neq 0; |h_2' - h_1'| \leq 180^\circ \\ (h_2' - h_1') - 360 & C_1' C_2' \neq 0; (h_2' - h_1') > 180^\circ \\ (h_2' - h_1') + 360 & C_1' C_2' \neq 0; (h_2' - h_1') < -180^\circ \end{cases}$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right)$$

$$\bar{L}' = (L_1^* + L_2^*)/2$$

$$\bar{C}' = (C_1' + C_2')/2$$

$$\bar{h}' = \begin{cases} \frac{h_1' + h_2'}{2} & |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ; C_1' C_2' \neq 0 \\ \frac{h_1' + h_2' + 360^\circ}{2} & |h_1' - h_2'| > 180^\circ; (h_1' + h_2') < 360^\circ; C_1' C_2' \neq 0 \\ \frac{h_1' + h_2' - 360^\circ}{2} & |h_1' - h_2'| > 180^\circ; (h_1' + h_2') \geq 360^\circ; C_1' C_2' \neq 0 \\ h_1' + h_2' & C_1' C_2' = 0 \end{cases}$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{h}') \\ + 0.32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ)$$

$$\Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left[\frac{\bar{h}' - 275^\circ}{25}\right]^2\right\}$$

$$R_c = 2 \sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}}$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}}$$

$$S_C = 1 + 0.045\bar{C}'$$

$$S_H = 1 + 0.015\bar{C}'T$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_c$$

Em que a diferença de cor é estimada por:

$$\Delta E_{00} = \left[ \left( \frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)^2 + R_T \left( \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right) \left( \frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right) \right]^{1/2}$$

Onde  $\Delta L'$ ,  $\Delta C'$  e  $\Delta H'$  são as diferenças em CIELAB da luminosidade, saturação e tonalidade, respectivamente, estimadas entre a amostra em análise e a amostra padrão. O  $S_L$ ,  $S_C$  e  $S_H$  são funções de ajuste para a luminosidade, saturação e tonalidade, respectivamente. Os factores  $k_L$ ,  $k_C$  e  $k_H$  são factores paramétricos ajustáveis de acordo com os diferentes parâmetros de visualização,

tais como a textura, separação, fundo, entre outros, para a luminosidade, saturação e tonalidade, respectivamente [39].

Apesar dos melhores resultados obtidos com a fórmula de diferença de cor CIEDE2000, esta não possui um espaço de cor próprio, dependendo do espaço de cor CIELAB para se representar graficamente.

### 1.2.1.6 O espaço DIN99

O espaço de cor DIN99, adoptado como o standard Alemão, baseia-se no espaço CIELAB. Realizando as necessárias transformações é mais uniforme que o próprio CIELAB, possui uma fórmula de diferença de cor Euclidiana com uma performance semelhante à fórmula de diferença de cor CIEDE2000, mas bastante mais simplificada [43] (Tabela VI). O espaço DIN99 pode ser obtido, na sua versão mais recente o DIN99d [44], por:

$$\begin{aligned}
 X' &= 1.12X - 0.12Z \\
 L_{99d} &= 325.22 \ln(1 + 0.0036L^*) \\
 e &= a^* \cos(50^\circ) + b^* \sin(50^\circ) \\
 f &= 1.14[-a^* \sin(50^\circ) + b^* \cos(50^\circ)] \\
 G &= \sqrt{e^2 + f^2} \\
 C_{99d} &= 22.5 \cdot \ln(1 + 0.06G) \\
 h_{99d} &= \arctan\left(\frac{f}{e}\right) + 50^\circ \\
 a_{99d} &= C_{99d} \cos(h_{99d}) \\
 b_{99d} &= C_{99d} \sin(h_{99d})
 \end{aligned}$$

Dada a sua simplicidade de cálculo e fórmula de diferença de cor de elevada performance associada, este espaço apresenta elevadas potencialidades. A Figura 1.31 mostra a alteração do sólido de cor-objecto, ou limites de Rösch-MacAdam (ver secção 1.3.1.2), do espaço CIELAB para o espaço DIN99d.

Existem, ainda em desenvolvimento, alguns espaços de cor que procuram adequar-se a várias condições de iluminação e de visualização, numa tentativa de conseguir estimar a percepção que um determinado observador tem de um determinado objecto colorido. Espaços como o CIECAM02

[43,45,46] ou o iCAM [47,48] não só melhoram a estimativa da percepção cromática, mas também permitem a utilização de ambientes complexos e não só de objectos simples com o mesmo tamanho e forma. São, no entanto, extremamente complexos e de difícil utilização.

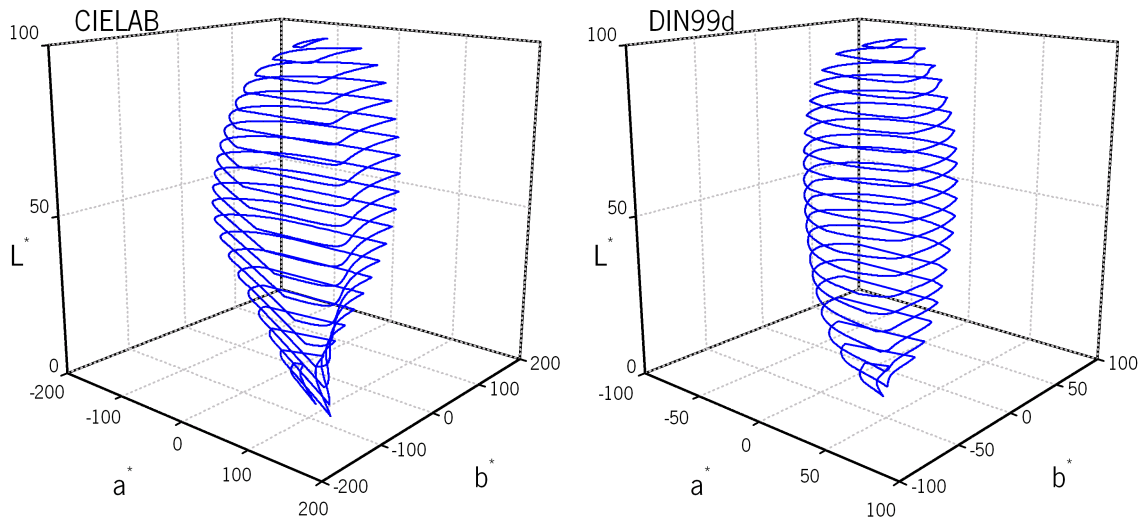


Figura 1.31 Sólido de cor representando os limites de Rösch-MacAdam, contendo todas as cores possíveis de gerar por reflexão ou transmissão (ver secção 1.3.1.2), representadas em CIELAB (à esquerda) e em DIN99d (à direita) assumindo o observador padrão CIE 1931 e o iluminante CIE C. Cada linha representa um nível de  $L^*$ , de 5 em 5 unidades. Uma particular chamada de atenção para o facto de a escala associada ao volume CIELAB no eixo  $a^*$  e  $b^*$  ser o dobro da escala associada ao volume DIN99d. No eixo do  $L^*$  a escala é a mesma.

### 1.2.1.7 O espaço de MacLeod and Boynton

Apesar de o diagrama cromático CIE 1931 permitir a representação de uma cor recorrendo às funções de reprodução da cor, não representa a excitação que um determinado estímulo provoca em cada um dos cones. MacLeod and Boynton apresentaram em 1979 [49] um espaço de representação da cromática onde as coordenadas representam a excitação dos cones (num plano de luminância constante).

No eixo vertical é representada a excitação do cone  $s$  e no eixo horizontal é representada a excitação do cone  $l$  normalizados para o valor da soma entre a excitação dos cones  $l$  e  $m$ , assumindo que os cones  $s$  não contribuem para a luminância. A Figura 1.32 representa a localização das cores monocromáticas e as linhas de confusão de observadores dicromatas, representadas neste espaço.

É possível, a partir dos valores triestímulos calculados considerando as funções de reprodução da cor modificadas por Judd [12] (ver secção 1.2), e não as do observador padrão CIE 1931, obter a excitação dos cones a partir de [36], assumindo os fundamentais de Smith e Pokorny [50]:

$$\begin{bmatrix} \bar{l}(\lambda) \\ \bar{m}(\lambda) \\ \bar{s}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.15516 & 0.54307 & -0.03287 \\ -0.15516 & 0.45692 & 0.03287 \\ 0.0 & 0.0 & 0.01608 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_J(\lambda) \\ \bar{y}_J(\lambda) \\ \bar{z}_J(\lambda) \end{bmatrix}$$

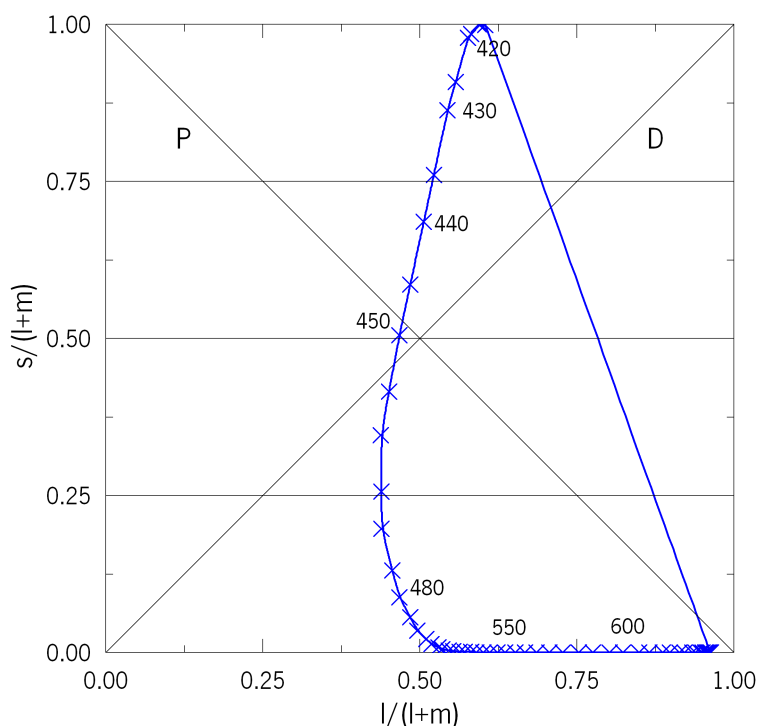


Figura 1.32 Espaço de MacLeod e Boynton de representação cromática da excitação de cones (adaptado de [36]). A recta D representa a linha de confusão do deuteranope e a recta P representa a linha de confusão do protanope. As linhas de confusão do tritanope são linhas representadas paralelas ao eixo  $l/(l+m)$ . A linha azul representa a localização das cores monocromáticas.

### 1.2.2 A representação da cor em observadores deficientes da visão das cores

Recorrendo a modelos de visão das cores de observadores dicromatas e anómalos, é possível simular para um observador normal a percepção de uma cor por um dicromata ou por um anómalo.

No caso de observadores dicromatas [51], se considerarmos a distribuição espectral do iluminante E (ver Figura 1.39) e as suas coordenadas expressas em excitação de cones obtidas a partir das funções de reprodução da cor de Judd forem  $(L_E, M_E, S_E)$  (ver secção 1.2.1.7), assim como as coordenadas  $(L_\lambda, M_\lambda, S_\lambda)$  da radiação monocromática  $\lambda$ , em que  $\lambda$  poderá ser 475 nm, 485 nm, 575 nm ou 660 nm, as coordenadas da cor  $(L_Q; M_Q; S_Q)$  simulada para um dicromata e representada por  $(L_{Q'}; M_{Q'}; S_{Q'})$  serão,:

Para um protanope:

$$L_{Q'} = -(bM_Q + cS_Q)/a$$

$$M_{Q'} = M_Q \text{ e } S_{Q'} = S_Q$$

*Se  $S_Q/M_Q < S_E/M_E$  então  $\lambda = 575 \text{ nm}$ ; senão  $\lambda = 475 \text{ nm}$*

Para um deuteranope:

$$M_{Q'} = -(aL_Q + cS_Q)/b$$

$$L_{Q'} = L_Q \text{ e } S_{Q'} = S_Q$$

*Se  $S_Q/L_Q < S_E/L_E$  então  $\lambda = 575 \text{ nm}$ ; senão  $\lambda = 475 \text{ nm}$*

Para um tritanope:

$$S_{Q'} = -(aL_Q + bM_Q)/c$$

$$L_{Q'} = L_Q \text{ e } M_{Q'} = M_Q$$

*Se  $M_Q/L_Q < M_E/L_E$  então  $\lambda = 660 \text{ nm}$ ; senão  $\lambda = 485 \text{ nm}$*

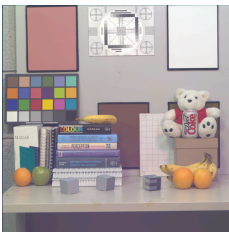
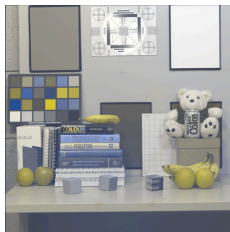
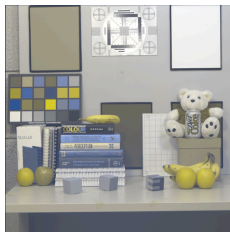
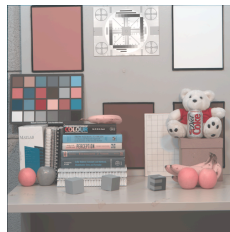
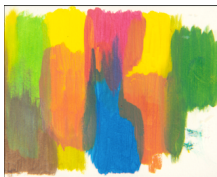



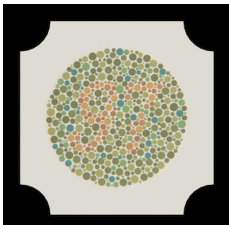
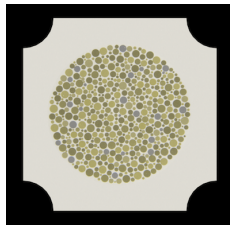
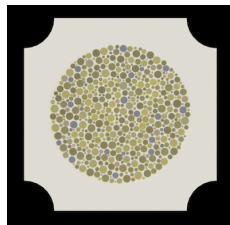
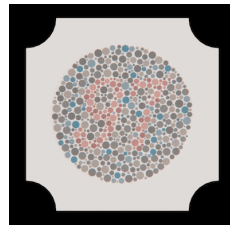
Em que:

$$a = M_E S_\lambda - S_E M_\lambda, \quad b = S_E L_\lambda - L_E S_\lambda \text{ e } c = L_E M_\lambda - M_E L_\lambda$$

Este algoritmo parte do pressuposto de que existem tonalidades que tem a mesma aparência visual para dicromatas e observadores tricromatas normais, em particular tonalidades cinzentas e algumas luzes monocromáticas específicas [52], baseando-se na percepção e comparação da cor de observadores com deficiência unilateral da visão das cores no caso dos deuteranopes e protanopes e em um caso de tritanopia unilateral adquirida no caso dos tritanopes. Estes pressupostos permitem definir uma superfície reduzida no espaço de cones (ver secção 1.2.1.7) onde é possível projectar o estímulo  $(L_Q; M_Q; S_Q)$  de forma a obter os estímulos  $(L_{Q'}; M_{Q'}; S_{Q'})$ , ou seja, a simulação para um observador tricromata normal da percepção da cor de um observador dicromata.



Tabela 1.3 Percepção da cor de observadores dicromatas, simuladas para observadores normais, utilizando o algoritmo de Brettel [51].

Observador			
Normal	Protanope	Deuteranope	Tritanope
			
			
			

A Figura 1.33 representa as superfícies reduzidas no espaço de cones que permite tal simulação. Os eixos L, M e S representam a excitação dos três tipos de cones. Neste caso particular os estímulos encontram-se circunscritos ao gamut das cores que é possível representar com o monitor utilizado na experiência descrita por Brettel *et al.*. W representa o estímulo branco que é possível representar com os canais RGB do monitor no máximo. O E representa o estímulo equi-iluminante mais brilhante que é possível representar no monitor. A linha *OE* representa o estímulo neutro para observadores normais e dicromatas. A figura (a) representa nas abas de *OE* em direcção a 475 nm e 575 nm as superfícies reduzidas de sinal de cones associadas à simulação da visão das cores de deuteranopes e protanopes. A figura (b) representa nas abas de *OE* em direcção a 485 nm e 660 nm as superfícies reduzidas de sinal de cones associadas à simulação da visão das cores de tritanopes. O algoritmo de simulação consiste em substituir o componente desconhecido pelo valor correspondente na superfície reduzida de estímulos. Para uma dada cor *Q*, é representada a

substituição para um protanope por  $Q'_p$ , para um deuteranope por  $Q'_d$  e para um tritanope por  $Q'_t$  (adaptado de [51]).

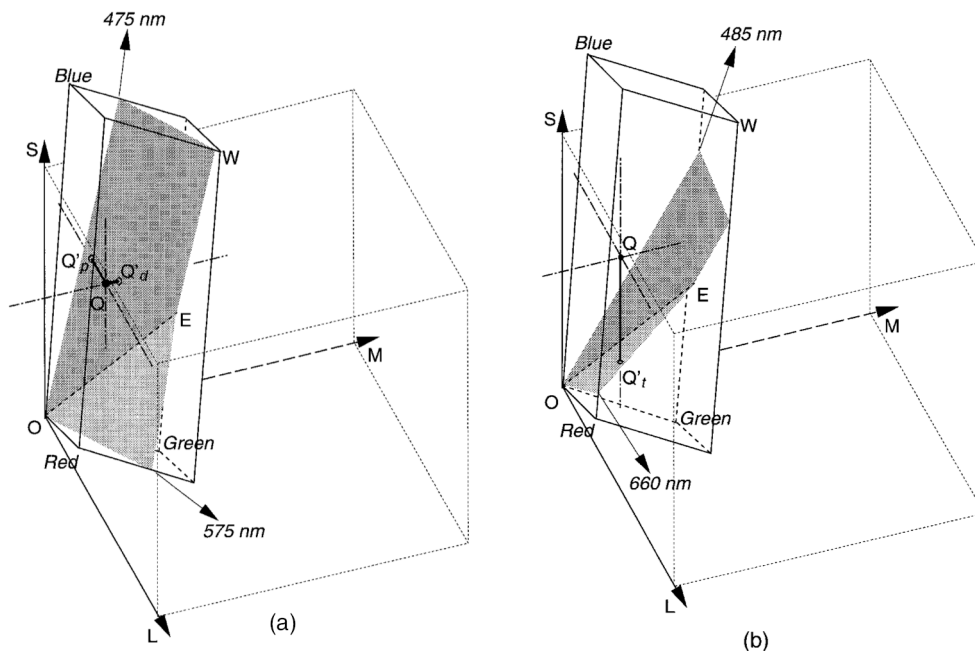


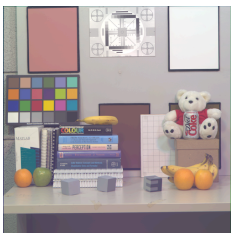
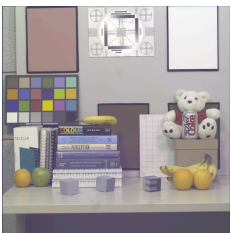
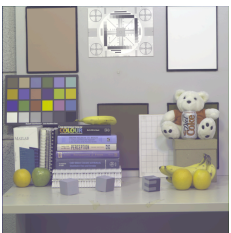


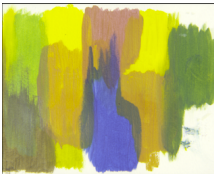
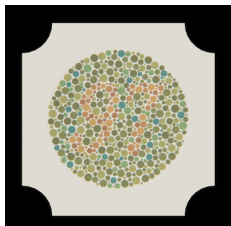
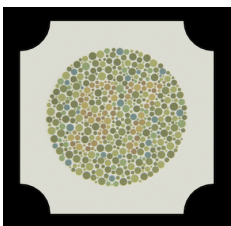
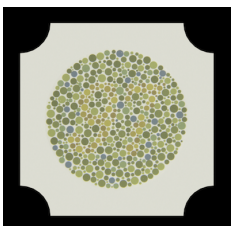
Figura 1.33 Representação geométrica do algoritmo que permite a simulação da visão das cores dicromática. Os eixos L, M e S representam a excitação dos três tipos de cones. Neste caso particular os estímulos encontram-se circunscritos ao gamut das cores que é possível representar com o monitor utilizado na experiência descrita por Brettel *et al.*. W representa o estímulo branco que é possível representar com os canais RGB do monitor no máximo. O E representa o estímulo equi-iluminante mais brilhante que é possível representar no monitor. A linha OE representa o estímulo neutro para observadores normais e dicromatas. A figura (a) representa nas abas de OE em direcção a 475 nm e 575 nm as superfícies reduzidas de sinal de cones associadas à simulação da visão das cores de deuteranopes e protanopes. A figura (b) representa nas abas de OE em direcção a 485 nm e 660 nm as superfícies reduzidas de sinal de cones associadas à simulação da visão das cores de tritanopes. O algoritmo de simulação consiste em substituir o componente desconhecido pelo valor correspondente na superfície reduzida de estímulos. Para uma dada cor Q, é representada a substituição para um protanope por  $Q'_p$ , para um deuteranope por  $Q'_d$  e para um tritanope por  $Q'_t$  (adaptado de [51]).

A Tabela 1.3 representa a percepção da cor de observadores dicromatas, simuladas para observadores normais, utilizando o algoritmo de Brettel [51].

No caso de observadores anómalos, assume-se que, para um protoanómalo a sensibilidade desconhecida do cone sensível no vermelho (L) é obtida deslocando 10 nm o espectro de

sensibilidade do cone sensível do verde (M) no sentido dos comprimentos de onda maiores, obtendo-se assim o cone anômalo sensível no vermelho (L'). Para um deuteroanômalo a sensibilidade desconhecida do cone M é obtida deslocando 6 nm o espectro de sensibilidade do cone L no sentido dos comprimentos de onda menores, obtendo-se assim o cone anômalo sensível no verde (M') (ver Figura 1.11). Este modelo [18], baseia-se no pressuposto de que os observadores anômalos podem ser caracterizados por foto-pigmentos médios, que observadores normais e tricromatas anômalos possuem meios oculares e densidades ópticas de foto-pigmentos dos cones similares e que o espectro do foto-pigmento não altera a sua forma quando representado em função da frequência e não do comprimento de onda [19]. A Tabela 1.4 apresenta a percepção das cores de observadores anômalos, simuladas para observadores normais, assumindo a sensibilidade espectral dos protoanômalos (L') e dos deuteroanômalos (M').

Tabela 1.4 Percepção da cor de observadores anômalos, simuladas para observadores normais, assumindo a sensibilidade espectral dos cones anômalos L' e M' representados na Figura 1.11.

Observador		
Normal	Protoanômalo	Deuteroanômalo
		
		
		

### 1.3 O espaço de cor, as cores monocromáticas, as cores óptimas e as cores dos objectos naturais

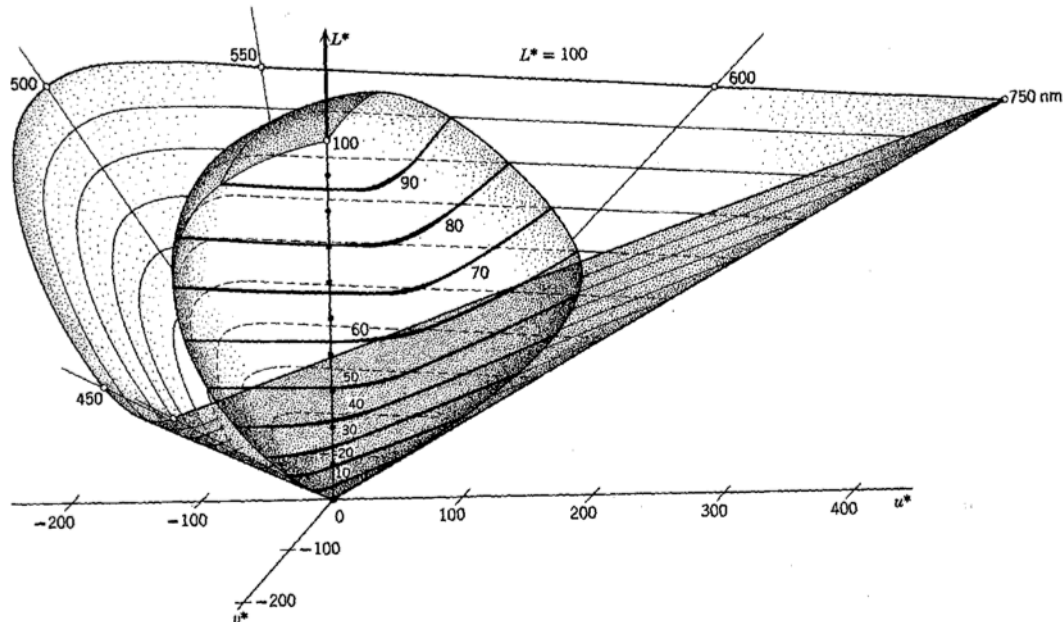


Figura 1.34 Espaço de cor CIELAB assumindo o iluminante D65 e o observador padrão CIE 1964. O volume interior representa o volume das cores ótimas, onde estão contidas todas as cores dos objectos obtidas apenas por reflexão ou transmissão. O volume exterior, aberto, é formado pelas cores monocromáticas (adaptado de [12]).

#### 1.3.1 O espaço de cor

Um espaço de cor permite representar todas as cores possíveis que existem, sejam elas oriundas de fontes de luz monocromáticas, provenientes de reflexão, transmissão, difracção, interferência, iridiscência, dispersão de Rayleigh ou Mie ou fluorescência, entre outros, como, por exemplo, o espaço de cor CIELAB representado na Figura 1.34.

##### 1.3.1.1 As cores monocromáticas

As cores monocromáticas (com uma distribuição espectral de energia em apenas um comprimento de onda, representada na Figura 1.35 a laranja) definem os limites do espaço de cor. A Figura 1.34 representa este volume, exterior e aberto, representado no espaço CIELAB assumindo o iluminante D65 e o observador padrão CIE 1964.

### 1.3.1.2 As cores óptimas

O volume que se encontra no interior do volume delimitado pelas cores monocromáticas (volume encerrado visível na Figura 1.34) é bastante específico e resulta da combinação de todas as cores possíveis que resultem apenas do processo de reflexão e transmissão. Este volume tem o nome de sólido de cor-objecto e é limitado pelas cores óptimas.

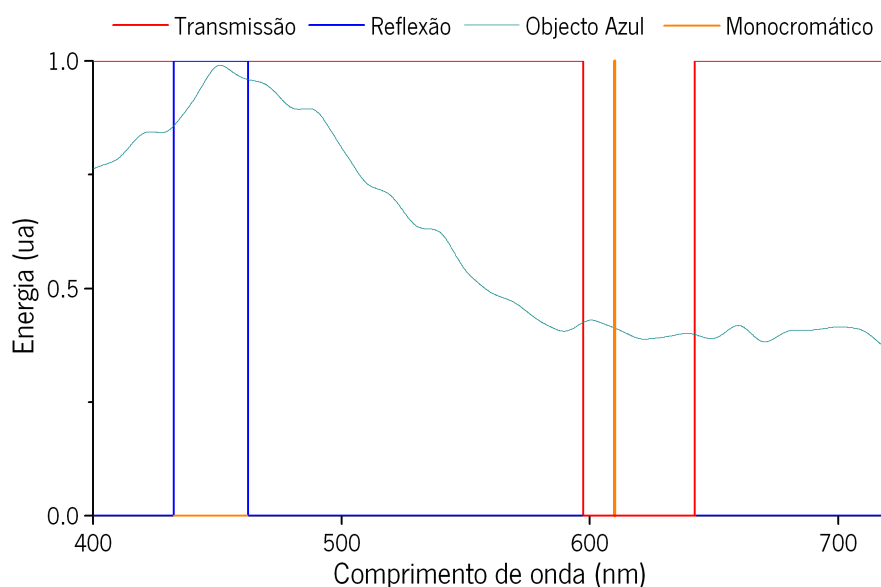


Figura 1.35 Exemplos de espectros de distribuição de energia (em unidades arbitrárias) para reflexão e transmissão de cores óptimas (linha azul e linha vermelha), cor monocromática (linha laranja) e de reflexão de um objecto de madeira (linha verde).

A teoria subjacente às cores óptimas foi desenvolvida no início do século XX [53-56] e mais tarde adaptada ao diagrama cromático I.C.I. 1931 [57,58] tomando o formato presentemente reconhecido como os limites de MacAdam ou os limites de Rösch-MacAdam.

É assumido que o sólido de cor-objecto resulta de todas as combinações possíveis dos espectros de reflectância e transmitância que possuam energia entre os 380 e os 780 nm, podendo apenas possuir o valor de 0 ou 1 ao longo da sua gama espectral. As funções quadradas representadas na Figura 1.35 pelas linhas azul e vermelha representam exemplos de espectros de reflexão e transmissão óptimos, respectivamente.

### **1.3.1.3 As cores dos objectos naturais**

Em geral as cores monocromáticas não ocorrem na natureza. A linha a verde representada na Figura 1.35 é apenas o exemplo de um espectro de reflectância de um objecto real de cor azul. Estes espectros apresentam uma distribuição espectral ao longo de toda a gama espectral, com transições suaves entre comprimentos de onda. É a integração de toda a energia ao longo da gama espectral que define a cor do objecto.

## **1.4 Iluminação**

### **1.4.1 Iluminantes CIE**

A principal fonte luminosa para o olho humano é o Sol. A Figura 1.36 representa a estimativa da distribuição espectral da energia radiante do Sol, medida após a sua passagem pela atmosfera terrestre, para 10 fases da luz do dia, desde os 5000 K (cor mais avermelhada) até aos 20000 K (cor mais azulada), normalizada para um valor de 100 a 560 nm.

Esta variação ao longo do dia faz com que a comparação de cores em diferentes períodos do dia, dependendo-se apenas da luz solar, seja dificultada [59]. A esta variação agrava-se o facto de que ao longo do Globo Terrestre as variações da distribuição espectral serem também significativas [60], dependendo da longitude, da latitude e das condições atmosféricas, tornando a análise e a comparação cromática difícil em diferentes zonas da Terra, horas do dia ou alturas do ano. O mesmo problema ocorre sempre que se utilizam duas fontes de luz diferentes para realizar comparações de cor, como por exemplo, à luz do dia e dentro de casa com luz artificial.

Em termos práticos, a utilização de fontes de luz na indústria, por exemplo, implica a descrição o mais completa possível da fonte de luz para que possam ser reproduzidas, posteriormente, as condições de visualização. Uma das formas de caracterizar uma fonte de luz é através da sua temperatura de cor. Um corpo negro, quando aquecido a uma determinada temperatura, emite um determinado espectro de radiação contínua, que pode ser medido e transformado em valores tristímulos representativos de uma determinada cor.

Um iluminante que possua uma distribuição espectral de energia igual à distribuição espectral de energia emitida por um corpo negro aquecido a uma determinada temperatura pode ser classificado

por essa mesma temperatura, ou seja, passa a ter uma temperatura de cor (TC), sendo a referência a temperatura do corpo negro. A Figura 1.37 representa a distribuição espectral de energia de um corpo negro a várias temperaturas, em função do comprimento de onda, normalizada para a unidade a 560 nm.

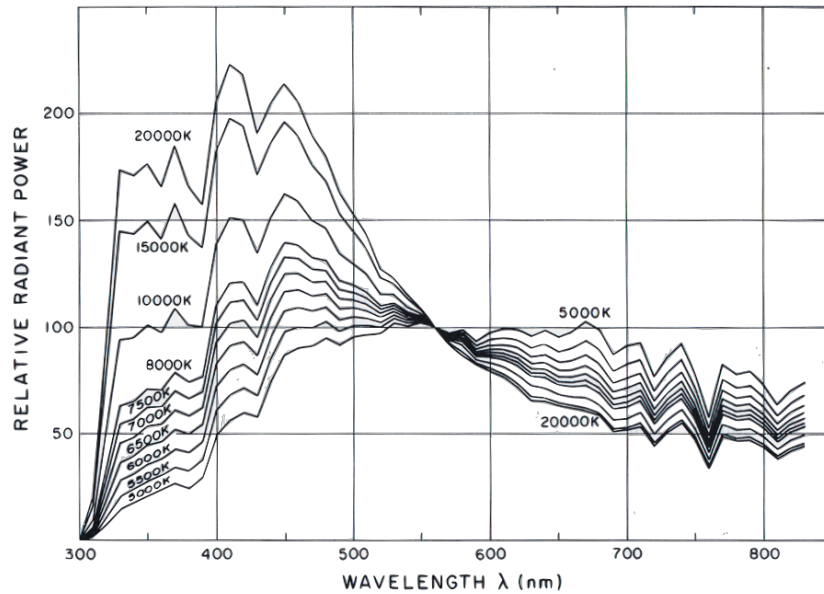


Figura 1.36 Estimativa da distribuição espectral da potência radiante do Sol, para 10 fases da luz do dia, dos 5000 K (avermelhado) aos 20000 K (azulado), normalizado para um valor de 100 a 560 nm (adaptado de [12]).

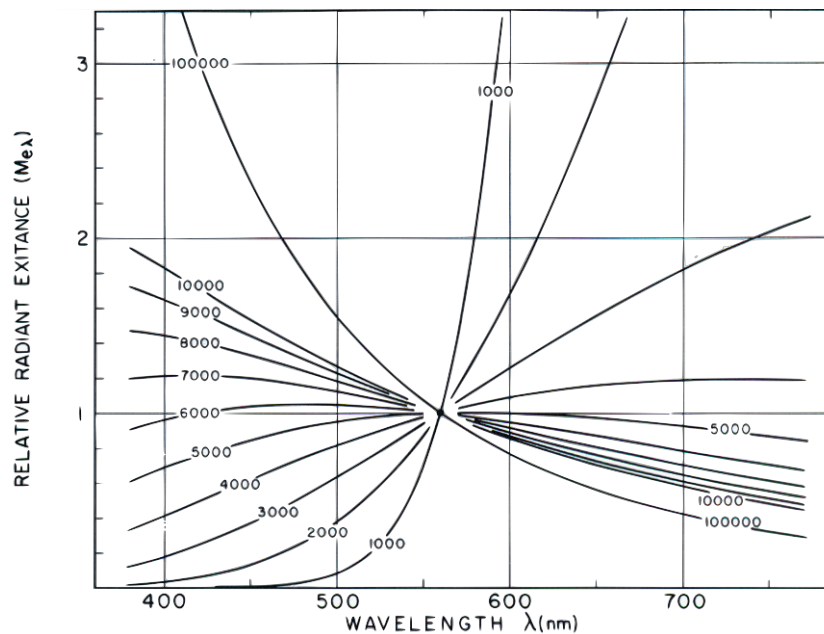


Figura 1.37 Distribuição espectral de energia de um corpo negro, em função do comprimento de onda, normalizada para que seja 1 a 560 nm. As diferentes linhas representam diferentes temperaturas do corpo negro, sendo que quanto mais quente o corpo negro é, mais azulada será a sua cor (adaptado de [12]).

Se a distribuição espectral do iluminante não for igual à do corpo negro, é possível relacionar os valores triestímulos da curva espectral de um corpo negro que mais se aproxima dos valores triestímulos do iluminante. Desta forma pode-se correlacionar a cor do iluminante com a cor da temperatura do corpo negro, uma vez que as duas curvas espectrais não são iguais, denominando-se de temperatura de cor correlacionada (CTT – do Inglês “Correlated Colour Temperature”), sendo que neste caso a referência continua a ser a temperatura do corpo negro.

Na Figura 1.38 a linha D representa a localização das coordenadas cromáticas dos iluminantes da luz do dia representados na Figura 1.36. A linha P representa as coordenadas cromáticas da cor da radiação emitida pelo corpo negro a diferentes temperaturas representadas na Figura 1.37. Para uma determinada coordenada D as coordenadas mais próximas da linha P definem a temperatura de cor correlacionada para o referido iluminante. Todas as coordenadas cromáticas que estão na mesma linha recta possuem a mesma temperatura de cor, neste caso particular, as temperaturas de cor indicadas no topo de cada recta. A Figura 1.40 representa as coordenadas cromáticas do iluminante da luz dia em várias fases em comparação com as cores monocromáticas.

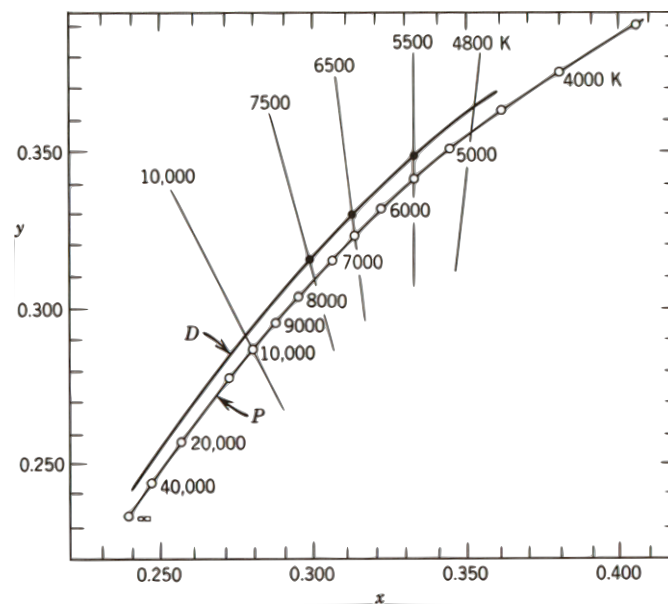


Figura 1.38 A linha D representa a localização das coordenadas cromáticas dos iluminantes da luz do dia representados na Figura 1.36. A linha P representa as coordenadas cromáticas da cor da radiação emitida pelo corpo negro a diferentes temperaturas representadas na Figura 1.37. Para uma determinada coordenada D as coordenadas mais próximas da linha P definem a temperatura de cor correlacionada. Todas as coordenadas cromáticas que estão na mesma linha recta possuem a mesma temperatura de cor, indicada no seu topo (adaptado de [12]).



Utilizando a TC e a CCT é possível caracterizar um iluminante, incorrendo-se, no entanto, em erros sempre que a distância entre a coordenada cromática do iluminante seja substancialmente diferente da coordenada cromática do corpo negro.

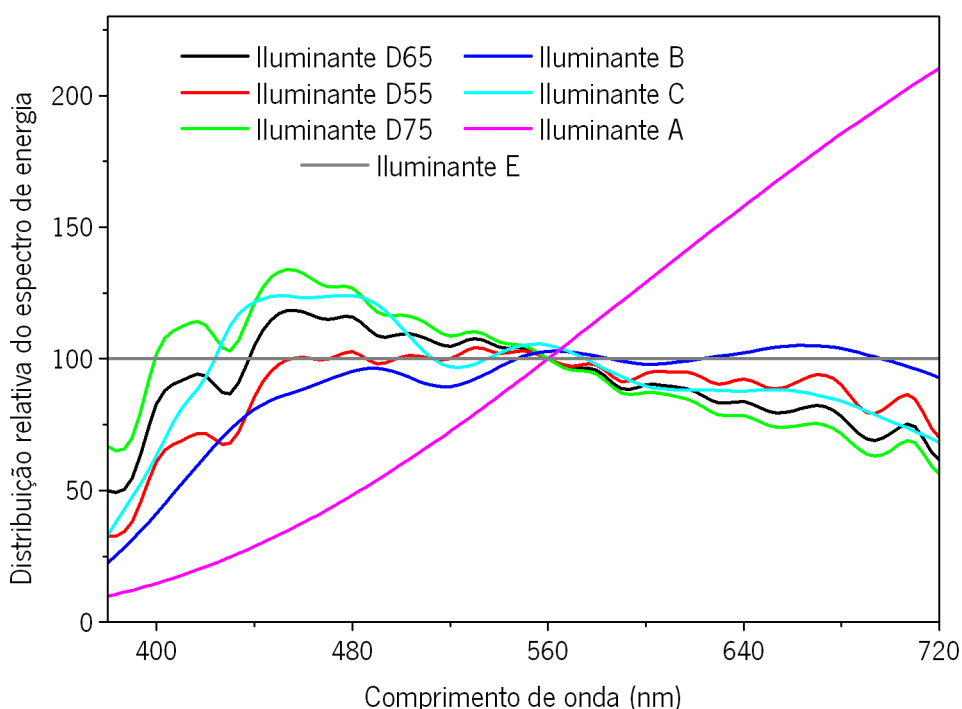


Figura 1.39 Distribuição relativa do espectro da energia radiante dos iluminantes D com CCT de 6500, 5500 e 7500, o iluminante A, B, C e E (adaptado de [13]).

Numa tentativa de uniformizar as fontes de luz e iluminantes utilizados, a CIE sugeriu em 1931 um conjunto de três iluminantes para serem utilizados em comparações e análises de cor. Desta forma um iluminante não é apenas descrito pela sua TC ou CCT, mas também pela sua distribuição espectral. A Figura 1.39 representa os iluminantes A, B e C, com CCT de 2856 K, 4874 K e 6774 K, respectivamente, que simulam a temperatura do corpo negro a 2856 K, a luz directa do Sol e a média da luz do dia [13]. A melhor aproximação ao iluminante A é uma lâmpada de tungsténio a funcionar a 2856 K, chamada de fonte A, sendo que as fontes B e C podem ser obtidas a partir da fonte A utilizando filtros líquidos de espessura e composição diferentes [13].

Devido à ineficácia em reproduzir as condições da luz do dia, à fraca performance na região ultravioleta do espectro (importante para a análise de amostras fluorescentes) os iluminantes B e C não são, na generalidade, utilizados. Em 1964 a CIE introduziu o iluminante D65 que melhor

descreve a média da luz do sol durante o dia, referindo-o como iluminante de referência para todos os cálculos colorimétricos [13] (ver Figura 1.39).

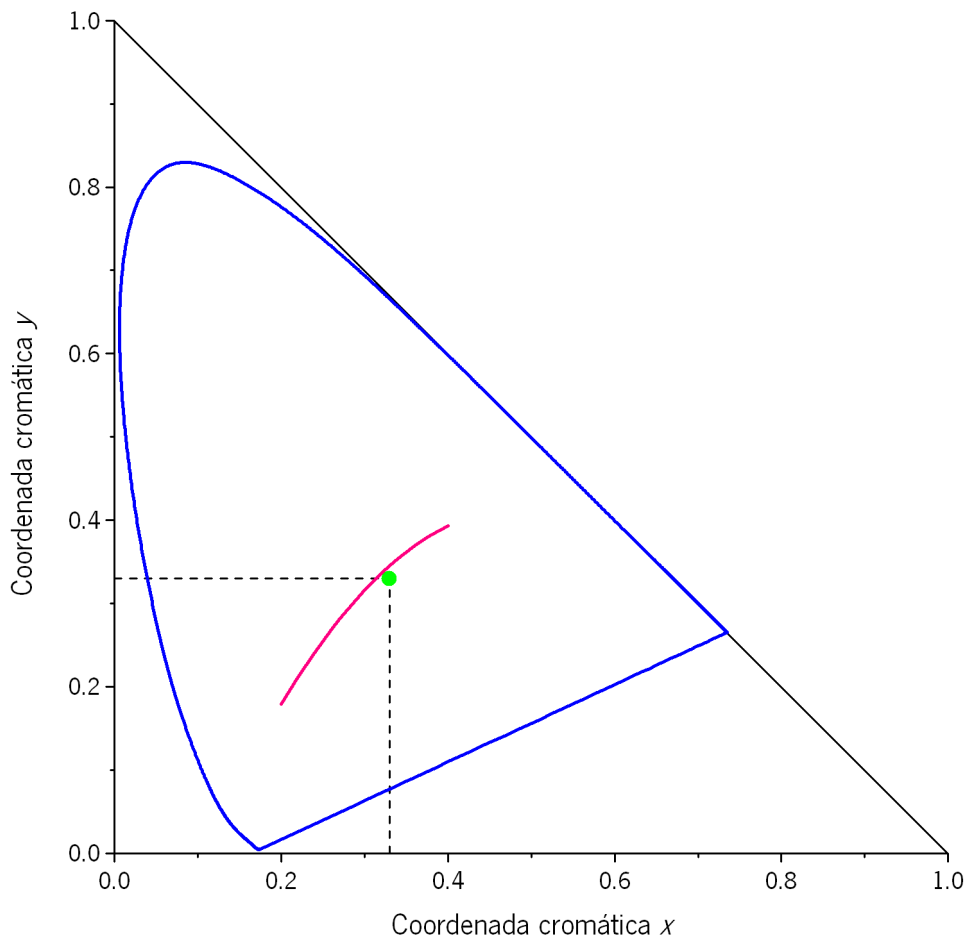


Figura 1.40 Localização das coordenadas cromáticas dos iluminantes D no diagrama cromático CIE 1931 (linha a rosa). O ponto verde representa a localização no diagrama cromático do iluminante de équo-energia (adaptado de [13]).

Sendo apenas um iluminante teórico, mas de utilização computacional bastante importante, o iluminante E é também bastante utilizado. Trata-se de um iluminante que possui a mesma distribuição de energia por todos os comprimentos de onda [12] (ver Figura 1.39).

Para além de iluminantes que procuram simular as diferentes fases da luz do dia, a CIE sugere também uma alargada gama de iluminantes fluorescentes, alguns capazes de simular a cromaticidade da média da luz do dia, e iluminantes de descarga de alta pressão. Os iluminantes fluorescentes são o FL1, FL2, FL3, FL4, FL5, FL6, FL7, FL8, FL9, FL10, FL11\*, FL12, FL3.1,

FL3.2, FL3.3, FL3.4, FL3.5, FL3.6, FL3.7, FL3.8, FL3.9, FL3.10, FL3.11, FL3.12, FL3.13, FL3.14, e o FL3.15 e os iluminantes de descarga de alta pressão são o HP1, HP2, HP3, HP4 e o HP5. O iluminante CIE FL11 é o recomendado pela CIE para primeira escolha, sempre que seja necessário seleccionar uma fonte de luz fluorescente. A Figura 1.41 representa a distribuição espectral relativa de alguns dos iluminantes CIE referidos.

