

# Universidade da Beira Interior

Faculdade de Engenharia - Departamento de Informática



## *MedCor*

Caracterização, modelação e implementação de transformações cromáticas em imagens digitais para observadores com cromatopsia visual

Elaborado por:

Marco André Vieira Andrade Bernardo

Covilhã, Agosto de 2009



# Universidade da Beira Interior

Faculdade de Engenharia - Departamento de Informática

Faculdade de Ciências - Departamento de Física



## *MedCor*

Caracterização, modelação e implementação de transformações cromáticas em imagens digitais para observadores com cromatopsia visual

Elaborado por:

Marco André Vieira Andrade Bernardo

Tese submetida ao Departamento de Informática para avaliação dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Informática, Orientado pela Prof. Doutora Maria Manuela Areias da Costa Pereira de Sousa, Professora Auxiliar no Departamento de Informática da Universidade da Beira Interior e Co-Orientado pelo Prof. Doutor Paulo Torrão Fiadeiro, Professor Associado no Departamento de Física da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal

Covilhã, Agosto de 2009



*Aos meus pais...*



---

# Conteúdo

---

<b>Conteúdo</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>9</b>
1.1 Propósito e Contexto . . . . .	9
1.2 Estado do Problema . . . . .	11
1.3 Objectivo do Estudo . . . . .	12
1.4 Estrutura da Tese . . . . .	13
<b>2 O Sistema Visual Humano</b>	<b>15</b>
2.1 Percepção Humana da Cor . . . . .	15
2.1.1 O olho - Sistema biológico . . . . .	16
2.1.2 A Retina . . . . .	18
2.1.3 Teoria dos Tri-Estímulos . . . . .	19
2.2 Cromatopsia Visual . . . . .	20
2.2.1 Deficiências na percepção da cor . . . . .	21
2.2.2 Hereditariedade . . . . .	21
2.2.3 Tipos de Cromatopsias . . . . .	22
2.2.4 Influência da cromatopsia visual na percepção da cor em dispositivos gráficos . . . . .	24
2.3 Considerações Finais . . . . .	24
<b>3 Colorimetria</b>	<b>25</b>
3.1 Fontes de Luz e Iluminantes . . . . .	25
3.1.1 Tipos de Iluminantes CIE . . . . .	26
3.2 Leis de Grassmann . . . . .	29
3.2.1 Primeira Lei de Grassmann . . . . .	29
3.2.2 Segunda Lei de Grassmann . . . . .	30
3.2.3 Terceira Lei de Grassmann . . . . .	30

3.3	Síntese aditiva e síntese subtractiva . . . . .	30
3.4	Atributos Percentuais da Cor . . . . .	32
3.4.1	Tonalidade . . . . .	33
3.4.2	Saturação . . . . .	33
3.4.3	Luminosidade ou Brilho . . . . .	33
3.5	Modelos de Cor . . . . .	33
3.5.1	Modelo HSV . . . . .	34
3.5.2	Modelo Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) RGB	34
3.5.3	Modelo CIE XYZ . . . . .	35
3.5.4	Modelo CIE LUV . . . . .	38
3.5.5	Modelo CIE LAB . . . . .	39
3.6	Considerações Finais . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>43</b>
4.1	Detecção Qualitativa . . . . .	43
4.1.1	Teste das Lãs de Holmgren . . . . .	43
4.1.2	Teste de Ishihara . . . . .	44
4.1.3	Teste de Farnsworth-Munsell 100-Hue . . . . .	44
4.2	Detecção Qualitativa e Quantitativa . . . . .	45
4.2.1	Anamaloscópio de Nagel . . . . .	45
4.2.2	Cambridge Colour Test . . . . .	46
4.3	Cromatopsia Visual e Imagens Digitais . . . . .	46
4.3.1	Simulação de Cromatopsia Visual em Imagens Digitais . . .	47
4.3.2	Correcção de Cor em Imagens Digitais . . . . .	48
4.3.3	Sistemas de Compensação em Tempo Real . . . . .	50
4.4	Ajuste do Iluminante . . . . .	51
4.5	Considerações Finais . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Metodologia</b>	<b>53</b>
5.1	Sistema Óptico Experimental . . . . .	53
5.1.1	Campo Bipartido . . . . .	55
5.1.2	Response Box . . . . .	55
5.2	Cenário Experimental . . . . .	56
5.2.1	Objectos de Teste . . . . .	56
5.2.2	Cores de Teste . . . . .	57
5.2.3	Iluminantes de Teste . . . . .	57
5.3	Observadores . . . . .	58
5.4	Calibração e Verificação . . . . .	58
5.4.1	Iluminantes de Teste . . . . .	59
5.4.2	Cores de Teste . . . . .	59
5.4.3	Matrizes de Teste . . . . .	59
5.5	Procedimento . . . . .	60

5.5.1	Experiência nº 1 - Variação $u'v'$ . . . . .	61
5.5.2	Experiência nº 2 - Variação L . . . . .	61
5.6	Cálculo Probabilístico . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>63</b>
6.1	Interpretação dos Resultados . . . . .	63
6.1.1	Observador - MAB . . . . .	63
6.1.2	Observador - PTF . . . . .	64
6.1.3	Observador - GMS . . . . .	64
6.1.4	Observador - TVC . . . . .	65
6.2	Interpretação dos Resultados do Cambridge Color Test . . . . .	66
6.2.1	Observador - MAB . . . . .	66
6.2.2	Observador - PTF . . . . .	67
6.2.3	Observador - GMS . . . . .	67
6.2.4	Observador - TVC . . . . .	67
6.3	Discussão . . . . .	67
<b>7</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>69</b>
7.1	Conclusões . . . . .	69
7.2	Trabalho Futuro . . . . .	70
	<b>Bibliografia</b>	<b>71</b>
	<b>A Diferenças de Cor</b>	<b>79</b>
	<b>B Cambridge Colour Test</b>	<b>82</b>
	<b>C Protocolo para o Observador</b>	<b>87</b>
	<b>D Calibração, Medição e Verificação</b>	<b>89</b>
D.1	Iluminantes de Teste . . . . .	89
D.2	Cores de Teste . . . . .	90
D.3	Matrizes de Teste . . . . .	91
D.4	Experiência nº 1 - Variação $u'v'$ . . . . .	92
D.5	Experiência nº 2 - Variação L . . . . .	93
<b>E</b>	<b>Resultados - Experiência nº 1</b>	<b>95</b>
E.1	Cor de Teste - Vermelho . . . . .	96
E.1.1	Iluminante de Teste - D55 . . . . .	96
E.1.2	Iluminante de Teste - D75 . . . . .	97
E.2	Cor de Teste - Verde . . . . .	98
E.2.1	Iluminante de Teste - D55 . . . . .	98
E.2.2	Iluminante de Teste - D75 . . . . .	99
E.3	Cor de Teste - Azul . . . . .	100