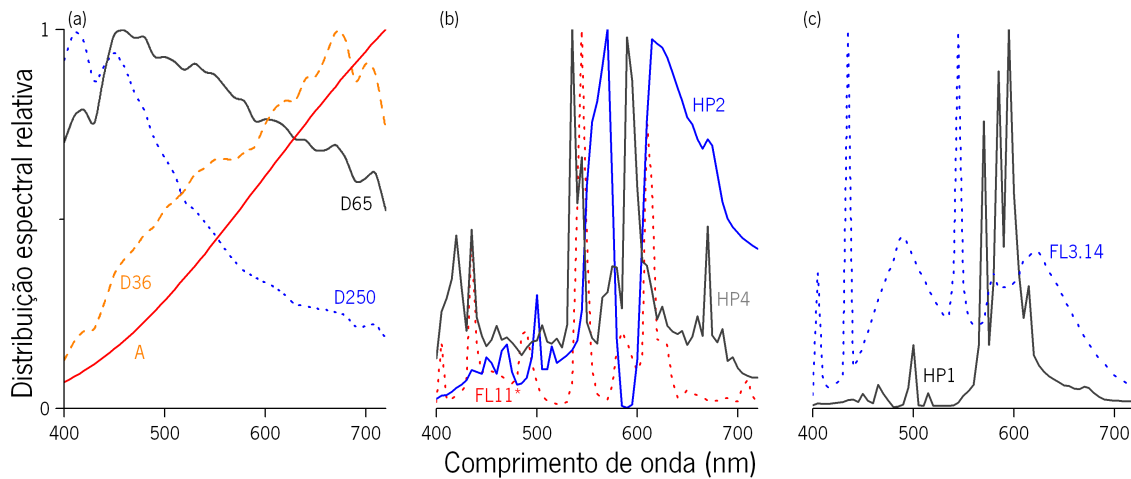


Figura 1.41 Distribuição espectral relativa de alguns dos iluminantes CIE fluorescentes (FL11\* e FL3.14) e de descarga de alta pressão (HP1, HP2 e HP4), em comparação com as fases extremas da luz do dia (D250 e D36), a luz média do dia (D65) e o iluminante A.

## 1.4.2 O Índice de Reprodução da Cor – CRI

Outra forma de caracterizar um iluminante, e avançada pela CIE, avalia a influência de um iluminante na percepção da cor de um conjunto de oito amostras coloridas. O Índice de Reprodução da Cor (CRI – sigla importada da designação Inglesa “*Colour Rendering Index*”)[61] permite comparar a cor de 8 amostras coloridas quando iluminadas por um iluminante de referência com o efeito da alteração da cor provocada pelo iluminante em teste. O CRI será tanto mais elevado quanto menor for a diferença perceptível entre a cor das amostras sob o iluminante de teste e a cor das amostras sob o iluminante de referência, sendo que o valor máximo possível é 100. Assim, o CRI é uma métrica de reprodução de cor por diferentes iluminantes, quando comparados com uma fase da luz do dia (ou com a radiação de um corpo negro).

O CRI pode ser estimado por:

- a) O iluminante de referência deverá ter a mesma cromaticidade, ou praticamente a mesma cromaticidade, que o iluminante de teste. Tal condição é cumprida quando a diferença cromática (DC) entre a cromaticidade dos dois iluminantes for inferior a  $5.4 \cdot 10^{-3}$ . A diferença cromática entre o iluminante de teste  $(u_k, v_k)$  e o iluminante de referência  $(u_r, v_r)$  deve ser estimada no espaço de cor uniforme (UCS do Inglês Uniform Colour Spaces) UCS 1960, por:

$$DC = \sqrt{(u_k - u_r)^2 + (v_k - v_r)^2}$$

- b) Se o iluminante de teste tiver uma CCT inferior a 5000 K, o iluminante de referência deverá ser obtido a partir de um corpo negro (radiador de Planck); se for superior a 5000 K o iluminante de referência deverá ser obtido a partir da distribuição espectral de uma das fases da luz do dia.
- c) Deverão ser utilizadas as amostras coloridas definidas pela CIE e apresentadas na Tabela 1.5 e representadas na Figura 1.42.
- d) Para cada uma das amostras devem ser calculados os valores triestímulos e as coordenadas cromáticas CIE 1931, para o iluminante de teste e para o iluminante de referência.
- e) As coordenadas cromáticas (ou os valores triestímulos) devem ser convertidos para o espaço de cor uniforme UCS 1960, por:

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}$$

$$v = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z}$$

ou por

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}$$

- f) Para ter em consideração a alteração da adaptação cromática devido aos diferentes estados de adaptação cromática que existem quando se utiliza o iluminante de teste  $k$  e posteriormente o iluminante de referência  $r$ , é necessário efectuar a respectiva correcção, por:

$$u'_{k,i} = \frac{10.872 + 0.404 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - 4 \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad (i = 1 \dots 14)$$

$$v'_{k,i} = \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad (i = 1 \dots 14)$$

Em que  $u'_{k,i}$  e  $v'_{k,i}$  são os valores das coordenadas cromáticas da amostra colorida  $i$ , após considerar a alteração da adaptação cromática, e não devem ser confundidas com as coordenadas cromáticas do espaço CIE 1976.

Tabela 1.5 Amostras coloridas utilizadas pela CIE para o cálculo do CRI (adaptado de [58]).

Nº Amostra	Designação de Munsell	Cor percebida sobre a luz do dia
1	7,5 R 6/4	Vermelho claro acinzentado
2	5 Y 6/4	Amarelo escuro acinzentado
3	5 GY 6/8	Amarelo esverdeado forte
4	2,5 G 6/8	Amarelo esverdeado moderado
5	10 BG 6/4	Verde claro azulado
6	5 PB 6/8	Azul claro
7	2,5 P 6/8	Violeta claro
8	10 P 6/8	Púrpura claro avermelhado
9	4,5 R 4/13	Vermelho forte
10	R Y 8/10	Amarelo forte
11	4,5 G 5/8	Verde forte
12	3 PB 3/11	Azul forte
13	5 YR 8/4	Rosa claro amarelado (pele humana)
14	5 GY 4/4	Verde oliva moderado (verde de folha)

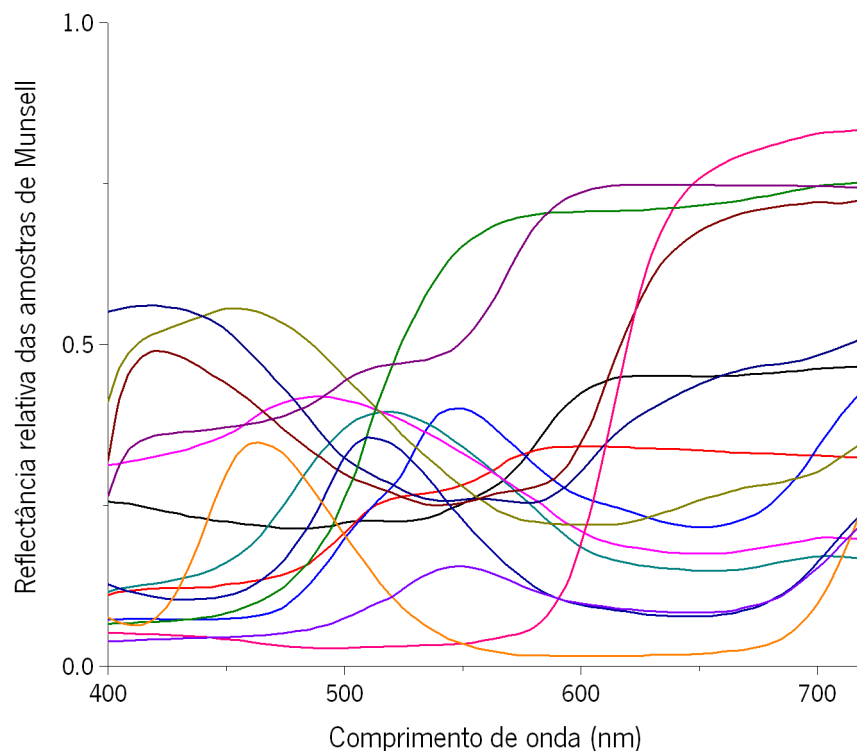


Figura 1.42 Distribuição espectral relativa das amostras coloridas utilizadas pela CIE para o cálculo do CRI (adaptado de [61])

As funções  $c$  e  $d$  devem ser calculadas para o iluminante de teste  $(u_k, v_k)$ , retornando  $(c_k, d_k)$  e para o iluminante de referência  $(u_r, v_r)$ , retornando  $(c_r, d_r)$ , por:

$$c = \frac{1}{v}(4 - u - 10v)$$

$$d = \frac{1}{v}(1.708v + 0.404 - 1.481u)$$

g) Os dados obtidos no ponto anterior devem agora ser convertidos para o espaço cromático USC 1964, por:

$$W_{r,i}^* = 25(Y_{r,i})^{1/3} - 17; \quad W_{k,i}^* = 25(Y_{k,i})^{1/3} - 17;$$

$$U_{r,i}^* = 13W_{r,i}^*(u_{r,i} - u_r); \quad U_{k,i}^* = 13W_{k,i}^*(u'_{k,i} - u'_k);$$

$$V_{r,i}^* = 13W_{r,i}^*(v_{r,i} - v_r); \quad V_{k,i}^* = 13W_{k,i}^*(v'_{k,i} - v'_k);$$

Os valores  $u'_k = u_r$  e  $v'_k = v_r$  são os valores das coordenadas cromáticas do iluminante de teste após ser considerada a alteração na adaptação cromática. Os valores  $Y_{r,i}$  e  $Y_{k,i}$  devem ser normalizados para que  $Y_r = Y_k = 100$ .

h) Para calcular a diferença de cor percebida entre o iluminante de teste e o iluminante de referência, para cada uma das amostras, deve ser usada a fórmula de diferença de cor do espaço de cor UCS 1964:

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2}$$

$$= \sqrt{(\Delta U_i^*)^2 + (\Delta V_i^*)^2 + (\Delta W_i^*)^2}$$

i) O CRI pode ser calculado para cada amostra individualmente -  $R_i$  - (“*Special Colour Rendering Index*”) ou para o total das 8 primeiras amostras -  $R_a$  - (“*General Colour Rendering Index*”) representadas na Tabela 1.5, por:

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i$$

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$$

A Tabela 1.6 apresenta alguns resultados do CRI  $R_a$  para alguns dos iluminantes recomendados pela CIE [13].

Tabela 1.6 Valores típicos do CRI  $R_a$  para alguns dos iluminantes recomendados pela CIE [13].

Iluminante CIE	CCT (K)	$R_a$
A	2856	100
D50	≈ 5000	100
D65	≈ 6500	100
D75	≈ 7500	100
FL2*	4230	64
FL7*	6500	90
FL11*	4000	83
HP1	1959	8
HP4	4002	74

### 1.4.3 Alternativas ao CRI

Apesar do enorme sucesso do CRI, em particular na aplicação pela indústria à caracterização numérica de uma fonte de luz as suas limitações são evidentes [62]. Para além de se basear em apenas 8 cores para gerar um índice, o iluminante a testar terá de ser muito próximo da distribuição espectral da luz do dia ou da radiação de um corpo negro. A Figura 1.43 representa o efeito do iluminante de referência quando este não é próximo do iluminante de teste, como no caso do iluminante CIE HP1. Uma vez que o iluminante de teste e o iluminante de referência são tão díspares, o cálculo do CRI não pode ser efectuado para este tipo de iluminantes.

Dado o aumento da utilização de iluminação LED, que difere bastante da iluminação da luz do dia, o CRI terá resultados bastante desfavoráveis tornando a sua classificação uma limitação para a qualificação de iluminantes LED [63,64]. Outro dos principais problemas reside no facto de ser um índice de comparação, ou seja, compara um iluminante com um de referência, medindo assim a capacidade de reproduzir cores e não a capacidade de gerar cores [65,66]. É possível, recorrendo a este índice, medir a capacidade de reprodução de uma cor por um dado iluminante, mas não existe uma correlação entre a forma como um observador gosta de ver aquela cor e qual o respectivo iluminante para tal [67].

Thornton apresentou em 1972 [68,69] a área ocupada pelas 8 cores utilizadas no CRI no espaço CIE 1960 quando observadas para diferentes tipos de iluminantes – O “Color – Discrimination Index”. Ao contrário do habitual no CRI, em vez de comparar as diferenças de cor provocadas por diferentes iluminantes, comparou as áreas geradas por cada um deles, sendo que quanto mais afastadas as cores maior a área obtida e maior a discriminação produzida pelo iluminante. Ao

comparar as áreas geradas pelos iluminantes com o CRI observou que alguns iluminantes com elevados CRI possuíam áreas menores, e vice-versa, concluindo que elevados CRI podem não significar boa discriminação cromática.

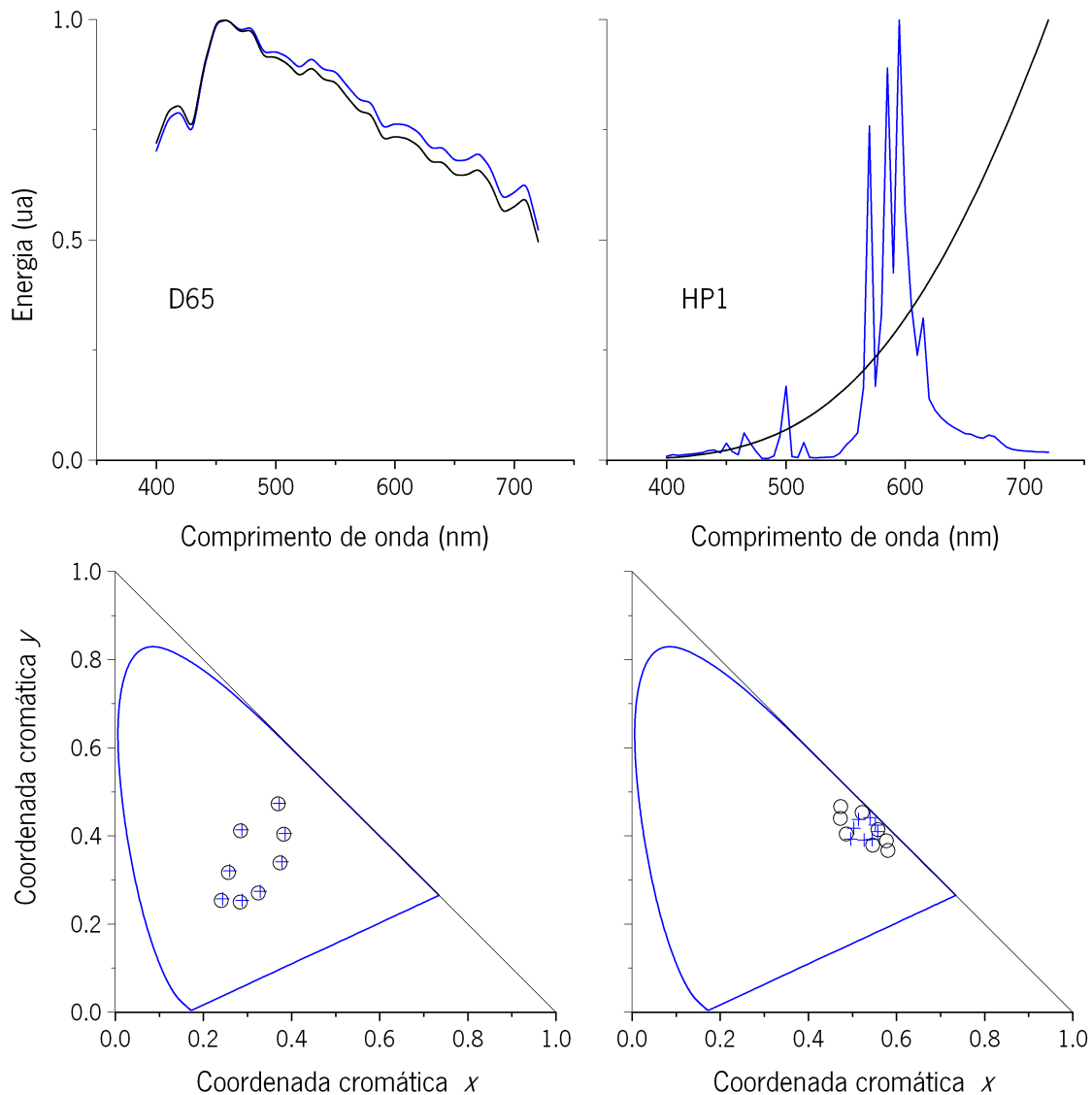


Figura 1.43 Iluminantes de referência para os iluminantes de teste CIE D65 (em cima à esquerda) e CIE HP1 (em cima à direita) e respectivo efeito do iluminante de teste e do iluminante de referência nas patelas de Munsell utilizadas no cálculo do CRI para o iluminante D65 (em baixo à esquerda) e para o iluminante HP1 (em baixo à direita).

Xu apresentou em 1983 e 1993 [65,66] o CRC “Colour-rendering capacity”, que estimava a área produzida por 8 cores, de início, e posteriormente melhorado para estimar o volume produzido por todas as cores que constituem o sólido de cor [12]. Tal estimativa permite saber qual o



comportamento de um determinado iluminante em relação à capacidade de gerar diversidade de cor, em todas as suas dimensões, e não apenas a capacidade de reproduzir fielmente uma cor.

Rea e Freyssinier-Nova apresentaram em 2008 [70] o GAI (“Gamut Area Index”), um índice que pretendia complementar o CRI com a informação da área gerada pelas patelas coloridas sugeridas pela CIE para utilização na estimativa do CRI. Tal como estimado por Thornton [68], o índice era estimado pelo cálculo da área das oito patelas coloridas no espaço CIE 1964, e normalizado para a área estimada das patelas quando iluminadas pelo iluminante E. Um iluminante que possua um CRI superior a 80 e um GAI entre 80 e 100 será capaz de proporcionar boa discriminação da cor e fazer com que os objectos observados aparentem naturais e intensos.

Li e Luo apresentaram em 2008 [71] o CRI-CAM02UCS, baseado no espaço de cor CAM02 mas sem resultados substancialmente diferentes dos apresentados pelo CRI, mesmo para um número bastante mais alargado de amostras coloridas, onde era também avaliado o volume produzido pelas amostras coloridas sob diferentes iluminantes.

Davis e Ohno apresentaram em 2010 [72] o CQS (“Color Quality Scale”). Não só utiliza na sua computação os espaços CIELAB, mas também procura introduzir as três dimensões da cor, assim como diversos factores de correcção, como o factor de saturação usado para controlar distorções na cromaticidade entre o iluminante de teste e o de referência, o factor da CCT para penalizar iluminantes com áreas de cor pequenas, a escala da área de cor usada para compensar iluminantes com aumentos exagerados em zonas do espaço específicos, entre outros.

Em 2009, Geisler-Moroder e Dür introduziram melhorias generalizadas no cálculo do CRI, substituindo o espaço de cor pelo CIELAB, calculando a diferença de cor utilizando a fórmula de diferença de cor CIEDE2000, e utilizando a adaptação cromática de Bradford [73].

Existem ainda outras tentativas de melhorar o actual CRI, sem alterar a sua filosofia de base, ou seja, a reprodutibilidade da cor de um objecto quando comparada com a cor que obtém sob uma das formas da luz do dia. Em 1999 a CIE apresentou uma tentativa de melhoria ao anterior método [74,75], mas devido à falta de consenso no interior do comité responsável as melhorias não foram aceites.

Apesar do aumento do interesse ao longo dos anos no desenvolvimento de uma escala que substitua efectivamente o CRI, a CIE ainda não assumiu nenhum dos índices aqui apresentados como o sucessor natural do CRI.

### 1.5 Adaptação Cromática

Um dos principais problemas em colorimetria prende-se com a multiplicidade de equipamentos de captura e reprodução da cor, assim como a as condições de iluminação e observação em que uma determinada amostra ou imagem foi adquirida ou apresentada. Tais problemas são de extrema importância, por exemplo, na indústria têxtil aquando da selecção de amostras coloridas em ambientes com iluminação diferente da que será utilizada para verificar a coloração final da amostra.

Numa tentativa de simular a percepção de uma cor sob um determinado iluminante, quando adquirida sob um outro iluminante, a CIE introduziu a adaptação cromática [76].

A adaptação cromática transforma os valores triestímulos em sensibilidade de cones através de:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{CAT02} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Onde:

$$M_{CAT02} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix}$$

No caso da adaptação *CAT02* o grau de adaptação *D* é estimado por:

$$D = F \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{36} \right) \cdot e^{\left( \frac{-L_a - 42}{92} \right)} \right]$$

Onde *F* é ajustado a 1, 0.9 ou 0.8 no caso de o fundo que rodeia a amostra ser “médio”, “diminuído” ou escuro e *L<sub>a</sub>* é a luminância da área de adaptação. Em teoria o grau de adaptação *D* deverá variar de 0 (situação em que não existe adaptação) a 1 (onde a adaptação à área de referência – branco de referência - é total). Caso *D* seja superior a 1, o seu valor deverá ser ajustado para 1.

O cálculo da sensibilidade dos cones já adaptada é realizada por:

$$R_c = [D \cdot (R_{rw}/R_w) + 1 - D] \cdot R$$

$$G_c = [D \cdot (G_{rw}/G_w) + 1 - D] \cdot G$$

$$B_c = [D \cdot (B_{rw}/B_w) + 1 - D] \cdot B$$

onde  $R_{rw}$ ,  $G_{rw}$  e  $B_{rw}$  são as sensibilidades dos cones produzidas pelo iluminante de teste e  $R_w$ ,  $G_w$  e  $B_w$  são as sensibilidades dos cones no iluminante de referência.

A reconversão a valores triestímulos é realizada por:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = M_{CAT02}^{-1} \begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix}$$

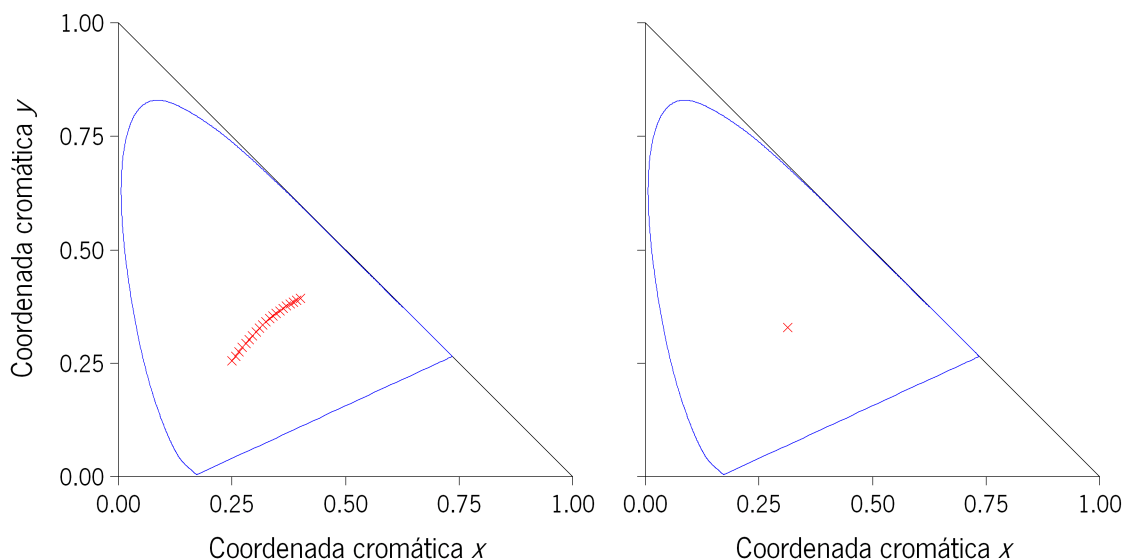


Figura 1.44 Posição das coordenadas cromáticas de várias fases da luz do dia reflectida numa superfície branca, assumindo o observador padrão da CIE 1931, sem considerar a adaptação ao iluminante (à esquerda) e considerando a adaptação ao iluminante (à direita).

A Figura 1.44 representa o efeito da adaptação na cor percebida de várias fases da luz do dia reflectida numa superfície branca perfeita e assumindo o observador padrão da CIE 1931, sem considerar a adaptação (à esquerda) e considerando a adaptação total ao iluminante e ao ambiente que rodeia a amostra (à direita). No caso em que a adaptação ao iluminante é total a cor branca da amostra é sempre branca, não importando a cor do iluminante, enquanto que sem adaptação o branco assume várias colorações dependendo da cor do iluminante.

## **1.6 Imagens hiperespectrais**

A espectroscopia é uma técnica que permite medir a energia reflectida por um objecto iluminado, ou irradiada por uma fonte de luz, em função do comprimento de onda, utilizando espectroradiómetros.

Ao contrário das imagens coloridas adquiridas por câmaras digitais convencionais, que registam a intensidade em apenas 3 sensores de cor – normalmente vermelho, verde e azul, as imagens hiperespectrais possuem a informação da intensidade da luz reflectida pelo objecto em análise para vários comprimentos de onda. Desta forma associam a uma elevada resolução espacial uma elevada resolução espectral, permitindo uma análise colorimétrica bastante precisa, assim como diversas simulações colorimétricas.

Um dos primeiros sistemas utilizados para adquirir imagens com resolução espectral foi o satélite Landsat1, lançado pela NASA em 1972, com quatro filtros que permitiam a aquisição de sinal em quatro bandas espectrais distintas: 500-600 nm, 600-700 nm, 700-800 nm e 800-1100 nm. O satélite WorldView-2 [77] lançado no final de 2009 é uma evolução dos primeiros satélites multiespectrais, possuindo uma elevada resolução espacial associada a uma resolução multiespectral com faixas sensíveis na zona do ultra violeta e do infravermelho próximos do visível.

Existem presentemente sistemas multiespectrais ou hiperespectrais com elevada resolução espacial e espectral baseados em diferentes tipos de tecnologia para permitir a análise espectral. Alguns sistemas adquirem a totalidade da imagem (resolução espacial), e utilizam um sistema de filtros para seleccionar o comprimento de onda a analisar, adquirindo uma imagem por comprimento de onda. Outros sistemas utilizam a captura em linha da imagem, sendo que em cada captura é adquirida a totalidade da resolução espectral para a linha analisada, sendo a imagem reconstruída juntando a totalidade das linhas, adquiridas individualmente.

### **1.6.1 Sistema hiperespectral I**

O sistema hiperespectral desenvolvido por Foster e Nascimento [78] é composto por uma câmara digital monocromática de elevada resolução espacial e um filtro de cristais líquidos que permite a selecção rápida e automática do comprimento de onda em análise.

A Figura 1.45 representa o primeiro sistema utilizado para adquirir imagens hiperespectrais de cenários naturais, composto por uma câmara digital monocromática (Hamamatsu – C4792.95-12ER) com uma resolução de 1024 (V) x 1344 (H) pixéis, com um CCD de 8.66x6.66 mm em que cada pixel tem a dimensão de 6.45x6.45  $\mu\text{m}$ , de baixo ruído, arrefecida com Peltier e com 12 bits de sinal de saída.

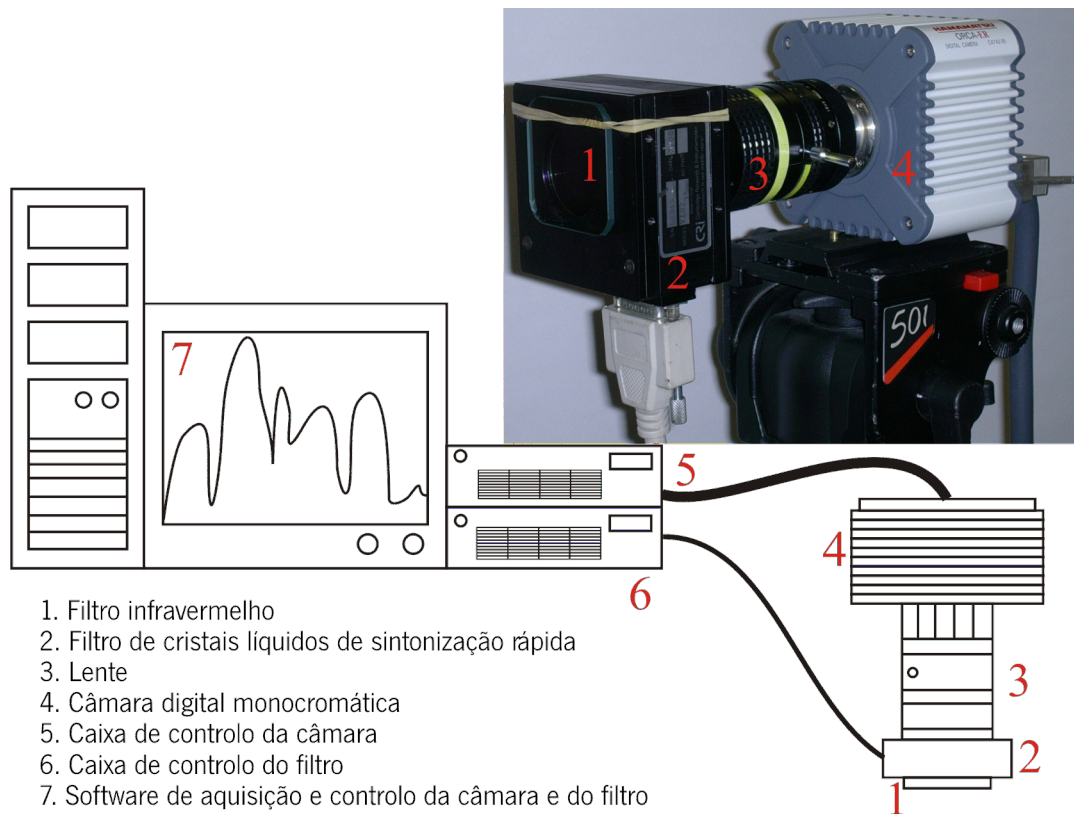


Figura 1.45 Esquema do sistema hiperespectral I desenvolvido por Foster e Nascimento [78]. Uma câmara digital monocromática adquire a imagem para o comprimento de onda seleccionado pelo filtro de cristais líquidos de sintonização rápida.

A lente acoplada à câmara funcionava tipicamente a 75 mm (de 12 a 75 mm possíveis) e a f/16 ou f/22 para uma maior profundidade de campo, produzindo cerca de 1 minuto de arco de campo de aquisição por pixel.

A selecção de cada comprimento de onda é realizada por um filtro de cristais líquidos (VariSpec, VS-VIS2-10HC-35-SQ CRI) de sintonização rápida, entre os 400 e os 720 nm, com 10 nm de intervalo entre cada comprimento de onda, com uma largura de banda a meia altura de 10nm a 500nm, 6 nm a 450 nm e 16nm a 720 nm. A Figura 1.46 representa a transmissão do filtro entre os 400 e os 750 nm. Para evitar a contaminação por luz infravermelha do sistema quando o filtro está

sintonizado para baixos comprimentos de onda, foi adicionado ao sistema um filtro de infravermelhos. O efeito da luz infravermelha no sistema é visível na Figura 1.47, quando o filtro está sintonizado para os 450 nm.

As imagens são adquiridas recorrendo a uma placa gráfica de aquisição de imagens com entrada digital (Matrox Meteor-II/Digital, Matrox Electronic Systems) e uma saída de sinal temporal que permite o controlo do tempo de exposição da câmara digital.

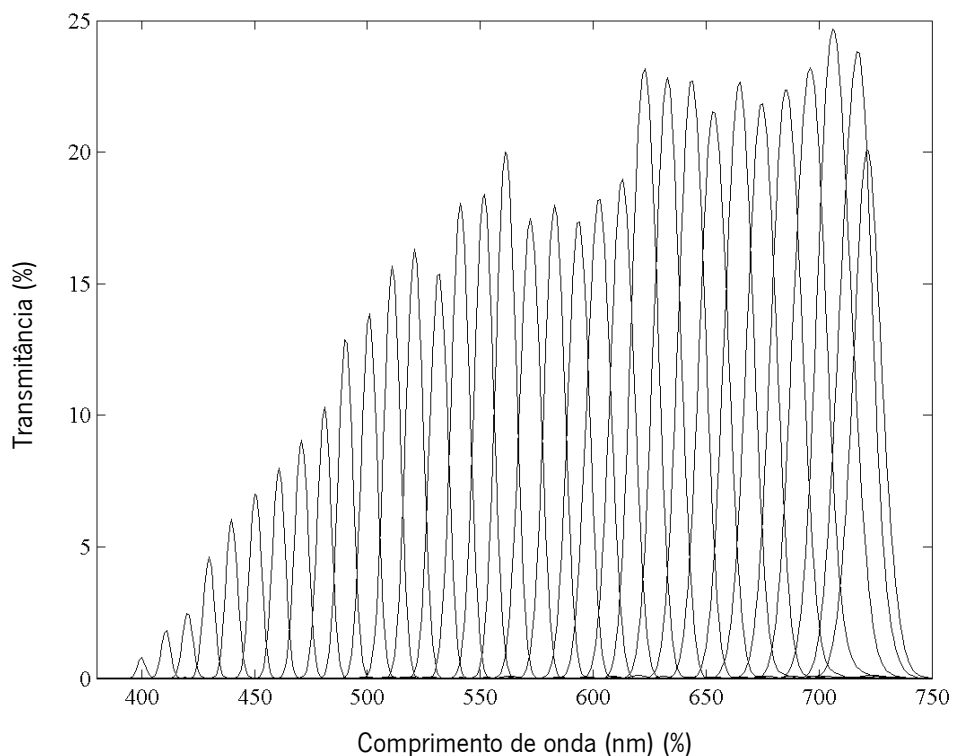


Figura 1.46 Transmissão à luz visível do filtro de cristais líquidos de sintonização rápida, medida com um espectrofotómetro (Shimadzu UV-3101PC, UV-VIS-NIR) (adaptado de [79]).

A sincronização de todo o sistema é garantida recorrendo a um software de controlo, desenvolvido especificamente para o efeito em linguagem "C". Para cada imagem a adquirir são estimados de forma automática os tempos de exposição óptimos para cada comprimento de onda sintonizado, tomando em consideração as condições de iluminação específicas de cada aquisição. O tempo máximo de exposição era de 6 segundos e para cada comprimento de onda o tempo de exposição era estimado de forma a que o sinal de saída se mantivesse entre os 90% e os 100% do máximo sinal de saída da câmara digital. A limitação no tempo máximo de exposição imposta pela câmara

digital origina, por vezes, imagens com sinal reduzido, em particular nos comprimentos de onda mais baixos, originando algum ruído nas reflectâncias adquiridas.

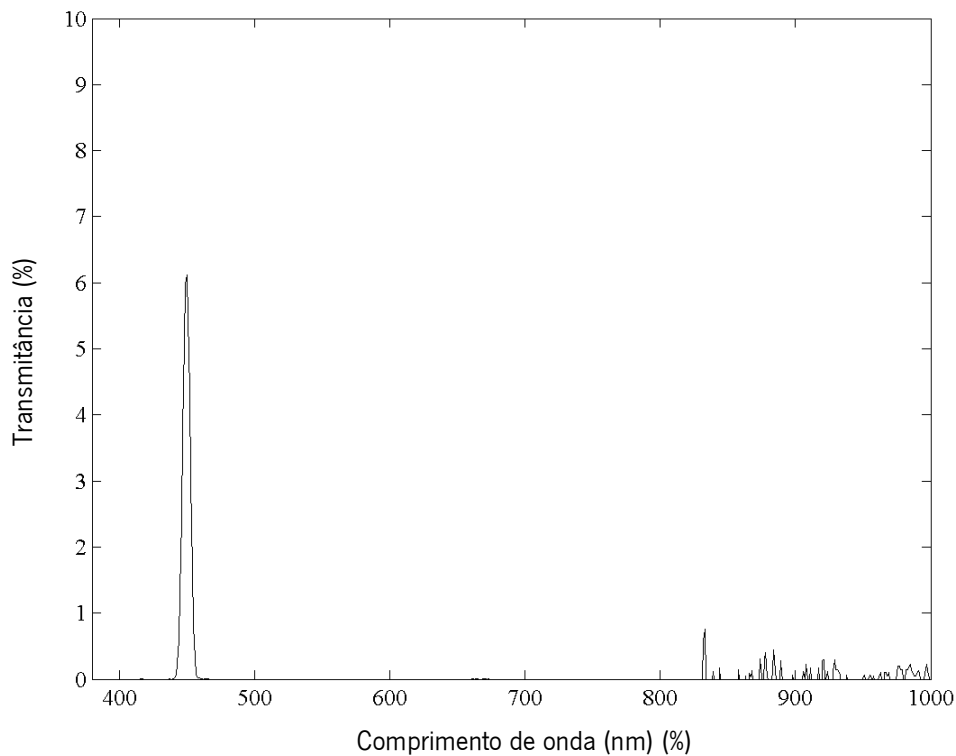


Figura 1.47 Transmissão de luz infravermelha do filtro de cristais líquidos quando sintonizado para 450 nm, medida com um espectrofotômetro (Shimadzu UV-3101PC, UV-VIS-NIR) (adaptado de [79]).

O sistema hiperespectral foi caracterizado em diversos pontos [79], demonstrando uma transmitância dependente do ângulo de incidência (diminuindo do centro para a periferia), um comportamento linear, influência do stray light, uma boa MTF (“Modulation transfer function”) e que o ruído do sistema é dependente do tempo de exposição da câmara digital. O resultado destas caracterizações foi introduzido de forma automática no software de aquisição por forma a compensar as inexactidões obtidas durante a aquisição e devidas à sua influência.

A reprodução das funções de reflectância foi também avaliada [80], comparando as reflectâncias espectrais de amostras pintadas a óleo obtidas a partir do sistema hiperespectral e a partir do telespectroradiômetro PR-650 (SpectraColorimeter, PR-650; Photo Research Inc., Chatsworth, CA) devidamente calibrado. A diferença de cor obtida pelos dois meios foi comparada utilizando o espaço de cor CIELAB e a fórmula de diferença de cor CIEDE2000, sendo que em média o resultado foi de 2.3 e de 1.3 respectivamente. O erro espectral obtido foi de cerca de 2%.

Considerando os erros de medida obtidos por comparação com o PR-650, obtêm-se uma precisão de reprodução espectral compatível com a reprodução para visualização [81].

### **1.6.2 Sistema hiperspectral II**

Para melhorar algumas das limitações impostas pelo sistema hiperspectral I, tais como a portabilidade, a usabilidade do software utilizado e principalmente os baixos tempos de exposição do CCD para aquisição associados aos comprimentos de onda curtos (no máximo 6 segundos), substituiu-se a câmara digital inicial pela câmara digital monocromática Hamamatsu - C4742-80 ORCAER. Esta câmara sendo refrigerada por um sistema Peltier em conjunto com um sistema de ar permite tempos de exposição de 4200 segundos (de acordo com a folha de especificações do fabricante), bastante superiores aos iniciais 6 segundos. Todos os restantes componentes do sistema hiperspectral I foram mantidos e o respectivo software de aquisição adaptado à nova configuração e calibração do sistema.

O facto de este modelo de câmara digital possuir o protocolo de comunicação firewire 1394 permitiu conectar a câmara directamente a um computador portátil e assumir o seu controlo a partir do software desenvolvido para o efeito, sem recorrer à placa gráfica de aquisição de imagens, tornando o sistema mais leve, logo mais portátil, e com uma utilização mais amigável e intuitiva [82].



## **2 Diversidade cromática em cenas naturais para observadores normais.**

### **2.1 Introdução**

O número de cores que o ser humano consegue distinguir, possuindo uma visão das cores normal, foi sempre um tópico de curiosidade científica [83], mas sem resultados efectivos até finais do século XX.

O valor de 10 milhões de cores é frequentemente avançado como o número de cores discerníveis [84], mas Judd e Wyszecki não apresentaram o método que suporta tal afirmação tornando impossível confirmar o valor avançado à luz dos conhecimentos actuais. Em 1998 Pointer e Attridge [41] estimaram o número de cores discerníveis em cerca de 2.28 milhões com base numa segmentação perceptual baseada nos limites teóricos do espaço de cor CIEALB considerando apenas cores resultantes de reflexão ou transmissão – o sólido de cor-objecto (ver secção 1.3).

No entanto as reflectâncias utilizadas para construir um sólido de cor não se aproximam das que existem em cenas complexas ou, em particular, no mundo natural (ver Figura 1.35), tornando anteriores estimativas do número de cores discerníveis desajustadas da real estimativa em cenários complexos naturais.

Tal valor ajustado a cenários naturais é importante dada a sua aplicabilidade na comparação da discriminação cromática de observadores normais ou deficientes da visão das cores em tarefas específicas, ou até no desenvolvimento e caracterização de novas fontes luminosas [85] capazes de desempenho específicos em tarefas colorimétricas de elevada precisão ou no desenho de novos filtros coloridos capazes de melhorar a visão das cores de observadores anómalos [86,87].

É assim importante que exista uma quantificação das diferenças que existem entre os sólidos de cor ideais, e os sólidos de cor reais. Foram já realizadas algumas tentativas de os comparar [88-90] que demonstram que o volume das cores naturais é menor quando comparado com o volume teórico, mas tais estimativas estão limitadas ao reduzido número de amostras utilizadas [88], ou, utilizando imagens hiperespectrais para ultrapassar esta limitação, na reduzida resolução das imagens utilizadas [89,90].

Este trabalho tem como objectivo estimar o número de cores discerníveis em cenários naturais, utilizando uma base de dados de 50 imagens hiperespectrais de cenas naturais [78,91,92] como representação da diversidade cromática e a fórmula de cor CIEDE2000 associada aos espaço de cor CIELAB [13] como modelo de percepção da visão das cores aproximadamente uniformes.

Comprova-se com este estudo que o volume ocupado pelas cores naturais é bastante limitado quando comparado com o sólido de cor teórico, resultando num número de cores discerníveis estimado de 2.3 milhões.

## 2.2 Métodos

Foi utilizada uma base de dados de 50 imagens hiperespectrais de cenários naturais. As imagens foram divididas em imagens rurais e imagens urbanas. As imagens rurais apenas possuíam cores naturais, enquanto que as imagens urbanas possuíam cores de origem humana, desde objectos fabricados com materiais artificiais, pintados com tintas artificiais, manipulados de materiais naturais, entre outros. A Figura 2.1 representa a base de dados de 50 cenas utilizadas neste trabalho.

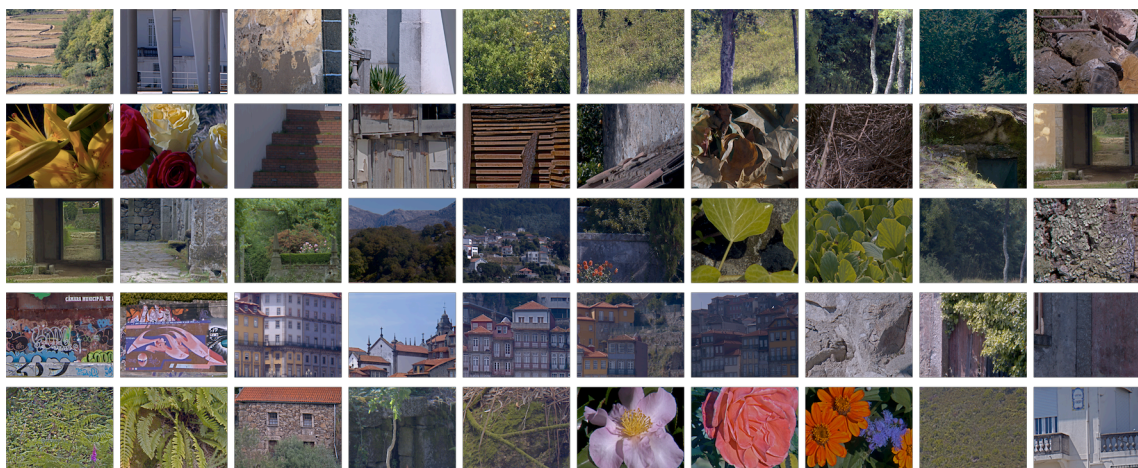


Figura 2.1 Base de dados das 50 cenas utilizadas neste trabalho.

As imagens foram adquiridas recorrendo ao sistema hiperespectral I (ver secção 1.6.1) composto por uma câmara digital monocromática arrefecida com Peltier e uma resolução de 1024 (V) x 1344 (H) pixéis (Hamamatsu, Modelo C4742-95-12ER, Hamamatsu Photonics K. K., Japan) emparelhada a uma lente de 75 mm de distância focal e cerca de 6 graus de campo visual com um filtro de cristais líquidos de sintonização rápida (Varispec, Modelo VS-VIS2-10-HC- 35-SQ, Cambridge

Research & Instrumentation, Inc., Massachusetts) na sua frente, associado a um filtro de infravermelhos. Cada imagem foi adquirida de 400 nm a 720 nm com 10 nm de intervalo. A junção das 33 imagens resultantes permitiu formar o cubo hiperespectral, em que em cada pixel está a informação espectral correspondente à área da imagem representada por esse pixel. Nesta configuração o sistema possuiu uma resolução próxima da do olho humano.

Os dados hiperespectrais foram calibrados utilizando o espectro de reflexão de uma referência cinza de espectro conhecido, presente na cena durante a aquisição, e medido recorrendo a um telespectroradiómetro (SpectraColorimeter, PR-650, PhotoResearch Inc., Chatsworth, California), logo após a aquisição da imagem.

A radiância espectral foi obtida após compensar os dados obtidos para o ruído da câmara, stray light e falta de uniformidade angular. Posteriormente foi convertida em valores triestímulos assumindo o observador padrão CIE 1931 e convertido de seguida em coordenadas do espaço de cor CIELAB (ver secção 1.2.1.5). O iluminante de referência assumido nestes cálculos foi obtido a partir da referência cinza presente na cena durante a aquisição, assumindo também que o branco da cena correspondia a um difusor perfeito.

A Figura 2.2 representa três exemplos de imagens da base de dados com a respectiva representação do volume CIELAB à direita. A última imagem representa uma imagem classificada como urbana, enquanto que as restantes são classificadas como imagens rurais. Para facilitar a visualização do volume CIELAB apenas estão representados parte dos pontos utilizados nos cálculos. Em alguns casos (em particular no último em que está representada uma cena urbana) é visível a representação de valores de  $L^*$  superiores a 100. Estes pontos resultam de especularidades (pontos de saturação luminosos na imagem) e representam menos de 3% dos pontos analisados e foram removidos na presente análise.

O número de cores discerníveis foi calculado segmentando o volume CIELAB em volumes discerníveis em forma de cubos e contando o número de cubos que continham pelo menos um pixel da imagem [41,85]. É no entanto sabido que o espaço CIELAB representa apenas aproximadamente a percepção de cores discerníveis [48,93-96] pelo que as estimativas do número de cores discerníveis foram obtidas recorrendo à fórmula de diferença de cor CIEDE2000 [39,97]

com os respectivos factores paramétricos  $K_L$ ,  $K_C$  e  $K_H$  ajustados para os valores padrão [13,98] (ver secção 1.2.1.5).

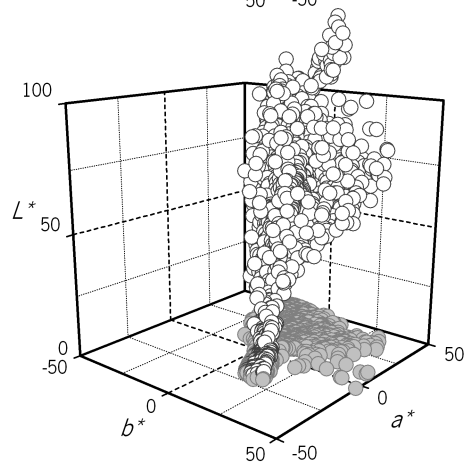
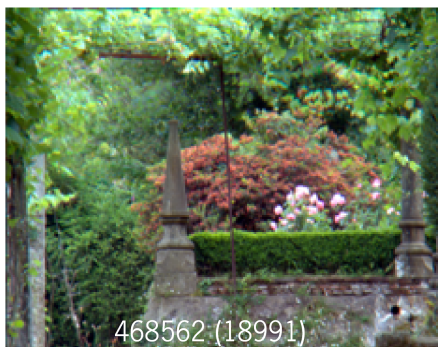
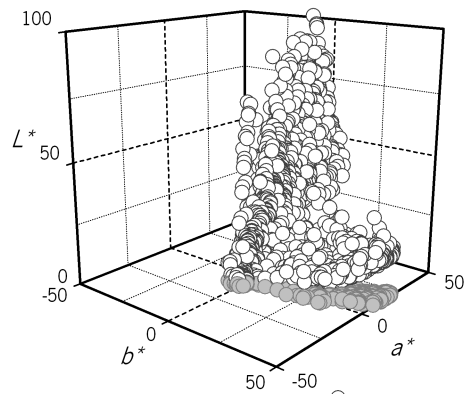
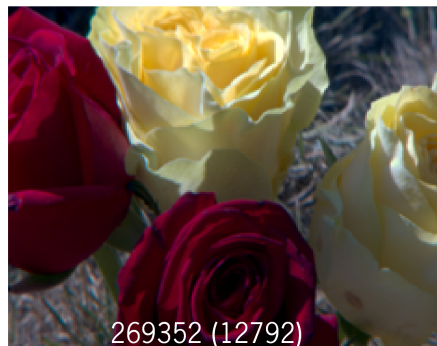
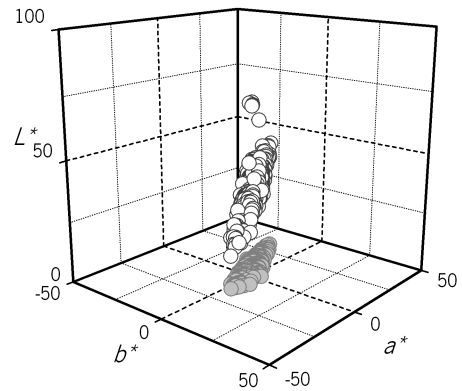


Figura 2.2 Exemplo de três cenas da base de dados (imagens à esquerda) e correspondente volume CIELAB (imagens à direita). Por forma a facilitar a visualização do volume CIELAB apenas se representa uma parte das coordenadas de cada cena. Os valores inscritos nas imagens da direita representam o número de cores discerníveis estimado utilizando a fórmula de diferença de cor CIEDE2000, enquanto que o valor entre parênteses representa o número de cores discerníveis nas mesmas condições mas ignorando a informação da coordenada  $L^*$ . A primeira imagem representa uma cena com um número de cores discerníveis abaixo da média, a segunda dentro da média e a terceira acima da média.

Mais especificamente, o procedimento executado era o seguinte: de forma totalmente aleatória era escolhida uma cor do volume CIELAB e, utilizando a fórmula de diferença de cor, todas as cores que estivessem a menos de 0.3 unidades de distância da cor em análise eram consideradas cores não discerníveis, contadas como uma cor apenas e retiradas da amostra para evitar dupla contagem. De seguida uma nova cor era seleccionada de forma aleatória e de novo a fórmula CIEDE2000 era aplicada e todas as cores não discerníveis contabilizadas como uma e retiradas da amostra, e assim sucessivamente até que nenhuma cor restasse no volume CIELAB. Neste método foi assumido um valor de discriminação cromática de 0.6 em CIEDE2000 [44,99]. Para avaliar o impacto da selecção da primeira cor, o procedimento foi repetido várias vezes em cada imagem, em algumas imagens diferentes, forçando a que a selecção da primeira cor fosse diferente em cada tentativa, sendo que se observou uma variação no desvio padrão de menos de 0.1%, entre procedimentos.

Para avaliar o número de cores obtido utilizando apenas a informação da saturação e da tonalidade, o procedimento descrito no parágrafo anterior foi utilizado ignorando a informação da luminosidade, sendo que desta forma as esferas foram reduzidas a círculos para efeitos de cálculo.

O volume de cor das cenas naturais foi estimado recorrendo à segmentação do volume de cor em cubos unitários (assumindo que a aresta do cubo corresponde ao limite de discriminação) e contando os que possuíam pelo menos um pixel no seu interior, ou seja, contando os que não estavam vazios [41,85]. O sólido de cor-objecto foi também estimado, para comparar com o resultado obtido para as cenas naturais, da seguinte forma: as cores óptimas foram estimadas assumindo um  $L^*$  de 1 a 99 em passos de 1, assumindo uma resolução espectral de 380 nm a 780 nm em passos de 0.1 nm, assumindo o observador padrão CIE 1931 e o iluminante CIE C (ver secção 1.3.1.2). Sempre que necessário foi realizada interpolação linear para ajustar a resolução espectral das funções de reprodução da cor e do iluminante à resolução espectral pretendida.

O iluminante CIE C foi escolhido para este estudo para permitir a comparação com resultados anteriores.

O volume final foi estimado recorrendo à interpolação linear dos resultados obtidos para cada um dos níveis de  $L^*$ .

## 2.3 Resultados

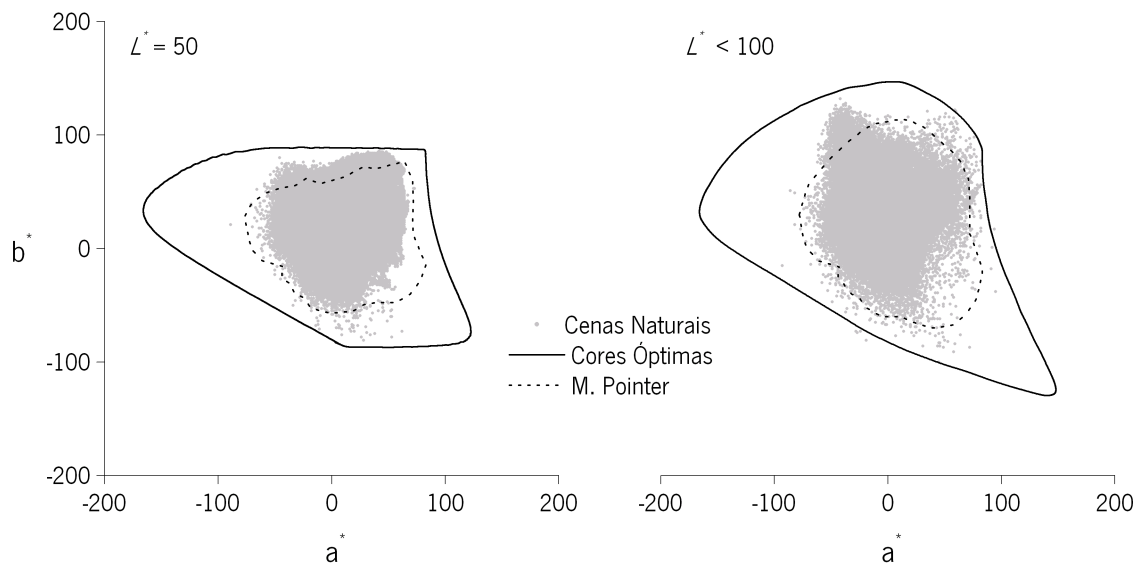


Figura 2.3 Gamut de cores das 50 imagens da base de dados representada no diagrama de cores CIE  $(a^*, b^*)$ , para apenas um nível de  $L^* = 50$  (à esquerda) e a projecção de todos os níveis de  $L^* < 100$  (à direita). Para comparação representam-se os limites produzidos pelas cores óptimas (linha a contínuo) e o gamut de cores gerada pelas 4089 amostras coloridas tabeladas por M. Pointer [88] (linha a tracejado). Em todos os casos assumiu-se a iluminação das amostras pelo iluminante CIE C.

A Figura 2.3 apresenta à esquerda o gamut de cores existente nas 50 imagens da base de dados utilizada neste trabalho, representadas em CIE  $(a^*, b^*)$  para o nível de  $L^* = 50$ ; à direita está representada, também em CIE  $(a^*, b^*)$ , a projecção do gamut de cores de todas as cenas da base de dados para os níveis de  $L^* < 100$ . Também representadas nos dois casos estão as cores óptimas e as 4089 amostras coloridas de superfícies reais tabeladas por M. Pointer [88], considerando nos dois casos as cores iluminadas pelo iluminante CIE C. O limite das cores óptimas apresentado à direita foi obtido sobrepondo todos os limites no diagrama CIE  $(a^*, b^*)$  e seleccionando os pontos limites da área resultante.

Para o caso de  $L^* = 50$ , na figura da esquerda, o gamut de cores das cenas naturais é consideravelmente inferior ao gamut das cores óptimas e é similar, apesar de não coincidente, ao gamut de cores obtido por M. Pointer. Apesar de não demonstrado nesta figura, para outros níveis de  $L^*$  o comportamento do gamut de cores das cenas naturais quando comparado com as amostras de M. Pointer e as cores óptimas é similar ao caso representado na figura.

A projecção de todo o volume de cor ( $L^* < 100$ ) no diagrama CIE ( $a^*, b^*$ ), na figura da direita, apresenta resultados semelhantes ao obtido para o  $L^* = 50$ . São também visíveis alguns pontos que estão fora dos limites das cores óptimas. Estes pontos correspondem a cores obtidas por processos que não reflexão ou transmissão e, como tal, não são consideradas cores-objecto.

O volume total do sólido de cor-objecto em CIELAB encontrado foi de cerca de 2.22 milhões, próximo do valor de 2.28 milhões encontrado por M. Pointer e G. G. Attridge [41] e de 2.05 milhões encontrado por Martínez-Verdú *et al.* [85]. O valor encontrado para o volume ocupado pelas cores das cenas naturais é de 689734, ou seja, cerca de 31% do valor obtido para o limite teórico. Estas estimativas foram obtidas utilizando o método dos cubos unitários para ser possível a comparação com os resultados anteriores.

A Figura 2.4 representa, à esquerda, a distribuição do número de cores discerníveis para a base de dados de 50 imagens. A linha contínua representa um ajuste Gaussiano. Na primeira linha da Tabela 2.1 está representado o número médio de cores discerníveis para todas as 50 cenas. A título de exemplo, a primeira imagem da Figura 2.2 representa uma cena com um número de cores discerníveis abaixo do número médio, enquanto que a última imagem possui um número de cores discerníveis acima do valor médio. Os valores dos números de cores discerníveis estão representados nas imagens, e o valor entre parênteses representa o número de cores discerníveis obtido ignorando o valor de  $L^*$ .

Foi encontrado um valor médio de cores discerníveis de 274 736 cores. Se o valor de  $L^*$  for ignorado o valor obtido é de apenas 4% do valor total. Este resultado permite afirmar que o número de cores discerníveis depende largamente do valor da luminosidade, e apenas uma pequena fracção depende das variações de saturação e tonalidade.

O lado direito da Figura 2.4 representa o número total de cores discerníveis em função do número de cenas considerado na análise. A linha a contínuo representa um ajustes exponencial aos dados obtidos com a forma de  $N \times (1 - e^{-kn})$ , onde o  $n$  representa o número de cenas em análise e o  $N$  e o  $k$  são parâmetros ajustáveis. A segunda linha da Tabela 2.1 apresenta os resultados obtidos para os valores assintóticos  $N$  para as duas condições analisadas.

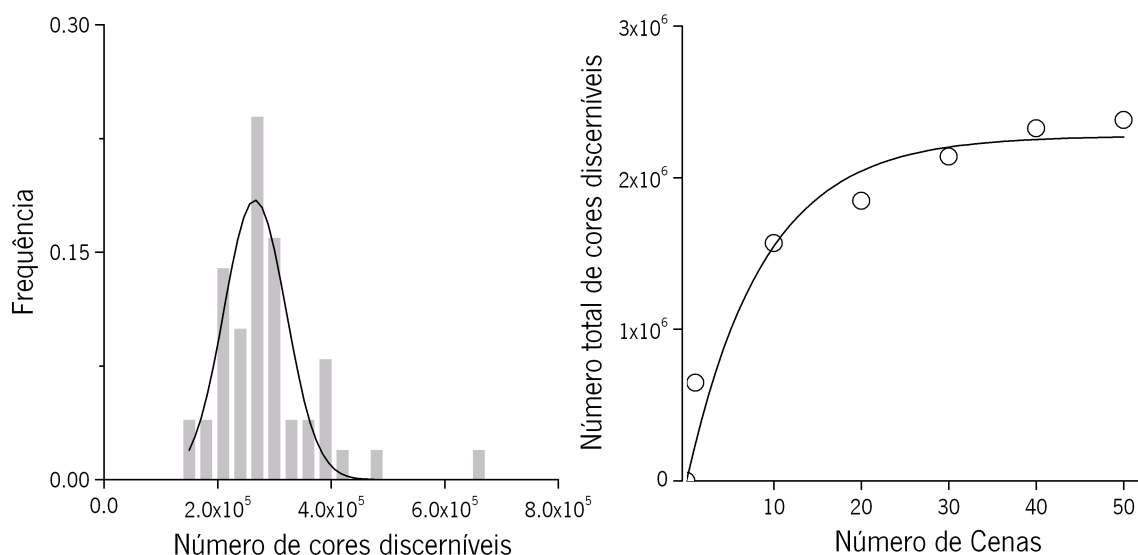


Figura 2.4 Esquerda - Distribuição do número de cores discerníveis para as 50 cenas analisadas. Os cálculos foram realizados assumindo a fórmula de diferença de cor CIEDE2000. A linha contínua representa um ajuste Gaussiano. Direita – Número total de cores discerníveis em função do número de cenas considerado na análise. Os resultados são também obtidos assumindo a fórmula de diferença de cor CIEDE2000. A linha contínua representa um ajuste exponencial.

Tabela 2.1 Estimativas obtidas utilizando a fórmula de diferença de cor CIEDE2000: número médio de cores discerníveis para a base de dados de 5 cenas e valores assintóticos obtidos a partir dos ajustes exponenciais.

Parâmetro	$(L^*, a^*, b^*)$	$(a^*, b^*)$
Número médio de cores discerníveis	274 736 (92 976)	11 276 (3 232)
Valores assintóticos	2 275 698	26 256

*Dados baseados nas três dimensões do espaço CIELAB  $(L^*, a^*, b^*)$ , ou ignorando a informação da luminosidade CIE  $(a^*, b^*)$ . Os valores entre parênteses representam o desvio padrão estimado.*

O número de cores discerníveis parece convergir para um valor assintótico, o que sugere que o número de cenas utilizado é suficiente para a análise efectuada. O número de cores discerníveis obtido ignorando  $L^*$  é cerca de 1.1% do total, o que é apenas uma pequena percentagem do obtido para as cenas individuais (cerca de 4%), o que poderá indicar uma redundância superior na saturação e na tonalidade do que na luminosidade.



## 2.4 Discussão

A principal contribuição deste trabalho é a estimativa do número de cores discerníveis utilizando imagens de cenas naturais baseadas em imagiografia hiperespectral, e a comparação dos resultados obtidos com os obtidos a partir dos volumes do sólido de cor-objecto. Estimou-se o número de cores discerníveis em cenas naturais em cerca de 2.3 milhões e que este valor corresponde a cerca de 30% do máximo teórico. De referir que o valor de 2.28 milhões de cores discerníveis avançado por M. Pointer [41] refere-se ao número de cores do volume do sólido de cor-objecto obtido utilizando a metodologia de segmentação cúbica do espaço CIELAB e não deve ser confundido com este, obtido a partir da utilização da fórmula de diferença de cor CIEDE2000 e apenas para as cores das cenas naturais.

Porquê esta diferença, ou seja, porque é o volume das cores das cenas naturais substancialmente inferior ao volume do sólido cor-objecto? Uma possível resposta poderá ser o facto de as reflectâncias das cores dos objectos naturais serem bastante diferentes das reflectâncias das cores óptimas, sugerindo que uma grande parte das cores próximas das cores óptimas poderá não ocorrer na Natureza, ou ocorrer muito raramente.

O facto de a diferença no número de cores discerníveis assumindo apenas a saturação e a tonalidade ser de 1.1% considerando a totalidade das cenas e de 4%, em média, considerando as cenas individuais sugere que existe uma redundância superior na luminosidade do que a que existe na saturação e na tonalidade.

Existe também uma limitação nas cores existentes na base de dados utilizada. Flores com cores muito saturadas e existentes em áreas tropicais [100], cores de ambientes extremos como desertos ou Círculos Polares, poderão não estar representadas. No entanto, o facto de o número de cores discerníveis ser estável a partir das 30 cenas analisadas permite sugerir que as 50 cenas utilizadas no total poderão conter uma boa amostragem das cores naturais.

As imagens hiperespectrais foram adquiridas em condições de iluminação específicas, condicionando a comparação directa com os dados obtidos para o volume do sólido de cor-objecto, iluminado apenas com um iluminante. No entanto, estudos que estimaram a variação do volume do sólido de cor-objecto em função da composição espectral do iluminante [85] demonstram que as

variações para a luz do dia são pequenas, o que não deverá afectar fundamentalmente os resultados aqui obtidos. A composição espectral do iluminante também varia ao longo da cena e a aplicação da fórmula de diferença de cor nestas condições não ideais poderá introduzir alguns erros na estimativa, mas é pouco provável que tais erros alterem dramaticamente os resultados aqui obtidos.

Em bom rigor, a fórmula de diferença de cor CIEDE2000 só deveria ser aplicada a estímulos de cor uniformes, em condições de adaptação muito bem definidas e não definem com grande precisão condições mais complexas. A discriminação em amostras uniformes também depende da adaptação [101,102] e, em imagens naturais com estruturas cromáticas complexas, a discriminação cromática dependerá ainda da distribuição das cores, do grau de adaptação do observador à imagem, da memória da cor, da textura cromática das imagens, entre outros parâmetros [89,103-105].

A estrutura espacial de uma imagem também influencia a discriminação [106] e métrica S-CIELAB [98,107] é uma tentativa de adicionar ao espaço de cor CIELAB a capacidade de estimar imagens e não apenas amostras coloridas uniformes. No entanto, o espaço S-CIELAB apenas estima as diferenças de cor entre uma imagem original e a reproduzida e não poderá ser utilizado neste estudo. Até ao momento não existe nenhum modelo que possa levar em consideração todos os parâmetros que poderão interferir na discriminação cromática, e este método é o possível dados os conhecimentos presentes. Apesar destas limitações não será de esperar que o resultado aqui obtido seja substancialmente alterado com a utilização de modelos mais completos.

Os resultados aqui obtidos permitem concluir que o sistema visual lidará com menos variação cromática do que a estimada a partir dos limites teóricos. Indica também que o sistema visual poderá ser capaz de uma discriminação superior à que normalmente utiliza, o que poderá apresentar limitações em algumas tarefas específicas, onde, por exemplo, seja necessária a discriminação de cores muito saturadas, uma vez que o sistema visual não é treinado para tal.

### **3 Diversidade cromática em cenas naturais para observadores normais e dicromatas e a influência de lentes coloridas.**

#### **3.1 Introdução**

Considerando os resultados obtidos no capítulo anterior, algumas das questões complementares que ficaram por responder prendem-se com a variação do número de cores discerníveis em cenas naturais para observadores com deficiência da visão das cores (DVC) e quais as alterações no número de cores discerníveis em cenas naturais com a utilização de lentes coloridas.

Uma das formas de deficiência da visão das cores é a dicromacia. Acontece quando existe a falta de um dos pigmentos dos cones (ver secção 1.1.1.2), sendo classificados em protanopes, deuteranopes ou tritanopes se o pigmento em falta é o sensível aos comprimentos de onda longos, médios ou curtos, respectivamente. Apesar de os dicromatas serem mais eficientes em algumas tarefas específicas como a discriminação de cores de camuflagem [108,109] ou a detecção de alguns estímulos de elevada frequência temporal [110] a sua discriminação cromática é severamente reduzida quando comparados com observadores normais [111]. É no entanto desconhecido qual o efeito desta redução no número de cores discerníveis.

Apesar das linhas de confusão (ver secção 1.2.1.2) estarem já bem caracterizadas [12], a inexistência de um diagrama cromático uniforme capaz de representar a sua percepção da cor torna difícil a estimativa da caracterização da redução no número de cores discerníveis face a um observador tricromata normal (para uma estimativa do número de cores discerníveis em observadores normais ver capítulo 2).

É no entanto possível, com base em alguns pressupostos relativos à visão dicromática, inferir qual a percepção da cor de dicromatas [112] e, utilizando algoritmos computacionais, simular para observadores normais a percepção das cores pelos dicromatas [51]. Tal procedimento pode ser expandido a cenas naturais o que possibilita a simulação de cenas complexas para tricromatas com a percepção das cores de dicromatas. É sabido que este modelo não representa completamente a visão a cores dicromática [113,114], mas tem sido amplamente utilizado para obter representações de imagens [115] e em aplicações práticas [116-119]. A conversão da visão das cores dicromática para percepções de tricromatas normais permite a representação indirecta da percepção das cores

dos dicromatas em espaços de cor associados a tricromatas normais, sendo assim possível a estimativa do número de cores discerníveis em cenas naturais.

É sabido que a utilização de iluminantes com diferentes perfis espectrais altera a diversidade cromática em observadores normais [85] e o número de cores discerníveis [120], sendo que tal também acontece com a utilização de filtros coloridos [121]. No caso de observadores normais, por exemplo, a densidade óptica do pigmento macular pode aumentar a discriminação cromática [122] e a utilização de filtros específicos poderão melhorar a visão das cores em certos casos [123]. É no entanto desconhecido o efeito que lentes coloridas poderão ter na diversidade cromática percebida por dicromatas ao observar cenas naturais.

O trabalho aqui apresentado tem como objectivo estimar a diminuição relativa no número de cores discerníveis por dicromatas ao observar cenas naturais e o efeito de filtros coloridos. Uma base de dados composta por imagens naturais hiperespectrais foi utilizada para simular a percepção da cor de dicromatas para observadores tricromatas normais, e desta forma representar as cores das imagens no espaço de cor CIELAB. No caso de observadores normais as radiâncias das cenas naturais foram convertidas em coordenadas cromáticas em CIELAB tendo em consideração o espectro de transmissão de vários filtros coloridos e o número de cores estimado pela segmentação do espaço CIELAB em cubos unitários. O número de cubos com pelo menos uma cor no interior dá uma aproximação ao número de cores discerníveis (ver capítulo 2). No caso dos dicromatas a percepção da cor foi simulada utilizando um algoritmo computacional [51] e o restante procedimento foi idêntico ao descrito para os tricromatas normais.

Foi encontrado que o número de cores discerníveis por observadores dicromatas é de cerca de 7% das cores discerníveis por observadores tricromatas e que enquanto algumas lentes coloridas aumentam consideravelmente o número de cores discerníveis em observadores normais, nos observadores dicromatas têm apenas um efeito moderado.

### **3.2 Métodos**

Uma base de dados de 50 imagens hiperespectrais (ver Figura 2.1) foi utilizada nas estimativas deste trabalho. As imagens foram adquiridas utilizando o sistema hiperespectral I (ver secção 1.6.1 e secção 2.2).

As radiâncias constantes das imagens hiperespectrais foram convertidas em valores triestímulos e depois em coordenadas cromáticas no espaço CIELAB, assumindo o observador padrão CIE 1931 (ver secção 1.2.1). O branco de referência foi obtido a partir do espectro de reflectância da referência cinza presente na cena durante a aquisição.

A simulação para observadores normais da percepção das imagens coloridas por observadores dicromatas foi conseguida utilizando o algoritmo descrito por Brettel [51] (ver secção 1.2.2). Os valores triestímulos estimados a partir das cenas naturais e assumindo o observador padrão CIE 1931 foram convertidos em excitações de cones utilizando as transformações de Vos [35] e assumindo os fundamentais de Smith e Pokorny [50] (ver secção 1.2 e 1.2.1.7). Para os protanopes, deuteranopes e tritanopes as excitações de cones  $(L_{Q_i}; M_{Q_i}; S_{Q_i})$  correspondentes foram estimadas substituindo o sinal do cone desconhecido pelo valor correspondente na superfície reduzida [51]. Estas coordenadas foram convertidas para valores triestímulos utilizando a conversão inversa de Vos e convertidas para o espaço CIELAB. Neste processo um número reduzido de cores não pode ser convertido pelo algoritmo em sinais reais de cones, representando, no entanto, menos de 1% dos pixels das imagens e foram retiradas da análise.

O número de cores foi estimado segmentando o espaço CIELAB em cubos de tamanho unitário e contando o número de cubos com pelo menos uma cor. Foi assumido que todas as cores contidas no interior de um só cubo não poderiam ser discriminadas, e por isso foram contadas como uma só. Esta metodologia dá uma apenas uma aproximação razoável ao resultado final [41] e é preferível face a metodologias mais complexas [85,124] pelo seu baixo consumo de recursos computacionais.

Para estudar a influência das lentes coloridas na percepção da cor das imagens, o espectro de radiância de cada pixel de cada imagem foi multiplicado pelo espectro de transmitância de cada lente colorida estudada, sendo o resultado final uma imagem espectral como se observada através da lente colorida. O volume CIELAB e o número de cores foram estimados para cada lente, como descrito anteriormente no cálculo do número de cores sem lentes coloridas.

A Figura 3.1 representa o espectro de transmitância das 10 lentes coloridas utilizadas, medido com um espectrofotómetro (Shimadzu, modelo UV-3101PC, Shimadzu Japão), dos 400 nm aos 720 nm

em passos de 1 nm. Nove lentes eram lentes coloridas de óculos de sol comerciais, excepto a Lente 8 que era uma lente idealizada. O seu espectro de transmitância foi obtido computacionalmente utilizando uma rotina de optimização que maximizou o número de cores discerníveis das imagens da base de dados simulando para um observador normal a percepção das imagens vistas através da lente.

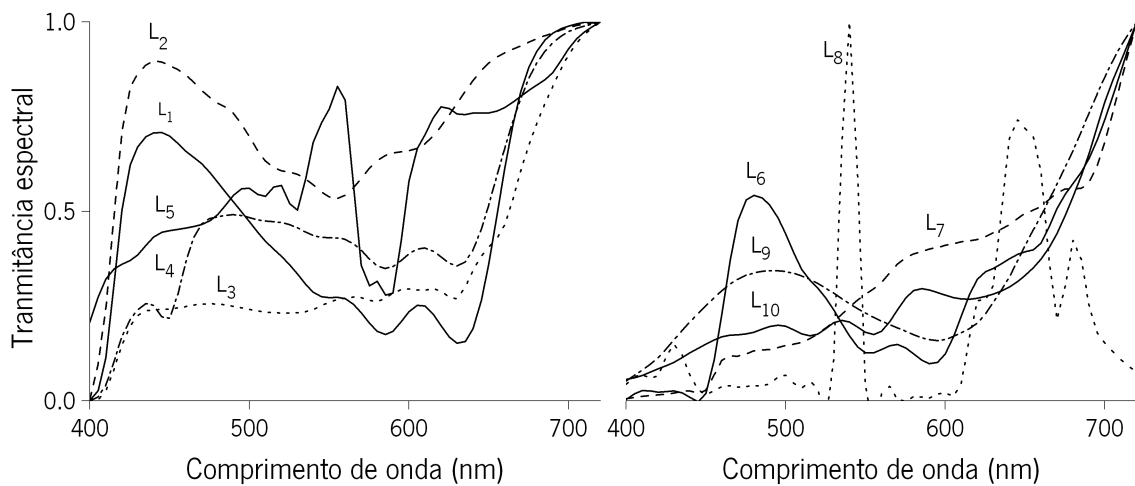


Figura 3.1 Espectro de transmissão das 10 lentes coloridas utilizadas neste estudo. Todas as lentes excepto a Lente 8 eram lentes coloridas de óculos de sol comerciais. A Lente 8 era uma lente teórica (ver texto para mais detalhes).

### 3.3 Resultados

A Figura 3.2 representa à esquerda as cores percebidas por observadores normais (A), protanopes (B), deuteranopes (C) e tritanopes (D) quando observam uma das cenas da base de dados. À direita estão representados os volumes CIELAB correspondentes. Na base de cada um dos gráficos CIELAB está representado a cinza a projecção do respectivo volume CIELAB em CIE ( $a^*$ ,  $b^*$ ). Por uma questão de melhor visualização apenas parte dos dados estão representados nos volumes CIELAB.

A Figura 3.3 representa a fracção das cores discerníveis percebidas por observadores protanopes, deuteranopes e tritanopes quando comparados com observadores tricromatas normais a observar as mesmas cenas. Os dados representam a média de todas as cenas e as barras de erro representam o desvio padrão.

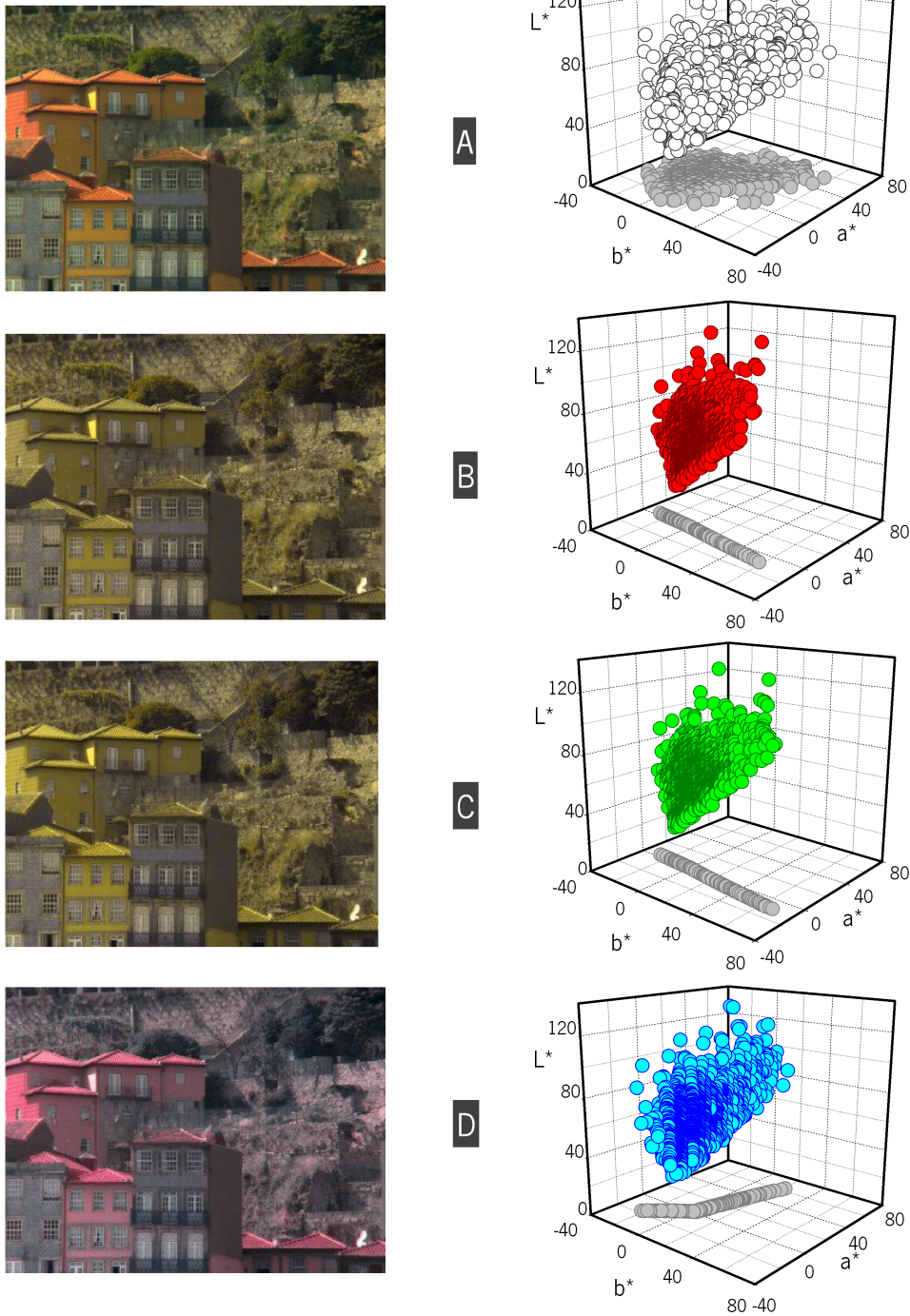


Figura 3.2 À esquerda estão representadas as cores percebidas por um observador normal (A), protanope (B), deuteranope (C) e tritanope (D), quando observa uma das cenas da base de dados. À direita estão representados os volumes CIELAB correspondentes. A cinza estão representadas as projecções do volume CIELAB em CIE ( $a^*, b^*$ ). Por uma questão de melhor visualização apenas parte dos dados estão representados nos volumes CIELAB.

A redução média na diversidade cromática percebida pelos observadores dicromatas é similar para os três tipos e de cerca de 93%, sendo que apenas discernem 7% das cores de um observador

normal. Considerando o resultado obtido para cenas individuais, a maior redução é de cerca de 96%, e a menor de 85%, também similar para os três tipos de dicromacia. A redução obtida para a imagem representada na Figura 3.2 é de 94% no caso do protanopes e deuteranopes e de 93% no caso dos tritanopes.

A Figura 3.4 representa, para cada uma das lentes coloridas analisada, a variação relativa obtida da comparação do número de cores discerníveis estimado com e sem lentes coloridas. Os dados representam a média de todas as cenas e as barras de erro o desvio padrão. Os valores negativos indicam uma redução no número de cores discerníveis e os valores positivos um aumento.

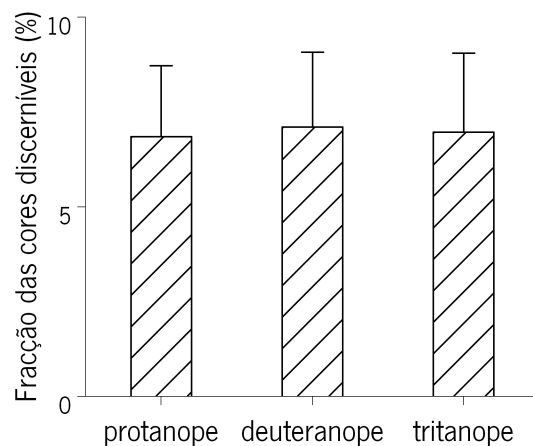


Figura 3.3 Fracção do número de cores discerníveis percebido pelos observadores protanopes, deuteranopes e tritanopes, quando comparado com um observadores tricromata normal observando a mesma cena. Os dados representam a média de todas as cenas da base de dados e as barras de erro representam o desvio padrão.

Mais detalhes sobre o efeito das lentes coloridas estão apresentados na Tabela 3.1. Para cada uma das lentes coloridas é apresentado o mínimo, o máximo e a média para todas as cenas da variação relativa do número de cores discerníveis obtido com lente e o número de cores discerníveis obtido sem lente para cada tipo de lente colorida e observador. Valores superiores a 1 indicam um aumento no número de cores discerníveis e inferiores a 1 uma diminuição. Em média o efeitos das lentes coloridas nos observadores normais é de 1.07, o que corresponde a uma melhoria; em protanopes e deuteranopes é de 0.96, o que corresponde a uma redução; e em tritanopes 1.11, o que corresponde a uma melhoria significativa. Em alguns casos, uma combinação particular de uma lente com uma cena poderão ser obtidos valores bastante superiores, como no caso da Lente 8.



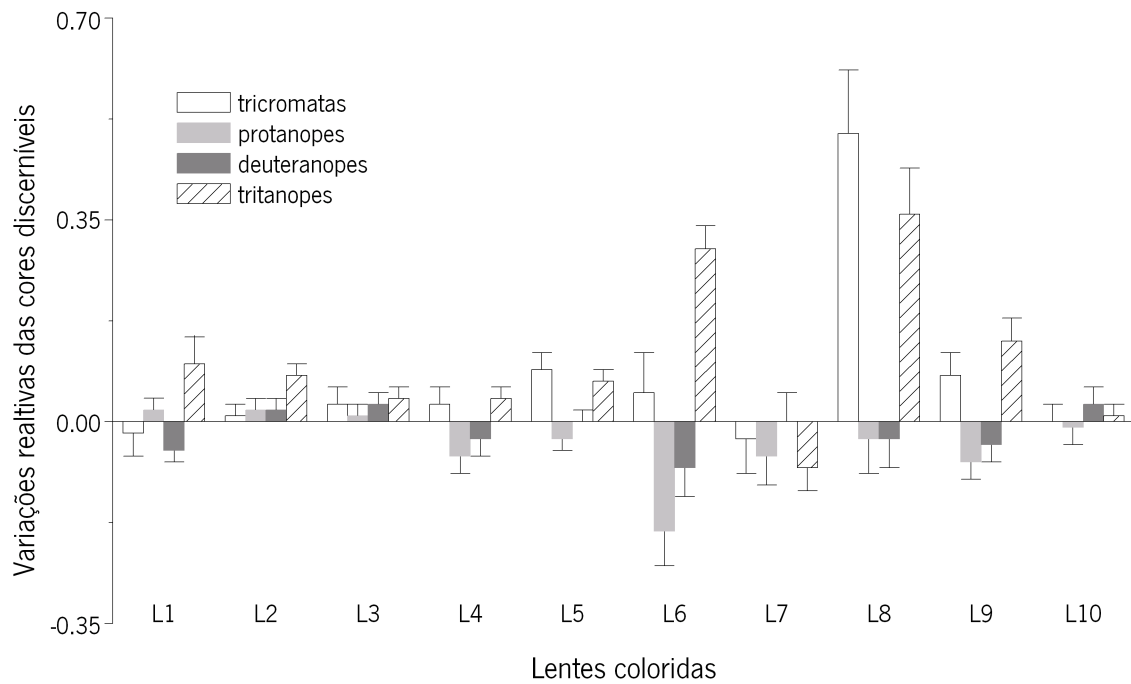


Figura 3.4 Variações relativas obtidas pela comparação do número de cores discerníveis estimado com e sem lentes coloridas. Os dados representam a média de todas as cenas e as barras de erro o desvio padrão. Os valores negativos indicam uma redução no número de cores discerníveis e os valores positivos um aumento.

Tabela 3.1 Mínimo, máximo e média para todas as cenas da variação relativa do número de cores discerníveis obtido com lente e o número de cores discerníveis obtido sem lente para cada tipo de lente colorida e observador.

Lente	tricromatas			protanopes			deuteranopes			tritanopes		
	min	máx	média	min	máx	média	min	máx	media	min	máx	média
1	0.91	1.15	0.98	0.94	1.08	1.02	0.89	1.04	0.95	1.00	1.25	1.10
2	0.96	1.12	1.01	0.97	1.10	1.02	0.96	1.09	1.02	1.03	1.15	1.08
3	0.97	1.12	1.03	0.96	1.09	1.01	0.96	1.09	1.03	1.00	1.11	1.04
4	0.98	1.16	1.03	0.89	1.03	0.94	0.92	1.05	0.97	1.00	1.14	1.04
5	1.02	1.20	1.09	0.92	1.04	0.97	0.93	1.06	1.00	1.02	1.15	1.07
6	0.92	1.25	1.05	0.68	0.96	0.81	0.85	1.04	0.92	1.18	1.40	1.30
7	0.86	1.11	0.97	0.84	1.07	0.94	0.90	1.11	1.00	0.83	1.05	0.92
8	1.28	1.74	1.50	0.80	1.19	0.97	0.88	1.10	0.97	1.20	1.51	1.36
9	1.01	1.22	1.08	0.87	1.03	0.93	0.91	1.05	0.96	1.05	1.24	1.14
10	0.95	1.08	1.00	0.93	1.08	0.99	0.95	1.09	1.03	0.96	1.07	1.01

### 3.4 Discussão

As estimativas aqui apresentadas sugerem que os observadores dicromatas percebem aproximadamente 7% das cores percebidas por observadores tricromatas normais. Apesar de existirem tentativas de modelizar a percepção da cor dos dicromatas [51,112,113,115] a questão do quão reduzida é a redução do número de cores discerníveis por observadores dicromatas ainda não foi estudada. Pode ser argumentado que o valor da redução obtido neste trabalho é demasiado baixo, dado que os dicromatas não parecem ter dificuldades em tarefas diárias com este nível de redução. No entanto este nível de redução não parece afectar a capacidade de detectar as principais características das cenas naturais, tal como pode ser observado na Figura 3.2, onde a redução no número de cores nas imagens representadas é de 94% para protanopes e deuteranopes e de 93% para tritanopes.

Este estudo baseia-se na análise de 50 imagens hiperespectrais de cenas naturais. Apesar da limitada amostra a base de dados contém uma diversidade considerável, com grandes planos, planos de proximidade, cenários urbanos e rurais, e considerando também os resultados da secção 2.3, Figura 2.4, que comprova uma boa representação da diversidade cromática disponível nos cenários naturais aos quais os seres humanos estão expostos.

A comparação da diversidade cromática obtida com e sem as lentes coloridas demonstra que a sua utilização poderá, em alguns casos, melhorar a diversidade cromática tanto de observadores normais como de observadores dicromatas. Estes resultados generalizam as descobertas de Moreland *et al.* [122] que considera o efeito do pigmento macular na visão das cores de tricromatas anómalos. As melhorias obtidas neste estudo não são especialmente significativas, em particular no caso dos observadores dicromatas, o que pode evidenciar a dificuldade em melhorar a diversidade cromática percebida por dicromatas na generalidade, mas que torna tal possível em situações específicas de combinação lente-cena natural. Apesar destes resultados fica ainda a questão de saber se observadores em situações reais percebem estas alterações como melhorias reais. Numa experiência psicofísica realizada com observadores normais [120] a diversidade cromática de pinturas artísticas era alterada continuamente ao alterar a composição espectral da iluminação a que estavam expostas. Os resultados sugeriam que pequenas alterações percentuais na diversidade cromática produziam alterações significativas na preferência dos observadores, resultado que parece indicar que as pequenas melhorias aqui descritas poderão ser visualmente relevantes.

A lente que produz o maior aumento da diversidade cromática em observadores normais, a Lente 8, possuiu um espectro bastante estruturado em algumas zonas espectrais. Este perfil espectral poderá suscitar algumas questões e até parecer inconsistente com alguns estudos anteriores que sugerem que o adelgaçamento da distribuição espectral da luz que chega aos nossos olhos tende a diminuir a discriminação cromática [63]. Os efeitos aqui descritos representam, no entanto, uma efectiva expansão do volume de cor CIELAB, e não podem ser comparados directamente com resultados de testes padrão desenhados para a luz do dia [61]. Para demonstrar o efeito da Lente 8 no volume CIELAB, 1269 amostras coloridas do livro de Munsell (Munsell Book of Color – Munsell Color Corporation, 1976) foram representadas no plano CIE ( $a^*, b^*$ ) simulando a sua percepção com e sem a Lente 8. Foi assumido o iluminante E e o observador padrão CIE 1931. O perfil espectral das reflectâncias das amostras de Munsell foi obtido do Grupo de Cor da Universidade de Joensuu (4). Os resultados estão apresentados na Figura 3.5. O resultado para as amostras observadas sem a lente está representado à esquerda e com a lente à direita.

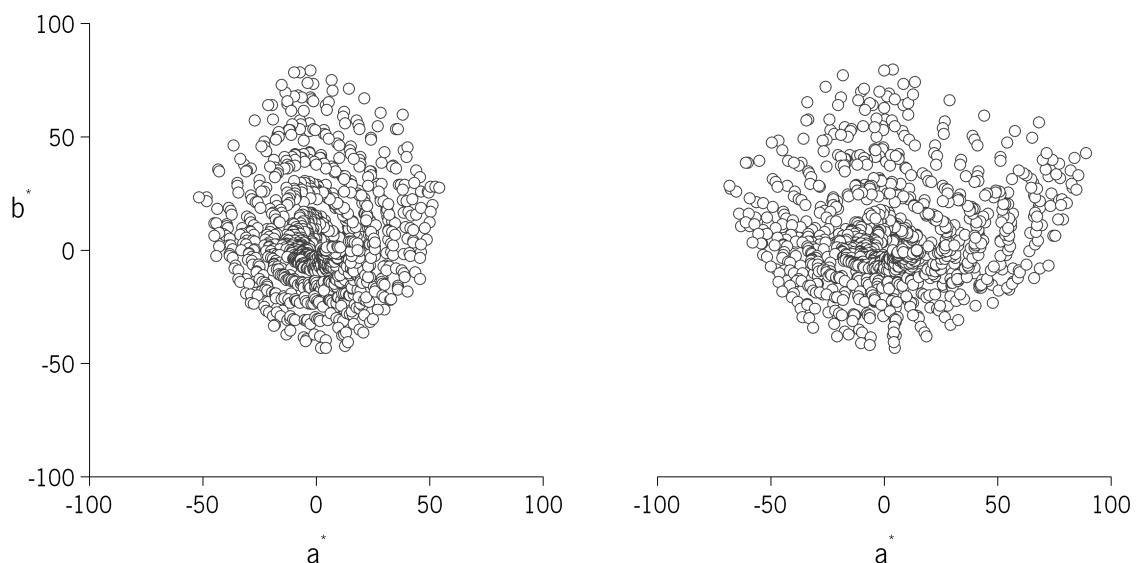


Figura 3.5 Representação em CIE ( $a^*, b^*$ ) das 1269 amostras coloridas do Munsell Color Book, assumindo o iluminante E no cálculo, quando observadas sem (esquerda) e com (direita) a Lente 8.

A segmentação do espaço CIELAB em cubos de tamanho unitário para estimar o número de cores discerníveis assume que todas as cores que estão no interior do mesmo cubo não são distinguíveis. No entanto, dada a distância entre os dois vértices mais distantes num cubo, alguns pares poderão ter uma diferença de cor superior a  $\Delta E_{ab}^* > 1$ , ou seja, superior ao limite de detecção de diferença

4 <http://spectral.joensuu.fi/> - acedida em 24-05-2011

de cor. A segmentação do espaço de cor em esferas resolveria este problema e estimaria um número de cores discerníveis de aproximadamente o dobro do método aqui utilizado [121]. Este resultado sugere que os resultados relativos aqui obtidos são robustos quando comparados com os obtidos utilizando metodologias mais precisas no cálculo do número de cores discerníveis.

O modelo de simulação de visão dicromática tem também algumas limitações na apresentação das cores simuladas [114], mas a utilização de outros modelos não altera substancialmente o resultado final [125].