E.3.1	Iluminante de Teste - D55 . . . . .	100
E.3.2	Iluminante de Teste - D75 . . . . .	101

**F Resultados - Experiência nº 2** **103**

F.1	Cor de Teste - Vermelho . . . . .	104
F.1.1	Iluminante de Teste - D55 . . . . .	104
F.1.2	Iluminante de Teste - D75 . . . . .	105
F.2	Cor de Teste - Verde . . . . .	106
F.2.1	Iluminante de Teste - D55 . . . . .	106
F.2.2	Iluminante de Teste - D75 . . . . .	107
F.3	Cor de Teste - Azul . . . . .	108
F.3.1	Iluminante de Teste - D55 . . . . .	108
F.3.2	Iluminante de Teste - D75 . . . . .	109

---

# Lista de Figuras

---

1.1	Exemplo de tabela de classificação . . . . .	11
2.1	Triângulo da Cor . . . . .	16
2.2	Espectro electromagnético . . . . .	16
2.3	Secção transversal do olho humano . . . . .	17
2.4	Secção transversal da retina . . . . .	18
2.5	Sensibilidade dos cones ( $L, M, S$ ) da retina . . . . .	19
3.1	Iluminantes CIE D65, A e F2 . . . . .	26
3.2	Iluminantes CIE A, B e C . . . . .	27
3.3	Iluminantes CIE D50, D55, D65, e D75 . . . . .	28
3.4	Iluminantes CIE F2, F7 e F11 . . . . .	29
3.5	Síntese aditiva das cores primárias . . . . .	31
3.6	Síntese subtractiva das cores complementares . . . . .	31
3.7	Modelo HSV . . . . .	34
3.8	Funções de ajuste de cor da CIE 1931 Red-Green-Blue (RGB) - $\bar{r}(\lambda)$ $\bar{g}(\lambda)$ $\bar{b}(\lambda)$ . . . . .	35
3.9	Funções de ajuste de cor da CIE 1931 XYZ - $\bar{x}(\lambda)$ $\bar{y}(\lambda)$ $\bar{z}(\lambda)$ . . . . .	36
3.10	Diagrama de Cromaticidade CIE 1931 ( $x, y$ ) . . . . .	37
3.11	Diagrama de Cromaticidade CIE 1976 ( $u', v'$ ) . . . . .	39
3.12	Diagrama de Cromaticidade CIE LAB . . . . .	40
4.1	Teste de Ishiara - Exemplo . . . . .	44
4.2	Teste de Farnsworth-Munsell 100-Hue . . . . .	45
4.3	Cambridge Colour Test - Exemplo . . . . .	46
5.1	Telespectroradiómetro - PR-650 <i>SpectraColorimeter</i> <sup>TM</sup> . . . . .	54
5.2	Diagrama do Sistema Óptico Experimental . . . . .	54
5.3	Exemplo do Campo Bipartido . . . . .	55
5.4	<i>Response Box</i> utilizada para a execução do teste . . . . .	56

5.5	Exemplo do Cenário Experimental Tridimensional . . . . .	56
5.6	Aparência do Iluminante D55 no Cenário de Teste . . . . .	58
5.7	Aparência do Iluminante D75 no Cenário de Teste . . . . .	58
6.1	$\overline{\Delta E}2000$ Experiência n <sup>o</sup> 1 - D55 . . . . .	65
6.2	$\overline{\Delta E}2000$ Experiência n <sup>o</sup> 2 - D55 . . . . .	65
6.3	$\overline{\Delta E}2000$ Experiência n <sup>o</sup> 1 - D75 . . . . .	66
6.4	$\overline{\Delta E}2000$ Experiência n <sup>o</sup> 2 - D75 . . . . .	66
D.1	Posicionamento da superfície de $BaSO_4$ no cenário para calibração dos iluminantes . . . . .	89
D.2	Exemplo da aplicação para calibração do Iluminante . . . . .	89
D.3	Exemplo do posicionamento de um papel colorido no cenário para calibração . . . . .	90
D.4	Exemplo da aplicação para calibração de uma cor de teste . . . . .	90
D.5	Exemplo da aplicação para geração da matriz $M1_{(11 \times 11)}$ da cor azul sob influência do iluminante D55 . . . . .	91
D.6	Exemplo da aplicação para geração da matriz $M2_{(1 \times 21)}$ da cor azul sob influência do iluminante D55 . . . . .	91
D.7	Experiência n <sup>o</sup> 1 à cor verde sob o iluminante D55 . . . . .	92
D.8	Experiência n <sup>o</sup> 1 à cor azul sob o iluminante D75 . . . . .	92
D.9	Exemplo da aplicação para a execução da experiência n <sup>o</sup> 1 da cor azul sob o iluminante D55 . . . . .	92
D.10	Experiência n <sup>o</sup> 2 à cor verde sob o iluminante D55 . . . . .	93
D.11	Experiência n <sup>o</sup> 2 à cor azul sob o iluminante D75 . . . . .	93
D.12	Exemplo da aplicação para a execução da experiência n <sup>o</sup> 2 da cor azul sob o iluminante D55 . . . . .	93
E.1	MAB-Vermelho-D55 . . . . .	96
E.2	PTF-Vermelho-D55 . . . . .	96
E.3	GMS-Vermelho-D55 . . . . .	96
E.4	TVC-Vermelho-D55 . . . . .	96
E.5	MAB-Vermelho-D75 . . . . .	97
E.6	PTF-Vermelho-D75 . . . . .	97
E.7	GMS-Vermelho-D75 . . . . .	97
E.8	TVC-Vermelho-D75 . . . . .	97
E.9	MAB-Verde-D55 . . . . .	98
E.10	PTF-Verde-D55 . . . . .	98
E.11	GMS-Verde-D55 . . . . .	98
E.12	TVC-Verde-D55 . . . . .	98
E.13	MAB-Verde-D75 . . . . .	99
E.14	PTF-Verde-D75 . . . . .	99

E.15	GMS-Verde-D75	99
E.16	TVC-Verde-D75	99
E.17	MAB-Azul-D55	100
E.18	PTF-Azul-D55	100
E.19	GMS-Azul-D55	100
E.20	TVC-Azul-D55	100
E.21	MAB-Azul-D75	101
E.22	PTF-Azul-D75	101
E.23	GMS-Azul-D75	101
E.24	TVC-Azul-D75	101
F.1	MAB-Vermelho-D55	104
F.2	PTF-Vermelho-D55	104
F.3	GMS-Vermelho-D55	104
F.4	TVC-Vermelho-D55	104
F.5	MAB-Vermelho-D75	105
F.6	PTF-Vermelho-D75	105
F.7	GMS-Vermelho-D75	105
F.8	TVC-Vermelho-D75	105
F.9	MAB-Verde-D55	106
F.10	PTF-Verde-D55	106
F.11	GMS-Verde-D55	106
F.12	TVC-Verde-D55	106
F.13	MAB-Verde-D75	107
F.14	PTF-Verde-D75	107
F.15	GMS-Verde-D75	107
F.16	TVC-Verde-D75	107
F.17	MAB-Azul-D55	108
F.18	PTF-Azul-D55	108
F.19	GMS-Azul-D55	108
F.20	TVC-Azul-D55	108
F.21	MAB-Azul-D75	109
F.22	PTF-Azul-D75	109
F.23	GMS-Azul-D75	109
F.24	TVC-Azul-D75	109



---

# Agradecimentos

---

À Prof. Manuela, por ter aceite o meu desafio. Desde o início, até à recta final, sempre demonstrou interesse, contribuindo na descoberta de respostas de um desafio com uma abordagem muito peculiar.

Ao Prof. Fiadeiro, pois sem ele, não teria sido possível compreender e abordar os temas relacionados com as ciências da visão. Sempre altamente prestável, e com um acolhimento formidável. Mais uma vez, obrigado pelo tempo despendido.

Queria dar também uma palavra de apreço e agradecimento ao Telmo pelas horas despendidas, durante a realização das experiências. Ao Gil, um especial agradecimento, não só pelo tempo despendido, mas também pela amizade e pelas demais opiniões fornecidas durante a realização deste estudo.

Também à minha família sempre presente e pronta a dar-me apoio nas horas mais difíceis.

Finalmente à minha mais que tudo... obrigado pela muita paciência e pelo carinho constantes. Sem ela não teria sido possível completar esta árdua tarefa!



---

# Resumo

---

Os indivíduos de portadores de cromatopsia visual possuem certas limitações, quer na visualização, quer na discriminação de algumas cores no mundo real. Estas limitações reflectem-se também na percepção, por estes indivíduos, de cores emitidas por qualquer tipo de ambiente gráfico.

Esta incapacidade visual poderá, de certa forma, ser prejudicial, na medida em que, o portador deste tipo de limitação poderá não obter uma acessibilidade à informação disponibilizada, nas mais variadas plataformas informáticas, tal como pode um observador com visão normal das cores.

Existe, assim, desta forma, uma lacuna no que diz respeito a um tipo de conhecimento ou de tecnologia que procure contornar estes aspectos fundamentais, que poderão, portanto, contribuir para um melhoramento da qualidade de vida de um indivíduo portador deste tipo de anomalia.

Por esta razão, e devido ao facto do estudo destas anomalias a nível informático ser ínfimo, propõem-se, então, uma metodologia de alteração colorimétrica em imagens digitais, assente na realização de um estudo intensivo e rigoroso através de experiências, com observadores, em cenário tridimensional, de forma a calcular o erro, ou desvio cromático em portadores de cromatopsia visual. Estas experiências que foram efectuadas em cada tipo de cor primária (RGB), sob a influência de dois tipos de iluminantes, de forma a tentar quantificar e modelar a variação de percepção colorimétrica em indivíduos portadores de cromatopsia visual.



---

# Abstract

---

Subjects with visual cromatopsia have certain limitations, on both vizualisation and discrimination of some real world colors. Those limitations are also clearly reflected in their perception of any kind of graphical environment radiated colors.

This inability could be harmful in some way, since the holder of such visual limitation may not get the same access, as an observer with normal color perception, to all kinds of available information in several software platforms.

A knowledge or technology of some kind seeking to circumvent those key aspects is missing, and such discover would contribute to improved quality of life on individuals with such conditions.

For this reason, and since computational studies on these anomalies are minimal, we now propose a methodology for color correction in digital images based on the completion of experimental and both intensive and rigorous studies on subjects, on three-dimensional scenes, so that chromatic error or deviation in visual cromatopsia holders can be quantified. Those trials were conducted in each primary color channel (RGB), in the presence of two different illuminants, to quantify and model color perception variation in visual cromatopsia holders.



---

# Acrónimos

---

**CCD** Charged Coupled Device

**CCT** Correlated Color Temperature

**CIE** Commission Internationale de l'Eclairage

**CMY** Cyan-Magenta-Yellow

**CMYK** Cyan-Magenta-Yellow-black

**CRT** Cathode Ray Tube

**CRS** Cambridge Research Systems

**HLS** Hue-Lightness-Saturation

**HMD** Helmet Mounted Display

**LCD** Liquid Crystal Display

**LMS** Large-Middle-Short

**MATLAB** MATrix LABoratory

**RGB** Red-Green-Blue

**SOM** Self-Organizing Map

**TFT** Thin-Film Transistor

**VSG** Visual Stimulus Generator

**W3C** Word Wide Web Consortium



# Capítulo 1

---

## Introdução

---

### 1.1 Propósito e Contexto

Com a realização desta tese, visou-se aprofundar o estudo de um distúrbio visual colorimétrico que afecta cerca de 9% da população Humana, de forma a ser possível obter uma melhor compreensão desta disfunção psicofísica, bem como a possibilidade de a contornar, conferindo uma melhor qualidade de vida aos seus portadores.

Uma correcta utilização da cor em dispositivos gráficos, para observadores com visão normal das cores, poderá de certa forma ter os seus benefícios, tais como o aumento do realismo da imagem visualizada, a facilidade de discriminação de certos cenários complexos, a obtenção de avisos através de estímulos visuais bem compreendidos, a organização lógica de certo tipo de padrões colorimétricos e mesmo até o desencadeamento de reacções emocionais de satisfação ou de insatisfação. Poderão então, existir alguns factores que proporcionem uma boa qualidade visual das cores emitidas em ambientes gráficos, para observadores com visão normal das cores.

Então, como se deverá utilizar correctamente um dispositivo gráfico e uma correcta gestão colorimétrica no caso do observador ser portador de cromatopsia visual? Assim, a perfeita percepção das cores é algo fundamental para qualquer utilizador de qualquer dispositivo ou ambiente gráfico.