O espaço de cor CIELAB não é completamente uniforme em toda a sua extensão [39,94] e existem espaços de cor mais uniformes [44,48]. Efeitos como a indução e a variação da sensibilidade visual com a estrutura espacial da imagem [106,107] não são também contemplados no espaço CIELAB. A implementação de representações de cor mais avançadas e completas, incluindo os efeitos já descritos não poderá ser feita sem um incremento significativo no custo computacional necessário, sem garantias de que tal afecte substancialmente [125] os resultados aqui apresentados.

## **4 Diversidade cromática em pinturas artísticas para observadores normais e deficientes da visão das cores e a influência de iluminantes CIE.**

### **4.1 Introdução**

A impressão visual e a apreciação de pinturas artísticas são influenciadas, para além de outros factores, pela intensidade e composição espectral do iluminante utilizado [120,126-130]. Apesar de tal influência ser vulgarmente aceite, a relação entre o perfil espectral de um iluminante e efeito visual provocado não é facilmente quantificado ou previsível.

No caso de observadores com a visão das cores normal, a qualidade de uma fonte de luz é tipicamente avaliada recorrendo ao índice de reprodução da cor (CRI – do Inglês “Colour Rendering Index”; ver secção 1.4.2), padrão de avaliação de fontes luminosas recomendado pela CIE [61,74]. O CRI avalia a reprodução da cor de oito amostras coloridas sob o iluminante de teste, quando comparado com a reprodução de um iluminante de referência (geralmente iluminante D ou radiação do corpo negro) (ver secção 1.4.2). As limitações do CRI são bastante conhecidas [131-134] e foram já sugeridos outros descritores da qualidade visual de fontes luminosas (ver secção 1.4.3), como por exemplo o índice de preferência [67,135,136], o índice de discriminação da cor [68] e o índice de gamut de área [70]. Numa tentativa de eliminar o iluminante de referência, um método baseado no volume de cor-objecto produzido pelo iluminante foi apresentado recentemente [85].

No contexto específico da iluminação de pinturas artísticas, os resultados de experiências psicofísicas utilizando imagens hiperspectrais de pinturas [120,128] indicaram que a preferência dos observadores para condições bastante específicas de iluminação poderá ser influenciada pelo número de cores discerníveis nas pinturas e que esta quantificação poderá ser utilizada como um parâmetro na avaliação dos efeitos de fontes luminosas em pinturas artísticas.

Os deficientes da visão das cores não são, por norma, considerados quando se avalia o CRI de fontes luminosas, apesar de representarem cerca de 8% dos homens e cerca de 0.5% das mulheres da população caucasiana (ver secção 1.1.1.2) [12,21]. Neste trabalho serão consideradas as anomalias da visão das cores genéticas e não as adquiridas [137,138].

A existência de modelos de visão das cores que permitem simular para observadores normais a percepção das cores de observadores dicromatas [51](ver secção 1.2.2) permite estimar o número de cores discerníveis pelos observadores dicromatas em cenas específicas (ver capítulo 3). Para além destes, existem modelos fiáveis da sensibilidade dos cones de observadores tricromatas anómalos (ver secção 1.1.1.2) [18] que permitem a simulação da sua percepção da cor e, consequentemente, a estimativa do número de cores discerníveis.

O objectivo deste trabalho é o de utilizar os modelos de simulação de cor de observadores tricromatas anómalos e dicromatas para avaliar a qualidade da iluminação de pinturas artísticas. Para tal será estimando o número de cores discerníveis por observadores normais, tricromatas anómalos e dicromatas quando observam pinturas artísticas iluminadas por diferentes iluminantes e comparar com o resultado obtido por métodos de quantificação tradicionais, como o CRI. Foi analisado o efeito de 55 iluminantes CIE em 11 pinturas a óleo de épocas diferentes. O estudo foi feito com base na análise de imagens hiperespectrais das pinturas.

## 4.2 Métodos



Figura 4.1 Imagens das 11 pinturas a óleo utilizadas neste trabalho (adaptado de [128]).

A Figura 4.1 apresenta imagens das 11 pinturas a óleo utilizadas neste trabalho. As pinturas pertencem à colecção do Museu Nogueira da Silva, Braga, Portugal e foram adquiridas utilizando o sistema hiperespectral I (ver secção 1.6.1). Sete pertencem ao período da Renascença e são

pintadas sobre madeira (A-e, H e I), e quatro (F,G,J e K) são do século XX e foram pintadas em tela (para mais detalhes sobre as pinturas consultar [128]).

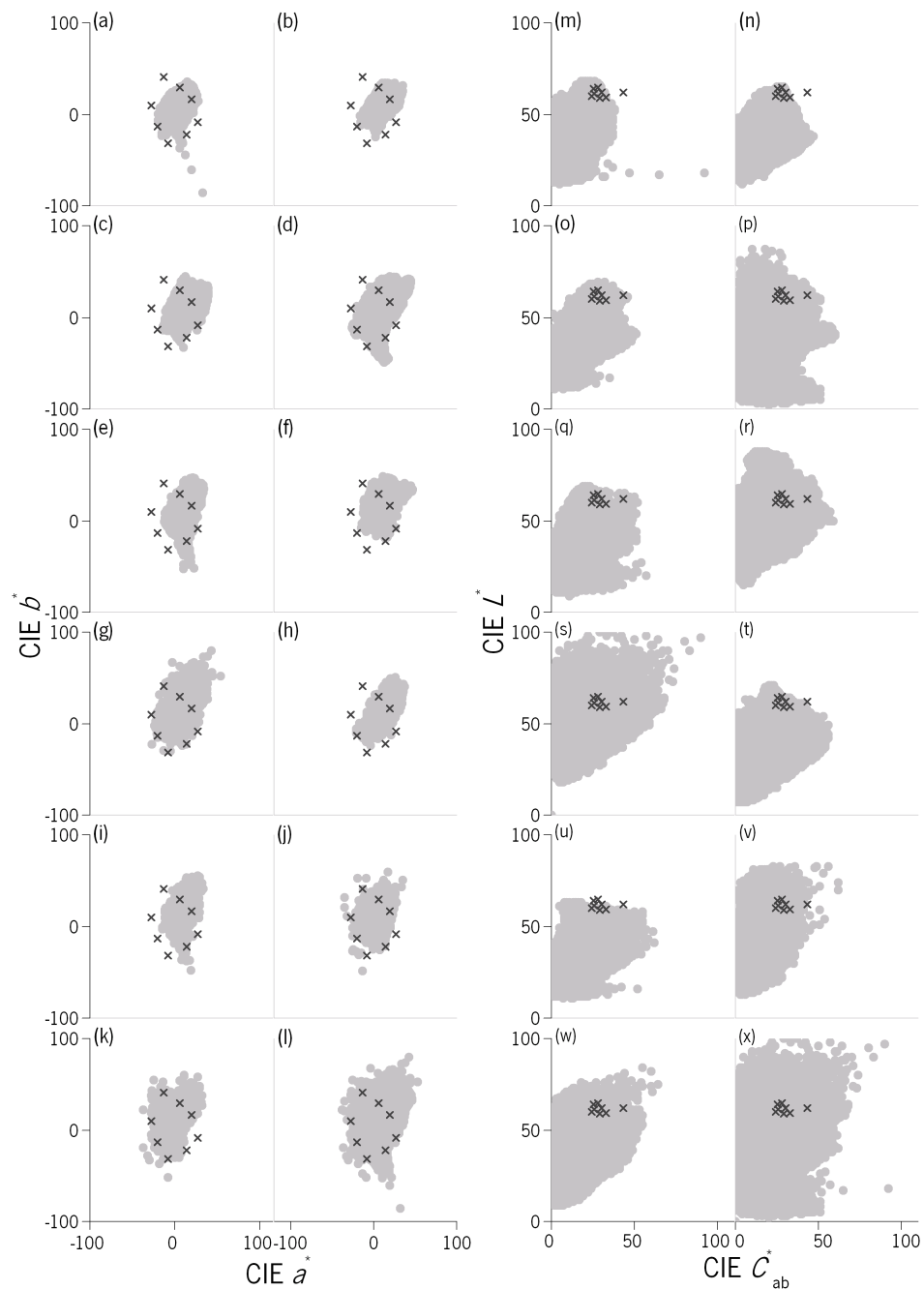


Figura 4.2 Gamut de cores de cada uma das pinturas, representadas em CIE ( $a^*, b^*$ ) e em CIE ( $C_{ab}^*, L^*$ ), assumindo o iluminante CIE A como fonte luminosa. (a) a (k) representam o gamut de cores em CIE ( $a^*, b^*$ ) das pinturas representadas na Figura 4.1. (m) a (w) representam informação relativa às mesmas pinturas, mas em CIE ( $L^*, C^*$ ). (l) e (x) representam o mesmo tipo de dados mas assumindo todas as cores de todas as pinturas numa só área em CIE ( $a^*, b^*$ ) e em CIE ( $L^*, C^*$ ), respectivamente. As 8 cores utilizadas na estimativa do CRI, iluminadas pelo iluminante CIE A estão representadas pelas cruzes.

A Figura 4.2 representa o gamut de cores de cada uma das pinturas no espaço de cor CIE ( $a^*, b^*$ ) e em CIE ( $C_{ab}^*, L^*$ ) [13] assumindo como iluminação o iluminante CIE A. As imagens (a) a (k) representam o gamut de cores em CIE ( $a^*, b^*$ ) das pinturas representadas na Figura 4.1. (m) a (w) representam informação relativa às mesmas pinturas, mas em CIE ( $L^*, C^*$ ). (l) e (x) representam o mesmo tipo de dados mas assumindo todas as cores de todas as pinturas numa só área em CIE ( $a^*, b^*$ ) e em CIE ( $L^*, C^*$ ), respectivamente. As 8 cores utilizadas na estimativa do CRI, iluminadas pelo iluminante CIE A estão representadas pelas cruzes.

A digitalização espectral das imagens (ver secção 1.6.1 e [91]) foi realizada dos 400 nm aos 720 nm em passos de 10 nm. A distância focal do sistema foi configurada para 75 mm e a abertura da lente para f/16. O sistema mantinha uma função de dispersão de linha próxima de uma função Gaussiana com um desvio padrão de  $\approx 1.3$  pixéis a 550 nm e um ângulo de captura de  $\approx 6$  graus, proporcionando desta forma uma resolução espacial equivalente à do olho humano à mesma distância de visualização, ou seja, 0.5 mm na superfície da pintura. As pinturas foram iluminadas com lâmpadas SoLux com uma temperatura correlacionada de cor (CCT) de 4 700 K e a baixa intensidade para evitar expor as pinturas a níveis elevados de radiação luminosa e consequente degradação das pinturas. A reflectância espectral de cada pixel da pintura foi estimada a partir de uma superfície de referência cinza presente na imagem, próxima da pintura, durante a aquisição das imagens. A falta de uniformidade espacial da iluminação foi compensada utilizando aquisições hiperespectrais de uma superfície de referência cinza, digitalizada no mesmo local e sob as mesmas condições de iluminação que as pinturas [120]. A precisão do sistema foi testada como descrita na secção 1.6.1.

A radiância espectral reflectida por cada pixel da pintura foi estimada a partir da reflectância obtida da digitalização hiperespectral (utilizando o procedimento descrito acima) e de um conjunto de iluminantes facultados pela CIE [13]. Os iluminantes utilizados foram o iluminante CIE A, C, 21 iluminantes CIE D (com CCT entre 25 000 K e 3 600 K em passos de 1190.3 K), 27 iluminantes fluorescentes (FL1, FL2, FL3, FL4, FL5, FL6, FL7, FL8, FL9, FL10, FL11\*, FL12, FL3.1, FL3.2, FL3.3, FL3.4, FL3.5, FL3.6, FL3.7, FL3.8, FL3.9, FL3.10, FL3.11, FL3.12, FL3.13, FL3.14, e FL3.15) e 5 iluminantes de descarga de alta pressão (HP1, HP2, HP3, HP4 e HP5). A Figura 4.3 apresenta a distribuição espectral relativa de alguns dos iluminantes utilizados. A Figura 4.4 apresenta as suas cores representadas no diagrama cromático CIE 1931. Estes iluminantes foram



escolhidos por representarem uma grande variedade de cromaticidade e CCT, permitindo que uma qualquer fonte de luz real possa ser aproximada a um dos iluminantes aqui utilizados.

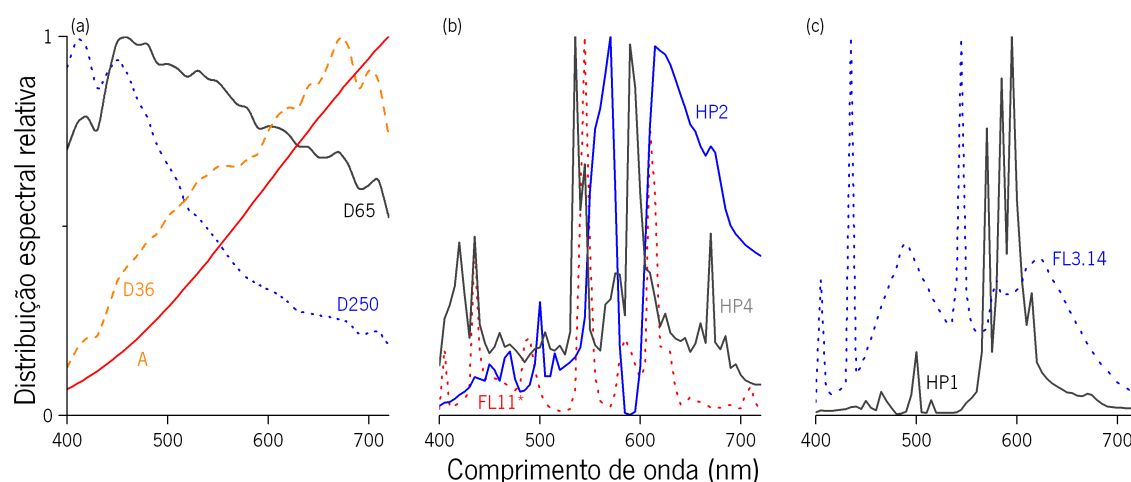


Figura 4.3 Distribuição espectral relativa de alguns dos iluminantes CIE utilizados neste trabalho. O iluminante CIE A foi utilizado como iluminante de referência em todas as estimativas aqui apresentadas.

No caso dos observadores tricromatas normais, o volume CIELAB de cada pintura iluminada por cada um dos iluminantes em análise foi estimado assumindo o observador padrão CIE 1931 [13]. O número de cores discerníveis foi estimado pela segmentação do volume CIELAB em cubos unitários e pela contagem dos cubos que continham pelo menos uma cor (ver secção 2.2). Os resultados obtidos por este meio são aceitáveis [41] e preferíveis face a outros métodos mais precisos, como a segmentação do espaço em esferas [85] (ver secção 2.2), dada a sua simplicidade de cálculo e poucos requisitos computacionais. Para além destes factos, dado que os resultados aqui apresentados são sempre relativos, variações obtidas por selecção de outros espaços, método de segmentação ou fórmulas de cor utilizadas serão, muito provavelmente, minimizadas.

No caso dos observadores dicromatas, o método utilizado para estimar o volume CIELAB para cada pintura foi o mesmo que o descrito na secção 3.2, quer para as radiâncias espectrais, quer para o branco de referência assumido em cada caso.

No caso dos observadores tricromatas anómalos foram adoptados os métodos e as considerações descritos na secção 1.2.2, assumindo as sensibilidades dos cones anómalos  $L'$  e  $M'$ , representadas na Figura 1.11, que resultam do deslocamento do cone M 10 nm no sentido de comprimentos de

onda maiores, e do deslocamento do cone L 6 nm no sentido dos comprimentos de onda menores, para os protoanómalos e deuteroanómalos, respectivamente [18]. O volume CIELAB para cada pintura foi estimado assumindo estas novas sensibilidades dos cones.

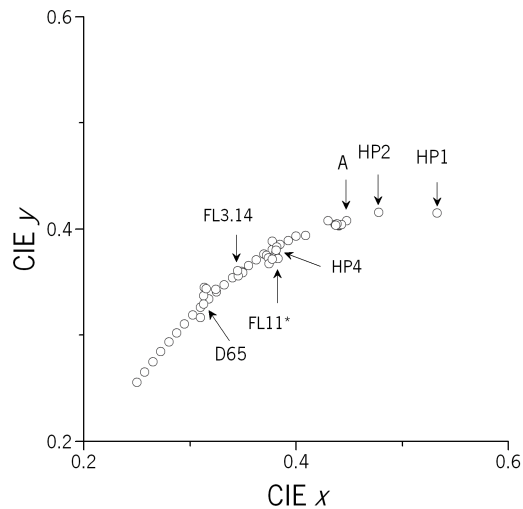


Figura 4.4 Coordenadas cromáticas dos 55 iluminantes CIE utilizados neste trabalho, representados no diagrama cromático CIE 1931. As setas indicam os melhores e os piores iluminantes estimados para os observadores normais e observadores deficientes da visão das cores.

O CRI geral  $R_a$  [61] foi estimado para todos os 55 iluminantes CIE testados, utilizando as 8 amostras coloridas descritas na secção 1.4.2 e assumindo as considerações aí descritas relativamente ao iluminante de referência. As cores destas 8 amostras iluminadas pelo iluminante CIE A estão representadas na Figura 4.2.

Todas as estimativas do número de cores discerníveis foram comparadas com as estimativas do número de cores discerníveis obtidas com o iluminante CIE A. Este iluminante foi utilizado como iluminante de referência e comparação, uma vez que poderá ainda ser o iluminante mais utilizado hoje em dia na iluminação de pinturas em museus [139]. Os resultados são estimativas médias de todas as cenas.

### 4.3 Resultados

A Figura 4.5 representa, a símbolos abertos, as variações relativas do número de cores discerníveis que cada iluminante produz, em comparação com o número de cores discerníveis produzidas pelo iluminante CIE A, para observadores normais, dicromatas e tricromatas anómalos. Cada ponto

representa os dados da média de todas as pinturas e as barras de erro representam o desvio padrão. As setas indicam, em cada caso, os pontos correspondentes ao iluminante que produz uma maior ou uma menor variação do número de cores discerníveis. Os símbolos cinza representam a razão entre o CRI geral  $R_a$  de cada um dos iluminantes CIE testados e o CRI geral do iluminante A ( $R_a^A$ ).

O número de cores discerníveis relativo varia consideravelmente de iluminante para iluminante, para todo o tipo de observadores. No caso dos observadores normais, o aumento máximo no número de cores discerníveis face ao iluminante CIE A é de cerca de 14% e acontece para o iluminante CIE FL11\*, e a diminuição máxima acontece com o iluminante CIE HP1 e é de cerca de 40%. Tal como esperado, os observadores deuteranopes e protanopes apresentam o mesmo tipo de variação. Já no caso dos deuteranómalos e protoanómalos o tipo de variação é diferente, sendo consideravelmente diferente no caso dos tritanopes.

O melhor iluminante para observadores normais é o CIE FL11\*, e é também um dos melhores para os outros tipos de observadores, mas não é necessariamente o melhor em cada um dos casos. O iluminante CIE HP4 é o melhor para os deuteranopes, protanopes e protoanómalos, e está muito próximo do melhor iluminante no caso dos deuteranómalos

A melhoria no número de cores discerníveis conseguidas para os observadores normais foi de 14% (com o iluminante CIE FL11\*), para tritanopes foi de 12% (com o iluminante CIE FL3.14), para deuteranopes foi de 18% (com o iluminante CIE HP4), para protanopes foi de 30% (com o iluminante CIE HP4), para deuteranómalos foi de 6% (com o iluminante CIE HP2) e para protoanómalos foi de 26% (com o iluminante CIE HP4).

Para demonstrar o efeito que diferentes iluminantes produzem nas pinturas para os diferentes tipos de observadores aqui estudados, a Figura 4.6 apresenta, usando como exemplo a pintura K representada na Figura 4.1, o efeito produzido no gamut cromático da pintura pelo melhor e pelo pior iluminante, para os diferentes tipos de observadores. O gamut cromático produzido pelo melhor iluminante é claramente superior ao produzido pelo pior iluminante, explicando-se assim o aumento no número de cores.

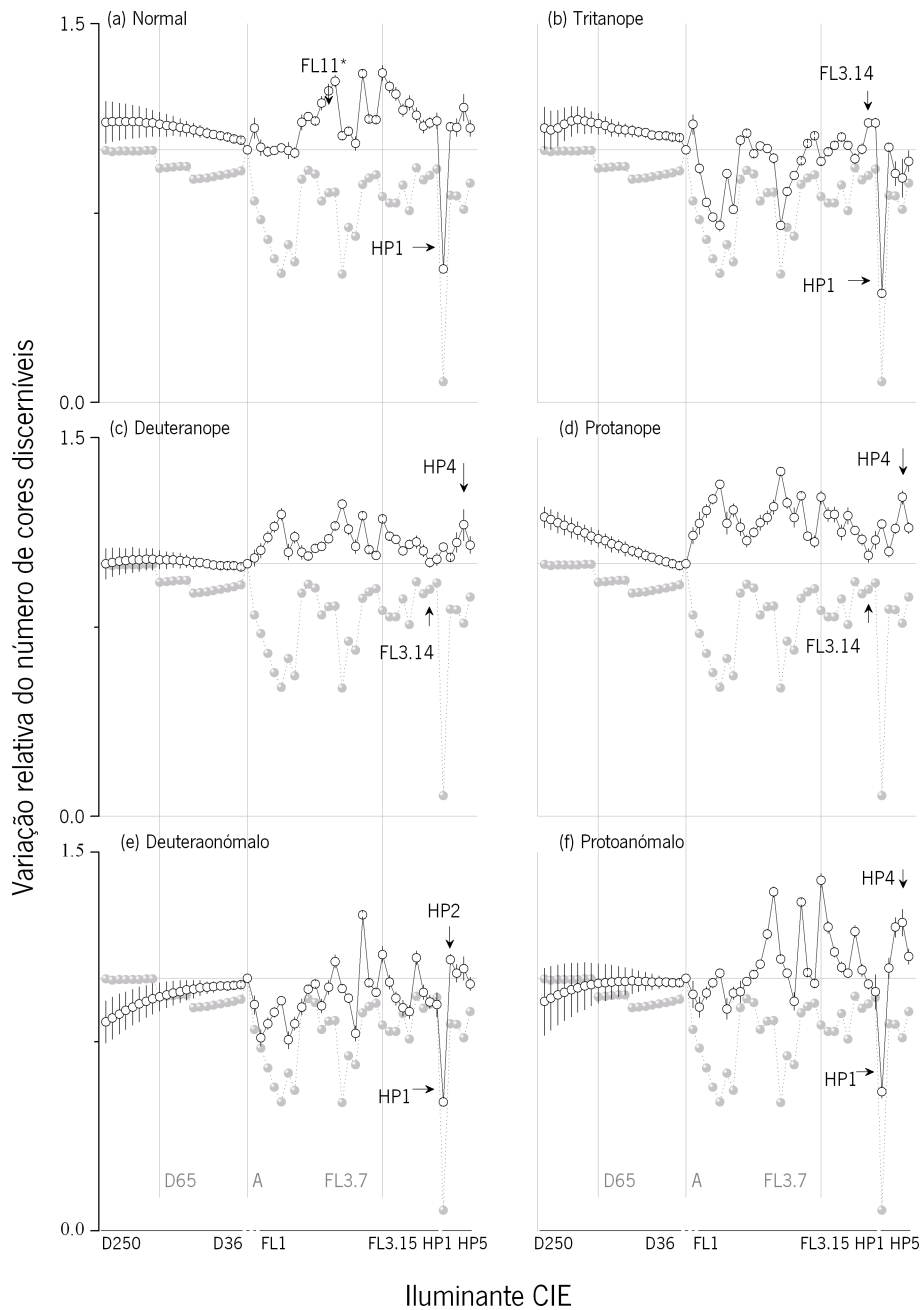


Figura 4.5 Variações relativas do número de cores discerníveis para cada iluminante para observadores normais (a), tritanopes (b), deuteranopes (c), protanopes (d), deuteroanómalos (e) e protoanómalos (f) (símbolos abertos). As estimativas foram efectuadas assumindo como referência o iluminante CIE A. Cada ponto representa a média de todas as pinturas, e as barras de erro o desvio padrão. As setas indicam, para cada tipo de observador, o iluminante que produz o valor máximo e mínimo do número de cores discerníveis. Os símbolos a cinza representam a razão entre o CRI ( $R_a$ ) de cada um dos iluminantes testados e o CRI do iluminante CIE A ( $R_a^A$ ).

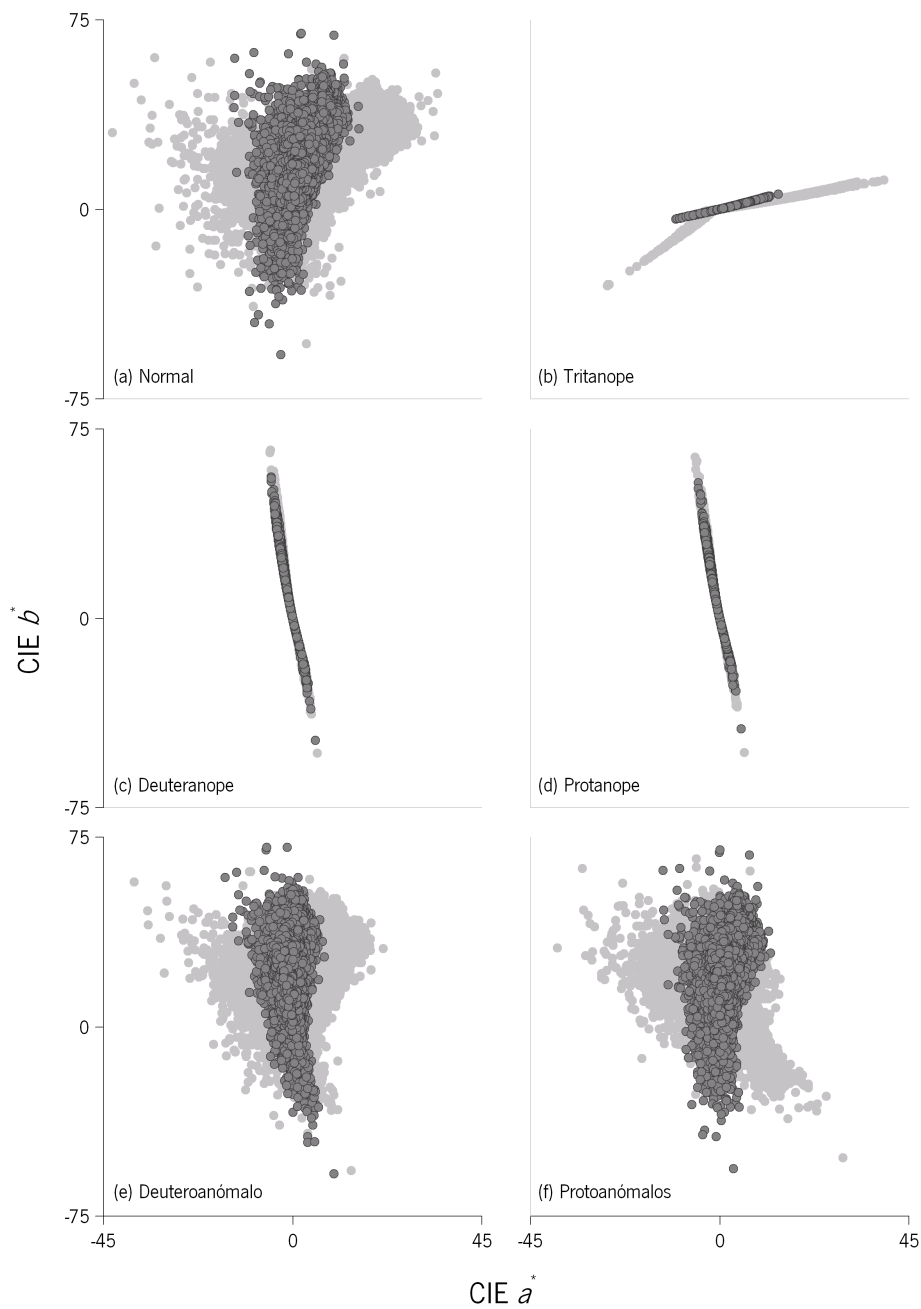


Figura 4.6 Gamut de cores da pintura K (ver Figura 4.1) assumindo a pintura iluminada pelo melhor (símbolos cinza claro) e pelo pior iluminante (símbolos cinza escuro) para todos os tipos de observadores estudados.

No caso dos observadores normais, existe alguma correlação entre o CRI geral ( $R_a$ ) e o número de cores discerníveis, mas o primeiro não pode ser utilizado para estimar o último com rigor, tal como representado na Figura 4.5. No caso dos observadores deficientes da visão das cores, a correlação é ainda menor, com o máximo de um coincidir com o mínimo do outro. Para melhor avaliar esta correlação a Figura 4.7 representa a razão entre o CRI geral  $R_a$  de cada um dos iluminantes CIE e o CRI geral do iluminante CIE A  $R_a^A$  representado em função da variação relativa do número de

cores discerníveis. As linhas rectas representam a regressão linear e a proporção da variância  $R^2$  considerada em cada caso é também representada.

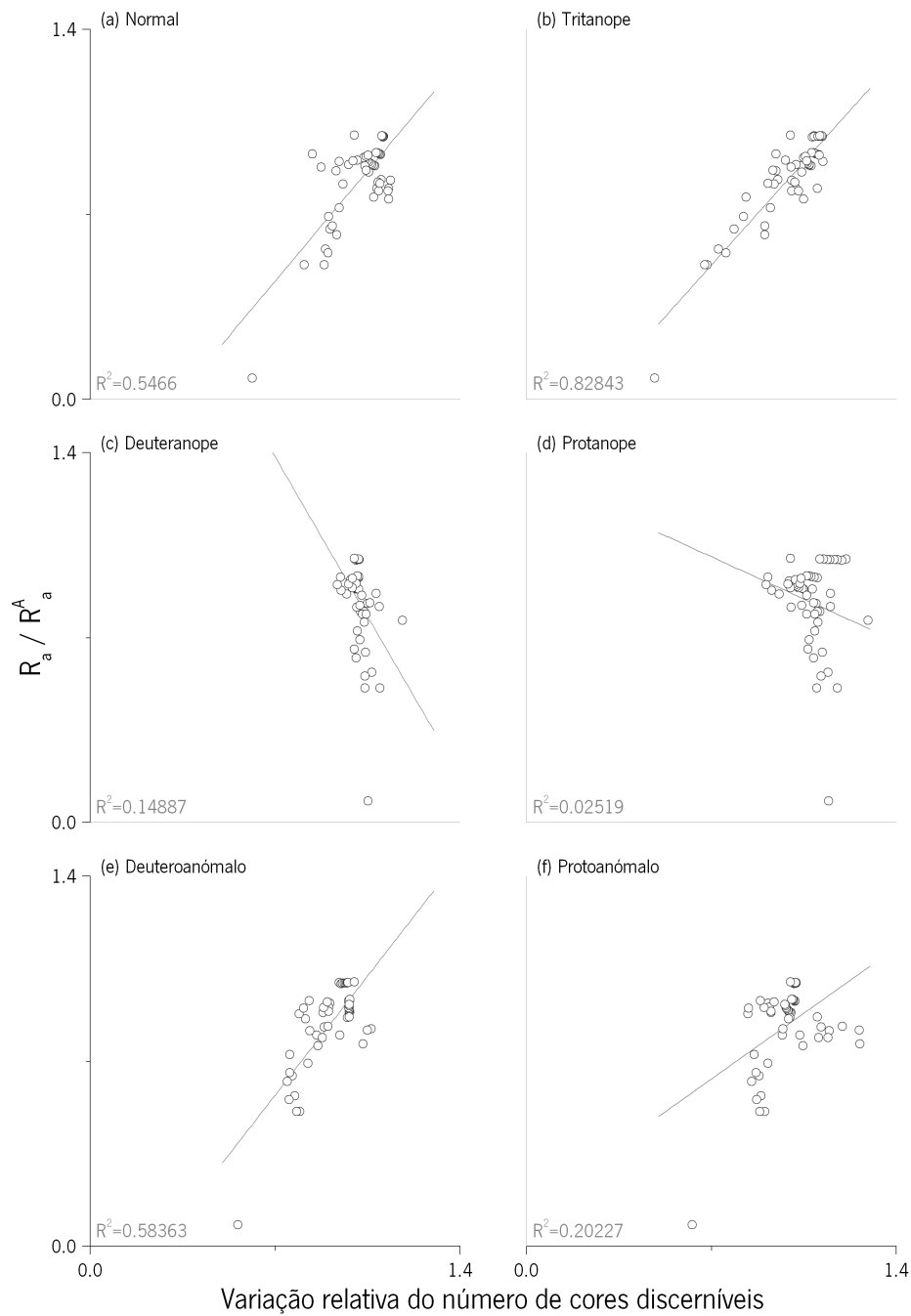


Figura 4.7 Razão entre o CRI ( $R_a$ ) de cada um dos iluminantes testado e o CRI ( $R_a^A$ ) do iluminante CIE A em função da variação relativa número de cores discerníveis (em relação ao iluminante CIE A) estimada para os observadores normais (a), tritanopes (b), deuteranopes (c), protanopes (d), deuteroanómalos (e) e protoanómalos (f). As linhas rectas representam a regressão linear e a proporção da variância  $R^2$  considerada em cada caso é também representada.

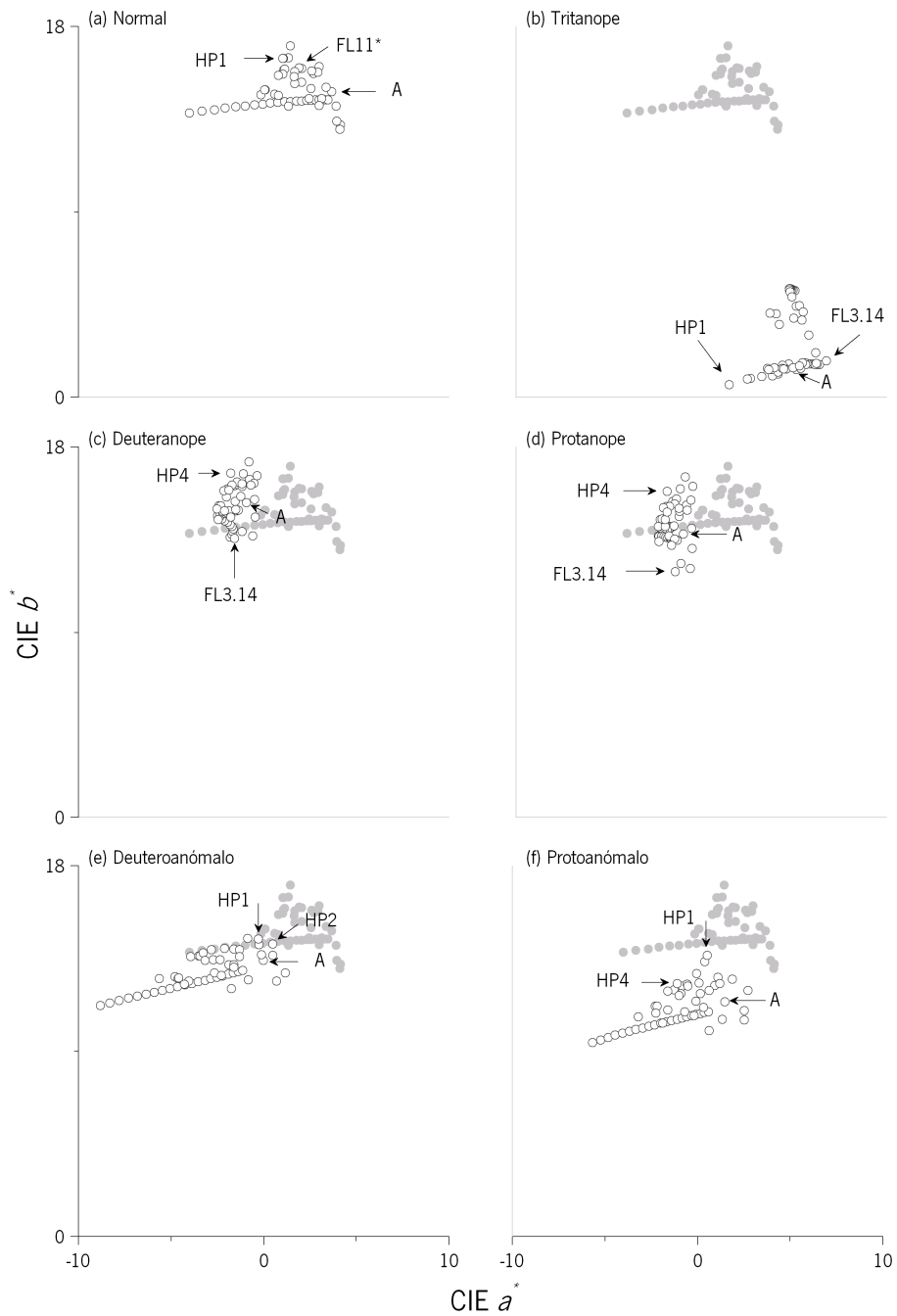


Figura 4.8 Os símbolos abertos representam a média das coordenadas cromáticas CIE ( $a^*, b^*$ ) das pinturas da Figura 4.1 iluminadas por cada um dos 55 iluminantes utilizados neste estudo para observadores normais (a), tritanopes (b), deuteranopes (c), protanopes (d), deuteranômalo (e) e protoanômalo (f). Os símbolos cinza representam a média das coordenadas cromáticas CIE ( $a^*, b^*$ ) para observadores normais. As setas indicam o melhor e o pior iluminante, assim como o iluminante de referência, o iluminante CIE A, utilizado nas estimativas apresentadas.

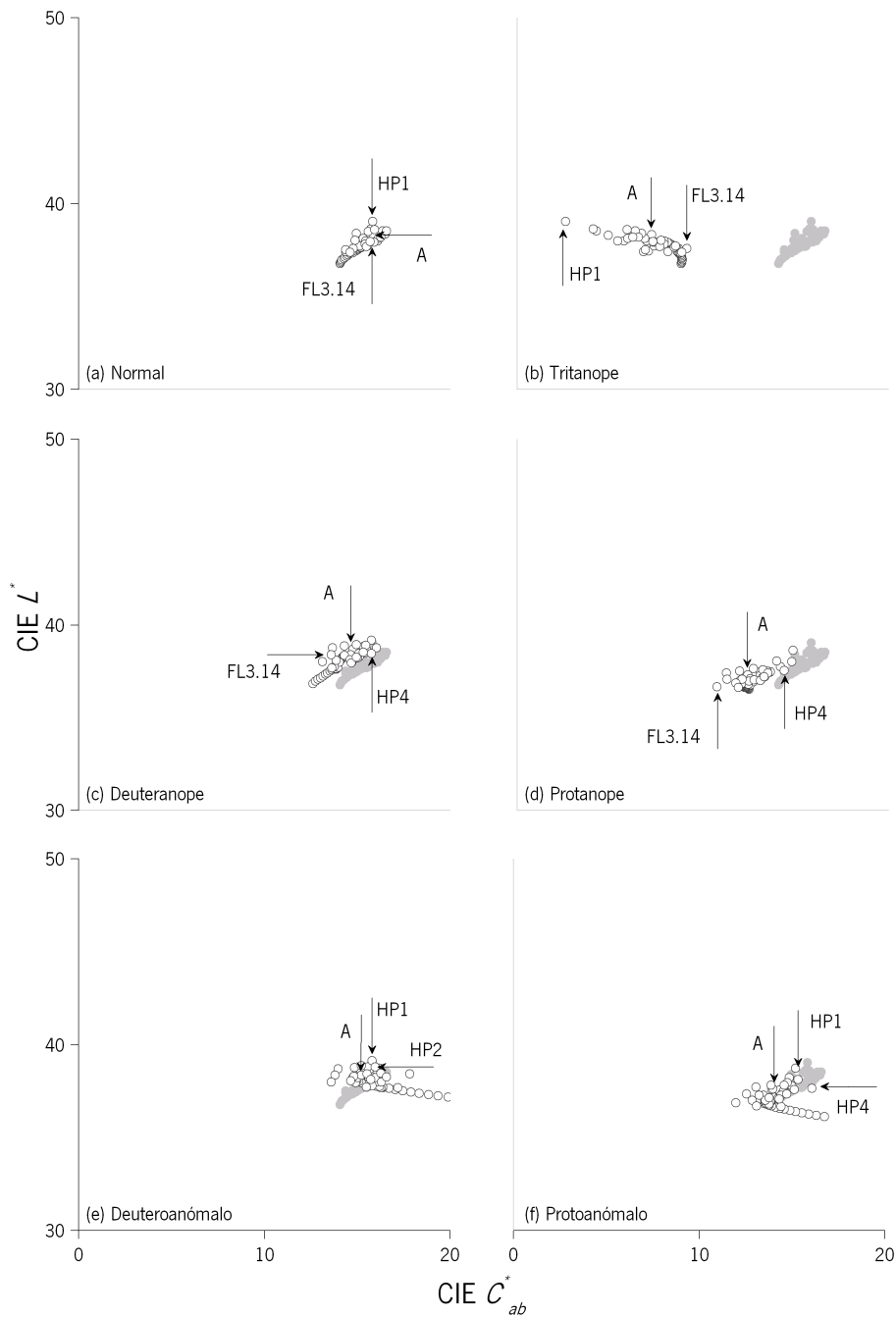


Figura 4.9 Representa o mesmo que a Figura 4.8 mas representando os dados em CIE( $C_{ab}^*$ ,  $L^*$ ).

Consistente com o resultado obtido para cenas naturais [140] (ver também capítulo 3), o número absoluto de cores discerníveis em pinturas artísticas estimado para observadores dicromatas é substancialmente reduzido, quando comparado com o número obtido para observadores normais. A redução é de cerca de 92%, 90% e 91% para tritanopes, deuteranopes e protanopes, respectivamente, e de cerca de 30% e 22% para deuteranoanômalos e protoanômalos, respectivamente.



Para avaliar as alterações à impressão global das cores das pinturas produzidas pelos iluminantes CIE utilizados, a cor média de todas as pinturas foi estimada para cada um dos iluminantes e observadores em estudo. A Figura 4.8 apresenta os resultados no diagrama de cor CIE( $a^*$ , $b^*$ ) e a Figura 4.9 apresenta os resultados no diagrama de cor CIE( $C_{ab}^*$ , $L^*$ ). Para facilitar a comparação, os dados relativos aos observadores normais são apresentados (com símbolo cinza) em todos os painéis da figura. De realçar que o que é representado é a cor que realmente é percebida pelo observador, normal ou deficiente da visão das cores. As variações da cor média com os iluminantes são pequenas, sugerindo pouca alteração à cor global da pintura com os iluminantes CIE utilizados.

#### **4.4 Discussão**

Neste trabalho avaliamos a capacidade de um conjunto de iluminantes de produzir cores em pinturas artísticas, para observadores normais e deficientes da visão das cores. Verificou-se que alguns iluminantes produzem bons resultados em todos os casos, excepto para tritanopes, o que sugere que será possível obter boas condições de iluminação de pinturas artísticas em simultâneo para observadores normais e deficientes da visão das cores com a escolha do iluminante adequada.

A redução da diversidade cromática em pinturas artísticas estimada neste trabalho é, no caso de observadores dicromatas, similar à redução estimada em cenas naturais, apesar das diferenças no gamut cromático entre os dois tipos de cenas [140]. No caso de tricromatas anómalos a redução é menor e entre os 20% a 30%. Apesar desta redução é possível, em todos os casos, aumentar o número de cores discerníveis em relação ao iluminante CIE A, utilizando para o efeito um iluminante especialmente escolhido para o efeito.

Os aumentos encontrados no número de cores discerníveis utilizando alguns iluminantes pode ser interpretado como uma expansão do volume cromático e, assim, ser considerado um aumento na discriminação cromática. Este resultado é consistente com trabalhos anteriores que utilizaram amostras coloridas de Munsell [140] (ver secção 3.4), cores óptimas [85] ou até amostras do teste de 100 tonalidades Farnsworth-Munsell [70]. Os iluminantes CIE FL11\* e CIE HP4 produzem, na maioria dos casos, aumentos no número de cores discerníveis. Os dois iluminantes possuem três bandas espectrais principais com máximos na zona vermelha, verde e azul do espectro da luz visível e verificou-se que são os melhores para observadores normais (CIE FL11\*), deuteranopes (CIE HP4), protanopes (CIE HP4) e protoanómalos (CIE HP4).

Verificou-se que a correlação entre o número de cores discerníveis e o CRI é bastante baixa para observadores normais e em particular para observadores deficientes da visão das cores. Este resultado sugere que o CRI poderá não ser o índice adequado para estimar a capacidade de fontes luminosas em produzir cor, em particular para observadores deficientes da visão das cores. É também pouco provável que seja possível utilizar um único índice capaz de abranger a complexidade dos efeitos visuais produzidos por fontes luminosas, sendo, eventualmente, necessários vários índices para o conseguir. No entanto a discriminação cromática assume particular interesse no caso dos observadores deficientes da visão das cores, em particular na apreciação de pinturas artísticas. Estes observadores estão à partida em desvantagem, e para este caso o número de cores discerníveis poderá ser uma boa ferramenta para classificar os efeitos cromáticos de fontes luminosas.

Os resultados aqui apresentados baseiam-se num modelo de visão dicromática que é sabido não a descrever completamente [114]; para além deste facto, o cálculo do número de cores pela segmentação do volume de cor, é realizado em CIELAB, um espaço de cor conhecido pela sua falta de uniformidade, em particular nas cores azuis e cinzas [39,48]. A segmentação do volume de cor em cubos unitários é também realizada assumindo que todas as cores que se encontrem no interior do mesmo cubo não podem ser distinguidas, no entanto, alguns pares possuem uma diferença de cor  $\Delta E_{ab}^* > 1$ . A utilização de esferas unitárias na segmentação do volume de cor permitiria ultrapassar este problema mas alguns estudos [141] sugerem que estimativas relativas do número de cores discerníveis proporcionam estimativas robustas e aproximadas a outras metodologias que poderiam ser utilizadas para um cálculo mais preciso do número de cores discerníveis.

A base de dados das pinturas utilizadas é também limitada em número e tipo de pintura, e a generalização destes resultados deverá ser feita com prudência, no entanto as pinturas utilizadas possuem uma diversidade cromática substancialmente superior às amostras utilizadas para estimar o CRI, norma actual na caracterização de uma fonte de luz.

Apesar destas limitações, os dados apresentados aqui sugerem que é possível encontrar boas condições de iluminação para todos os tipos de observadores, desde que seja seleccionado o iluminante adequado, informação que poderá ser útil para museus e galerias de arte.

## **5 Diversidade cromática em cenários de interior para observadores normais e deficientes da visão das cores e a influência de iluminantes CIE e fontes de luz LED.**

### **5.1 Introdução**

A impressão visual provocada pela observação de uma imagem é fortemente influenciada pela composição espectral da iluminação que sobre ela incide [64,127-130,142,143] e, de um ponto de vista prático, a avaliação do efeito na visão de fontes de luz é um aspecto importante da ciência das cores [144].

Os efeitos cromáticos produzidos por fontes de luz são quantificados por índices de reprodução da cor (ver secção 1.4.3 e [62] para uma revisão dos índices). Um dos aspectos tipicamente avaliado é o efeito produzido pelo iluminante na aparência de objectos coloridos, em comparação com o efeito produzido nos mesmos objectos por um iluminante de referência. O método padrão utilizado no momento é o CRI [61] mas possui as limitações e foram já propostas algumas alternativas ao CRI, já descritas anteriormente (ver secção 1.4.3), mas sem aceitação formal por parte da CIE.

Uma das limitações destes novos índices, mesmo daqueles que se baseiam no cálculo da área ou do volume produzido por um determinado iluminante num conjunto de amostras coloridas [70,71], é a limitada variedade cromática utilizada nas amostras em análise, análise da qual poderá ser difícil extrair informação generalizável para cenários mais complexos com a utilização de iluminação LED [145,146]. Tais limitações poderão ser ultrapassadas considerando cenas complexas na sua totalidade [147] ou a utilização das fronteiras do espaço de cor-objecto [71,85,148]. Outra limitação é a definição dos índices apenas para observadores com a visão das cores normal, sendo que os efeitos para observadores com deficiências na visão das cores não são por norma considerados.

Este trabalho pretende avaliar a qualidade de 55 iluminantes CIE e 5 fontes de luz LED estimando o número de cores discerníveis que os iluminantes produzem em objectos encontrados tipicamente em cenários de interior, para observadores normais e com deficiências na visão das cores. A metodologia aqui empregue é semelhante à utilizada por Xu [133] que estimou o volume de cor dos limites teóricos definidos pelas cores óptimas [57,58] no espaço CIELUV.

## 5.2 Métodos



Figura 5.1 Imagens das cenas analisadas. As três imagens representadas à direita fazem parte de uma base de dados pública de imagens hiperespectrais [149], e as outras 12 foram adquiridas no nosso laboratório.

A Figura 5.1 mostra imagens das cenas utilizadas neste trabalho. As três cenas representadas à direita fazem parte de uma base de dados pública de imagens hiperespectrais (disponibilizadas por David Brainard [149]), e as outras 12 foram adquiridas no nosso laboratório. As imagens disponibilizadas por Brainard foram adquiridas entre 400 nm e 700 nm em passos de 10 nm utilizando filtros de interferência de banda estreita (10 nm de largura a meia altura) e uma câmara digital monocromática com uma resolução espacial de 2000 x 2000 pixéis e 12-bits de saída [150]. As imagens adquiridas no nosso laboratório foram digitalizadas utilizando o sistema hiperespectral II (ver secção 1.6.1 e 1.6.2).

As cenas utilizadas contêm objectos que se encontram tipicamente em cenários de interior, como livros, tecidos coloridos, brinquedos, artigos de escritório, fruta, vegetação de interior, entre outros. Para as imagens do David Brainard, a reflectância espectral de cada pixel foi obtida dividindo os dados em bruto pelo espectro do iluminante da cena obtido a partir de uma referência colocada na imagem numa dada localização. Para as imagens obtidas no nosso laboratório o procedimento para obter a reflectância espectral foi o mesmo que o executado para as pinturas artísticas descritas na secção 4.2 e em [128,147]. Em todos os casos o espectro de reflectância foi linearmente interpolado para passos de 5 nm, para desta forma melhor utilizar a informação espectral dos

iluminantes utilizados (com uma distribuição espectral muito estruturada e bandas espectrais estreitas).

O espectro da radiância de cada pixel de cada imagem foi estimado multiplicando o espectro de reflectância de cada pixel pela distribuição espectral de cada um dos 60 iluminantes da base de dados de iluminantes utilizada. Os iluminantes utilizados estavam definidos num intervalo espectral dos 400 nm aos 720 nm em passos de 5 nm para as nossas imagens e dos 400 nm aos 700 nm em passos de 5 nm para as imagens do David Brainard.

Foram utilizados os 55 iluminantes CIE já descritos na secção 4.2, e 5 fontes de luz LED brancas. Os LED brancos utilizados foram LXHL-BW02, LXHL-BW03, LXML-PWC1-0100, LXML-PWN1-0100 e LXML-PWW1-0060 (Luxeon, Philips Lumileds Lighting Company, EUA). Estes LED foram escolhidos para este trabalho, uma vez que são amplamente utilizados e são vendidos por uma das maiores companhias de iluminação disponíveis. A Figura 5.2 representa a sua distribuição espectral relativa. Os outros iluminantes foram escolhidos porque representam uma grande variedade de cromaticidade, CRI e CCT, incluindo iluminantes fluorescentes e lâmpadas de descarga de grande potência (consulte [13] para obter os dados tabelados).

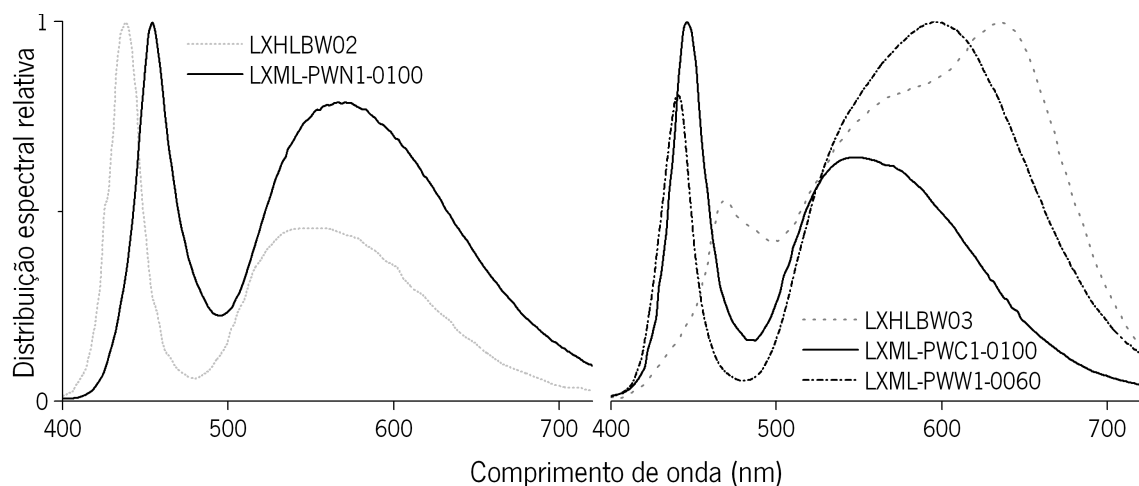


Figura 5.2 Distribuição espectral relativa das 5 fontes de luz LED utilizadas neste trabalho (Luxeon, Philips Lumileds Lighting Company, EUA). Os gráficos foram construídos a partir dos dados disponibilizados pelo fabricante (em anexo).

No caso dos observadores tricromatas normais, o volume CIELAB de cada cena iluminada por cada um dos iluminantes em análise foi estimado assumindo o observador padrão CIE 1931 [13]. O

número de cores discerníveis foi estimado pela segmentação do volume CIELAB em cubos unitários e pela contagem dos cubos que continham pelo menos uma cor (ver secção 2.2). Os resultados obtidos por este meio são aceitáveis [41] e preferíveis face a outros métodos mais precisos, como a segmentação do espaço por esferas [85] (ver secção 2.2), dada a sua simplicidade de cálculo e poucos requisitos computacionais. Dado que os resultados aqui apresentados são sempre relativos, variações obtidas por selecção de outros espaços, método de segmentação ou fórmulas de cor utilizadas são, muito provavelmente, minimizadas.

No caso dos observadores dicromatas, o método utilizado para estimar o volume CIELAB para cada cena foi o mesmo que o descrito na secção 3.2, quer para as radiâncias espectrais, quer para o branco de referência assumido em cada caso.

No caso dos observadores tricromatas anómalos foram adoptados os métodos e as considerações descritos na secção 1.2.2, assumindo as sensibilidades dos cones anómalos  $L'$  e  $M'$ , representadas na Figura 1.11, que resultam do deslocamento do cone M 10 nm no sentido de comprimentos de onda maiores, e do deslocamento do cone L 6 nm no sentido dos comprimentos de onda menores, para os protoanómalos e deuteroanómalos, respectivamente [18]. O volume CIELAB para cada cenário foi estimado assumindo estas novas sensibilidades dos cones. Subjacente a este método está o pressuposto de que a estimativa da cor para tricromatas anómalos se baseia no facto de que a mesma excitação dos cones produz a mesma percepção em tricromatas anómalos e em observadores normais.

O número de cores discerníveis foi estimado para os observadores com deficiências na visão das cores da mesma forma que o método utilizado para os observadores normais.

Todas as estimativas do número de cores discerníveis para cada um dos iluminantes da base de dados foram comparadas com as estimativas do número de cores discerníveis obtidas para o iluminante CIE A. Este iluminante foi utilizado para comparação dada a sua ampla utilização, mesmo em interiores apesar do aumento da iluminação fluorescente e LED, e dada ampla divulgação das suas especificações.

O CRI foi estimado para cada iluminante, estimando o CRI geral  $R_a$  e o  $R_b$  (ver secção 1.4.2) obtido utilizando as 8 e as 14 amostras coloridas de Munsell recomendadas pela CIE [61], respectivamente. O GAI [70] foi calculado estimando a área do polígono definido pelas coordenadas cromáticas das 8 amostras coloridas de Munsell, utilizadas no cálculo do CRI, iluminadas pelo iluminante de teste, no espaço CIE 1964 [13].

### 5.3 Resultados

A Figura 5.3 demonstra os efeitos cromáticos provocados pela distribuição espectral de dois iluminantes diferentes, representados no espaço de cor CIELAB. Na imagem da esquerda está representado o efeito do iluminante CIE FL3.8 e na da direita o iluminante CIE HP1, para a diversidade cromática da cena representada pela figura. Estes iluminantes produzem o maior e o menor número de cores discerníveis para a cena apresentada, respectivamente, correspondendo a uma variação aproximada de 2 vezes.

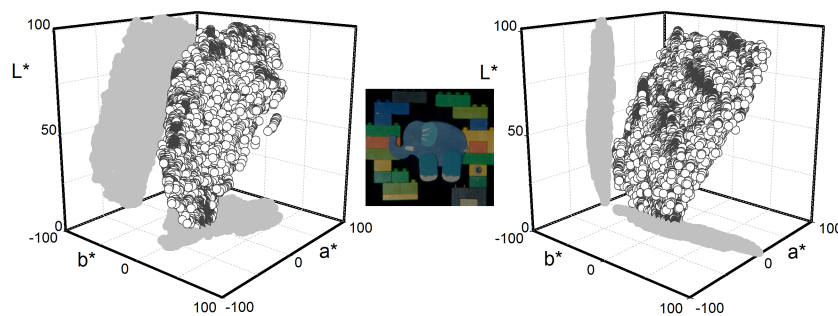


Figura 5.3 Representação dos efeitos cromáticos nas cores de uma cena, produzidos por iluminantes com distribuição espectral diferente. À esquerda está representado o volume de cor CIELAB produzido pelo iluminante CIE FL3.8 e à direita o volume de cor CIELAB produzido pelo iluminante CIE HP1.

A Figura 5.4 representa a média para todas as cenas do número relativo de cores discerníveis obtido a partir da razão entre o número de cores discerníveis de cada iluminante e o número de cores discerníveis obtido para o iluminante CIE A. A linha circular cinza representa a localização do iluminante CIE A (círculo unitário), os símbolos circulares representam os resultados para as cenas obtidas no nosso laboratório e as cruzes representam os dados para as outras três cenas. A coluna da esquerda representa os iluminantes CIE D, A e C, a coluna central os iluminantes CIE FL e HP e a coluna da direita os LED. Em cada linha estão representados os resultados para os observadores normais (a), tritanopes (b), deuteranopes (c), protanopes (d), deuteroanómalos (e) e protoanómalos (f). Em cada caso o melhor iluminante está assinalado por uma linha recta cinza e sombreado a cinza.

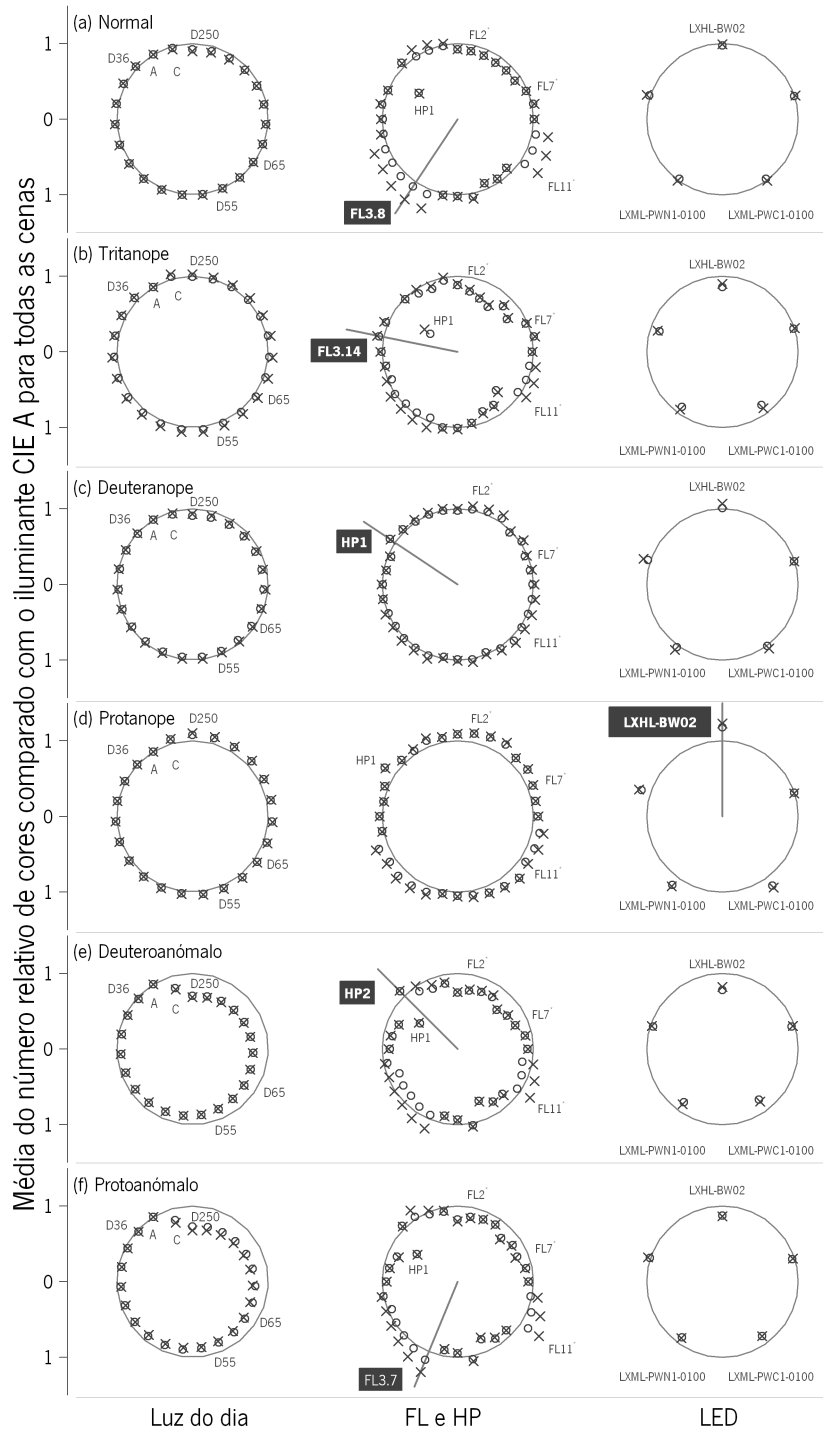


Figura 5.4 Média de todas as cenas do número relativo de cores discerníveis obtido a partir da razão entre o número de cores discerníveis de cada iluminante e o número de cores discerníveis obtido para o iluminante CIE A. A linha circular cinza representa a localização do iluminante CIE A (círculo unitário), os símbolos circulares representam os resultados para as cenas obtidas no nosso laboratório e as cruzes representam os dados para as outras três cenas. A coluna da esquerda representa os iluminantes CIE D, A e C, a coluna central os iluminantes CIE FL e HP e a coluna da direita os LED. Em cada caso o melhor iluminante está assinalado por uma linha recta cinza e sombreado a cinza.



Os iluminantes da luz do dia (iluminantes CIE D) apresentam efeitos similares através do intervalo de CTT analisado, excepto para o caso dos observadores deuteroanómalos e protoanómalos, onde a diversidade cromática diminui com o aumento da CCT. No caso dos iluminantes CIE FL e HP a diversidade cromática é muito mais variável com o iluminante utilizado e para o tipo de observador. Por exemplo, no caso de observadores normais, o iluminante CIE HP1 reduz o número de cores discerníveis cerca de 40%, no entanto é o melhor iluminante no caso dos observadores deuteranopes, onde aumenta a diversidade cromática cerca de 8%. Os melhores iluminantes foram o FL3.8, FL3.14, HP1, LXHL-BW02, HP2 e FL3.7 com melhorias de cerca de 7.5% ( $\pm 2.5$ ), 6% ( $\pm 4$ ), 8% ( $\pm 2$ ), 18% ( $\pm 6$ ), 7.5% ( $\pm 2.5$ ) e 12% ( $\pm 2.3$ ) para observadores normais, tritanopes, deuteranopes, protanopes, deuteroanómalos e protoanómalos, respectivamente (os números entre parênteses representam o desvio padrão). Estes resultados são similares para os dois conjuntos de bases de dados hiperspectrais.

Tabela 5.1 Proporção da variância  $R^2$  considerada na regressão linear do  $GAI/GAI_A$ ,  $GAI^{(a^*,b^*)}/GAI_A^{(a^*,b^*)}$ ,  $R_a/R_a^A$  e  $R_b/R_b^A$  em função da variação média do número relativos de cores discerníveis. O A maiúsculo indicado em índice representa os dados obtidos para o iluminante CIE A em cada caso.

<b>Observador</b>	$GAI/GAI_A$	$GAI^{(a^*,b^*)}/GAI_A^{(a^*,b^*)}$	$R_a/R_a^A$	$R_b/R_b^A$
<b><math>R^2</math></b>				
Normal	0.11	0.96	0.21	0.14
Tritanope	0.48	0.74	0.86	0.84
Deuteranope	0.77	0.07	0.58	0.66
Protanope	0.06	0.33	0.46	0.55
Deuteroanómalo	0.05	0.55	0.06	0.04
Protoanómalo	0.11	0.44	0.00	0.00

Numa tentativa de investigar a relação entre a diversidade cromática estimada pelo número de cores discerníveis e outros métodos mais convencionais de avaliar o índice de reprodução da cor, O CRI e o GAI foram calculados para todos os iluminantes e comparados com a média do número de cores discerníveis. A Figura 5.5 representa a razão entre o GAI estimado para cada iluminante e o GAI estimado para o iluminante CIE A em função da razão entre o número de cores discerníveis obtido para cada iluminante e o número de cores discerníveis obtido para o iluminante CIE A. A Tabela 5.1 representa a proporção da variância  $R^2$  considerada na regressão linear aplicada a cada caso, com uma análise similar aplicada ao  $R_a$  e ao  $R_b$ . Encontrou-se em todos os casos um baixo

grau de correlação, incluindo no caso do  $R_a$  e do  $R_b$ , excepto no caso do GAI calculado no espaço CIELAB, onde a correlação é superior.

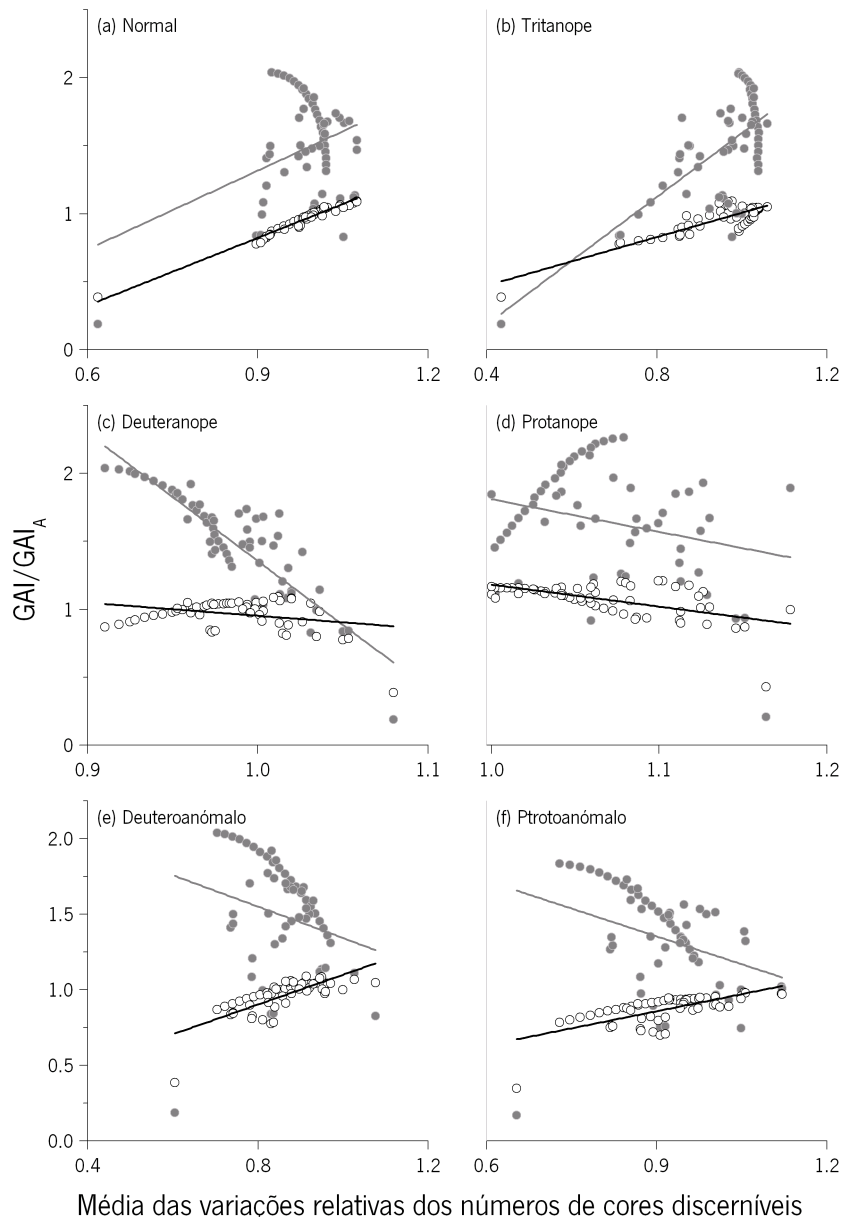


Figura 5.5 Razão entre o GAI obtido para cada iluminante e o GAI obtido para o iluminante CIE A em função da razão entre o número de cores discerníveis de cada iluminante e o número de cores discerníveis obtido para o iluminante CIE A. Os símbolos circulares cinza representam o GAI estimado no espaço de cor CIE 1960 UCS e os símbolos circulares brancos representam o GAI estimado no espaço de cor CIE ( $a^*,b^*$ ). As linhas rectas representam a regressão linear e a proporção da variância  $R^2$  considerada em cada caso está representada na Tabela 5.1.

## 5.4 Discussão

Neste trabalho foram utilizadas imagens hiperespectrais de cenas de interior para estimar variações no número de cores discerníveis produzidas por um conjunto de iluminantes para observadores normais e deficientes das visões das cores. Foi encontrada uma grande variação na diversidade cromática para o conjunto de iluminantes testados, com o melhor iluminante a produzir cerca de 50% mais cores discerníveis que o pior, para cenas de interior específica.

Os resultados obtidos a partir dos dois conjuntos diferentes de imagens hiperespectrais são bastante semelhantes. Representando a média do número de cores obtido para cada iluminante para um conjunto (Brainard) em função da média do número de cores obtido para cada iluminante para o outro conjunto (nosso laboratório) encontra-se uma boa correlação entre os dois conjuntos, sendo que a proporção da variância  $R^2$  considerada é de 0.75, 0.93, 0.89, 0.94, 0.74 e 0.93 no caso de observadores normais, tritanopes, deuteranopes, protanopes, deuteranómalos e protoanómalos, respectivamente. Este nível de correlação entre os dois conjuntos demonstra uma amostragem adequada.

Comparando os resultados apresentados aqui com os obtidos para pinturas artísticas na secção 4.3 e [147] verifica-se que os iluminantes que produzem o maior número de cores discerníveis são diferentes para as pinturas artísticas ou para as cenas de interior. Os melhores iluminantes para pinturas artísticas, decorrente do trabalho apresentado anteriormente, são o CIE FL11\*, CIE FL3.14 e o CIE HP2 para observadores normais, tritanopes e deuteranómalos e o CIE HP4 para observadores deuteranopes, protanopes e protoanómalos. No entanto, os melhores iluminantes sugeridos para cenas de interior correspondem a máximos relativos para pinturas artísticas, sugerindo que o mesmo iluminante poderá ser utilizado para iluminar os dois tipos de cenas.

A baixa correlação entre o número de cores discerníveis e o CRI era já esperada, uma vez que procuram demonstrar propriedades colorimétricas diferentes. Quando comparado com o GAI, a correlação com o número de cores discerníveis é maior, em particular quando o espaço CIELAB foi utilizado na estimativa do GAI, resultado indicador de que as duas quantidades possuem característica comuns.

Os resultados aqui apresentados baseiam-se num modelo de visão dicromática que é sabido não a descrever completamente [114]; para além deste facto, o cálculo do número de cores pela segmentação do volume de cor, é realizado em CIELAB, um espaço de cor conhecido pela sua falta de uniformidade, em particular nas cores azuis e cinzas [39,48]. A segmentação do volume de cor em cubos unitários é também realizada assumindo que todas as cores que se encontrem no interior do mesmo cubo não podem ser distinguidas, no entanto, alguns pares possuem uma diferença de cor  $\Delta E_{ab}^* > 1$ . A utilização de esferas unitárias na segmentação do volume de cor permitiria ultrapassar este problema mas verificou-se que a utilização de estimativas relativas do número de cores discerníveis permitem obter resultados robustos e aproximados a outras metodologias que poderiam ser utilizadas para um cálculo mais preciso do número de cores discerníveis [141].

A qualidade de uma fonte de luz depende de mais factores do que os efeitos cromáticos que produz, tal como o brilho perceptível [151,152]. No entanto, o número de cores discerníveis poderá ser uma métrica útil na estimativa dos efeitos de uma fonte de luz na separação das cores de uma cena e, por sua vez, na discriminação dos seus elementos. Assim, a utilização do número de cores discerníveis como complemento do GAI ou do CRI poderá beneficiar observadores normais e deficientes da visão das cores na selecção da melhor fonte de luz para utilizar em ambientes de interior.

## **6 Índice de Diversidade Cromática (CDI) – Uma aproximação baseada em imagens hiperespectrais.**

### **6.1 Introdução**

A composição espectral da iluminação ou a utilização de filtros coloridos na iluminação determina fortemente a qualidade da visualização cromática que observadores normais e deficientes da visão das cores experimentam ao observar pinturas artísticas ou cenas naturais [64,120,127,129,130,140,153].

Tipicamente, as fontes de luz são avaliadas recorrendo ao CRI. Esta quantidade é estimada avaliando a reprodutibilidade de oito amostras coloridas sob um iluminante de teste quando comparado com um iluminante de referência (ver secção 1.4.2) [61]. As limitações deste método e novos métodos numa tentativa de suplantarem o CRI foram já discutidas na secção 1.4.2 e em outras publicações [61,131-134,145]. Em particular, o GAI [70] que, em vez de estimar um índice baseado na reprodução da cor por comparação directa, avalia a área do gamut cromático produzido pelo iluminante de teste em oito amostras coloridas, avaliando indirectamente a diversidade cromática produzida pelo respectivo iluminante. O CRI e o GAI possuem uma baixa correlação com a diversidade cromática esperada em cenários mais complexos, como o são as pinturas artísticas e as cenas naturais [147,154], tornando estes índices inadequados na estimativa da diversidade cromática provocada por iluminantes em tais cenas. O número de cores discerníveis poderá servir para estimar a diversidade cromática em cenários complexos, quer em observadores normais, quer em observadores deficientes da visão das cores [41,85,140,141,147].

É necessário estabelecer uma nova métrica capaz de avaliar e determinar o efeito que um determinado iluminante produz na diversidade cromática de cenas complexas, se possível uma que utilize bases de dados colorimétricas facilmente acessíveis.

O principal objectivo deste trabalho foi o de avaliar a utilização de um novo índice de diversidade cromática (CDI – do Inglês “Chromatic Diversity Index”) baseado nas superfícies coloridas de Munsell, mas extensível a cenários muito mais complexos como as cenas naturais, pinturas artísticas ou cenários de interior. As cores de 1269 superfícies de Munsell e 85 imagens hiperespectrais de cenários naturais, de interior e pinturas artísticas foram estimadas simulando a

iluminação por 60 iluminantes ou fontes de luz, e os seus efeitos no volume de cor CIELAB e no número de cores discerníveis das referidas cenas foram utilizados como descritores das variações da diversidade cromática.

## 6.2 Métodos

As figuras Figura 2.1, a Figura 5.1 e a Figura 6.1 mostram imagens dos cenários naturais, cenários de interior e pinturas artísticas, respectivamente, analisadas neste trabalho, num total de 85 imagens hiperespectrais. As cenas naturais foram adquiridas utilizando o sistema hiperespectral I (ver secção 1.6.1 e secção 2.2), as imagens de cenários de interior do nosso laboratório foram adquiridas utilizando o sistema hiperespectral I enquanto que as imagens do laboratório do David Brainard utilizaram o sistema descrito na secção 5.2. No caso das pinturas artísticas, as imagens A a D, H a J e N a Q foram adquiridas utilizando o sistema hiperespectral I (ver secção 4.2), enquanto que as restantes imagens da Figura 6.1 foram adquiridas utilizando o sistema hiperespectral II (ver secção 1.6.2).



Figura 6.1 Imagens das pinturas artísticas analisadas neste trabalho.

A informação hiperespectral das imagens das cenas naturais foi calibrada recorrendo ao espectro da luz reflectida por uma referência plana cinza, presente na cena durante a aquisição, medido pelo telespectrorradiómetro, tal como descrito na secção 2.2. No caso da informação hiperespectral das imagens das pinturas artísticas e das cenas de interior o procedimento adoptado foi o mesmo que o descrito nas secções 4.2 e 5.2, respectivamente.

O perfil espectral das reflectâncias das amostras coloridas de Munsell foi obtido junto do Grupo de Cor da Universidade de Joensuu (5).

Foram utilizados 55 iluminantes CIE e 5 fontes de luz LED, cuja descrição se encontra na secção 4.2 e na secção 5.2, respectivamente. A Figura 4.3 e a Figura 5.2 representam a distribuição espectral relativa de alguns iluminantes CIE e das 5 fontes de luz LED utilizadas, respectivamente.

Para melhor adequar o perfil espectral das imagens hiperespectrais a alguns iluminantes CIE, as reflectâncias obtidas foram interpoladas linearmente dos 400 nm aos 720 nm em passo de 5 nm para as nossas imagens, e dos 400 nm aos 700 nm em passos de 5 nm para as imagens do David Brainard. Para observadores normais, a radiância foi estimada multiplicando a reflectância de cada pixel da imagem ou superfície de Munsell pelo espectro do iluminante em análise e o volume de cor CIELAB correspondente foi gerado assumindo o observador padrão CIE 1931 (ver secção 4.2). O número de cores discerníveis foi estimado pela segmentação do espaço de cor CIELAB em cubos de discriminação unitária e contando o número de cubos com pelo menos uma cor no seu interior, assumindo que todas as cores que se encontram no interior do mesmo cubo não podem ser discriminadas (ver secção 2.2). O volume de cor correspondente a cada número de cores discerníveis foi calculado recorrendo a um algoritmo de “convex-hull” que estima o menor poliedro convexo que contém todos os pontos do volume de cor CIELAB e por cálculo do volume do poliedro convexo.

No caso dos observadores dicromatas, os valores triestímulos foram calculados assumindo a reflectância de cada pixel da imagem ou das superfícies de Munsell, o iluminante em estudo e o observador padrão CIE 1931, convertidos para excitação de cones correspondentes e posteriormente convertidos novamente em valores triestímulos, como descrito na secção 3.2. A simulação para um observador normal da cor percebida por um dicromata foi estimada recorrendo ao procedimento descrito na secção 1.2.2 e na secção 3.2. No caso de observadores tricromatas anómalos, foram assumidas as sensibilidades dos cones descritas na Figura 1.11 e na secção 1.2.2. O volume CIELAB foi estimado como descrito na secção 4.2.

---

5 <http://spectral.joensuu.fi/> - acedida em 24-05-2011

O número de cores discerníveis e o volume CIELAB das imagens e das superfícies de Munsell iluminadas pelo iluminante em análise, para observadores dicromatas e observadores tricromatas normais, foram estimados pelo mesmo procedimento que o utilizado para os observadores normais.

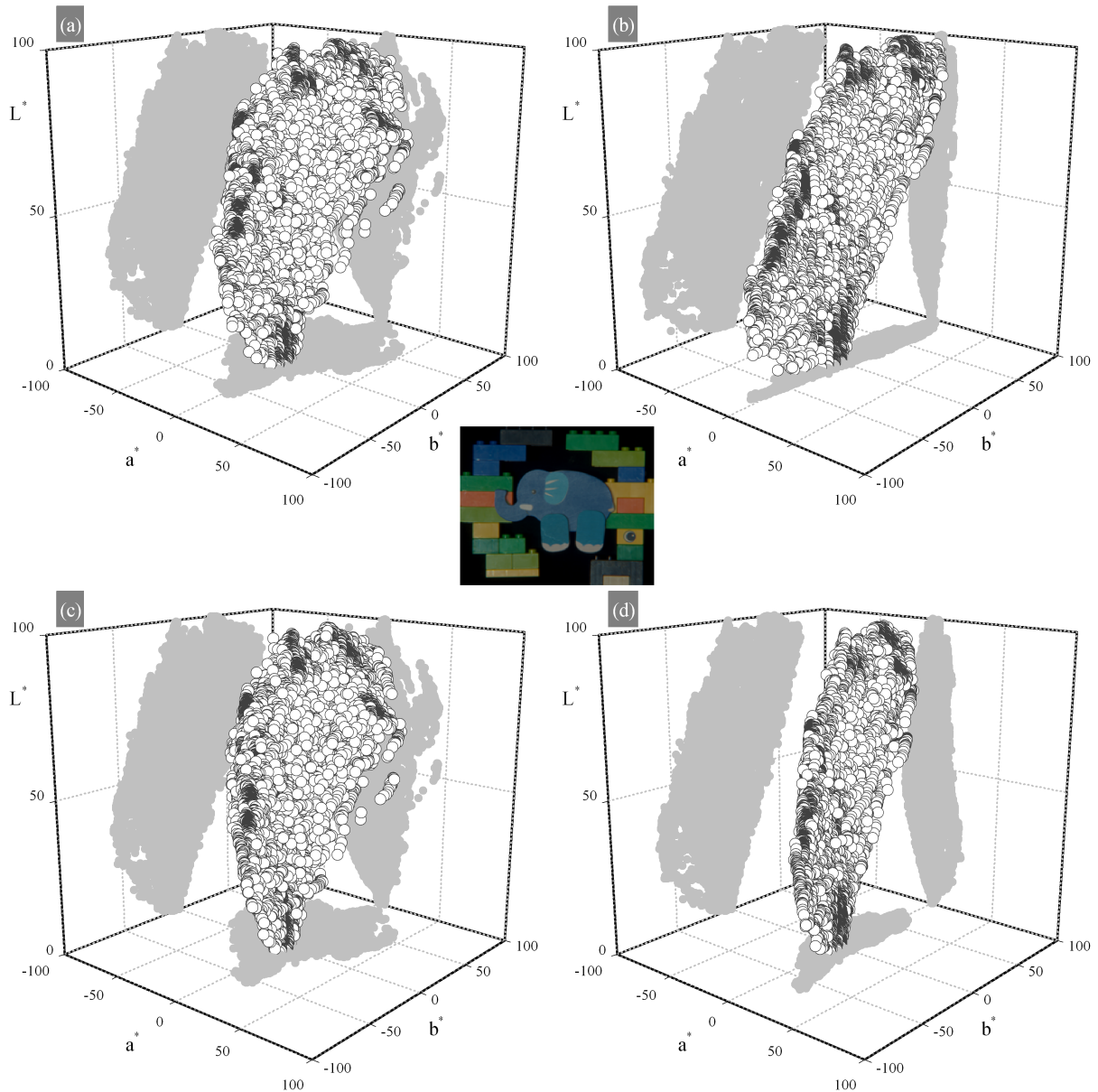


Figura 6.2 Demonstração do efeito da adaptação cromática e da distribuição espectral do iluminante na diversidade cromática da cena representada: (a) efeito do iluminante CIE FL3.8 sem adaptação, (b) efeito do iluminante CIE HP1 sem adaptação, (c) efeito do iluminante CIE FL3.8 com adaptação, (d) efeito do iluminante CIE HP1 com adaptação. O iluminante CIE D65 foi utilizado como o iluminante de referência.

Para estimar a influência da adaptação cromática CAT02 [76] os valores triestímulos foram estimados para todos os observadores pelo método já descrito, assumindo o observador padrão CIE



1931, todos os iluminantes da base de dados, todas as imagens hiperespectrais e todas as superfícies de Munsell. Os valores triestímulos foram então convertidos em excitações de cones utilizando a matriz  $M_{CAT02}$  descrita na secção 1.5, assumindo o iluminante CIE D65 como referência. O parâmetro  $F$  foi ajustado a 1 e o valor da luminosidade do iluminante foi considerado o valor da luminosidade do campo de adaptação. Os valores triestímulos adaptados foram estimados das excitações de cones adaptadas pelo método descrito na secção 1.5 e posteriormente convertidos para o espaço de cor CIELAB, para observadores normais e deficientes da visão das cores. A Figura 6.2 demonstra o efeito da adaptação cromática e da distribuição espectral do iluminante na diversidade cromática para observadores normais: (a) efeito do iluminante CIE FL3.8 sem adaptação, (b) efeito do iluminante CIE HP1 sem adaptação, (c) efeito do iluminante CIE FL3.8 com adaptação, (d) efeito do iluminante CIE HP1 com adaptação. Em todos os casos o iluminante CIE D65 foi utilizado como o iluminante de referência.

O número de cores discerníveis e o volume ocupado pelas cores do volume de cor CIELAB das imagens e das superfícies de Munsell iluminadas pelo iluminante em análise adaptado para o iluminante CIE D65, para observadores normais e deficientes da visão das cores, foram estimados pelo mesmo procedimento que o utilizado para os observadores normais.

### 6.3 Resultados

A Figura 6.3 representa os valores médios de todas as cenas analisadas do volume CIELAB (quadrados) e do número de cores discerníveis (círculos) em função do volume ocupado pelas superfícies coloridas de Munsell em CIELAB. Cada ponto representa a média de todas as cenas, para cada um dos iluminantes da base de dados analisada, para observadores normais (a), tritanopes (b), deuteranopes (c), protanopes (d), deuteroanómalos (e) e protoanómalos (f). As linhas rectas representam a regressão linear e a proporção da variância  $R^2$  considerada em cada caso é também representada. A Figura 6.4 representa o mesmo que o descrito para a Figura 6.3, mas neste caso considerando o efeito da adaptação cromática, tendo como iluminante de referência o iluminante CIE D65. As escalas nas duas figuras estão divididas por um factor de 10 000 para melhor visualização dos dados.

Existe uma boa correlação entre o volume CIELAB das cores das imagens analisadas e o volume CIELAB das superfícies coloridas de Munsell e entre o número de cores discerníveis nas imagens

analisadas e o volume CIELAB das superfícies coloridas de Munsell, para os observadores normais, tritanopes, deuteroanómalos e protoanómalos.

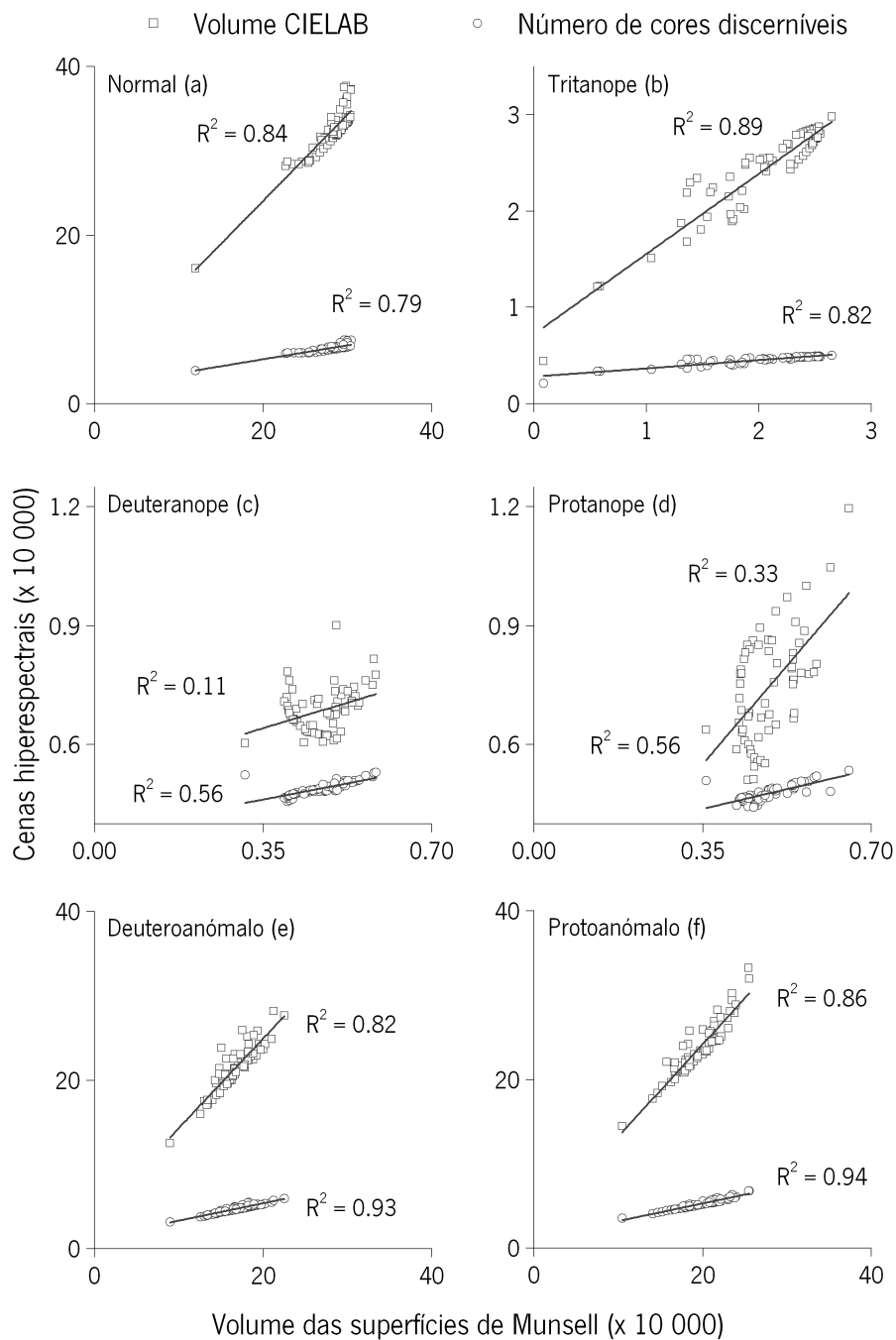


Figura 6.3 Representação da média para todas as cenas do volume CIELAB (quadrados) e do número de cores discerníveis (círculos) em função do volume CIELAB composto por todas as superfícies de Munsell, para todos os iluminantes da base de dados para observadores normais (a), tritanopes (b), deuteroanómalos (c), protanopes (d), deuteroanómalos (e) e protoanómalos (f). As linhas rectas representam a regressão linear e a proporção da variância  $R^2$  considerada em cada caso é também representada.

No caso dos observadores protanopes e deuteranopes, esta correlação não existe de todo. Considerando o efeito da adaptação, a boa correlação obtida para os observadores normais, tritanopes, deuteroanómalos e protoanómalos mantém-se no caso do volume CIELAB e do número de cores discerníveis, estendendo-se a boa correlação aos observadores deuteranopes e protanopes, para o volume CIELAB, mantendo-se a má correlação para o número de cores discerníveis.

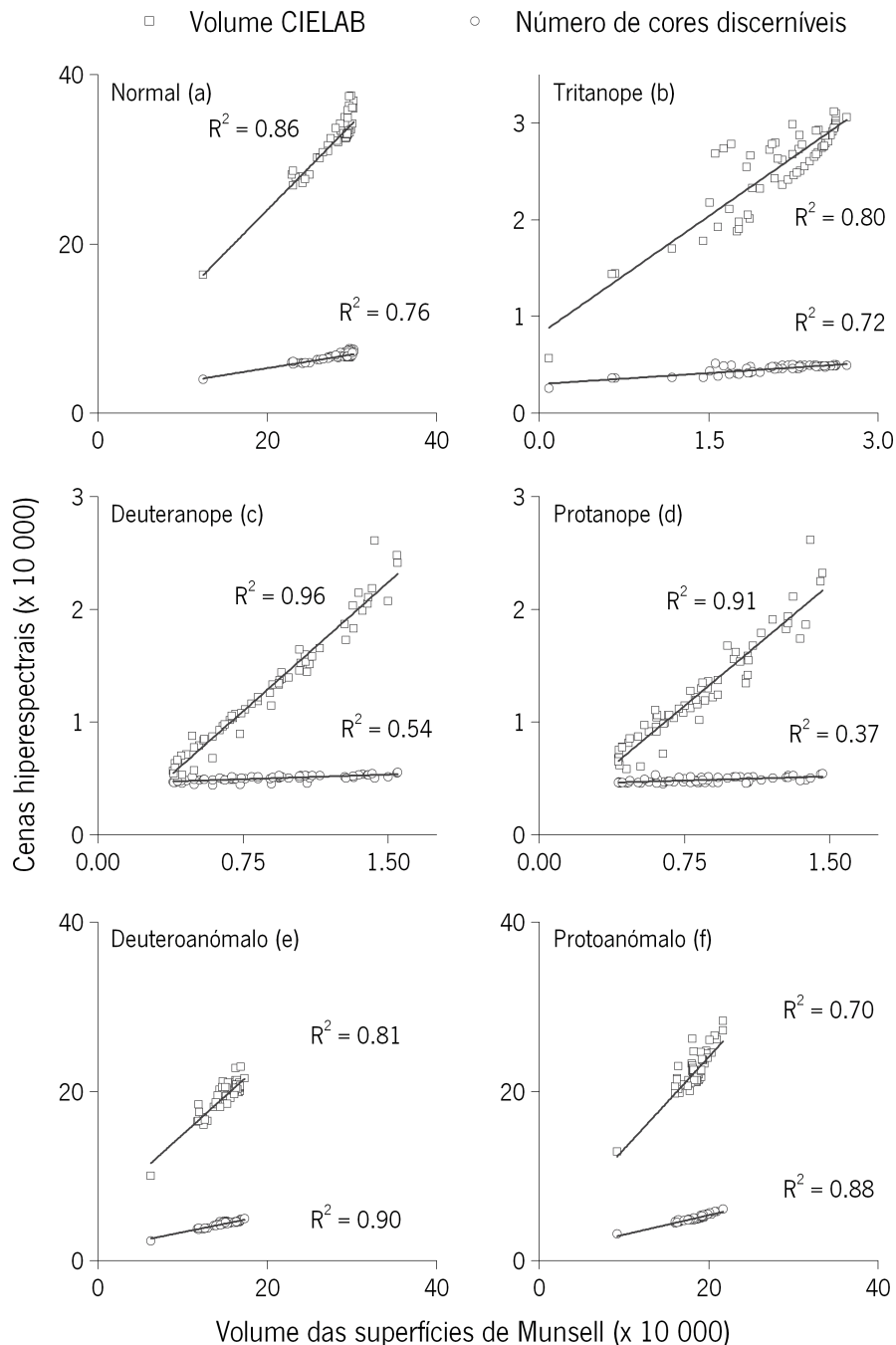


Figura 6.4 O mesmo que o descrito na Figura 6.3 mas considerando o efeito da adaptação cromática, tendo como iluminante de referência o iluminante CIE D65.