A cor tem nos dias de hoje uma enorme e relevante importância no que diz respeito à informática, visto que está presente nas mais variadas áreas, tais como, a impressão nos mais diversos tipos de dispositivos e materiais, o design gráfico, a codificação, a compressão, e o processamento de imagens digitais. Por estas

razões e, por razões de preenchimento de lacunas em termos de acessibilidades de visualização por indivíduos portadores de daltonismo, se demonstra a importância do estudo desta tese. Importando ainda fazer referência a que a interpretação e metodologia exercida para a tentativa de estudar e compreender a cromatopsia visual, no campo da imagem digital, foi executada de uma forma inovadora, não existindo um tipo de investigação similar, visto que esta metodologia possibilita a medição do erro cromático cometido e ser efectuadas experiências em cenário tridimensional.

No entanto, tornou-se necessário adquirir algumas noções relacionadas com a cor e a luz, de forma a compreender melhor a alteração que ocorre ao nível da percepção da cor, aquando da presença da anomalia num cenário real.

O termo luz é usado em dois sentidos. No sentido físico, a luz é um feixe de ondas electromagnéticas, às quais o olho humano é sensível. No sentido psicofísico, a luz é a sensação produzida num observador, quando a sua retina é estimulada. A sensibilidade do olho humano varia de observador para observador. Para um mesmo observador, esta varia com a frequência da faixa espectral (faixa de comprimentos de onda visíveis) e produz distintos estímulos cromáticos (cor). A cada comprimento de onda é, assim, associada uma cor espectral.

No que concerne a esta tese, a cor pode ser entendida como um certo tipo de luz que afecta a visão humana, bem como o resultado que este fenómeno provoca na mente de quem o vê. É importante referir que a cor existe devido à interacção entre uma fonte de luz, os objectos e o sistema visual humano. O olho humano percebe as cores como sendo um conjunto de vários comprimentos de onda, conjunto este que abrange o vermelho ( $580 \text{ nm}^1$ ), o verde ( $540 \text{ nm}$ ) e o azul ( $450 \text{ nm}$ ); estas cores são absorvidas ou reflectidas pelos objectos.

A cromatopsia visual, também designada por daltonismo, é uma perturbação da percepção visual, caracterizada pela incapacidade de diferenciar todas ou algumas cores, principalmente o verde, o vermelho e o azul. Na retina humana normal existem receptores sensíveis às cores, os cones, que contêm pigmentos selectivos para a cor verde, vermelha e azul. A deficiência de cores ocorre quando há uma redução na quantidade de um ou mais desses pigmentos, a qual está associada à diminuição, ou ausência, de alguns tipos de cones ou perda, parcial ou total, de funcionamento destes. Assim, a consequência da anomalia, a nível visual, traduz-se numa alteração da sensibilidade aos diferentes comprimentos de onda, associados a cada cor, resultando, portanto, numa percepção alterada das cores primárias, o que influencia a percepção das outras cores do espectro.

---

<sup>1</sup>  $1 \text{ nm} = 1.0 \times 10^{-9} \text{ metros}$

## 1.2 Estado do Problema

Será, seguidamente, exposto um cenário que permite verificar as dificuldades quotidianas dos indivíduos portadores de cromatopsia visual. Imagine-se que um docente opta por uma diferente forma de publicar as notas dos seus alunos. Isto é, em vez da habitual pauta com os nomes dos alunos e a respectiva classificação, este docente opta por apresentar os resultados através de tabelas (Figura 1.1). Contudo, estas tabelas, para além dos nomes dos alunos, não possuem qualquer legenda, sendo formadas por células de cores diferentes. Como inicialmente o docente havia atribuído a cada nota uma cor, bastava que o aluno verificasse onde se encontrava o seu nome, para que conseguisse constatar qual a classificação que conseguira obter. Facilmente se verifica, que um aluno daltónico, se debateria sobre qual seria a sua classificação, uma vez que este método de publicação de resultados, por parte do docente, mesmo que indirectamente, acaba por discriminar alunos com deficiência colorimétrica visual.

Sabendo que o docente atribuíra a cor Azul-escuro para "Excelente", a cor Azul-claro para "Muito Bom", a cor Verde para "Bom", a cor Amarela para "Suficiente" e a cor Vermelha para "Insuficiente", facilmente se identificaria qual a classificação que cada aluno obteve, excepto em situações de daltonismo.

Alunos	Frequência A	Frequência B	Exame
Aluno A	Amarelo	Verde	Azul-claro
Aluno B	Azul-claro	Azul-escuro	Verde
Aluno C	Verde	Azul-claro	Azul-escuro
Aluno D	Azul-escuro	Amarelo	Verde
Aluno E	Azul-claro	Verde	Azul-claro

Figura 1.1: Exemplo de tabela de classificação

O mundo actual representa-se principalmente por imagens coloridas, em discernimento das palavras ou acções, colocando os indivíduos portadores de cromatopsia visual em desvantagem, na medida em que não lhes é possibilitada a capacidade de usufruir da "imagem real". No quotidiano, várias são as dificuldades com que estes se deparam. Desde os anúncios publicitários, à compra de roupa, à visualização correcta das luzes dos semáforos e, até mesmo, a navegação na internet, constituem situações delicadas, com as quais os portadores de cromatopsia visual têm que se deparar.

Relativamente à navegação em "Websites" coloridos na "Internet", para um observador com cromatopsia visual, pode ser uma experiência não muito agradável. Alguns dos textos e imagens podem estar ilegíveis, ou mesmo a leitura de gráficos, como constatado anteriormente, pode estar impossibilitada devido ao esquema de cores utilizado.

Para possibilitar a leitura destes textos e gráficos, bem como a visualização de imagens, existem já aplicativos de software que executam transformações de cor no sentido de permitir que cores de aparência dúbia sejam deslocadas para posições diferentes do espaço cromático, por forma a tornarem-se diferenciáveis para um observador com cromatopsia. O problema destes aplicativos de transformação de cor descora a minimização dos eventuais erros cromáticos de percepção, mas sim e apenas que as cores possam ser diferenciáveis.

### 1.3 Objectivo do Estudo

Tendo em conta as dificuldades anteriormente referidas, com a realização desta tese procurou-se criar um alicerce para diminuir a fronteira entre indivíduos com visão normal e indivíduos portadores de cromatopsia visual.

Considerando que cada vez mais indivíduos utilizam computadores e a Internet, torna-se importante criar igualdade entre todos. Assim, o ideal seria existir uma aplicação, tipo "filtro", que permitisse que indivíduos portadores de cromatopsia visual, pudessem discriminar as cores, da mesma forma que a restante população com visão normal.