## 6.4 Discussão

Neste trabalho foram utilizadas 85 imagens hiperespectrais de cenas naturais, pinturas artísticas e cenários de interior em conjunto com a informação espectral de 1269 superfícies coloridas de Munsell. Em todos os pixels, em cada uma das imagens, ou superfícies coloridas, no caso das superfícies de Munsell, foram estudados os efeitos provocados pela distribuição espectral de diferentes iluminantes CIE (55 iluminantes entre iluminantes da luz do dia, fluorescente e de descarga de alta pressão) no volume CIELAB e no número de cores discerníveis, para observadores normais e deficientes da visão das cores. Foi também considerado em cada caso o efeito da adaptação cromática CAT02, assumindo como iluminante de referência o iluminante CIE D65. Verifica-se que para observadores normais, tritanopes, deuteroanómalos e protoanómalos existe uma boa correlação entre o volume CIELAB das cores das imagens e o volume CIELAB das superfícies de Munsell e o número de cores discerníveis das imagens e o volume CIELAB das superfícies de Munsell para os iluminantes estudados, independentemente da utilização da adaptação cromática. Para o caso dos observadores deuteranopes e protanopes, existe uma grande falta de correlação entre o volume CIELAB das cores das imagens e o volume CIELAB das superfícies de Munsell e o número de cores discerníveis das imagens e o volume CIELAB das superfícies de Munsell para os iluminantes estudados, melhorando substancialmente a correlação entre o volume CIELAB das cores das imagens e o volume CIELAB das superfícies de Munsell nos dois tipos de observadores com a utilização da adaptação cromática. Para o número de cores discerníveis a correlação mantém-se baixa. No caso dos protanopes a variação do número de cores com os iluminantes da luz do dia varia muito pouco enquanto que o volume CIELAB das superfícies de Munsell varia consideravelmente. No caso dos deuteranopes existe um valor máximo no valor do volume das superfícies de Munsell para o iluminante CIE D65, sendo que para as restantes fases da luz do dia o volume é menor. Tais efeitos não são totalmente perceptíveis na Figura 6.4 devido à escala adoptada.

O CDI – “Chromatic Diversity Index” é obtido a partir da comparação da estimativa em CIELAB do número de cores discerníveis em cenas complexas utilizando dados hiperespectrais com o volume ocupado em CIELAB pelas superfícies de Munsell para um determinado iluminante. A boa correlação encontrada nesta comparação permite sugerir a utilização do volume ocupado pelas superfícies de Munsell quando iluminadas por um determinado iluminante para estimar o efeito correspondente em cenários bastante mais complexos. Pode, assim, o CDI ser utilizado para

complementar outros índices de classificação de fontes luminosas como o CRI [61] e o GAI [70], para observadores normais, tritanopes, deuteroanómalos e protoanómalos.

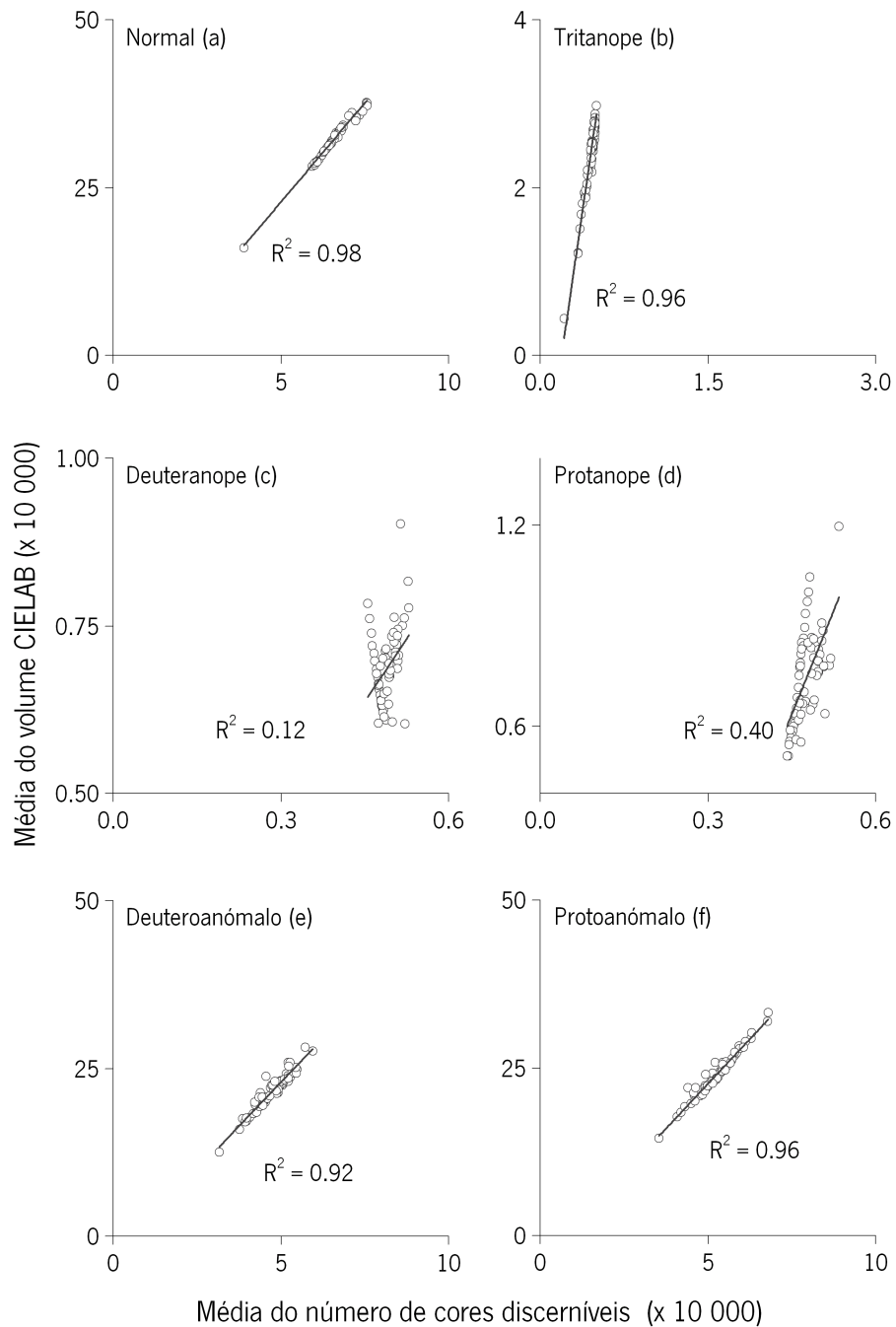


Figura 6.5 Média do volume CIELAB ocupado pelas cores de todas as cenas representado em função da média do número de cores discerníveis de todas as cenas para os diferentes iluminantes estudados. As linhas rectas representam a regressão linear e a proporção da variância  $R^2$  considerada em cada caso é também representada.

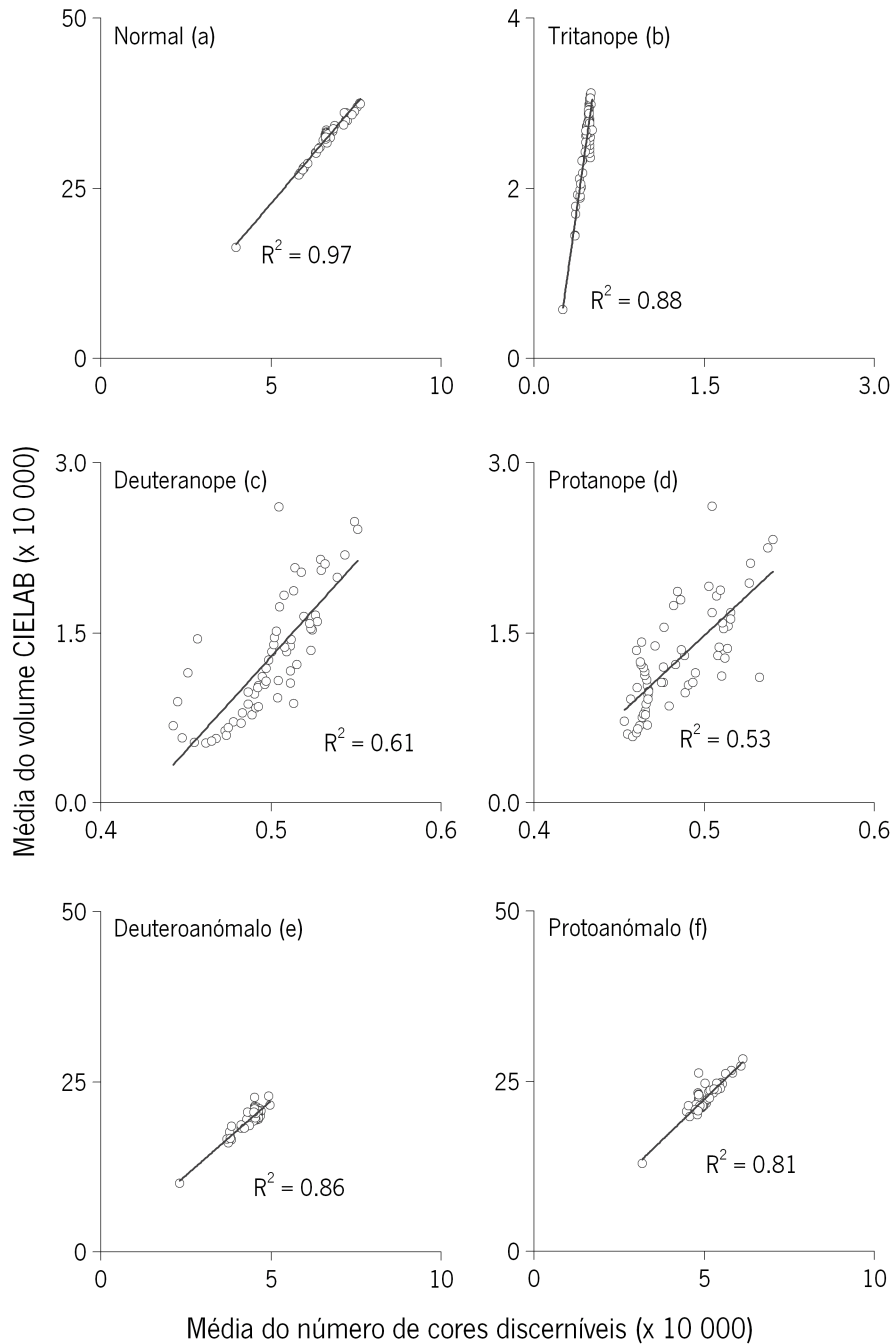


Figura 6.6 O mesmo que o descrito na Figura 6.5, mas neste caso considerando o efeito da adaptação cromática, tendo como iluminante de referência o iluminante CIE D65.

Durante todo o procedimento foi utilizado o volume CIELAB ocupado pela diversidade cromática utilizada para estimar o número de cores discerníveis para permitir a comparação com o volume CIELAB ocupado pelas superfícies de Munsell utilizando o mesmo método de cálculo e a mesma grandeza. A variação do número de cores das superfícies de Munsell com diferentes iluminantes é praticamente zero e a correlação entre o número de cores discerníveis e o volume CIELAB ocupado por estas cores é boa para observadores normais, tritanopes, deuteroanômalos e protoanômalos,

como representado na Figura 6.5, e melhora consideravelmente para os deuteranopes e protanopes se a adaptação cromática assumindo o iluminante CIE D65 como o iluminante de referência for considerada, como demonstra a Figura 6.6.

Os resultados aqui apresentados baseiam-se num modelo de visão dicromática que é sabido não a descrever completamente [114]; para além deste facto, o cálculo do número de cores pela segmentação do volume de cor, é realizado em CIELAB, um espaço de cor conhecido pela sua falta de uniformidade, em particular nas cores azuis e cinzas [39,48]. A segmentação do volume de cor em cubos unitários é também realizada assumindo que todas as cores que se encontrem no interior do mesmo cubo não podem ser distinguidas, no entanto, alguns pares possuem uma diferença de cor  $\Delta E_{ab}^* > 1$ . A utilização de esferas unitárias na segmentação do volume de cor permitiria ultrapassar este problema mas alguns estudos [141] sugerem que estimativas relativas do número de cores discerníveis proporcionam estimativas robustas e aproximadas a outras metodologias que poderiam ser utilizadas para um cálculo mais preciso do número de cores discerníveis.

A boa correlação encontrada entre os volumes CIELAB das superfícies de Munsell e das imagens hiperespectrais não é um resultado totalmente previsível, uma vez que a distribuição das cores naturais no espaço CIELAB não é nem uniforme nem contínua, o que acontece com as superfícies de Munsell. Estas irregularidades, assim como espaços vazios que possam existir no volume CIELAB das cores das imagens hiperespectrais, não são consideradas pelo método de cálculo do volume “convex-hull”, pelo que o número de cores discerníveis poderá ser uma quantidade mais aproximada na estimativa da diversidade cromática de cenários complexos, em comparação com a estimativa do volume CIELAB.

Apesar das limitações aqui apresentadas o CDI – “Colour Diversity Index” pode ser utilizado para estimar a influência na diversidade cromática em cenários complexos provocada por iluminantes com diferentes distribuições espectrais para observadores normais, tritanopes, deuteroanómalos e protoanómalos. Pode, assim, o CDI ser um bom complemento a outros índices de classificação de fontes luminosas como o CRI e o GAI.

## **7 Conclusões**

O número de cores discerníveis foi utilizado, ao longo de todo este trabalho, para estimar variações na diversidade cromática em cenários complexos de diversos tipos provocadas por diferentes iluminantes com diferentes distribuições espectrais para diferentes tipos de observadores.

O capítulo 2 apresenta a diversidade cromática em cenários naturais para observadores normais e demonstra o quão limitada é esta diversidade quando comparada com o volumes do sólido de cor-objecto.

O capítulo 3 generaliza o resultado obtido no capítulo 2 para observadores dicromatas e demonstra, uma vez mais, a possibilidade do número de cores discerníveis em representar não só a diversidade cromática mas também alterações provocadas pela utilização de lentes coloridas.

O capítulo 4 comprova a possibilidade de utilizar o número de cores discerníveis como método de avaliar a influência de diferentes iluminantes na diversidade cromática de pinturas artísticas digitalizadas com um sistema hiperspectral, para observadores normais e deficientes da visão das cores. Apresenta também sugestões de iluminantes a utilizar em diferentes tipos de observadores para maximizar o conteúdo cromático de pinturas artísticas.

O capítulo 5 expande os resultados obtidos no capítulo 4 para cenários de interior e para novas fontes de iluminação, em particular iluminação LED, utilizando para o efeito dados hiperspectrais de dois conjuntos diferentes de imagens de cenas de interior. Uma vez mais comprova a possibilidade de utilizar o número de cores discerníveis como forma de estimar variações na diversidade cromática provocada por alterações no perfil spectral do iluminante, para observadores normais e deficientes da visão das cores. É ainda comparado este método com alguns já existentes com o GAI e o CRI, para verificar a possibilidade de o número de cores discerníveis ser considerado para complementar a informação proporcionada pelo GAI e pelo CRI.

Sendo o número de cores discerníveis capaz de avaliar as variações cromáticas provocadas por alterações na distribuição spectral do iluminante, no capítulo 6 demonstramos que é possível utilizar um conjunto limitado de amostras coloridas (o livro das superfícies coloridas de Munsell)



para estimar alterações na diversidade cromática de cenas naturais, muito mais complexas, provocadas por alterações no iluminante. É neste capítulo apresentado o CDI – “Chromatic Diversity Index”, um índice que permite avaliar as alterações cromáticas em cenários naturais provocadas por diferentes iluminantes, para diferentes tipos de observadores.

Apesar de existirem limitações aos modelos utilizados de representação de cor, de simulação da cor percebida por observadores dicromatas e tricromatas anómalos e do cálculo do número de cores, os resultados aqui obtidos sugerem que podem ser considerados com um elevado grau de confiança na selecção de iluminantes para utilizar em cenas naturais, pinturas artísticas e cenas de interior para melhorar a discriminação cromática de observadores normais e deficientes da visão das cores. Esta conclusão é fortalecida pelo facto de este trabalho demonstrar que a estimativa do número de cores discerníveis em termos relativos é bastante sólido e pouco sensível ao método utilizado.

Assim o número de cores discerníveis pode, em conjunto com o CDI, ajudar na selecção de iluminantes específicos para observadores normais e deficientes da visão das cores.

De futuro seria interessante realizar experiências psicofísicas de discriminação cromática em cenários complexos considerando observadores normais e deficientes da visão das cores para comprovar as conclusões obtidas neste estudo, em particular o aumento da discriminação cromática com a utilização de iluminantes com perfis espectrais adequados, ou filtros coloridos.

## 8 Bibliografia

- [1] C.-H. Sung and J.-Z. Chuang, "The cell biology of vision," *The Journal of Cell Biology*, vol. 190, 2010, pp. 953-963.
- [2] P.G. Watson and R.D. Young, "Scleral structure, organisation and disease. A review," *Experimental Eye Research*, vol. 78, 2004, pp. 609-623.
- [3] F. Adler, *Adler's physiology of the eye: clinical application*, St. Louis, Missouri, USA: Mosby-Year Book, Inc., 1992.
- [4] J.R. Koretz, C.A. Cook, and P.L. Kaufman, "Aging of the human lens: changes in lens shape upon accommodation and with accommodative loss," *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, vol. 19, 2002, pp. 144-151.
- [5] D.L. Nickla and J. Wallman, "The multifunctional choroid," *Progress in Retinal and Eye Research*, vol. 29, 2010, pp. 144-168.
- [6] H. Wässle, "Parallel processing in the mammalian retina," *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 5, 2004, pp. 747-757.
- [7] R.H. Masland, "The fundamental plan of the retina," vol. 4, 2001, pp. 877-886.
- [8] V. Balasubramanian and P. Sterling, "Receptive fields and functional architecture in the retina," *Journal of Physiology-London*, vol. 587, 2009, pp. 2753-2767.
- [9] C.A. Curcio, K.R. Sloan, R.E. Kalina, and A.E. Hendrickson, "Human Photoreceptor Topography," *Journal of Comparative Neurology*, vol. 292, 1990, pp. 497-523.
- [10] A.I. Cohen, "New Evidence Supporting Linkage to Extracellular Space of Outer Segment Saccules of Frog Cones but Not Rods," *The Journal of Cell Biology*, vol. 37, 1968, pp. 424-444.
- [11] C.W. Oyster, *The Human Eye - structure and function*, Massachusetts: Sinauer Associates, Inc., 1999.
- [12] G. Wyszecki and W.S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae.*, New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [13] CIE, *Colorimetry, CIE Publ 15:2004*, Viena: CIE, 2004.
- [14] A. Stockman and L.T. Sharpe, "The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype," *Vision Research*, vol. 40, 2000, pp. 1711-1737.
- [15] H. Hofer, J. Carroll, J. Neitz, M. Neitz, and D.R. Williams, "Organization of the Human Trichromatic Cone Mosaic," *J. Neurosci.*, vol. 25, 2005, pp. 9669-9679.
- [16] A. Roorda and D.R. Williams, "The arrangement of the three cone classes in the living human eye," *Nature*, vol. 397, Feb. 1999, pp. 520-522.

- [17] D.H. Brainard and A. Stockman, "Colorimetry," *Handbook of Optics, Third Edition Volume III: Vision and Vision Optics*, M. Bass, C. DeCusatis, J. Enoch, V. Lakshminarayanan, G. Li, C. MacDonald, V. Mahajan, and E.V. Stryland, eds., New York, USA: The McGraw-Hill Companies, 2010, p. 10.1.
- [18] P. DeMarco, J. Pokorny, and V.C. Smith, "Full-Spectrum Cone Sensitivity Functions for X-Chromosome-Linked Anomalous Trichromates," vol. 9, 1992, pp. 1465-1476.
- [19] A. Knowles and H.J.A. Dartnall, "The Characterization of Visual Pigments by Absorption Spectroscopy," H. Davson, ed., Michigan: Academic Press, 1997.
- [20] J.D. Mollon, "The Origins of Modern Color Science," S.K.S.B.T.-T.S. of C. (Second Edition), ed., Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2003, pp. 1-39.
- [21] L.T. Sharpe, A. Stockman, H. Jagle, and J. Nathans, "Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness.," K.R. Gegenfurtner and L.T. Sharpe, eds., Cambridge: Cambridge University Press, 1999, pp. 3-51.
- [22] J. Neitz and M. Neitz, "The genetics of normal and defective color vision," *Vision Research*, vol. 51, Apr. 2011, pp. 633-651.
- [23] S.L. Merbs and J. Nathans, "Absorption spectra of the hybrid pigments responsible for anomalous color vision," *Science*, vol. 258, 1992, pp. 464-466.
- [24] S.G. Solomon and P. Lennie, "The machinery of colour vision," *Nat Rev Neurosci*, vol. 8, Apr. 2007, pp. 276-286.
- [25] K.R. Gegenfurtner and D.C. Kiper, "COLOR VISION," *Annual Review of Neuroscience*, vol. 26, Mar. 2003, pp. 181-206.
- [26] L.C. Sincich and J.C. Horton, "THE CIRCUITRY OF V1 AND V2: Integration of Color, Form, and Motion," *Annual Review of Neuroscience*, vol. 28, Jul. 2005, pp. 303-326.
- [27] H. Helmholtz, *Handbuch der physiologischen Optik*, Hamburg: Voss, 1866.
- [28] I. Newton, "New theory about Light and Colours," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 80, pp. 3075-3087.
- [29] S.I. Newton, *Opticks (Reprinted in 1952)*, New York: Dove Publications, 1730.
- [30] G. Palmer, *Theory of Colors and Vision*, London: Leacroft, 1777.
- [31] T. Young, "On the theory of Light and Colours," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 92, 1802, pp. 20-21.
- [32] R.M. Boynton, "A system of photometry and colorimetry based on cone excitations," *Color Research & Application*, vol. 11, 1986, pp. 244-252.
- [33] D.M. Dacey, "Circuitry for color coding in the primate retina," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 93, 1996, pp. 582-588.
- [34] W.D. Wright, "A trichromatic colorimeter with spectral primaries," *Transactions of the Optical Society*, vol. 29, 1928, pp. 225-242.

- [35] J. J. Vos, "Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer," *Color Research & Application*, vol. 3, 1978, pp. 125-128.
- [36] V.C. Smith and J. Pokorny, "The design and use of a cone chromaticity space: A tutorial," *Color Research & Application*, vol. 21, 1996, pp. 375-383.
- [37] W.D. Wright, "Graphical representation of small color differences," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 33, 1948, pp. 632-636.
- [38] R.W.G. Hunt, *Measuring Colour*, London: Ellis Horwood, 1991.
- [39] M.R. Luo, G. Cui, and B. Rigg, "The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000," *Color Research and Application*, vol. 26, 2001, pp. 340-350.
- [40] B. Hill, T. Roger, and F.W. Vorhagen, "Comparative analysis of the quantization of color spaces on the basis of the CIELAB color-difference formula," *ACM Trans. Graph.*, vol. 16, Apr. 1997, pp. 109-154.
- [41] M.R. Pointer and G.G. Attridge, "The number of discernible colours," *Color Research and Application*, vol. 23, 1998, pp. 52-54.
- [42] G. Sharma, W. Wu, and E.N. Dalal, "The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations," *Color Research & Application*, vol. 30, 2005, pp. 21-30.
- [43] M.R. Luo, G. Cui, and C. Li, "Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model," *Color Research & Application*, vol. 31, 2006, pp. 320-330.
- [44] G. Cui, M.R. Luo, B. Rigg, G. Roesler, and K. Witt, "Uniform colour spaces based on the DIN99 colour-difference formula," *Color Research and Application*, vol. 27, 2002, pp. 282-290.
- [45] N. Moroney, M.D. Fairchild, R.W.G. Hunt, C. Li, M.R. Luo, and T. Newman, "The CIECAM02 Color Appearance Model," T.S. for I.S. and Technology, ed., Arizona: 2002, pp. 23-27.
- [46] C. Li, M.R. Luo, R.W.G. Hunt, N. Moroney, M.D. Fairchild, and T. Newman, "The Performance of CIECAM02," T.S. for I.S. and Technology, ed., Arizona: 2002, pp. 28-32.
- [47] M.D. Fairchild and G.M. Johnson, "iCAM framework for image appearance, differences, and quality," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 13, Jan. 2004, pp. 126-138.
- [48] M.D. Fairchild, *Color Appearance Models*, USA: John Wiley & Sons, 2005.
- [49] D.I.A. MacLeod and R.M. Boynton, "Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 69, Aug. 1979, pp. 1183-1186.
- [50] V.C. Smith and J. Pokorny, "Spectral Sensitivity of Foveal Cone Photopigments between 400 and 500 Nm," *Vision Research*, vol. 15, 1975, pp. 161-171.
- [51] H. Brettel, F. Viénot, and J.D. Mollon, "Computerized simulation of color appearance for dichromats," vol. 14, 1997, pp. 2647-2655.

- [52] D.B. Judd, "Color Perceptions of Deuteranopic and Protanopic Observers," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 41, 1948, pp. 247-271.
- [53] Erwin Schrödinger, "Theorie der Pigmente von größter Leuchtkraft," *Annalen der Physik*, vol. 367, 1920, pp. 603-622.
- [54] R.T.D. Luther, "Aus dem Gebiet der Farbreizmetrik," *Zeitschrift für technische Physik*, vol. 8, 1927, p. 540-558.
- [55] N. Nyberg, "Zum Aufbau des Farbenkörpers im Raume aller Lichtempfindungen," *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, vol. 52, 1929, pp. 406-419.
- [56] J.J. Koenderink, *Color for the Sciences*, The MIT Press, 2010.
- [57] D.L. MacAdam, "The theory of the maximum visual efficiency of colored materials," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 25, 1935, pp. 249-252.
- [58] D.L. MacAdam, "Maximum visual efficiency of colored materials," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 25, 1935, pp. 361-367.
- [59] J. Romero, J. Hernandez-Andres, J.L. Nieves, and J.A. Garcia, "Color coordinates of objects with daylight changes," *Color Research and Application*, vol. 28, 2003, pp. 25-35.
- [60] V.D.P. Sastri, "Locus of Daylight Chromaticities in Relation to Atmospheric Conditions," *Journal of Physics D-Applied Physics*, vol. 9, 1976, p. L1-L3.
- [61] CIE, *Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources*, CIE Publ 13.3:1995, Vienna: CIE, 1995.
- [62] X. Guo and K.W. Houser, "A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources," *Lighting Research and Technology*, vol. 36, 2004, pp. 183-197.
- [63] F. Vienot, E. Mahler, L. Serreault, M. Harrar, and J. Ezrati, "Discriminating colours under LED illumination," J.L. Nieves and J. Hernandez-Andres, eds., Granada: AIC, International Colour Association, 2005, pp. 33-36.
- [64] E. Mahler, J.J. Ezrati, and F. Vienot, "Testing LED Lighting for Colour Discrimination and Colour Rendering," *Color Research and Application*, vol. 34, 2009, pp. 8-17.
- [65] H. Xu, "Color-rendering capacity of illumination," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 73, Dec. 1983, pp. 1709-1713.
- [66] H. Xu, "Colour rendering capacity and luminous efficiency of a spectrum," *Lighting Research and Technology*, vol. 25, 1993.
- [67] D.B. Judd, "A flattery index for artificial illuminants," *Illum. Eng.*, vol. 62, 1967, pp. 593-598.
- [68] W.A. Thornton, "Color-Discrimination Index," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 62, 1972, pp. 191-&.
- [69] W.A. Thornton, "Color-Rendering Capability of Commercial Lamps," *Appl. Opt.*, vol. 11, May. 1972, pp. 1078-1086.

- [70] M.S. Rea and J.P. Freyssinier-Nova, "Color rendering: A tale of two metrics," *Color Research and Application*, vol. 33, 2008, pp. 192-202.
- [71] C. Li and M.R. Luo, "Assessing colour rendering properties of daylight sources - PhD Thesis," University of Leeds, UK, 2008.
- [72] W. Davis and Y. Ohno, "Color quality scale," *Optical Engineering*, vol. 49, Mar. 2010, pp. 33602-33616.
- [73] D. Geisler-Moroder and A. Dur, "Color-rendering indices in global illumination methods," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 18, 2009, p. 43015.
- [74] CIE, "Colour rendering, TC 1-33 closing remarks," *Publ. CIE*, vol. 135, 1999.
- [75] CIE, *CIE COLLECTION 1999 - Vision and Colour Physical Measurement of Light and Radiation, CIE Publ 135.1:2000 Revision 1*, Viena: CIE, 2000.
- [76] CIE, *A Review of chromatic adaptation transforms, CIE Publ 160:2004*, Viena: CIE, 2004.
- [77] DigitalGlobe, "WorldView - 2 <http://www.digitalglobe.com/index.php/88/WorldView-2>," 2009.
- [78] D.H. Foster, S.M.C. Nascimento, and K. Amano, "Information limits on neural identification of colored surfaces in natural scenes," *Visual Neuroscience*, vol. 21, 2004, pp. 331-336.
- [79] P.D. Pinto, "Chromatic properties of natural scenes and their influence on gaze position," University of Manchester, 2004.
- [80] M.J.A.T. d Carvalho, "Digitalização de pintura artística com imagiografia hiperespectral," University of Minho, 2004.
- [81] R.S. Berns, "The science of digitizing paintings for color-accurate image archives: A review," *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 45, 2001, pp. 305-325.
- [82] P.D.A. Pinto, "Colorimetria Hiperespectral de Pinturas Artísticas," Universidade do Minho, 2011.
- [83] D.L. Macadam, "Note on the Number of Distinct Chromaticities," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 37, 1947, pp. 308-309.
- [84] D.B. Judd and G. Wyszecki, *Color in Business, Science and Industry*, USA: John Wiley & Sons, 1975.
- [85] F. Martinez-Verdu, E. Perales, E. Chorro, D. de Fez, V. Viqueira, and E. Gilabert, "Computation and visualization of the MacAdam limits for any lightness, hue angle, and light source," *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, vol. 24, 2007, pp. 1501-1515.
- [86] J.M.M. Linhares, P.D.A. Pinto, S.M.C. Nascimento, K. Amano, and D.H. Foster, "Enhancing the chromatic diversity of natural scenes with optimized coloured filters," Granada, Spain: 2005, pp. 231-234.
- [87] J.M.M. Linhares, P.D. Pinto, M.A. Aldaba, S.M.C. Nascimento, D.H. Foster, and K. Amano, "Viewing natural scenes through colored filters," *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, vol. 46, 2005.
- [88] M.R. Pointer, "The Gamut of Real Surface Colours," *Color Research & Application*, vol. 5, 1980, pp. 145-155.

- [89] M.A. Webster and J.D. Mollon, "Adaptation and the color statistics of natural images," *Vision Research*, vol. 37, 1997, pp. 3283-3298.
- [90] S.M.C. Nascimento, F.P. Ferreira, and D.H. Foster, "Statistics of spatial cone-excitation ratios in natural scenes," *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, vol. 19, 2002, pp. 1484-1490.
- [91] D.H. Foster, K. Amano, S.M.C. Nascimento, and M.J. Foster, "Frequency of metamerism in natural scenes," *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, vol. 23, 2006, pp. 2359-2372.
- [92] S.M.C. Nascimento, D.H. Foster, and K. Amano, "Psychophysical estimates of the number of spectral-reflectance basis functions needed to reproduce natural scenes," *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, vol. 22, 2005, pp. 1017-1022.
- [93] R.S. Berns, D.H. Alman, L. Reniff, G.D. Snyder, and M.R. Balononrosen, "Visual Determination of Suprathreshold Color-Difference Tolerances Using Probit Analysis," *Color Research and Application*, vol. 16, 1991, pp. 297-316.
- [94] M.R. Luo and B. Rigg, "Chromaticity-Discrimination Ellipses for Surface Colors," *Color Research and Application*, vol. 11, 1986, pp. 25-42.
- [95] K. Witt, "Parametric Effects on Surface Color-Difference Evaluation at Threshold," *Color Research and Application*, vol. 15, 1990, pp. 189-199.
- [96] K. Witt, "Geometric relations between scales of small colour differences," *Color Research and Application*, vol. 24, 1999, pp. 78-92.
- [97] M.R. Luo, G. Cui, and B. Rigg, "Further comments on CIEDE2000," *Color Research and Application*, vol. 27, 2002, pp. 127-128.
- [98] G.M. Johnson and M.D. Fairchild, "A top down description of S-CIELAB and CIEDE2000," *Color Research and Application*, vol. 28, 2003, pp. 425-435.
- [99] P.L. Sun and P. Morovic, "Inter-relating colour difference metrics," S. for I.S. and Technology, ed., Arizona, USA: IS&T, 2002, pp. 55-60.
- [100] B.C. Regan, C. Julliot, B. Simmen, F. Vienot, P. Charles-Dominique, and J.D. Mollon, "Fruits, foliage and the evolution of primate colour vision," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, vol. 356, 2001, pp. 229-283.
- [101] J. Krauskopf and K. Gegenfurtner, "Color Discrimination and Adaptation," *Vision Research*, vol. 32, 1992, pp. 2165-2175.
- [102] A.J. Zele, V.C. Smith, and J. Pokorny, "Spatial and temporal chromatic contrast: Effects on chromatic discrimination for stimuli varying in L- and M-cone excitation," *Visual Neuroscience*, vol. 23, 2006, pp. 495-501.

- [103] T. Hansen and K.R. Gegenfurtner, "Chromatic and luminance edges in natural scenes," *Perception*, vol. 36, 2007, p. 193.
- [104] T. Hansen, M. Olkkonen, S. Walter, and K.R. Gegenfurtner, "Memory modulates color appearance," *Nat Neurosci*, vol. 9, 2006, pp. 1367-1368.
- [105] T. Hansen, M. Giesel, and K.R. Gegenfurtner, "Chromatic discrimination of natural objects," *J Vis*, vol. 8, 2008, pp. 2 1-19.
- [106] M.A. Aldaba, J.M.M. Linhares, P.D. Pinto, S.M.C. Nascimento, K. Amano, and D.H. Foster, "Visual sensitivity to color errors in images of natural scenes," *Visual Neuroscience*, vol. 23, 2006, pp. 555-559.
- [107] X. Zhang, D.A. Silverstein, J.E. Farrell, and B.A. Wandell, "Color image quality metric S-CIELAB and its application on halftone texture visibility," *IEEE*, 1997, pp. 44-48.
- [108] M.J. Morgan, A. Adam, and J.D. Mollon, "Dichromates Detect Color-Camouflaged Objects That Are Not Detected by Trichromates," *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, vol. 248, 1992, pp. 291-295.
- [109] A. Saito, A. Mikami, T. Hosokawa, and T. Hasegawa, "Advantage of dichromats over trichromats in discrimination of color-camouflaged stimuli in humans," *Perceptual and Motor Skills*, vol. 102, 2006, pp. 3-12.
- [110] L.T. Sharpe, E. de Luca, T. Hansen, H. Jagle, and K.R. Gegenfurtner, "Advantages and disadvantages of human dichromacy," *Journal of Vision*, vol. 6, 2006, pp. 213-223.
- [111] K.H. Ruddock, "Psychophysics of inherited colour vision deficiencies.," D.H. Foster, ed., London: Macmillan, 1991, pp. 4-37.
- [112] F. Vienot, H. Brettel, L. Ott, A. Benbarkak, and J.D. Mollon, "What Do Color-Blind People See," *Nature*, vol. 376, 1995, pp. 127-128.
- [113] T. Wachtler, U. Dohrmann, and R. Hertel, "Modeling color percepts of dichromats," *Vision Research*, vol. 44, 2004, pp. 2843-2855.
- [114] P. Capilla, M.A. Diez-Ajenjo, M.J. Luque, and J. Malo, "Corresponding-pair procedure: a new approach to simulation of dichromatic color perception," *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*, vol. 21, 2004, pp. 176-186.
- [115] M.J. D and R.B. C, "Simulating the perceptual world of the anomalous trichromat.," *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2001, p. S97.
- [116] V.A. Kovalev, "Mining dichromatic colours from video," *Advances in Data Mining*, vol. 4065, 2006, pp. 431-443.
- [117] K. Rasche, R. Geist, and J. Westall, "Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 25, 2005, pp. 22-30.



- [118] F. Vienot, H. Brettel, and J.D. Mollon, "Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats," *Color Research and Application*, vol. 24, 1999, pp. 243-252.
- [119] S. Yang, Y.M. Ro, E.K. Wong, and J.-H. Lee, "Quantification and standardized description of color vision deficiency caused by anomalous trichromats-part I: simulation and measurement," *J. Image Video Process.*, vol. 2008, Jan. 2008, p. 7:1-7:9.
- [120] P.D. Pinto, J.M.M. Linhares, J.A. Carvalhal, and S.M.C. Nascimento, "Psychophysical estimation of the best illumination for appreciation of Renaissance paintings," *Vis Neurosci*, vol. 23, 2006, pp. 669-674.
- [121] J.M.M. Linhares, "Estimating Chromatic Diversity from Hyperspectral Images," 2005.
- [122] J.D. Moreland and S. Westland, "Macular pigment and color discrimination," *Visual Neuroscience*, vol. 23, 2006, pp. 549-554.
- [123] G. Kovacs, I. Kucsera, G. Abraham, and K. Wenzel, "Enhancing color representation for anomalous trichromats on CRT monitors," *Color Research and Application*, vol. 26, 2001, p. S273-S276.
- [124] E. Perales, F. Martinez-Verdu, V. Viqueira, M.J. Luque, and P. Capilla, "Computing the number of distinguishable colors under several illuminants and light sources," *Society for Imaging Science and Technology*, 2006, pp. 414-419.
- [125] J.M.M. Linhares and S.M.C. Nascimento, "The number of discernible colours perceived by dichromats in natural scenes: The influence of different theoretical models," *SEDOPICA*, ed., Alicante, Spain: Sociedad Española de Óptica, 2010.
- [126] I. Abramov, J. Gordon, M. Scuello, and S. Weintraub, "Museum lighting: Adjusting the illuminant," *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, vol. 44, 2003, p. U306-U306.
- [127] R.G. Davis and D.N. Ginthner, "Correlated Color Temperature, Illuminance Level, and the Kruithof Curve," *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 19, 1990, pp. 27-38.
- [128] P.D. Pinto, J.M.M. Linhares, and S.M.C. Nascimento, "Correlated color temperature preferred by observers for illumination of artistic paintings," *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, vol. 25, 2008, pp. 623-630.
- [129] M. Scuello, I. Abramov, J. Gordon, and S. Weintraub, "Museum lighting: Why are some illuminants preferred?," *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, vol. 21, 2004, pp. 306-311.
- [130] M. Scuello, I. Abramov, J. Gordon, S. Weintraub, and S. Weintraub, "Museum lighting: Optimizing the illuminant," *Color Research and Application*, vol. 29, 2004, pp. 121-127.
- [131] M.R. Pointer, "Measuring colour rendering-A new approach," *Lighting Res. Technol.*, vol. 18, 1986, pp. 175-184.
- [132] C. van Trigt, "Color rendering, a reassessment," *Color Research and Application*, vol. 24, 1999, pp. 197-206.

- [133] H. Xu, "Color-Rendering Capacity of Light," *Color Research and Application*, vol. 18, 1993, pp. 267-269.
- [134] H. Xu, "Assessing the effectiveness of colour rendering," *Lighting Research and Technology*, vol. 29, 1997, p. 89.
- [135] J. Schanda, "A combined colour preference-colour rendering index," *Lighting Res. Technol.*, vol. 17, 1985, pp. 31-34.
- [136] W.A. Thornton, "A validation of the colour-preference index," *J. IES*, vol. 17, 1974, pp. 48-52.
- [137] J. Birch, J.A. Chisholm, P. Kinnear, M. Marre, A.J.L.G. Pinckers, J. Pokorny, V.C. Smith, and G. Verriest, "Acquired color vision defects.," J. Pokorny, V.C. Smith, G. Verriest, and A.J.L.G. Pinckers, eds., New York: Grune & Stratton, Inc, 1979.
- [138] Cronly-Dillon, "Colour Vision Deficiencies in Ophthalmic Diseases," D.H. Foster, ed., Basingstoke: Macmillan Press, 1991, pp. 115-172.
- [139] G. Thomson, *The Museum Environment*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1986.
- [140] J.M.M. Linhares, P.D. Pinto, and S.M.C. Nascimento, "The number of discernible colors perceived by dichromats in natural scenes and the effects of colored lenses," *Visual Neuroscience*, vol. 25, 2008, pp. 493-499.
- [141] J.M. Linhares, P.D. Pinto, and S.M. Nascimento, "The number of discernible colors in natural scenes," *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, vol. 25, 2008, pp. 2918-2924.
- [142] S.A. Fotios, "Lamp colour properties and apparent brightness: a review," *Lighting Research and Technology*, vol. 33, 2001, pp. 163-178.
- [143] S. Fotios and T. Gado, "A comparison of visual objectives used in side-by-side matching tests," *Lighting Research and Technology*, vol. 37, 2005, pp. 117-130.
- [144] J. Schanda, *Colorimetry: Understanding the CIE System*, Hungary: (ed J. Schanda), Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [145] W. Davis and Y. Ohno, "Toward an improved color rendering metric," I.T. Ferguson, J.C. Carrano, T. Tsunemasa, and I.E. Ashdown, eds., SPIE, Bellingham, WA, 2005, pp. 1G-1 - 1G-8.
- [146] F. Vienot, E. Mahler, J.-J. Ezrati, C. Boust, A. Rambaud, and A. Bricoune, "Color Appearance under LED Illumination: The Visual Judgment of Observers," *Journal of Light & Visual Environment*, vol. 32, 2008, pp. 208-213.
- [147] J.M.M. Linhares, P.D.A. Pinto, and S.M.C. Nascimento, "Color rendering of art paintings under CIE illuminants for normal and color deficient observers," *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*, vol. 26, 2009, pp. 1668-1677.
- [148] P. Capilla, with Esther Perales and Francisco Martinez-Verdú and Valentin Viqueira and Maria J. Luque, "Computing the Number of Distinguishable Colours under Several Illuminants and Light Sources," S. for I.S. and Technology, ed., Leeds, United Kingdom: IS&T, 2006, pp. 414-419.

- [149] D.H. Brainard, "Hyperspectral Image Data," 1997.
- [150] P.L. Vora, J.E. Farrell, J.D. Tietz, and D.H. Brainard, "Image capture: Simulation of sensor responses from hyperspectral images," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 10, 2001, pp. 307-316.
- [151] S.A. Fotios, K.W. Houser, and C. Cheal, "Counterbalancing needed to avoid bias in side-by-side brightness matching tasks," *Leukos*, vol. 4, 2008, pp. 207-223.
- [152] S.A. Fotios and K.W. Houser, "Research Methods to Avoid Bias in Categorical Ratings of Brightness," *Leukos*, vol. 5, 2009, pp. 167-181.
- [153] P.D. Pinto, P.E.R. Felgueiras, J.M.M. Linhares, and S.M.C. Nascimento, "Chromatic effects of metamers of D65 on art paintings," *Ophthalmic and Physiological Optics*, vol. 30, 2010, pp. 632-637.
- [154] J.M.M. Linhares, P.E.R. Felgueiras, P.D. Pinto, and S.M.C. Nascimento, "Colour rendering of indoor lighting with CIE illuminants and white LEDs for normal and colour deficient observers," *Ophthalmic and Physiological Optics*, vol. 30, 2010, pp. 618-625.

## 9 Anexos

### **Anexo I – Lista de publicações e comunicações em encontros científicos, sujeitas a arbitragem internacional, resultantes do trabalho realizado no âmbito desta tese de Doutoramento**

#### **Publicação de artigos em revistas científicas**

- J.M. Linhares, P.D. Pinto, and S.M. Nascimento, "The number of discernible colors in natural scenes," *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, vol. 25, 2008, pp. 2918-2924.
- J.M.M. Linhares, P.D. Pinto, and S.M.C. Nascimento, "The number of discernible colors perceived by dichromats in natural scenes and the effects of colored lenses," *Visual Neuroscience*, vol. 25, 2008, pp. 493-499.
- J.M.M. Linhares, P.D.A. Pinto, and S.M.C. Nascimento, "Color rendering of art paintings under CIE illuminants for normal and color deficient observers," *Journal of the Optical Society of America a- Optics Image Science and Vision*, vol. 26, 2009, pp. 1668-1677.
- J.M.M. Linhares, P.E.R. Felgueiras, P.D. Pinto, and S.M.C. Nascimento, "Colour rendering of indoor lighting with CIE illuminants and white LEDs for normal and colour deficient observers," *Ophthalmic and Physiological Optics*, vol. 30, 2010, pp. 618-625.

#### **Publicação de artigos em actas de encontros científicos**

- J.M.M. Linhares, P.D. Pinto, and S.M. Nascimento, "The number of colors perceived by dichromats when appreciating art paintings under standard illuminants," J.P. Ramo, ed., Terrassa, Spain: CGIV 2008 - 4th European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision, and MCS'08, the 10th International Symposium on Multispectral Colour Science, 2008, p. 441.
- J.M.M. Linhares and S.M.C. Nascimento, "The number of discernible colours perceived by dichromats in natural scenes: The influence of different theoretical models," SEDOPICA, ed., Alicante, Spain: Sociedad Española de Óptica, 2010.
- J.M.M. Linhares, P.D.A. Pinto, and S.M.C. Nascimento, "Chromatic Diversity Index – An Approach Based on Natural Scenes," J. Parkkinen and T. Jääskeläinen, eds., Joensuu, Finland: CGIV 2010 - 5th European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision, and MCS'10, the 12th International Symposium on Multispectral Colour Science, 2010.
- S.M.C. Nascimento, P.E.R. Felgueiras, and J.M.M. Linhares, "Chromatic Effects of Metamers of Daylights," J. Parkkinen and T. Jääskeläinen, eds., Joensuu, Finland: CGIV 2010 - 5th European Conference on

Colour in Graphics, Imaging, and Vision, and MCS'10, the 12th International Symposium on Multispectral Colour Science, 2010.

J.M.M. Linhares and S.M.C. Nascimento, "Color Diversity Index - The effect of chromatic adaptation," *International Conference on Applications of Optics and Photonics - AOP2011*, Manuel Filipe P. C. M. Costa, eds., Braga, Portugal: SPOF (Sociedade Portuguesa para a Investigação e Desenvolvimento em Óptica e Fotónica), 2011.

### **Comunicações em encontros científicos**

J.M. Linhares, P.D. Pinto, and S.M. Nascimento, "The number of discernible colours perceived by protanomalous and deuteranomalous in natural scenes," *Perception*, vol. 37, 2008, p. ECVF Abstract Supplement, page 62.

J.M.M. Linhares, P.D. Pinto, and S.M. Nascimento, "The number of colors perceived by dichromats when appreciating art paintings under standard illuminants," J.P. Ramo, ed., Terrassa, Spain: CGIV 2008 - 4th European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision, and MCS'08, the 10th International Symposium on Multispectral Colour Science, 2008, p. 441.

S.M. Nascimento, J.M. Linhares, P.D. Pinto, D.H. Foster, and K. Amano, "The distribution of discernible colours in natural scenes," *Perception*, vol. 37, 2008, p. ECVF Abstract Supplement, page 84.

J.M.M. Linhares, P.D.A. Pinto, R.G. Lopes, and S.M.C. Nascimento, "The number of discernible colors in natural scenes rendered with daylight illuminants for normal and color deficient observers," *Journal of Vision*, vol. 9, 2009, p. 63.

J.M.M. Linhares and S.M.C. Nascimento, "Testing models of color deficiencies using normal observers with Ishihara plates simulated for color deficient observers," Naples, Florida, USA: Vision Sciences Society, 2010.

## Anexo II – Folhas de dados dos LED utilizados neste trabalho, facultadas pelo fabricante.

Os dados que caracterizam as fontes de LED utilizadas neste trabalho estão acessíveis na página electrónica do respectivo fabricante. No entanto dada a frequência com que são lançados no mercado novos produtos é provável que em breve estes dados deixem de estar disponíveis e facilmente acessíveis. Assim sendo, serão aqui reproduzidas a totalidade das características técnicas associadas a cada uma das fontes de luz baseadas em LEDs utilizadas neste trabalho.

Technical Datasheet DS25

LUXEON®  
never before possible

# power light source LUXEON® Emitter

## Introduction

LUXEON® is a revolutionary, energy efficient and ultra compact new light source, combining the lifetime and reliability advantages of Light Emitting Diodes with the brightness of conventional lighting.

LUXEON Emitters give you total design freedom and unmatched brightness, creating a new world of light.

LUXEON Emitters can be purchased in reels for high volume assembly. For more information, consult your local Lumileds representative.

For high volume applications, custom LUXEON power light source designs are available upon request, to meet your specific needs.



LUXEON Emitter is available in white, green, blue, royal blue, cyan, red, red-orange and amber.



## Features

- ♦ Highest flux per LED family in the world
- ♦ Very long operating life (up to 100k hours)
- ♦ Available in White, Green, Blue, Royal Blue, Cyan, Red, Red-Orange, and Amber
- ♦ Lambertian, Batwing or Side Emitting radiation pattern
- ♦ More energy efficient than incandescent and most halogen lamps
- ♦ Low voltage DC operated
- ♦ Cool beam, safe to the touch
- ♦ Instant light (less than 100 ns)
- ♦ Fully dimmable
- ♦ No UV
- ♦ Superior ESD protection

## Typical Applications

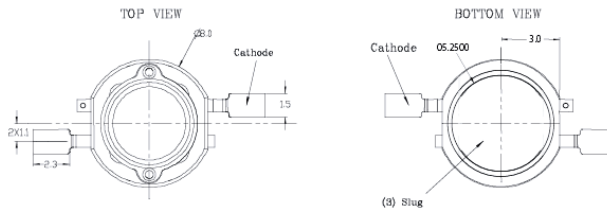
- ♦ Reading lights (car, bus, aircraft)
- ♦ Portable (flashlight, bicycle)
- ♦ Mini-accent/Uplighters/Downlighters/Orientation
- ♦ Fiber optic alternative/Decorative/Entertainment
- ♦ Bollards/Security/Garden
- ♦ Cove/Undershelf/Task
- ♦ Traffic signaling/Beacons/ Rail crossing and Wayside
- ♦ Indoor/Outdoor Commercial and Residential Architectural
- ♦ Automotive Ext (Stop-Tail-Turn, CHMSL, Mirror Side Repeat)
- ♦ Edge-lit signs (Exit, point of sale)
- ♦ LCD Backlights/Light Guides

**PHILIPS**

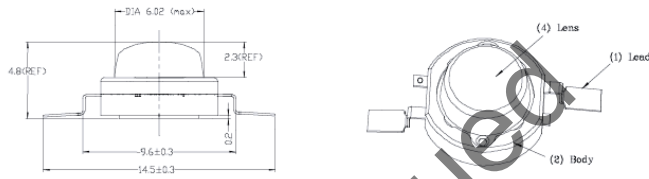
**LUMILEDS**  
LIGHT FROM SILICON VALLEY

## Mechanical Dimensions

### Batwing



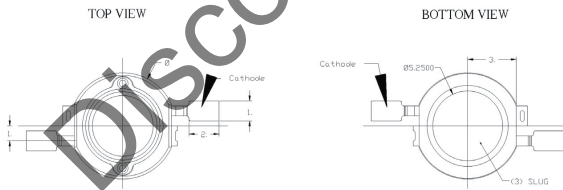
Drawings not to scale



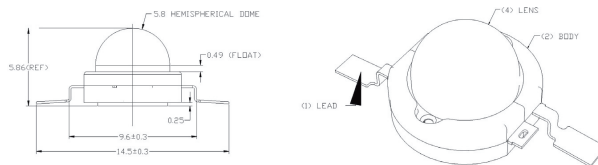
#### Notes:

1. The anode side of the device is denoted by a hole in the lead frame. Electrical insulation between the case and the board is required—slug of device is not electrically neutral. Do not electrically connect either the anode or cathode to the slug.
2. All dimensions are in millimeters.
3. All dimensions without tolerances are for reference only.

### Lambertian



Drawings not to scale

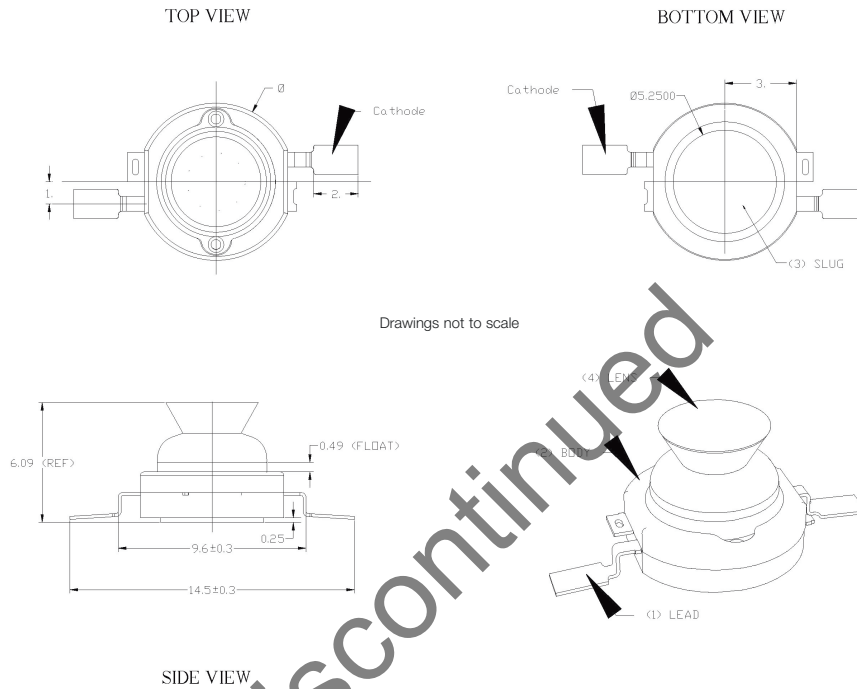


#### Notes:

1. The anode side of the device is denoted by a hole in the lead frame. Electrical insulation between the case and the board is required—slug of device is not electrically neutral. Do not electrically connect either the anode or cathode to the slug.
2. All dimensions are in millimeters.
3. All dimensions without tolerances are for reference only.

## Mechanical Dimensions, Continued

### Side Emitting



#### Notes:

1. The anode side of the device is denoted by a hole in the lead frame. Electrical insulation between the case and the board is required—slug of device is not electrically neutral. Do not electrically connect either the anode or cathode to the slug.
2. Caution must be used in handling this device to avoid damage to the lens surfaces that will reduce optical efficiency.
3. All dimensions are in millimeters.
4. All dimensions without tolerances are for reference only.



## Flux Characteristics at 350mA, Junction Temperature, $T_J = 25^\circ\text{C}$

Table 1.

Color	LUXEON Emitter	Minimum Luminous Flux (lm) or Radiometric Power (mW) $\Phi_V^{[1,2]}$	Typical Luminous Flux (lm) or Radiometric Power (mW) $\Phi_V^{[2]}$	Radiation Pattern
White <sup>[3]</sup>	LXHL-BW02	30.6	45	Batwing
Warm White	LXHL-BW03	13.9	30	
Green	LXHL-BM01	30.6	53	
Cyan	LXHL-BE01	30.6	45	
Blue <sup>[3]</sup>	LXHL-BB01	8.2	16	
Royal blue <sup>[4]</sup>	LXHL-BR02	145 mW	220 mW	
Red	LXHL-BD01	13.9	27	
Red	LXHL-BD03	30.6	42	
Red-Orange	LXHL-BH03	39.8	55	
Amber	LXHL-BL01	10.7	25	
Amber	LXHL-BL03	23.5	42	
White	LXHL-PW01	30.6	45	Lambertian
Green	LXHL-PM01	30.6	53	
Cyan	LXHL-PE01	30.6	45	
Blue <sup>[3]</sup>	LXHL-PB01	8.2	16	
Royal Blue <sup>[4]</sup>	LXHL-PR03	145 mW	220 mW	
Red	LXHL-PD01	30.6	44	
Red-Orange	LXHL-PH01	39.8	55	
Amber	LXHL-PL01	23.5	42	
White	LXHL-DW01	23.5	40.5	Side Emitting
Green	LXHL-DM01	23.5	48	
Cyan	LXHL-DE01	23.5	40.5	
Blue <sup>[3]</sup>	LXHL-DB01	8.2	14.5	
Royal blue <sup>[4]</sup>	LXHL-DR01	115 mW	198 mW	
Red	LXHL-DD01	30.6	40	
Red-Orange	LXHL-DH01	39.8	50	
Amber	LXHL-DL01	23.5	38	

Notes for Table 1:

- Minimum luminous flux or radiometric power performance guaranteed within published operating conditions. Philips Lumileds maintains a tolerance of  $\pm 10\%$  on flux and power measurements.
- LUXEON types with even higher luminous flux levels will become available in the future. Please consult your Philips Lumileds Authorized Distributor or Philips Lumileds sales representative for more information.
- Minimum flux value for 470 nm devices. Due to the CIE eye response curve in the short blue wavelength range, the minimum luminous flux will vary over the Philips Lumileds' blue color range. Luminous flux will vary from a minimum of 6.3 lm at 460 nm to a typical of 20 lm at 480 nm due to this effect. Although the luminous power efficiency is lower in the short blue wavelength range, radiometric power efficiency increases as wavelength decreases. For more information, consult the LUXEON Design Guide, available upon request.
- Royal Blue product is binned by radiometric power and peak wavelength rather than photometric lumens and dominant wavelength.
- In July 2003 Philips Lumileds announced a second-generation white batwing product using a new phosphor deposition process resulting in improved color uniformity, LXHL-BW02.

## Optical Characteristics at 350mA, Junction Temperature, T<sub>J</sub> = 25°C

Table 2.

Radiation Pattern	Color	Dominant Wavelength <sup>(1)</sup> λ <sub>D</sub> , Peak Wavelength <sup>(2)</sup> λ <sub>P</sub> , or Color Temperature <sup>(3)</sup>			Spectral Half-width <sup>(4)</sup> Δλ <sub>1/2</sub> (nm)	Temperature Coefficient of Dominant Wavelength (nm/°C) Δλ <sub>D</sub> /ΔT <sub>J</sub>	Total Included Angle <sup>(5)</sup> θ <sub>0.90V</sub> (degrees)	Viewing Angle <sup>(6)</sup> 2θ 1/2 (degrees)
		Min.	CCT Typ.	Max.				
Batwing	White	4500K	5500 K	10000 K	---	---	110	110
	Warm White	2850K	3300K	3800K	---	---	110	110
	Green	520 nm	530 nm	550 nm	35	0.04	110	110
	Cyan	490 nm	505 nm	520 nm	30	0.04	110	110
	Blue	460 nm	470 nm	490 nm	25	0.04	110	110
	Royal Blue <sup>(7)</sup>	440 nm	455 nm	460 nm	20	0.04	110	110
	Red	620.5 nm	625 nm	645 nm	20	0.05	110	110
	Red-Orange	613.5 nm	617 nm	620.5nm	20	0.06	110	110
	Amber	584.5 nm	590 nm	597 nm	14	0.09	110	110
Lambertian	White	4500 K	5500 K	10000 K	---	---	160	140
	Green	520 nm	530 nm	550 nm	35	0.04	160	140
	Cyan	490 nm	505 nm	520 nm	30	0.04	160	140
	Blue	460 nm	470 nm	490 nm	25	0.04	160	140
	Royal Blue <sup>(7)</sup>	440 nm	455 nm	460 nm	20	0.04	160	140
	Red	620.5 nm	627 nm	645 nm	20	0.05	160	140
	Red-Orange	613.5 nm	617 nm	620.5 nm	20	0.06	160	140
	Amber	584.5 nm	590 nm	597 nm	14	0.09	160	140

## Optical Characteristics at 350mA, Junction Temperature, T<sub>J</sub> = 25°C, Cont.

Table 3.

Radiation Pattern	Color	Dominant Wavelength <sup>(1)</sup> λ <sub>D</sub> , Peak Wavelength <sup>(2)</sup> λ <sub>P</sub> , or Color Temperature <sup>(3)</sup>			Spectral Half-width <sup>(4)</sup> Δλ <sub>1/2</sub> (nm)	Temperature Coefficient of Dominant Wavelength (nm/°C) Δλ <sub>D</sub> /ΔT <sub>J</sub>	Typical Total Flux Percent within first 45° <sup>(7)</sup> Cum Φ <sub>45°</sub>	Typical Angle of Peak Intensity <sup>(8)</sup> θ <sub>Peak</sub>
		Min.	CCT Typ.	Max.				
Side Emitting	White	4500 K	5500 K	10000 K	---	---	<15%	75° - 85°
	Green	520 nm	530 nm	550 nm	35	0.04	<15%	75° - 85°
	Cyan	490 nm	505 nm	520 nm	30	0.04	<15%	75° - 85°
	Blue	460 nm	470 nm	490 nm	25	0.04	<15%	75° - 85°
	Royal Blue <sup>(7)</sup>	440 nm	455 nm	460 nm	20	0.04	<15%	75° - 85°
	Red	620.5 nm	627 nm	645 nm	20	0.05	<15%	75° - 85°
	Red-Orange	613.5 nm	617 nm	620.5 nm	20	0.06	<15%	75° - 85°
	Amber	584.5 nm	590 nm	597 nm	14	0.09	<15%	75° - 85°

Notes: (for Tables 2 & 3)

- Dominant wavelength is derived from the CIE 1931 Chromaticity diagram and represents the perceived color. Philips Lumileds maintains a tolerance of ± 0.5nm for dominant wavelength measurements.
- Royal Blue product is binned by radiometric power and peak wavelength rather than photometric lumens and dominant wavelength. Philips Lumileds maintains a tolerance of ± 2nm for peak wavelength measurements.
- CCT ±5% tester tolerance.
- Spectral width at 1/2 of the peak intensity.
- Total angle at which 90% of total luminous flux is captured.
- θ<sub>1/2</sub> is the off axis angle from lamp centerline where the luminous intensity is 1/2 of the peak value.
- Cumulative flux percent within ± 45° from optical axis.
- Off axis angle from lamp centerline where the luminous intensity reaches the peak value.

Notes: (for Tables 2 & 3) Continued

9. CRI (Color Rendering Index) for White product types is 70. CRI for Warm White product type is 90 with typical  $R_g$  value of 70.
10. All red, red-orange and amber products built with Aluminum Indium Gallium Phosphide (AlInGaP).
11. All white, warm white, green, cyan, blue and royal blue products built with Indium Gallium Nitride (InGaN).
12. Blue and Royal Blue power light sources represented here are IEC825 Class 2 for eye safety.

### Electrical Characteristics at 350mA, Junction Temperature, $T_J = 25^\circ\text{C}$

Table 4.

Radiation Pattern	Color	Forward Voltage $V_F$ <sup>(1)</sup>			Dynamic Resistance <sup>(2)</sup> ( $\Omega$ ) $R_D$	Temperature Coefficient of Forward Voltage <sup>(3)</sup> (mV/ $^\circ\text{C}$ ) $\Delta V_F / \Delta T_J$	Thermal Resistance, Junction to Case ( $^\circ\text{C}/\text{W}$ ) $R_{\theta_{JC}}$
		Min.	Typ.	Max.			
Batwing	White	2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
	Warm White	2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
	Green	2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
	Cyan	2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
	Blue	2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
	Royal Blue	2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
	Red (BD01)	2.31	2.85	3.27	2.4	-2.0	15
	Red (BD03)	2.31	2.95	3.51	2.4	-2.0	18
	Red-Orange	2.31	2.95	3.51	2.4	-2.0	18
	Amber (BL01)	2.31	2.85	3.27	2.4	-2.0	15
	Amber (BL03)	2.31	2.95	3.51	2.4	-2.0	18
	Lambertian	White	2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0
Green		2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
Cyan		2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
Blue		2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
Royal Blue		2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
Red		2.31	2.85	3.51	2.4	-2.0	18
Red-Orange		2.31	2.95	3.51	2.4	-2.0	18
Amber		2.31	2.95	3.51	2.4	-2.0	18
Side Emitting	White	2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
	Green	2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
	Cyan	2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
	Blue	2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
	Royal Blue	2.79	3.42	3.99	1.0	-2.0	15
	Red	2.31	2.95	3.51	2.4	-2.0	18
	Red-Orange	2.31	2.95	3.51	2.4	-2.0	18
	Amber	2.31	2.95	3.51	2.4	-2.0	18

Notes for Table 4:

1. Philips Lumileds maintains a tolerance of  $\pm 0.06\text{V}$  on forward voltage measurements.
2. Dynamic resistance is the inverse of the slope in linear forward voltage model for LEDs. See Figures 3a and 3b. Measured between  $25^\circ\text{C} \leq T_J \leq 110^\circ\text{C}$  at  $I_F = 350\text{mA}$ .

## Absolute Maximum Ratings

Table 5.			
Parameter	White/Green/ Cyan/Blue/ Royal Blue	Warm White	Red/ Red-Orange/ Amber
DC Forward Current (mA) <sup>(1)</sup>	350	350	385
Peak Pulsed Forward Current (mA)	500	500	550
Average Forward Current (mA)	350	350	350
ESD Sensitivity <sup>(2)</sup>	± 16,000V HBM		
LED Junction Temperature (°C)	135	120	120
Storage Temperature (°C)	-40 to +120	-40 to +120	-40 to +120
Soldering Temperature (°C) <sup>(3)</sup>	260 for 5 seconds max	260 for 5 seconds max	260 for 5 seconds max

Notes for Table 5:

1. Proper current derating must be observed to maintain junction temperature below the maximum. For more information, consult the LUXEON Design Guide, available upon request.
2. LEDs are not designed to be driven in reverse bias. Please consult Philips Lumileds' Application Brief AB11 for further information.
3. Measured at leads, during lead soldering and slug attach, body temperature must not exceed 120°C. LUXEON emitters cannot be soldered by general IR or Vapor-phase reflow, nor by wave soldering. Lead soldering is limited to selective heating of the leads, such as by hot-bar reflow, fiber focussed IR, or hand soldering. The package back plane (slug) may not be attached by soldering, but rather with a thermally conductive adhesive. Electrical insulation between the slug and the board is required. Please consult Philips Lumileds' Application Brief AB10 on *LUXEON Emitter Assembly Information* for further details on assembly methods.

Discontinued

Wavelength Characteristics,  $T_J = 25^\circ\text{C}$

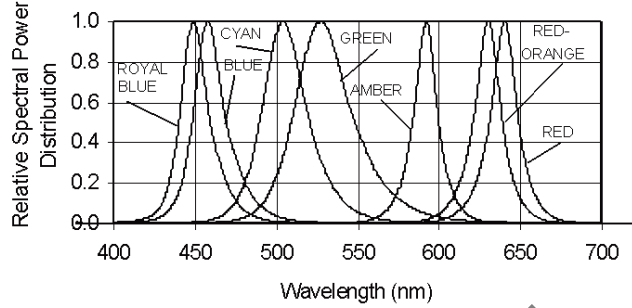


Figure 1a. Relative Intensity vs. Wavelength

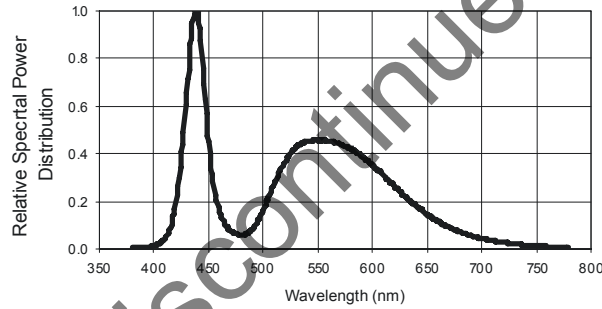


Figure 1b. White Color Spectrum of Typical CCT Part, Integrated Measurement. Applicable for LXHL-BW02.

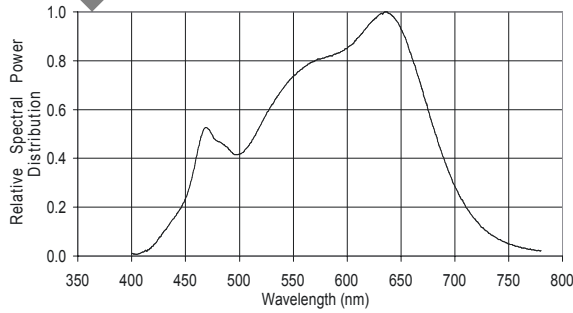


Figure 1c. White Color Spectrum of Typical Warm White Part, Integrated Measurement. Applicable for LXHL-BW03.

**Light Output Characteristics**

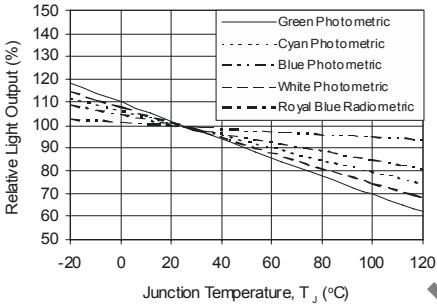


Figure 2a. Relative Light Output vs. Junction Temperature for White, Warm White, Green, Cyan, Blue and Royal Blue.

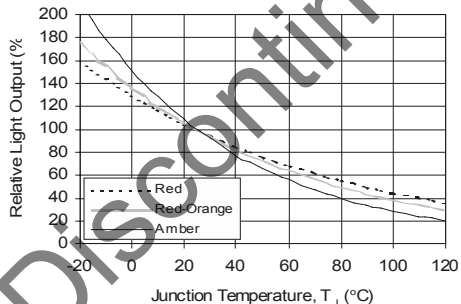


Figure 2b. Relative Light Output vs. Junction Temperature for Red, Red-Orange and Amber.

---

## Forward Current Characteristics, $T_J = 25^\circ\text{C}$

Note:

Driving these high power devices at currents less than the test conditions may produce unpredictable results and may be subject to variation in performance. Pulse width modulation (PWM) is recommended for dimming effects.

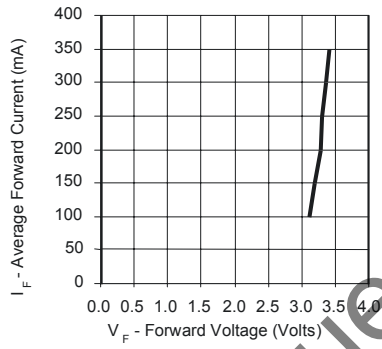


Figure 3a. Forward Current vs. Forward Voltage for White, Warm White, Green, Cyan, Blue, and Royal Blue.

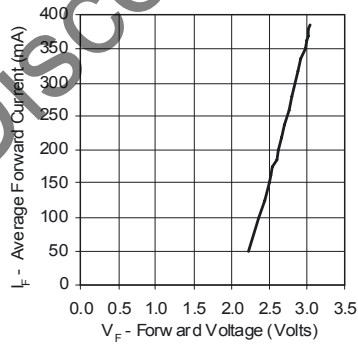


Figure 3b. Forward Current vs. Forward Voltage for Red, Red-Orange and Amber.

---

## Forward Current Characteristics, $T_J = 25^\circ\text{C}$ , Continued

Note:

Driving these high power devices at currents less than the test conditions may produce unpredictable results and may be subject to variation in performance. Pulse width modulation (PWM) is recommended for dimming effects.

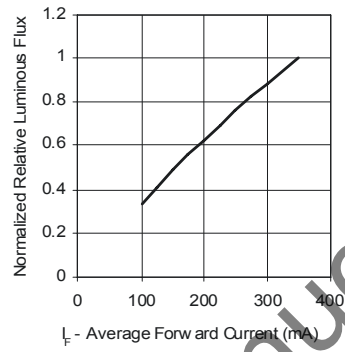


Figure 4a. Relative Luminous Flux vs. Forward Current for White, Warm White, Green, Cyan, Blue, and Royal Blue at  $T_J = 25^\circ\text{C}$  maintained.

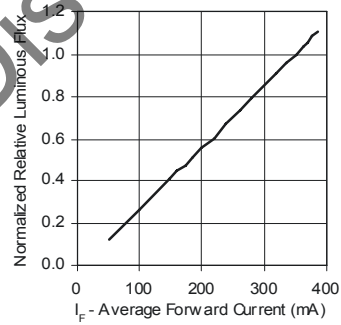


Figure 4b. Relative Luminous Flux vs. Forward Current for Red, Red-Orange and Amber at  $T_J = 25^\circ\text{C}$  maintained.



## Current Derating Curves

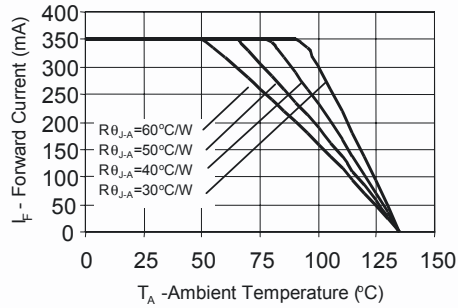


Figure 5a. Maximum Forward Current vs. Ambient Temperature.  
Derating based on  $T_{JMAX} = 135^\circ\text{C}$  for White, Green, Cyan, Blue, and Royal Blue.

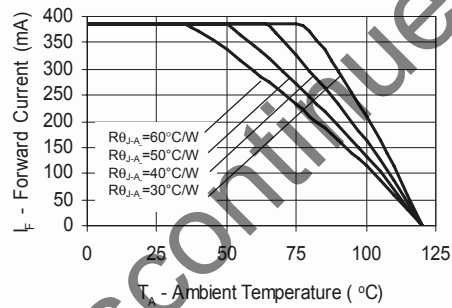


Figure 5b. Maximum Forward Current vs. Ambient Temperature.  
Derating based on  $T_{JMAX} = 120^\circ\text{C}$  for Red, Red-Orange and Amber.

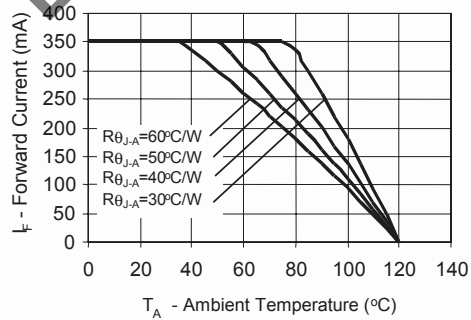


Figure 5c. Maximum Forward Current vs. Ambient Temperature.  
Derating based on  $T_{JMAX} = 120^\circ\text{C}$  for Warm White.

## Typical Batwing Representative Spatial Radiation Pattern

Note:

For more detailed technical information regarding LUXEON radiation patterns, please consult your Philips Lumileds Authorized Distributor or Philips Lumileds sales representative.

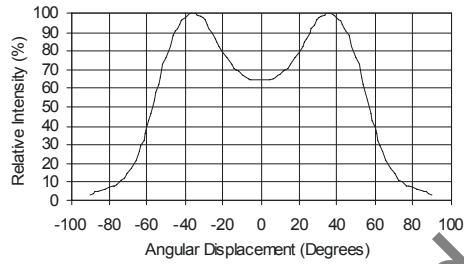


Figure 6a. Typical Representative Spatial Radiation Pattern for LUXEON Emitter Warm White (LXHL-BW03).

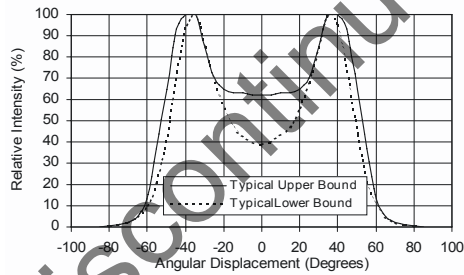


Figure 6b. Typical Representative Spatial Radiation Pattern for LUXEON Emitter Green, Cyan, Blue and Royal Blue.

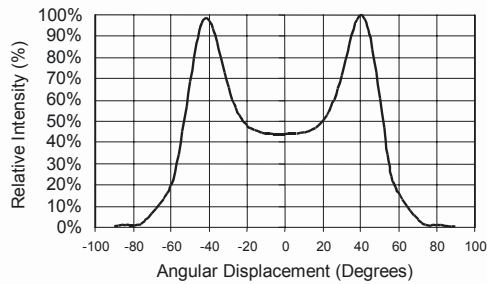


Figure 6c. Typical Representative Spatial Radiation Pattern for LUXEON Emitter White (LXHL-BW02).

---

## Typical Batwing Representative Spatial Radiation Pattern, Continued

Note:

For more detailed technical information regarding LUXEON radiation patterns, please consult your Philips Lumileds Authorized Distributor or Philips Lumileds sales representative.

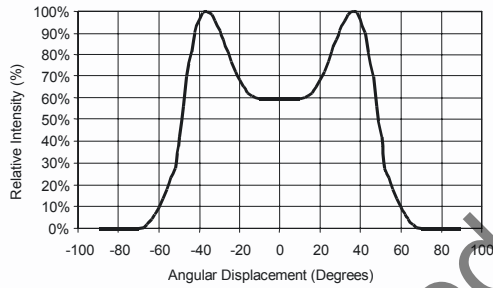


Figure 6d. Typical Representative Spatial Radiation Pattern for LUXEON Emitter Red (LXHL-BD01) and Amber (LXHL-BL01).

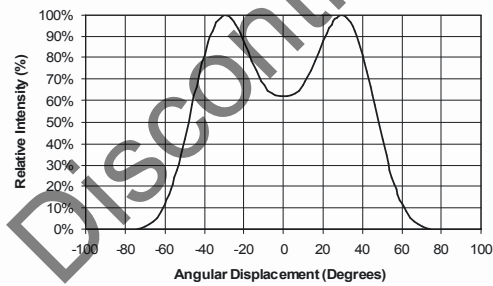


Figure 6e. Typical Representative Spatial Radiation Pattern for LUXEON Emitter Red (LXHL-BD03), Red-Orange (LXHL-BH03) and Amber (LXHL-BL03).

## Typical Lambertian Representative Spatial Radiation Pattern

Note:

For more detailed technical information regarding LUXEON radiation patterns, please consult your Philips Lumileds Authorized Distributor or Philips Lumileds sales representative.

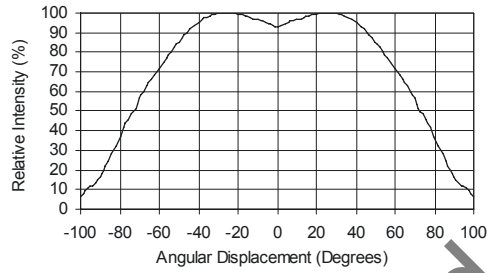


Figure 7a. Typical Representative Spatial Radiation Pattern for LUXEON Emitter Red, Red-Orange and Amber.

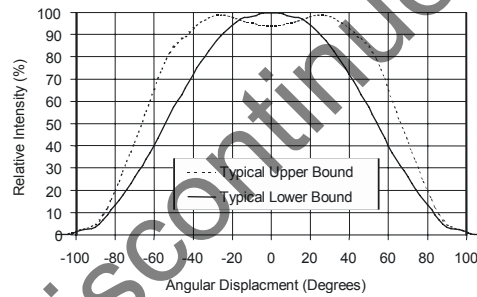


Figure 7b. Typical Representative Spatial Radiation Pattern for LUXEON Emitter White, Green, Cyan, Blue and Royal Blue.

## Typical Side Emitting Representative Spatial Radiation Pattern

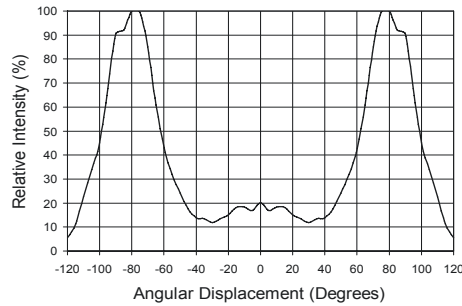


Figure 8a. Typical Representative Spatial Radiation Pattern for LUXEON Emitter Red, Red-Orange and Amber.

---

## Typical Side Emitting Representative Spatial Radiation Pattern, Continued

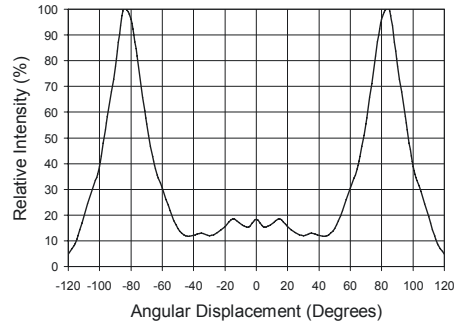


Figure 8b. Typical Representative Spatial Radiation Pattern for LUXEON Emitter White, Green, Cyan, Blue and Royal Blue.

### Average Lumen Maintenance Characteristics

Lifetime for solid-state lighting devices (LEDs) is typically defined in terms of lumen maintenance—the percentage of initial light output remaining after a specified period of time. Philips Lumileds projects that LUXEON products will deliver on average 70% lumen maintenance at 50,000 hours of operation. This performance is based on independent test data, Philips Lumileds historical data from tests run on similar material systems, and internal LUXEON reliability testing. This projection is based on constant current 350 mA operation with junction temperature maintained at or below 90°C. Observation of design limits included in this data sheet is required in order to achieve this projected lumen maintenance.

Discontinued

## Emitter Reel Packaging

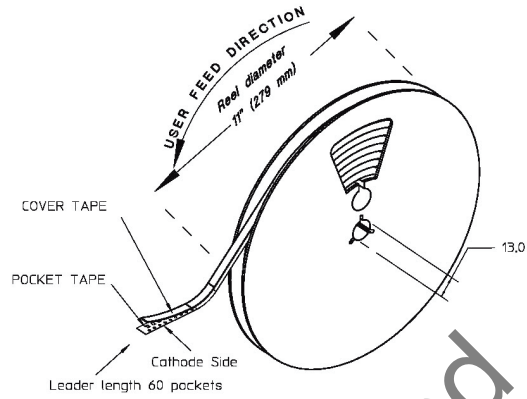


Figure 9. Reel dimensions and orientation.

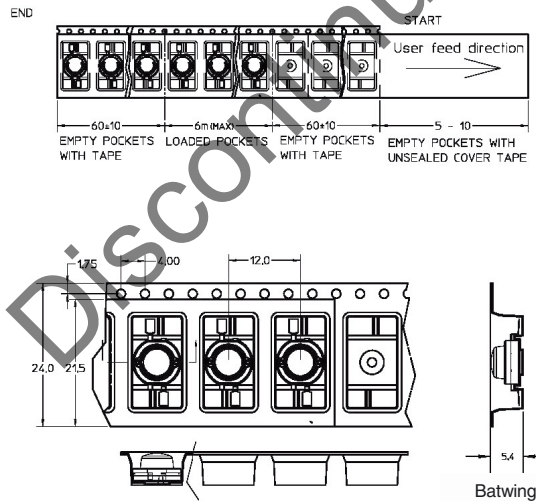


Figure 10. Tape dimensions for Batwing radiation pattern.

### Notes:

1. LUXEON emitters should be picked up by the body (not the lens) during placement. The inner diameter of the pick-up collet should be greater than or equal to 6.5 mm. Please consult Philips Lumileds Application Brief AB10 on LUXEON Emitter assembly information for further details on assembly methods.
2. Drawings not to scale.
3. All dimensions are in millimeters.
4. All dimensions without tolerances are for reference only.

## Emitter Reel Packaging

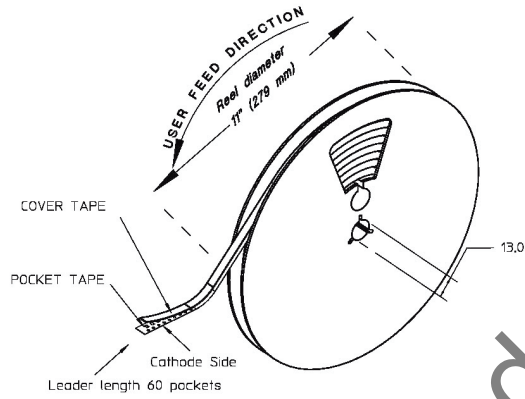


Figure 11. Reel dimensions and orientation.

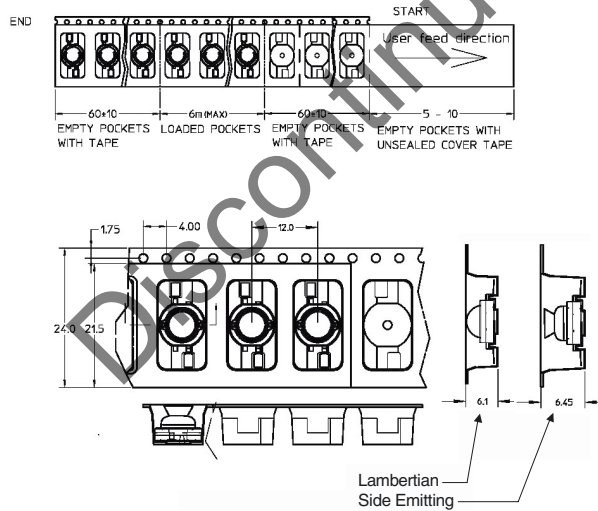


Figure 12. Tape dimensions for Lambertian and Side Emitting radiation patterns.

### Notes:

1. LUXEON emitters should be picked up by the body (not the lens) during placement. The inner diameter of the pick-up collet should be greater than or equal to 6.5 mm. Please consult Philips Lumileds Application Brief AB10 on LUXEON Emitter assembly information for further details on assembly methods.
2. Drawings not to scale.
3. All dimensions are in millimeters.
4. All dimensions without tolerances are for reference only.

---

# PHILIPS

LUMILEDS  
LIGHT FROM SILICON VALLEY

## Company Information

Philips Lumileds Lighting Company is a world class supplier of Light Emitting Diodes (LEDs) and produces billions of LEDs annually. Philips Lumileds is a fully integrated supplier producing core LED material in all three base colors (red, green, blue) and white. Philips Lumileds has R&D centers in San Jose, California and in The Netherlands as well as production capabilities in San Jose, Penang Malaysia and Singapore. Founded in 1999, Philips Lumileds is the high-flux LED technology leader and is dedicated to bridging the gap between solid-state LED technology and the lighting world. Philips Lumileds technologies, LEDs and systems are enabling new applications and markets in the lighting world.

Philips Lumileds may make process or materials changes affecting the performance or other characteristics of our products. These products supplied after such changes will continue to meet published specifications, but may not be identical to products supplied as samples or under prior orders.



WWW.LUXEON.COM  
WWW.LUMILEDSFUTURE.COM

FOR TECHNICAL ASSISTANCE OR THE  
LOCATION OF YOUR NEAREST SALES  
OFFICE CONTACT ANY OF THE  
FOLLOWING:

**NORTH AMERICA:**  
1 888 589 3662  
AMERICAS@FUTURELIGHTINGSOLUTIONS.COM

**EUROPE:**  
OO 800 443 88 873  
EUROPE@FUTURELIGHTINGSOLUTIONS.COM

**ASIA PACIFIC:**  
800 5864 5337  
ASIA@FUTURELIGHTINGSOLUTIONS.COM

**JAPAN:**  
800 5864 5337  
JAPAN@FUTURELIGHTINGSOLUTIONS.COM

©2007 Philips Lumileds Lighting Company. All rights reserved. Product specifications are subject to change without notice. Luxeon is a registered trademark of the Philips Lumileds Lighting Company in the United States and other countries.







LUXEON Rebel  
General Purpose White  
Portfolio

*High flux  
and color stability*

Technical Datasheet DS64

L U X E  N<sup>®</sup>  
never before possible

# LUXEON<sup>®</sup> Rebel

## General Purpose White Portfolio

### Introduction

The LUXEON<sup>®</sup> Rebel General Purpose White Portfolio LEDs in this datasheet are ideal for all lighting and illumination applications. These flux differentiated parts, like all other LUXEON Rebel LEDs, provide the industry's best lumen maintenance, superior reliability and quality white light that make them the most widely used power LEDs today. Using the information in this document you can start designing applications to your unique specifications.

LUXEON Rebel General Purpose White LEDs

- Deliver more usable light and higher flux density
- Optimize applications to reduce size and cost
- Tightly pack the LEDs for mixing
- Engineer more robust applications
- Utilize standard FR4 PCB technology
- Simplify manufacturing through the use of surface mount technology.

PHILIPS  
LUMILEDS

# Table of Contents

Product Nomenclature.....	3
Average Lumen Maintenance Characteristics .....	3
Environmental Compliance.....	3
Visual Appearance of LUXEON Rebel.....	3
Flux Characteristics.....	4
Flux Performance, Binning, and Supportability .....	5
Optical Characteristics .....	6
Electrical Characteristics.....	7
Absolute Maximum Ratings .....	8
JEDEC Moisture Sensitivity.....	8
Reflow Soldering Characteristics.....	9
Mechanical Dimensions .....	10
Pad Configuration.....	11
Solder Pad Design.....	11
Wavelength Characteristics.....	12
Typical Light Output Characteristics over Temperature.....	14
Typical Forward Current Characteristics.....	15
Typical Relative Luminous Flux .....	16
Current Derating Curves.....	17
Typical Radiation Patterns .....	19
Emitter Pocket Tape Packaging.....	21
Emitter Reel Packaging .....	22
Product Binning and Labeling .....	23
Luminous Flux Bins.....	24
Cool-White Bin Structure .....	25
Neutral-White Bin Structure .....	27
Warm-White Bin Structure.....	28
Forward Voltage Bins.....	30

## Product Nomenclature

LUXEON Rebel is tested and binned at 350 mA.

The part number designation is explained as follows:

L X M L - A B C D - E F G H

Where:

- A — designates radiation pattern (value P for Lambertian)
- B — designates color (see LUXEON Rebel Binning and Labeling section)
- C — designates color variant (0 for direct colored variants)
- D — designates test current (value I for 350 mA)
- E — reserved for future product offerings
- FGH — minimum luminous flux (lm) or radiometric power (mW) performance

Therefore products tested and binned at 350 mA follow the part numbering scheme:

L X M L - P x 0 I - x x x x

## Average Lumen Maintenance Characteristics

Lifetime for solid-state lighting devices (LEDs) is typically defined in terms of lumen maintenance—the percentage of initial light output remaining after a specified period of time.

Philips Lumileds projects that cool-white, neutral-white and warm-white LUXEON Rebel products will deliver, on average, 70% lumen maintenance (B50, L70) at 50,000 hours of operation at a forward current of 700 mA. This projection is based on constant current operation with junction temperature maintained at or below 135°C.

This performance is based on independent test data, Philips Lumileds historical data from tests run on similar material systems, and internal LUXEON reliability testing. Observation of design limits included in this data sheet is required in order to achieve this projected lumen maintenance.

## Environmental Compliance

Philips Lumileds is committed to providing environmentally friendly products to the solid-state lighting market. LUXEON Rebel is compliant to the European Union directives on the restriction of hazardous substances in electronic equipment, namely the RoHS directive. Philips Lumileds will not intentionally add the following restricted materials to the LUXEON Rebel: lead, mercury, cadmium, hexavalent chromium, polybrominated biphenyls (PBB) or polybrominated diphenyl ethers (PBDE).

## Visual Appearance of LUXEON Rebel

All lighted LUXEON Rebel product will provide comparable lambertian beam performance, suitable for use with commercially available optical systems. Without power, LED die within different reels may appear visually different. Please contact your Philips Lumileds or Future Electronics representative for further information.