A grande dificuldade reside no facto de, até hoje, não ser possível determinar o erro cromático para cada tipo de cromatopsia visual. Sabe-se, apenas, que certos comprimentos de onda não são percebidos ou são confundidos, por deficiência genética dos cones na retina, mas ninguém jamais ficou daltónico e, menos ainda, deixou de o ser, para poder quantificar as diferenças inerentes a estes tipos de erros cromáticos. Assim, devido a factores psicofísicos, as respostas não podem ser dadas de uma forma simples e matemática, pois o estudo de um indivíduo com cromatopsia visual não é tarefa trivial. Existe uma grande dificuldade na compreensão da forma como os daltónicos percebem as cores, uma vez que todos as medidas que actualmente existem são de origem qualitativa, e não métodos capazes de quantificar o erro cromático, através da análise dos resultados obtidos em testes com cenários reais tridimensionais.

Assim o objectivo desta tese é propor um modelo, assim como a sua respectiva validação para o qual é necessário medir numericamente em observadores normais e portadores de cromatopsia, o erro ou desvio da representação cromática

de três superfícies coloridas. Estas superfícies tridimensionais foram colocadas num cenário real, o qual foi iluminado com dois tipos de iluminantes "standard", de forma a caracterizar, modelar e implementar transformações cromáticas numa base de dados de imagens digitais para observadores com diversos tipos de cromatopsia visual.

## **1.4 Estrutura da Tese**

Esta tese está estruturada em 7 capítulos. O capítulo 1 descreve, de forma geral, o propósito do trabalho. O capítulo 2, descreve todo o sistema visual humano, em termos da percepção da cor e das diferentes cromatopsias associadas. No capítulo 3 é feita uma breve descrição teórica, relacionada com do estudo da Colorimetria, bem como com a teoria que lhe está inerente, de forma a obter um melhor nível de informação relacionado com objectivo da tese em questão. No capítulo 4 faz-se um breve estudo do estado da arte associado a este tipo de experiências e tecnologias. No capítulo 5 é apresentada a metodologia aplicada e, no capítulo 6 são analisados os resultados. Finalmente, no capítulo 7, são referenciadas as conclusões obtidas no decorrer das experiências.



## Capítulo 2

---

# O Sistema Visual Humano

---

A forma como a cor é apresentada influencia, amplamente, a forma como é percebida. Se a apresentação da cor for feita de modo incorrecto, pode induzir em erro, em relação ao que se está a observar, podendo isto diferir da forma, ou recurso, como o indivíduo está a visualizar o objecto, ou a imagem, em causa.

Se o verde brilhante que irradia de uma floresta estiver muito amarelado e fraco, o esplendor da natureza deixa de ser retratado e a aparência "sadia" da paisagem é perdida. Se os vermelhos da floresta, que deveriam ser resplandecentes e vibrantes, se tornarem fracos, será transmitida uma imagem apática e deprimente, em vez de excitante.

Jacques Rivière<sup>1</sup> escreveu "A verdadeira essência da pintura é representar os objectos tal como eles são genuinamente, isto é, representá-los de uma forma diferente à que é realmente observada. Através da pintura procura-se transmitir a essência, a presença dos objectos, razão pela qual a imagem criada não representa o real aspecto.", porque a aparência muda a cada instante. Esta é a função visual do cérebro, representar os objectos como eles verdadeiramente são, independentemente do momento ou do efeito que esses mesmos objectos possam provocar na visão humana[53].

### 2.1 Percepção Humana da Cor

Conforme se pode visualizar na Figura 2.1, a cor existe devido à interacção entre a fonte de luz, os objectos e o sistema visual humano.

O olho humano percebe as cores como sendo um conjunto de vários compri-

---

<sup>1</sup>Jacques Rivière, 1886-1925, crítico de arte francês

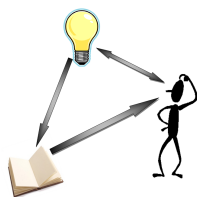


Figura 2.1: Triângulo da Cor

mentos de onda, que como se pode ver na Figura 2.2, abrange o vermelho ( $580\text{ nm}$ ), o verde ( $540\text{ nm}$ ) e o azul ( $450\text{ nm}$ ), os quais são absorvidos ou reflectidos pelos objectos[43].

Por exemplo, supondo que se está num piquenique num dia ensolarado, prestes a apanhar uma maçã vermelha. A luz do sol brilha na maçã e o comprimento de onda do vermelho da luz reflecte da maçã para os olhos. Os comprimentos de onda do azul e do verde são absorvidos pela maçã. Sensores nos olhos reagem à luz reflectida, enviando uma mensagem que é interpretada pelo cérebro como sendo a cor vermelha.

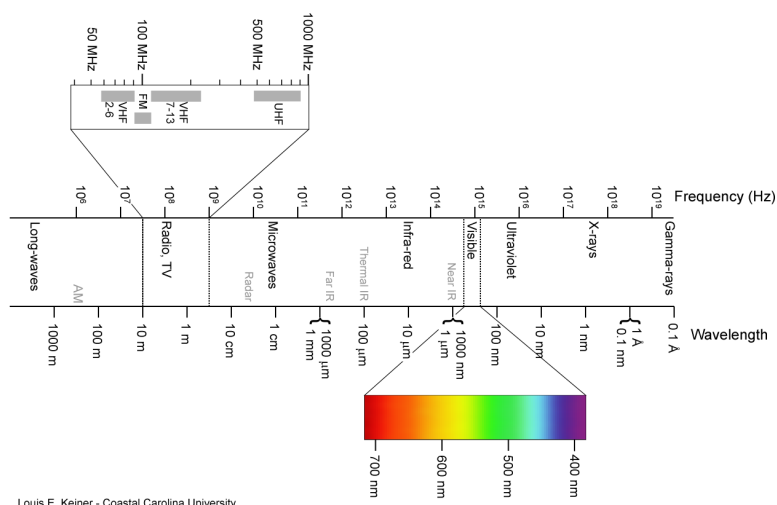


Figura 2.2: Espectro electromagnético (*Louis E. Keiner - Coastal Carolina University*)

### 2.1.1 O olho - Sistema biológico

A percepção visual é fortemente influenciada pela estrutura anatómica do olho humano. Na Figura 2.3 é representado o esquema da secção transversal do olho humano, apresentando os principais elementos estruturais. A estrutura

ocular pode ser comparada a uma máquina fotográfica, a um microscópio óptico ou a um telescópio, devido à sua constituição: um sistema de lentes (cristalino, córnea), um sistema de abertura variável (íris, pupila) e um filme fotográfico (retina).