# Flux Characteristics

## Flux Characteristics for LUXEON Rebel, Thermal Pad Temperature=25°C

**Table I.**

Performance at Test Current				Typical Performance at Indicated Current	
Color	Part Number	Minimum Luminous Flux (lm) $\Phi_v^{[1]}$	Test Current (mA)	Typical Luminous Flux (lm) $\Phi_v^{[2]}$	Drive Current (mA)
Cool White	LXML-PWCI-0040	40	350	80	700
	LXML-PWCI-0050	50	350	95	700
	LXML-PWCI-0080	80	350	145	700
	LXML-PWCI-0090	90	350	160	700
	LXML-PWCI-0100	100	350	180	700
Neutral-White	LXML-PWNI-0040	40	350	80	700
	LXML-PWNI-0050	50	350	95	700
	LXML-PWNI-0080	80	350	145	700
	LXML-PWNI-0090	90	350	160	700
	LXML-PWNI-0100	100	350	180	700
Warm-White	LXML-PWWI-0040	40	350	80	700
	LXML-PWWI-0050	50	350	95	700
	LXML-PWWI-0060	60	350	110	700

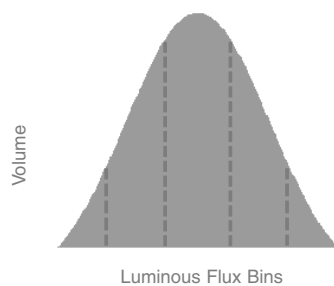
**Notes for Table I:**

1. Minimum luminous flux performance guaranteed within published operating conditions. Philips Lumileds maintains a tolerance of  $\pm 6.5\%$  on flux measurements.
2. Typical luminous flux performance when device is operated within published operating conditions.

## Flux Characteristics, Continued

### Flux Performance, Binning, and Supportability

LEDs are produced with semiconductor technology that is subject to process variation, yielding a range of flux performance that is approximately Gaussian in nature. In order to provide customers with fine granularity within the overall flux distribution, Philips Lumileds separates LEDs into fixed, easy to design with, minimum luminous flux bins. To verify supportability of parts chosen for your application design, please consult your Philips Lumileds/Future Lighting Solutions sales representative.



# Optical Characteristics

## Lambertian LUXEON Rebel at Test Current <sup>[1]</sup> Thermal Pad Temperature = 25°C

**Table 2.**

Color	Color Temperature <sup>[3] [4]</sup> CCT			Typical Total Included Angle <sup>[5]</sup> (degrees) $\theta_{0.90V}$	Typical Viewing Angle <sup>[6]</sup> (degrees) $2\theta_{1/2}$
	Min.	Typ.	Max.		
Cool-White	4500K	6500K	10,000K	160	120
Neutral-White	3500K	4100K	4500K	160	120
Warm-White	2540K	3100K	3500K	160	120

**Notes for Table 2:**

1. Test current is 350 mA for all LXML-Pxx1-0xxx products.
2. CCT  $\pm 5\%$  tester tolerance.
3. Typical CRI (Color Rendering Index) for cool-white is 70, neutral-white is 70 and warm-white is 85.
4. Total angle at which 90% of total luminous flux is captured.
5. Viewing angle is the off axis angle from lamp centerline where the luminous intensity is  $\frac{1}{2}$  of the peak value.
6. All white products are built with Indium Gallium Nitride (InGaN).
7. Cool-white, neutral-white and warm-white power light sources represented here are IEC825 class 2 for eye safety.

## Electrical Characteristics

### Electrical Characteristics at 350 mA for LUXEON Rebel, Part Numbers LXML-Pxx I-0xxx, Thermal Pad Temperature = 25°C

**Table 3.**

Color	Forward Voltage $V_f$ [1] (V)			Typical Temperature Coefficient of Forward Voltage [2] (mV/°C) $\Delta V_f / \Delta T_j$	Typical Thermal Resistance Junction to Thermal Pad (°C/W) $R\theta_{j-c}$
	Min.	Typ.	Max.		
Cool-White	2.55	3.15	3.99	-2.0 to -4.0	10
Neutral-White	2.55	3.15	3.99	-2.0 to -4.0	10
Warm-White	2.55	3.15	3.99	-2.0 to -4.0	10

**Notes for Table 3:**

1. Philips Lumileds maintains a tolerance of  $\pm 0.06V$  on forward voltage measurements.
  2. Measured between 25°C =  $T_j = 110^\circ C$  at  $I_f = 350$  mA.
- \* Dynamic resistance is the inverse of the slope in linear forward voltage model for LEDs. See figure 6.

### Typical Electrical Characteristics at 700 mA for LUXEON Rebel, Part Numbers LXML-Pxx I-0xxx, Thermal Pad Temperature = 25°C

**Table 4.**

Color	Typical Forward Voltage $V_f$ (V)
Cool-White	3.40
Neutral-White	3.40
Warm-White	3.40

**Notes for Table 4:**

1. Philips Lumileds maintains a tolerance of  $\pm 0.06V$  on forward voltage measurements.
2. Dynamic resistance is the inverse of the slope in linear forward voltage model for LEDs. See figure 6.
3. Measured between 25°C =  $T_j = 110^\circ C$  at  $I_f = 700$  mA.



## Absolute Maximum Ratings

**Table 5.**

Parameter	Cool-White/Neutral-White/Warm-White
DC Forward Current (mA)	1000
Peak Pulsed Forward Current (mA)	1000
Average Forward Current (mA)	1000
ESD Sensitivity	< 8000V Human Body Model (HBM) Class 2 JESD22-A114-B < 400V Machine Model (MM) Class 2 JESD22-A115-B
LED Junction Temperature[1]	150°C
Operating Case Temperature at 350 mA	-40°C - 135°C
Storage Temperature	-40°C - 135°C
Soldering Temperature	JEDEC 020c 260°C
Allowable Reflow Cycles	3
Autoclave Conditions	121°C at 2 ATM 100% Relative Humidity for 96 Hours Maximum
Reverse Voltage (Vr)	See Note 2

**Notes for Table 5:**

1. Proper current derating must be observed to maintain junction temperature below the maximum.
2. LUXEON Rebel LEDs are not designed to be driven in reverse bias.

## JEDEC Moisture Sensitivity

**Table 6.**

Level	Soak Requirements			
	Floor Life		Standard	
	Time	Conditions	Time	Conditions
1	unlimited	≤ 30°C / 85% RH	168h + 5 / -0	85°C / 85% RH

# Reflow Soldering Characteristics

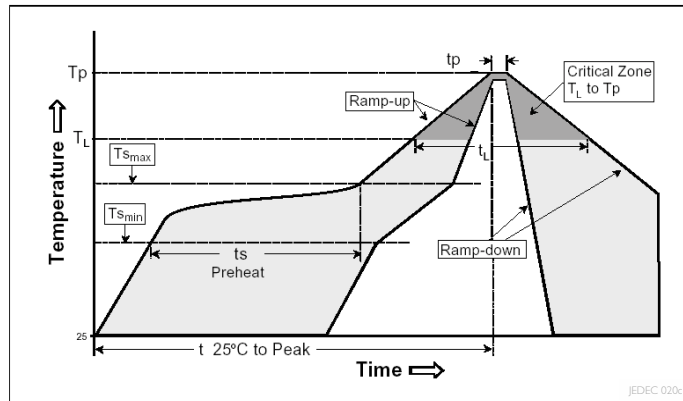


Table 7.

Profile Feature	Lead Free Assembly
Average Ramp-Up Rate ( $T_{s_{max}}$ to $T_p$ )	3°C / second max
Preheat Temperature Min ( $T_{s_{min}}$ )	150°C
Preheat Temperature Max ( $T_{s_{max}}$ )	200°C
Preheat Time ( $t_{s_{min}}$ to $t_{s_{max}}$ )	60 - 180 seconds
Time Maintained Above Temperature $T_L$ ( $t_L$ )	217°C
Time Maintained Above Time ( $t_L$ )	60 - 150 seconds
Peak / Classification Temperature ( $T_p$ )	260°C
Time Within 5°C of Actual Peak Temperature ( $t_p$ )	20 - 40 seconds
Ramp-Down Rate	6°C / second max
Time 25°C to Peak Temperature	8 minutes max

Note for Table 7:

- I. All temperatures refer to the application Printed Circuit Board (PCB), measured on the surface adjacent to the package body.

# Mechanical Dimensions

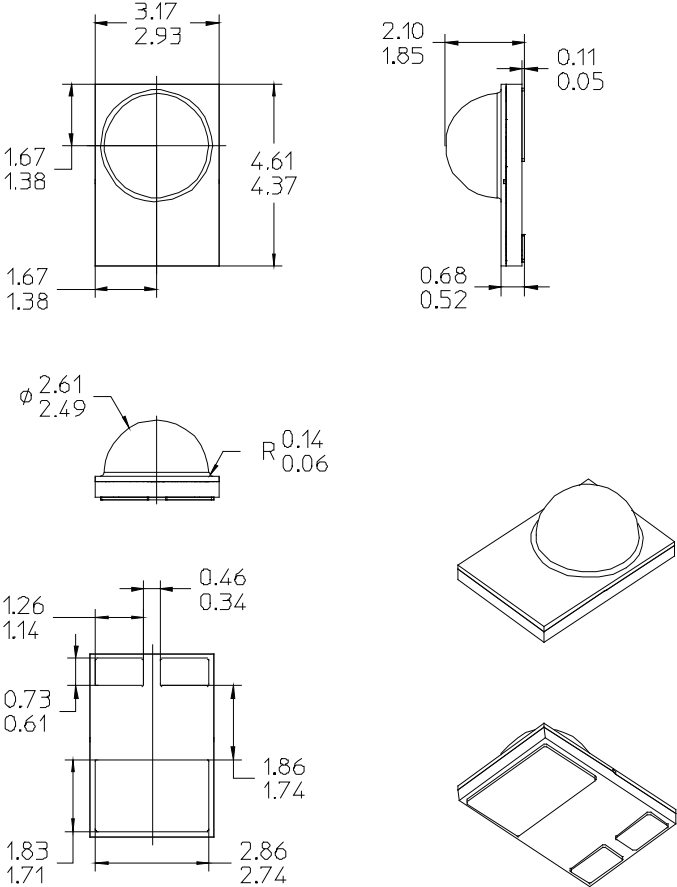
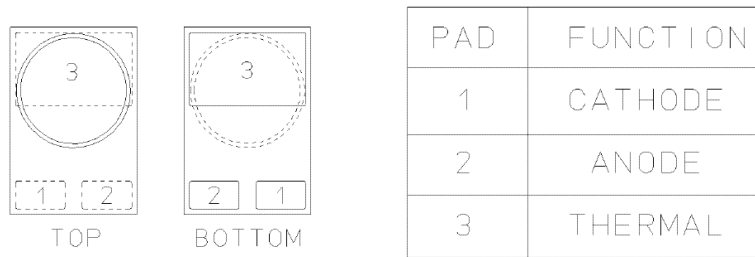


Figure 1. Package outline drawing.

Notes for Figure 1:

1. Do not handle the device by the lens—care must be taken to avoid damage to the lens or the interior of the device that can be damaged by excessive force to the lens.
2. Drawings not to scale.
3. All dimensions are in millimeters.
4. The Thermal Pad is electrically isolated from the Anode and Cathode contact pads.

## Pad Configuration



**Figure 2. Pad configuration.**

Note for Figure 2:

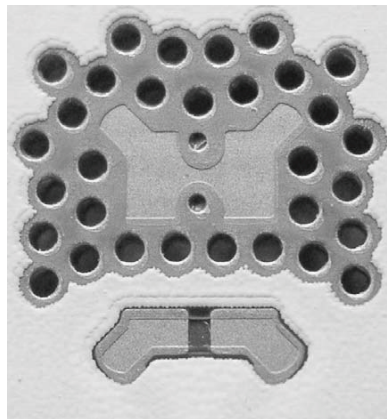
1. The Thermal Pad is electrically isolated from the Anode and Cathode contact pads.

## Solder Pad Design

Note for Figure 3:

The photograph below shows the recommended LUXEON Rebel layout on Printed Circuit Board (PCB). This design easily achieves a thermal resistance of 7K/W.

Application Brief AB32 provides extensive details for this layout. In addition, the .dwg files are available upon request.



**Figure 3. Solder pad layout.**

## Wavelength Characteristics

Cool-White at Test Current  
Thermal Pad Temperature = 25°C

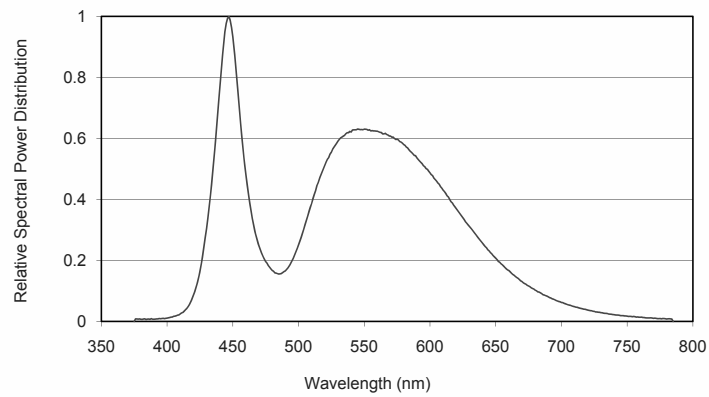


Figure 4a. Cool-white color spectrum of typical CCT part, integrated measurement

Neutral-White at Test Current  
Thermal Pad Temperature = 25°C

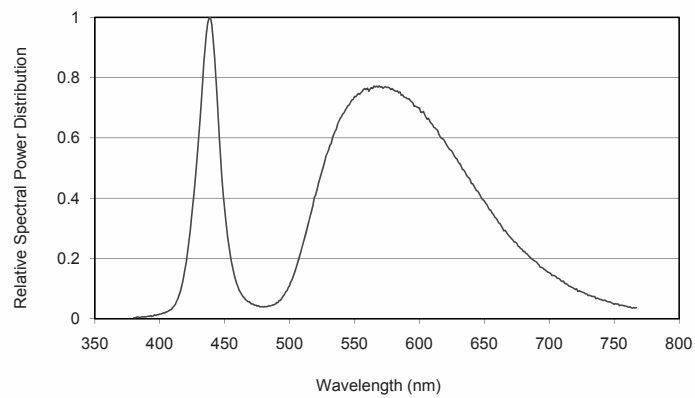


Figure 4b. Neutral-white color spectrum of typical CCT part, integrated measurement.

## Wavelength Characteristics, Continued

Warm-White at Test Current  
Thermal Pad Temperature = 25°C

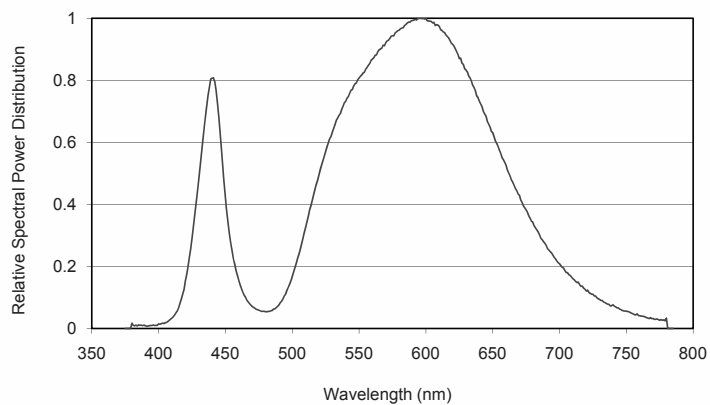


Figure 4c. Warm-white color spectrum of typical CCT part, integrated measurement.

# Typical Light Output Characteristics over Temperature

## Cool-White, Neutral-White, and Warm-White at Test Current

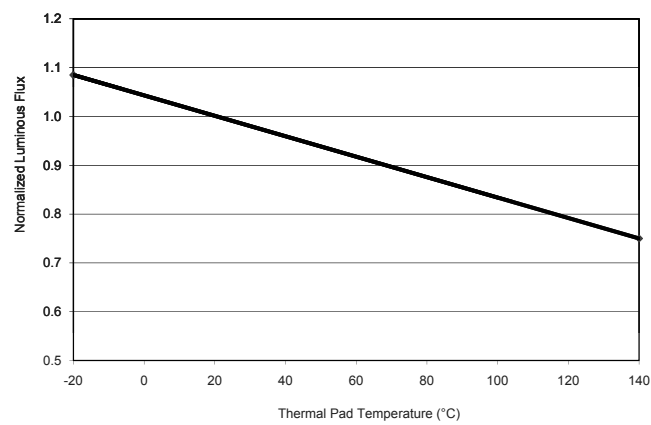


Figure 5. Relative luminous flux vs. thermal pad temperature.

## Typical Forward Current Characteristics

Cool-White, Neutral-White and Warm-White  
Thermal Pad Temperature = 25°C

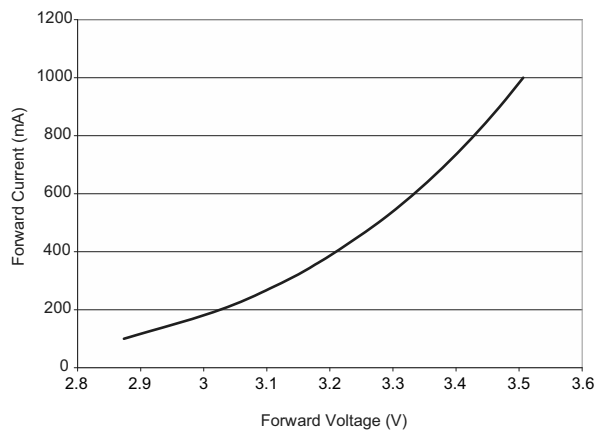


Figure 6. Forward current vs. forward voltage.



## Typical Relative Luminous Flux

Typical Relative Luminous Flux vs. Forward Current for Cool-White, Neutral-White and Warm-White Thermal Pad Temperature = 25°C

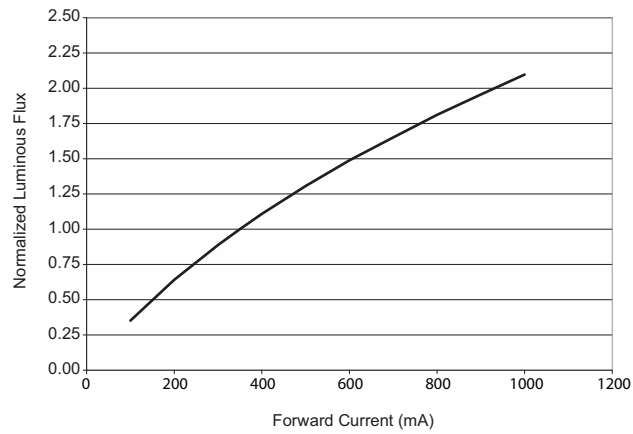


Figure 7. Relative luminous flux or radiometric power vs. forward current for cool-white, neutral-white and warm-white  
Thermal Pad = 25°C maintained, test current 350 mA.

## Current Derating Curves

### Current Derating Curve for 350 mA Drive Current Cool-White, Neutral-White and Warm-White

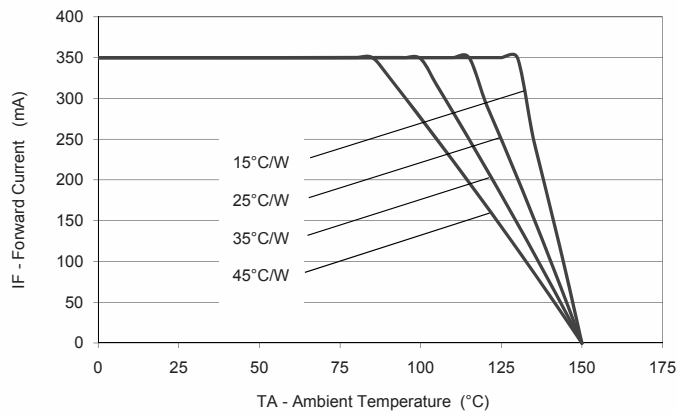


Figure 8. Maximum forward current vs. ambient temperature, based on  $T_{JMAX} = 150^{\circ}C$ .

### Current Derating Curve for 700 mA Drive Current Cool-White, Neutral-White and Warm-White

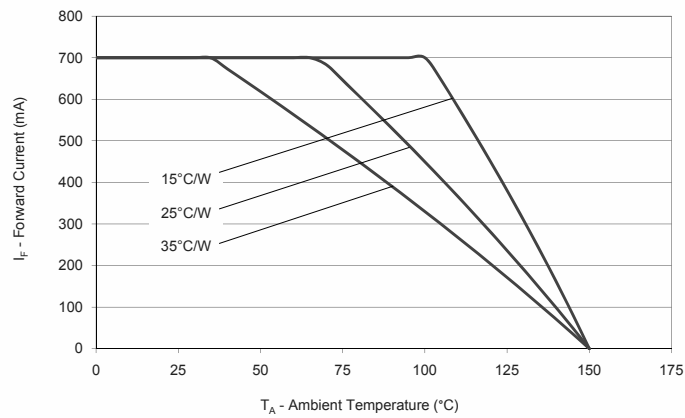


Figure 9. Maximum forward current vs. ambient temperature, based on  $T_{JMAX} = 150^{\circ}C$ .

I. Current derating curves represent constant current operation condition.

# Current Derating Curves, Continued

## Current Derating Curve for 1000 mA Drive Current Cool-White, Neutral-White and Warm-White

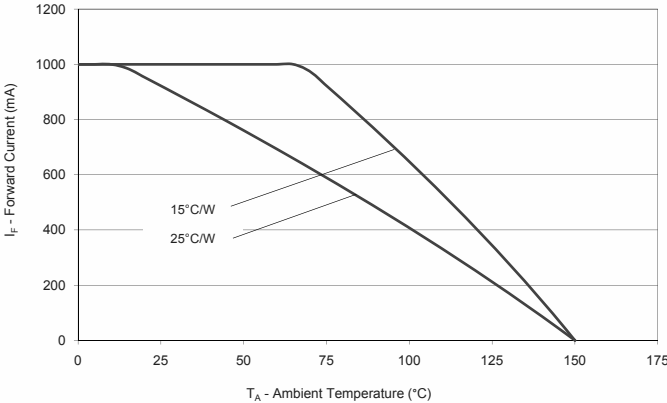


Figure 10. Maximum forward current vs. ambient temperature, based on  $T_{MAX} = 150^{\circ}C$ .

# Typical Radiation Patterns

## Typical Spatial Radiation Pattern for Cool-White, Neutral-White and Warm-White Lambertian

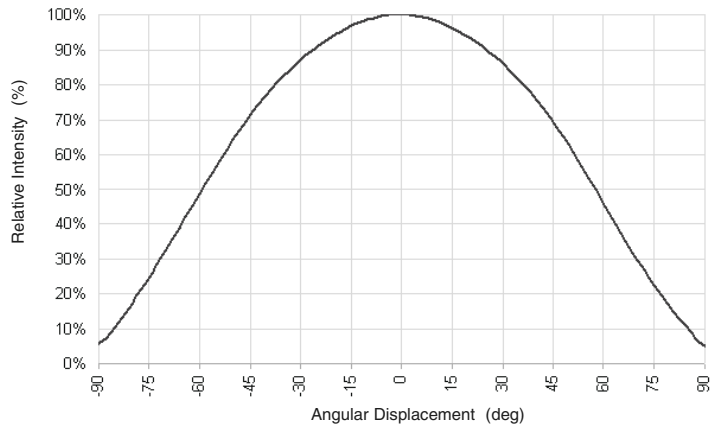


Figure 11a. Typical representative spatial radiation pattern for cool-white, neutral-white and warm-white lambertian.

## Typical Polar Radiation Pattern for White Lambertain

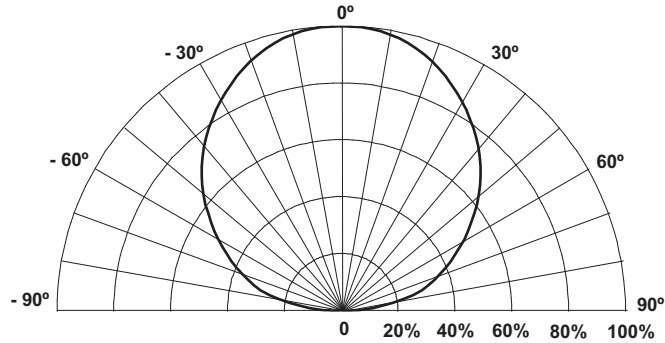


Figure 11b. Typical polar radiation pattern for cool-white, neutral-white and warm-white lambertian.

## Typical Radiation Patterns, Continued

### Typical Color Coordinates vs. Angle for Warm-White

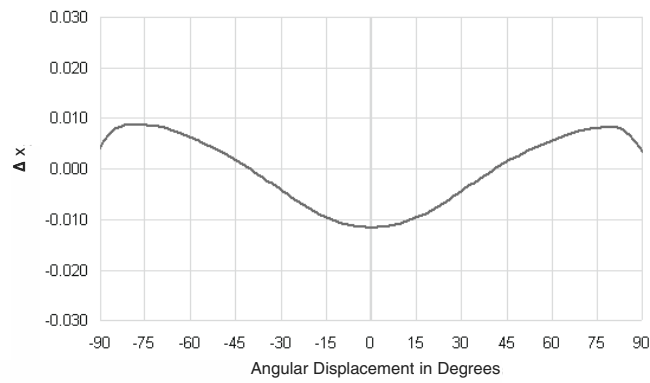


Figure 12a. X coordinate vs. angle for warm-white LUXEON Rebel.

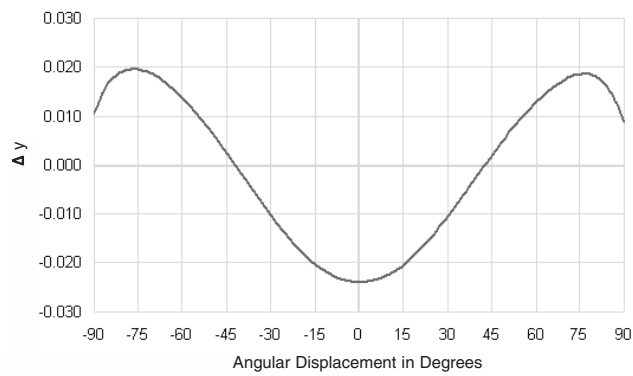


Figure 12b. Y coordinate vs. angle for warm-white LUXEON Rebel.

# Emitter Pocket Tape Packaging

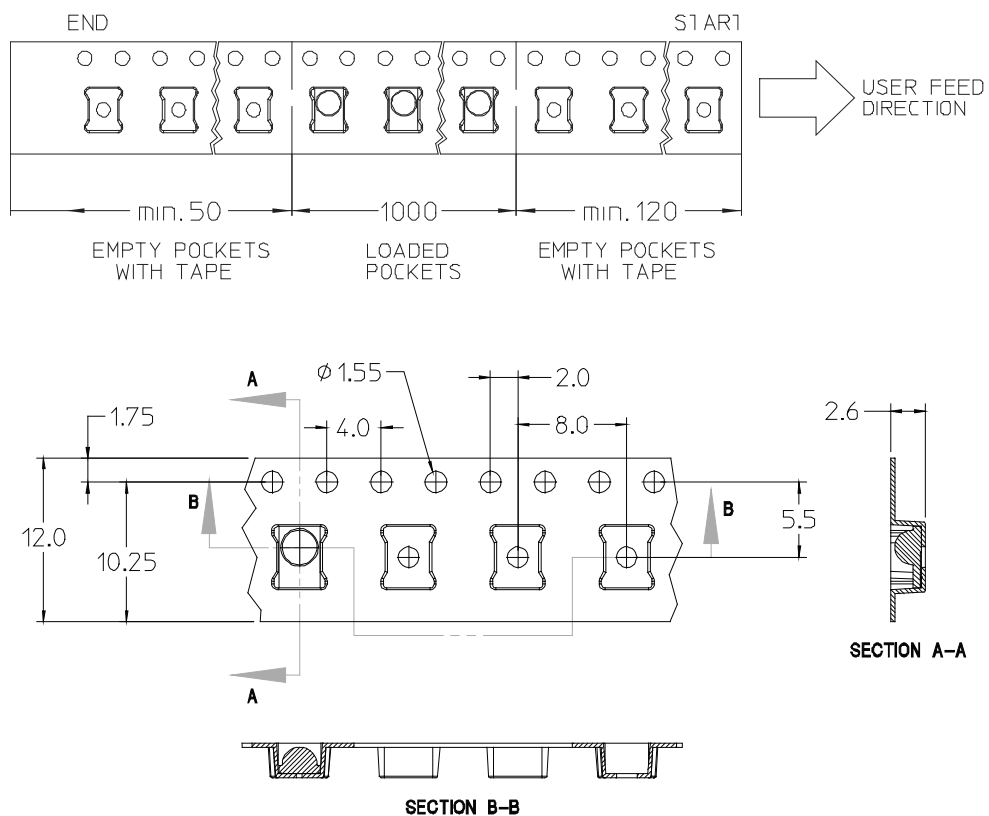


Figure 13. Emitter pocket tape packaging

# Emitter Reel Packaging

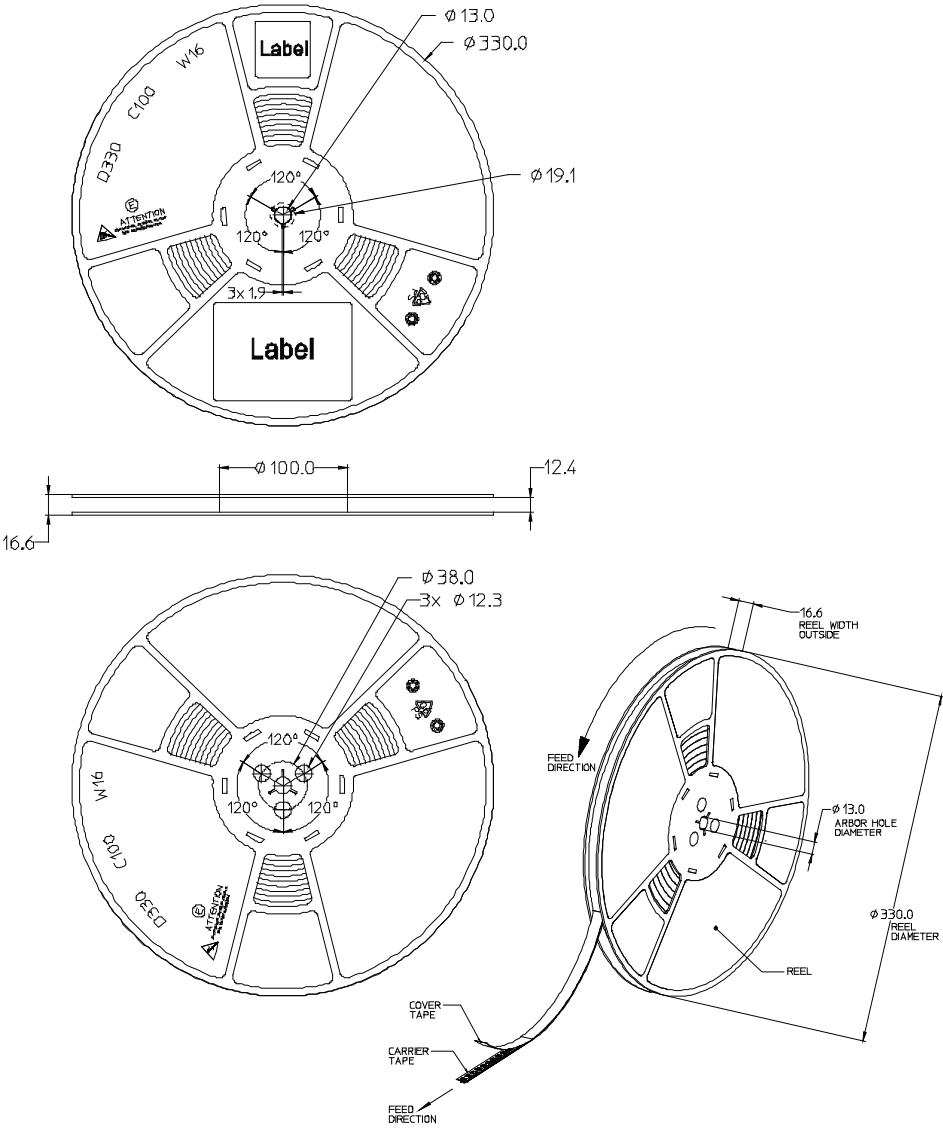


Figure 14. Emitter reel packaging

# Product Binning and Labeling

## **Purpose of Product Binning**

In the manufacturing of semiconductor products, there is a variation of performance around the average values given in the technical data sheets. For this reason, Philips Lumileds bins the LED components for luminous flux, color and forward voltage ( $V_f$ ).

## **Decoding Product Bin Labeling**

LUXEON Rebel Emitters are labeled using a three or four digit alphanumeric code (CAT code) depicting the bin values for emitters packaged on a single reel. All emitters packaged within a reel are of the same 3-variable bin combination. Using these codes, it is possible to determine optimum mixing and matching of products for consistency in a given application.

Reels of Cool-White, Neutral-White and Warm-White Emitters are labeled with a four digit alphanumeric CAT code following the format below.

ABCD

A = Flux bin (J, K, L, M etc.)

B and C = Color bin (W0, U0, V0 etc.)

D =  $V_f$  bin (D, E, F, G etc.)



# Luminous Flux Bins

Table 8 lists the standard photometric luminous flux bins for LUXEON Rebel emitters (tested and binned at 350 mA).

Although several bins are outlined, product availability in a particular bin varies by production run and by product performance. Not all bins are available in all colors.

**Table 8.**  
Flux Bins

Bin Code	Minimum Photometric Flux (lm)	Maximum Photometric Flux (lm)
G	40	50
H	50	60
J	60	70
K	70	80
L	80	90
M	90	100
N	100	120
P	120	140
Q	140	160
R	160	180
S	180	200
T	200	220
U	220	240
V	240	260
W	260	280
X	280	300

## Cool-White Bin Structure

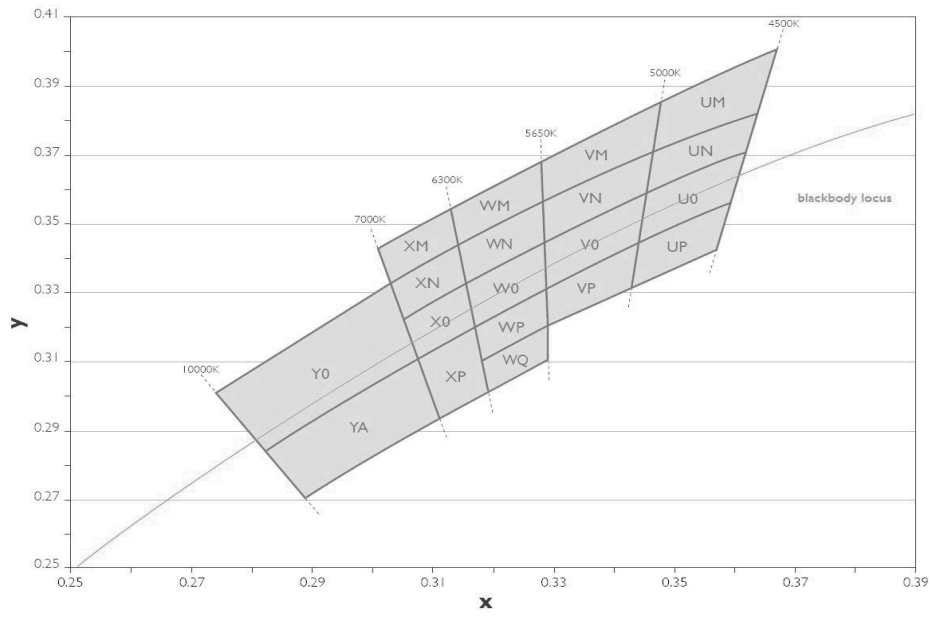


Figure 15. Cool-White bin structure.

Cool-White LUXEON Rebel Emitters are tested and binned by x,y coordinates. 19 Color Bins, CCT Range 10,000K to 4,500K.

**Table 9.**

Cool-White Bin Coordinates							
Bin Code	X	Y	Typical CCT (K)	Bin Code	X	Y	Typical CCT (K)
Y0	0.274238	0.300667	8000	WQ	0.318606	0.310201	6000
	0.303051	0.332708			0.329393	0.320211	
	0.307553	0.310778			0.329544	0.310495	
	0.282968	0.283772			0.319597	0.301303	
YA	0.282968	0.283772	8000	VM	0.328636	0.368952	5300
	0.307553	0.310778			0.348147	0.385629	
	0.311163	0.293192			0.346904	0.371742	
	0.289922	0.270316			0.328823	0.356917	
XM	0.301093	0.342244	6700	VN	0.328823	0.356917	5300
	0.313617	0.354992			0.346904	0.371742	
	0.314792	0.344438			0.345781	0.359190	
	0.303051	0.332708			0.329006	0.345092	
XN	0.303051	0.332708	6700	V0	0.329006	0.345092	5300
	0.314792	0.344438			0.345781	0.359190	
	0.316042	0.333222			0.344443	0.344232	
	0.305170	0.322386			0.329220	0.331331	
X0	0.305170	0.322386	6700	VP	0.329220	0.331331	5300
	0.316042	0.333222			0.344443	0.344232	
	0.317466	0.320438			0.343352	0.332034	
	0.307553	0.310778			0.329393	0.320211	
XP	0.307553	0.310778	6700	UM	0.348147	0.385629	4750
	0.317466	0.320438			0.367294	0.400290	
	0.319597	0.301303			0.364212	0.382878	
	0.311163	0.293192			0.346904	0.371742	
WM	0.313617	0.354992	6000	UN	0.346904	0.371742	4750
	0.328636	0.368952			0.364212	0.382878	
	0.328823	0.356917			0.362219	0.371616	
	0.314792	0.344438			0.345781	0.359190	
WN	0.314792	0.344438	6000	U0	0.345781	0.359190	4750
	0.328823	0.356917			0.362219	0.371616	
	0.329006	0.345092			0.359401	0.355699	
	0.316042	0.333222			0.344443	0.344232	
W0	0.316042	0.333222	6000	UP	0.344443	0.344232	4750
	0.329006	0.345092			0.359401	0.355699	
	0.329220	0.331331			0.357079	0.342581	
	0.317466	0.320438			0.343352	0.332034	
WP	0.317466	0.320438	6000				
	0.329220	0.331331					
	0.329393	0.320211					
	0.318606	0.310201					

Note for Table 9:

1. Philips Lumileds maintains a tester tolerance of  $\pm 0.005$  on x,y color coordinates.

## Neutral-White Bin Structure

Neutral-White LUXEON Rebel Emitters are tested and binned by x,y coordinates. 12 Color Bins, CCT Range 4,500K to 3,500K.

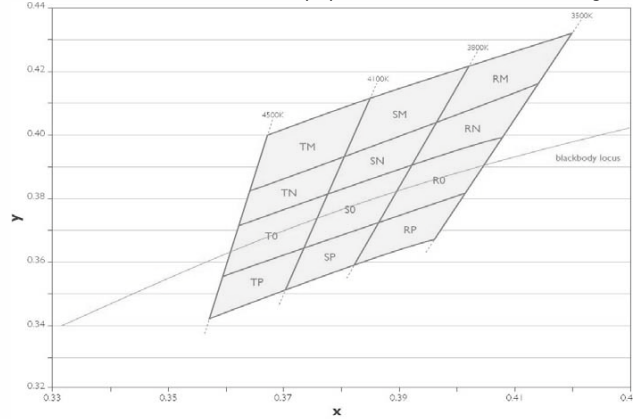


Figure 16. Neutral-White bin structure.

Table 10.

Neutral-White Bin Coordinates							
Bin Code	X	Y	Typical CCT (K)	Bin Code	X	Y	Typical CCT (K)
TM	0.367294	0.400290	4300	SO	0.378264	0.382458	3950
	0.385953	0.412995			0.392368	0.390932	
	0.381106	0.393747			0.387071	0.373899	
	0.364212	0.382878			0.374075	0.365822	
TN	0.364212	0.382878	4300	SP	0.374075	0.365822	3950
	0.381106	0.393747			0.387071	0.373899	
	0.378264	0.382458			0.382598	0.359515	
	0.362219	0.371616			0.370582	0.351953	
TO	0.362219	0.371616	4300	RM	0.402270	0.422776	3650
	0.378264	0.382458			0.420940	0.432618	
	0.374075	0.365822			0.414776	0.416097	
	0.359401	0.355699			0.396279	0.403508	
TP	0.359401	0.355699	4300	RN	0.396279	0.403508	3650
	0.374075	0.365822			0.414776	0.416097	
	0.370582	0.351953			0.408593	0.399525	
	0.357079	0.342581			0.392368	0.390932	
SM	0.385953	0.412995	3950	RO	0.392368	0.390932	3650
	0.402270	0.422776			0.408593	0.399525	
	0.396279	0.403508			0.402113	0.382156	
	0.381106	0.393747			0.387071	0.373899	
SN	0.381106	0.393747	3950	RP	0.387071	0.373899	3650
	0.396279	0.403508			0.402113	0.382156	
	0.392368	0.390932			0.396564	0.367284	
	0.378264	0.382458			0.382598	0.359515	

Note for Table 10:

- I. Philips Lumileds maintains a tester tolerance of  $\pm 0.005$  on x,y color coordinates.

## Warm-White Bin Structure

Warm-White LUXEON Rebel Emitters are tested and binned by x,y coordinates. 15 Color Bins, CCT Range 3,500K to 2,540K.

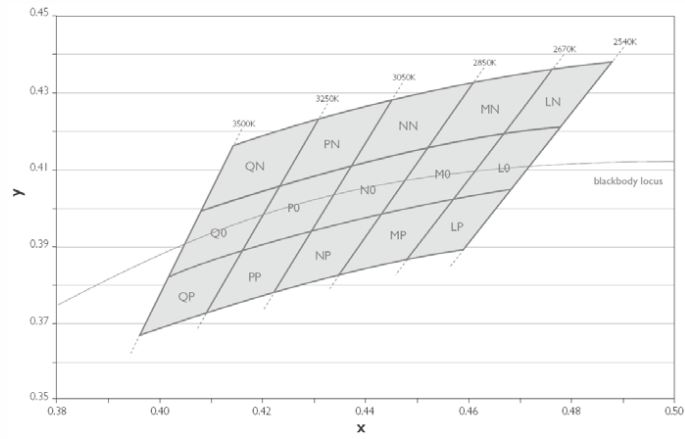


Figure 17. Warm-White bin structure.

**Table II.**

Warm-White Bin Coordinates							
Bin Code	X	Y	Typical CCT (K)	Bin Code	X	Y	Typical CCT (K)
QN	0.414776	0.416097	3375	NP	0.429373	0.394281	2950
	0.431186	0.423386			0.443600	0.399111	
	0.423956	0.406472			0.435591	0.383714	
	0.408593	0.399525			0.422124	0.378952	
QO	0.408593	0.399525	3375	MN	0.461404	0.433334	2760
	0.423956	0.406472			0.476733	0.436634	
	0.416487	0.389001			0.467132	0.419632	
	0.402113	0.382156			0.452512	0.416241	
QP	0.402113	0.382156	3375	MO	0.452512	0.416241	2760
	0.416487	0.389001			0.467132	0.419632	
	0.409996	0.373814			0.457663	0.402866	
	0.396564	0.367284			0.443600	0.399111	
PN	0.431186	0.423386	3150	MP	0.443600	0.399111	2760
	0.445639	0.428680			0.457663	0.402866	
	0.437578	0.411632			0.448994	0.387515	
	0.423956	0.406472			0.435591	0.383714	
PO	0.423956	0.406472	3150	LN	0.476733	0.436634	2605
	0.437578	0.411632			0.488403	0.438170	
	0.429373	0.394281			0.478372	0.421400	
	0.416487	0.389001			0.467132	0.419632	
PP	0.416487	0.389001	3150	LO	0.467132	0.419632	2605
	0.429373	0.394281			0.478372	0.421400	
	0.422124	0.378952			0.468646	0.405140	
	0.409996	0.373814			0.457663	0.402866	
NN	0.445639	0.428680	2950	LP	0.468646	0.405140	2605
	0.461404	0.433334			0.457663	0.402866	
	0.452512	0.416241			0.448994	0.387515	
	0.437578	0.411632			0.459563	0.389955	
NO	0.437578	0.411632	2950				
	0.452512	0.416241					
	0.443600	0.399111					
	0.429373	0.394281					

Note for Table II:

- I. Philips Lumileds maintains a tester tolerance of  $\pm 0.005$  on x,y color coordinates.

## Forward Voltage Bins

Table 13 lists minimum and maximum  $V_f$  bin values per emitter. Although several bins are outlined, product availability in a particular bin varies by production run and by product performance.

**Table 12.**

V <sub>f</sub> Bins		
Bin Code	Minimum Forward Voltage (V)	Maximum Forward Voltage (V)
B	2.55	2.79
C	2.79	3.03
D	3.03	3.27
E	3.27	3.51
F	3.51	3.75
G	3.75	3.99

## Company Information

Philips Lumileds is the world's leading provider of power LEDs for everyday lighting applications. The company's records for light output, efficiency and thermal management are direct results of the ongoing commitment to advancing solid-state lighting technology and enabling lighting solutions that are more environmentally friendly, help reduce CO<sub>2</sub> emissions and reduce the need for power plant expansion. Philips Lumileds LUXEON® LEDs are enabling never before possible applications in outdoor lighting, shop lighting and home lighting.

Philips Lumileds is a fully integrated supplier; producing core LED material in all three base colors, (Red, Green, Blue) and white. Philips Lumileds has R&D centers in San Jose, California and in the Netherlands, and production capabilities in San Jose, Singapore and Penang Malaysia. Founded in 1999, Philips Lumileds is the high flux LED technology leader and is dedicated to bridging the gap between solid-state technology and the lighting world. More information about the company's LUXEON LED products and solid-state lighting technologies can be found at [www.philipslumileds.com](http://www.philipslumileds.com).

©2009 Philips Lumileds Lighting Company. All rights reserved.  
Product specifications are subject to change without notice.  
LUXEON is a registered trademark of the Philips Lumileds  
Lighting Company in the United States and other countries.

**PHILIPS**  
**LUMILEDS**

[www.philipslumileds.com](http://www.philipslumileds.com)  
[www.futurelightingsolutions.com](http://www.futurelightingsolutions.com)

For technical assistance or the location of your nearest sales office contact any of the following:

North America:  
1 888 589 3662  
[americas@futurelightingsolutions.com](mailto:americas@futurelightingsolutions.com)

Europe:  
00 800 443 88 873  
[europe@futurelightingsolutions.com](mailto:europe@futurelightingsolutions.com)

Asia Pacific:  
800 5864 5337  
[asia@futurelightingsolutions.com](mailto:asia@futurelightingsolutions.com)

Japan:  
800 5864 5337  
[japan@futurelightingsolutions.com](mailto:japan@futurelightingsolutions.com)