Enquanto a pupila controla a quantidade de luz admitida pelo olho, a córnea e o cristalino funcionam como um sistema de focagem de uma câmara de vídeo. Estas estruturas, aquando da focagem de um objecto real, fornecem, de uma forma conjunta, uma adaptação à distância do objecto a visualizar. A retina, localizada na parte posterior do olho, fornece a primeira camada de processamento; isto é, retém as imagens e transmite essa informação para o cérebro, através de impulsos eléctricos, enviados pelo nervo óptico. Estas e outras estruturas têm um impacto significativo sobre a percepção da cor[39, 72, 49].

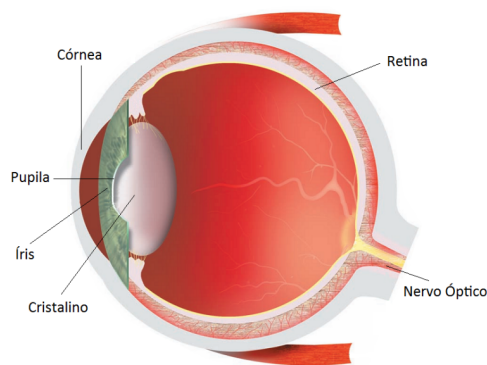


Figura 2.3: Representação esquemática da secção transversal do olho humano, apresentando os principais elementos estruturais[1].

A córnea, uma superfície transparente, está localizada na parte frontal do olho. É um dos elementos fundamentais para a formação de uma imagem, já que faz parte do sistema de focagem do olho[39].

A íris é uma estrutura contráctil, que rodeia a *pupila*, uma abertura central, controlando o seu tamanho e regulando, assim, a quantidade de luz que entra no olho. É, portanto, responsável por definir a porção de retina que é iluminada[39].

O cristalino funciona como uma lente, participando nos meios refractivos do olho, sendo capaz de aumentar o grau de focagem das imagens (acomodação). Esta estrutura absorve e dispersa energia, de comprimentos de onda curtos (azul e violeta), e, consoante o envelhecimento do cristalino, aumenta o nível de absorção e de dispersão de energia, havendo, ainda, um amarelecimento crescente da estrutura em questão[13].

Muitos mecanismos de adaptação cromática, geralmente, desconhecem este tipo

de mudanças graduais e de significativa diferença de observador para observador. Os efeitos desta diferença são mais perceptíveis no desempenho de testes de *color-match*, comparando com outros observadores.

O efeito é particularmente visível com objectos de cor púrpura, uma vez que, o cristalino de um indivíduo com determinada idade, absorve uma grande parte da energia reflectida por um objecto de cor púrpura, mas, por outro lado, não influencia a energia reflectida por um objecto de cor vermelha. Os observadores com idade mais avançada têm tendência para responder que o objecto visualizado é significativamente mais avermelhado, comparando com respostas de observadores mais novos[56, 70, 61].

O nervo óptico tem função exclusivamente sensitiva, transportando as sensações visuais do olho para o cérebro, correspondendo este ao último nível de processamento da retina.[39].

### 2.1.2 A Retina

A retina corresponde à camada mais interna do globo ocular, onde é possível encontrar os elementos responsáveis pela definição das cores[39]. Como se pode visualizar na Figura 2.4, contém cinco camadas de células, responsáveis por várias tarefas no processamento da imagem. A primeira camada celular contém dois tipos de fotorreceptores sensíveis à luz, estando agrupados de forma a filtrar diferentes tipos de luz.

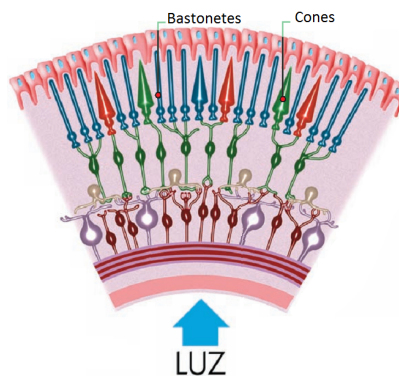


Figura 2.4: Representação esquemática da secção transversal da retina, apresentando os dois tipos de fotorreceptores[1].

#### Bastonetes

Os bastonetes, aproximadamente 120 milhões, são células sensíveis à luz acromática (preto ou branco), responsáveis pela visão nocturna (escotópica), captando, apenas, a luminosidade da cor.[7].

## Cones

Os cones são células sensíveis à luz cromática, constituindo aproximadamente 8 milhões de células, que são responsáveis pela visão diurna (fotópica). Estas células podem operar como filtros, para diferentes comprimentos de onda, estando divididas em três tipos, como se pode visualizar na Figura 2.5:

- **S-Short:** Cones sensíveis a comprimentos de onda curtos, com um pico de sensibilidade de  $440\text{ nm}$  (cor violeta, mas referido erroneamente muitas vezes pela cor azul)[63, 68];
- **M-Middle:** Cones sensíveis a comprimentos de onda médios, com um pico de sensibilidade de  $540\text{ nm}$  (referido pela cor verde, mas percebido como verde-amarelado)[63, 68];
- **L-Large:** Cones sensíveis a comprimentos de onda longos, com um pico de sensibilidade de  $570\text{ nm}$  (referido pela cor vermelha, mas percebido como laranja)[63, 68];

O sistema nervoso obtém a informação da cor, comparando as respostas destes três tipos de cones, e, através destes três valores, descreve a sensação de cor. Então, qualquer método de associação destes três valores (chamados "Tri-Estímulos") e uma cor dada, é chamado de *espaço de cor*.

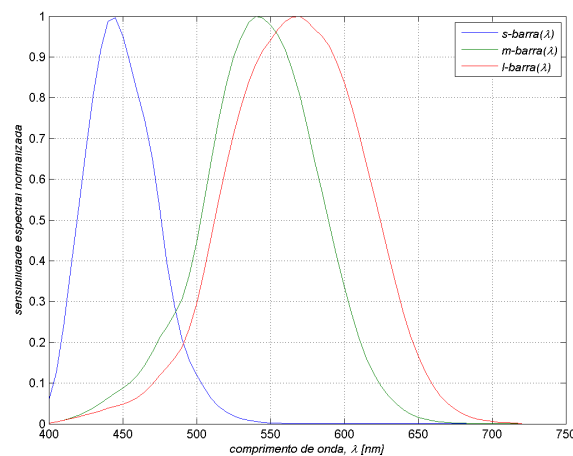


Figura 2.5: Sensibilidade dos cones ( $L$ ,  $M$ ,  $S$ ) da retina, em função do comprimento de onda

### 2.1.3 Teoria dos Tri-Estímulos

No início do século XIX, Thomas Young<sup>2</sup> propôs a teoria tricromática, segundo a qual o olho humano tem receptores para três cores primárias (vermelho,

<sup>2</sup>Thomas Young, 1773-1829, polímata inglês

verde, azul). As outras cores seriam resultado da combinação destas três cores, o que ocorre a nível cerebral. A perda da capacidade de perceber uma destas cores pela retina, produziria a incapacidade de perceber qualquer cor que a tenha como componente[74].

A teoria tricromática de Young foi desenvolvida posteriormente por Hermann von Helmholtz<sup>3</sup>. Segundo este, é a síntese das três cores primárias que permite, ao cérebro humano, realizar todas as matizes de cores do espectro visível[22].

Mais tarde, Maxwell<sup>4</sup> demonstrou que qualquer cor pode ser produzida pelas três cores primárias e apresentou uma explicação para a incapacidade de certas pessoas perceberem cores, confirmando as ideias de Young e Helmholtz. Esta teoria é, até hoje, uma base para a compreensão da visão colorida, embora não tenha em conta determinados aspectos subtis da visão, quer no que se refere ao funcionamento das células cromáticas quer no que se refere ao processamento da informação sobre as cores no cérebro humano. Pode-se considerar, de acordo com esta teoria, que os três cones existentes na retina são sensíveis respectivamente ao vermelho (red), ao verde (green) e ao azul (blue), que se designam pela iniciais R, G e B. Estas são as chamadas cores primárias[42].

## 2.2 Cromatopsia Visual

Mais conhecido por daltonismo, a cromatopsia visual, é uma deficiência frequente, que impossibilita a distinção entre algumas cores. Estima-se que cerca de 8% da população seja portadora deste distúrbio, sendo que apenas 1% das mulheres são atingidas[13, 72].

Designado também de *discromatopsia* ou *discromopsia*, é uma perturbação da percepção visual, caracterizada pela incapacidade de diferenciar todas ou algumas cores, manifestando-se muitas vezes pela dificuldade em distinguir o verde do vermelho.

Esta perturbação tem normalmente origem genética, mas pode, também, resultar ou de lesão nos órgãos responsáveis pela visão, ou de lesão de origem neurológica. Actualmente não existe nenhum tipo de tratamento conhecido para este distúrbio. Porém, um daltónico pode viver de modo perfeitamente normal, desde que tenha conhecimento das limitações da sua visão. O portador do problema pode, por exemplo, observar a posição das cores de um semáforo, de modo a saber qual a cor indicada pela lâmpada.

---

<sup>3</sup>Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, 1821-1894, físico alemão

<sup>4</sup>James Clerk Maxwell, 1831-1879, físico e matemático britânico

### 2.2.1 Deficiências na percepção da cor

O daltonismo não é considerado como uma deficiência física de grande significado apesar de dificultar, e muitas vezes impossibilitar, uma série de actividades profissionais e do quotidiano. Apesar de não existir nenhum tratamento, recursos ópticos foram desenvolvidos para facilitar a identificação das cores.

Qualquer anomalia na codificação dos genes responsáveis pelos fotopigmentos nos cones (localizados no cromossoma X), produzirá sensibilidades a diferentes comprimentos de onda de luz, o que resulta numa percepção alterada da cor (ou até, em casos extremos, na inabilidade de perceber a cor). Os cones funcionam, contudo, respondem inadequadamente.

Estima-se que entre oito a vinte por cento da população (as estatísticas variam) sofra de algum tipo de deficiência na percepção da cor. A forma mais comum de deficiência é a "verde-vermelho", assim chamada, não necessariamente pela falha na percepção destas cores, mas, pela sua causa: defeitos na pigmentação dos cones responsáveis pela percepção desses comprimentos de onda.

Deficiências nos cones com pigmentação azul são pouco frequentes e estão, geralmente, associadas a distúrbios mais sérios na visão[39, 62].

### 2.2.2 Hereditariedade

A mutação genética que provoca o daltonismo sobreviveu devido à vantagem conferida aos daltónicos ao longo da história evolutiva. Essa vantagem advém, sobretudo, do facto de os portadores desses genes possuírem uma melhor capacidade de visão nocturna, bem como uma maior capacidade de reconhecerem elementos semi-ocultos, como animais, ou pessoas, disfarçados pela camuflagem.

O Daltonismo é uma deficiência hereditária de transmissão bastante peculiar, que atinge, os homens na maioria dos casos. Os homens daltónicos transmitem o gene do daltonismo somente para as filhas e nunca para os filhos, uma vez que o gene responsável pela doença se encontra sempre no cromossoma X. Trata-se, portanto, de uma transmissão recessiva relacionada com o sexo. As filhas não manifestam nunca o daltonismo, mas têm uma hipótese de 50% de transmiti-lo para os filhos de sexo masculino. No caso das mulheres, será necessário que ambos os cromossomas X, sejam portadores do gene anómalo[62, 60].

Os portadores do gene anómalo apresentam, assim, dificuldade na percepção de determinadas cores primárias, como o azul, verde ou o vermelho, o que se repercute na percepção das restantes cores do espectro. Esta perturbação é cau-

sada pela ausência, ou menor número, de alguns tipos de cones, ou pela perda de função parcial, ou total, destes, o que está, normalmente, associado à diminuição de pigmento nos fotoreceptores, os quais deixam de ser capazes de ser capazes de processar diferenciadamente a informação luminosa de cor[39].

### 2.2.3 Tipos de Cromatopsias

Um indivíduo pode ser portador de uma deficiência, a nível da percepção das cores, segundo dois cenários distintos: o primeiro caracteriza-se pela incapacidade de identificar a cor, enquanto o outro consiste na ausência completa de sensibilidade à mesma. Esta situação pode estar relacionada com duas cores, ou com apenas uma delas. Pode-se afirmar que existem três tipos de cromatopsias:

#### Monocromacia

Os indivíduos com esta anomalia, vêem o mundo em tons de branco, de preto e de cinzento. Estão incluídos nesta classe os indivíduos acromatas, que têm acromatopsia, não identificando nenhuma cor. A estimativa é de que, para cada 30 ou 40 mil pessoas, exista uma acromata. Esta constitui a forma mais rara de daltonismo[72].

#### Dicromacia

Os indivíduos com esta anomalia, têm dois tipos de cones, em vez de três, podendo distinguir-se três situações diferentes[13, 32]:

- **Protanopia:** designa o distúrbio para reconhecer a cor vermelha. Os indivíduos desta classe são insensíveis ao vermelho intenso. A protanopia caracteriza-se pela ausência completa do receptor para o vermelho. Enquanto que os homens constituem aproximadamente 1% da população que sofre desta anomalia, as mulheres detêm uma percentagem mais baixa, aproximadamente 0.02%.
- **Deutanopia:** designa o distúrbio para identificar a cor verde. Os indivíduos desta classe têm em comum o facto de confundirem as cores vermelha, verde e amarela. Na deutanopia o indivíduo não tem o receptor para o verde (ausência completa). Nesta situação os homens representam 1.2%, em contraste com 0.01% das mulheres.
- **Tritanopia:** é o distúrbio que impede o reconhecimento da cor azul. A identificação pode ser deficiente ou nula (nos casos em que há ausência completa de sensibilidade à cor). Indivíduos desta classe são cegos para cor azul e confundem as cores verde e azul. Enquanto os homens representam 0.002% da população, as mulheres têm uma menor probabilidade de possuírem este tipo de daltonismo, situando-se o valor perto de 0.001%.

### Tricromacia Anómala

Os indivíduos tricromáticos, representam o caso mais comum, apresentando os três tipos de cones, mas percebendo os tons das cores alterados. Possuem defeitos similares aos dicromáticos mas num grau inferior, mais atenuado, e manifesta-se sob a forma de três anomalias distintas[21, 45, 58]:

- **Protanomalia:** designa a presença de uma mutação do pigmento sensível aos comprimentos de onda *L-Large* e, por isso resulta numa menor sensibilidade à cor vermelha, afecta 1 em cada 100 homens (1%) e 0.03% de indivíduos do sexo feminino.
- **Deuteranomalia:** designa a presença de uma mutação do pigmento sensível aos comprimentos de onda *M-Middle* e, por isso resulta numa menor sensibilidade de discriminação da cor verde. Aproximadamente cinco em cada cem homens são portadores deste distúrbio, enquanto que as mulheres são representadas por apenas 0.36%. A deuteranopia caracteriza-se pelo defeito nos receptores para o verde e corresponde a 75% dos casos.
- **Tritanomalia:** designa a presença de uma mutação do pigmento sensível aos comprimentos de onda *S-Short* e, por isso resulta numa menor sensibilidade de discriminação na gama do azul-amarelo.

Classificação	Incidência (%)	
	Homens	Mulheres
<b>Monocromacia</b>	<b>0.003</b>	<b>0.00001</b>
<b>Dicromacia</b>	<b>2.28</b>	<b>0.03</b>
Protanopia	1.01	0.02
Deuteranopia	1.27	0.01
Tritanopia	0.002	0.001
<b>Tricromacia Anómala</b>	<b>5.71</b>	<b>0.39</b>
Protanomalia	1.08	0.03
Deuteranomalia	4.63	0.36
Tritanomalia	0.0001	0.0001

Tabela 2.1: Estimativa da incidência da cromatopsia visual em caucasianos[58, 64]

### 2.2.4 Influência da cromatopsia visual na percepção da cor em dispositivos gráficos

Compreender a natureza da cromatopsia visual é útil na criação de dispositivos gráficos, que são proveitosos para um vasto número de utilizadores, incluindo os portadores de cromatopsia visual.

Uma regra simples na criação dos dispositivos gráficos que são utilizados por portadores de cromatopsia visual é codificar sempre importantes distinções na imagem com uma interpretação de luminância redundante. Por exemplo, uma ferramenta de pesquisa do World Wide Web, deve destacar palavras encontradas no browser, quer em diferente cor, quer com diferente brilho.

Em adição à codificação redundante usando a luminância, é amplamente recomendado não codificar diferenças usando cores juntamente com um dos principais canais cromáticos, em particular o canal vermelho-verde, na medida em que este é o susceptível a deter uma alteração.

A cromatopsia visual pode ser definida em termos de tarefas de discriminação de cor. Um indivíduo com cromatopsia visual, percebe determinadas cores como sendo idênticas, enquanto um indivíduo com visão normal tem a capacidade de as distinguir como sendo diferentes. Com uma sensibilidade, vermelho-verde diminuída, as cores que são primariamente definidas pelos seus componentes vermelho e verde, tal como o rosa e o bege, podem parecer idênticas, uma vez que o observador com cromatopsia visual é menos sensível ao verde e vermelho que as distinguem[35].

## 2.3 Considerações Finais

É importante salientar alguns aspectos que são fundamentais para perceber assuntos posteriores, relacionados com a visão humana e com as suas alterações. Torna-se importante reter que os cones são células visuais humanas, situadas na retina do olho. Destas células, os cones são os responsáveis pela percepção visual das cores e, quando ocorre uma anomalia ao nível dos mesmos, a visualização das cores deixa de ser feita de forma correcta. Isto é, existe uma anomalia na percepção visual das cores, mais comumente designada por cromatopsia visual ou daltonismo. A cromatopsia visual é uma deficiência cuja transmissão está associada ao sexo, manifestando-se através de diversos tipos. As diferenças de percepção das sensações visuais do mundo e das cores que o constituem, por indivíduos portadores de cromatopsia visual, constituem, por isso, o objectivo base desta tese.

## Capítulo 3

---

# Colorimetria

---

A colorimetria, refere-se à ciência e à tecnologia usada para quantificar e descrever (com a ajuda de modelos matemáticos) as percepções humanas da cor, ou seja, é um ramo das ciências da cor, centrado na especificação quantitativa da cor de um estímulo visual, definido fisicamente de uma tal forma que[72]:

1. quando visto por um observador com visão normal das cores, e sobre as mesmas condições de observação, estímulos com a mesma especificação parecem o mesmo;
2. estímulos que parecem o mesmo, têm a mesma especificação;
3. os valores que compreendem a especificação de cor, são funções contínuas dos parâmetros físicos, que definem a distribuição da potência espectral radiante pelo estímulo.

### 3.1 Fontes de Luz e Iluminantes

Um dos três componentes da Figura 2.1 é a fonte de luz. A fonte de luz em questão fornece a energia electromagnética requerida para iniciar as respostas visuais. A especificação das propriedades da cor das fontes de luz pode ser feita de duas maneiras, através de medições e através de normalizações[13].

Pode então dizer-se que uma fonte de luz é um fenómeno físico de um tipo de radiação, tal como uma vela, uma lâmpada de tungsténio ou a própria luz do dia. Por sua vez, um iluminante é um conjunto de especificações tabeladas para uma potencial fonte de luz. Todas as fontes de luz podem ser especificadas como um iluminante, mas nem todos podem ser representados como uma fonte de luz. Os

iluminantes são especificados, normalmente, em termos de energia relativa, tabelados para cada comprimento de onda[10]. Logo, pode dizer-se que é a radiação com uma distribuição de fluxo espectral relativo, definido ao longo da gama de comprimentos de onda, que influencia a percepção da cor de um objecto[25, 52].

Se a função  $S(\lambda)$  representar a radiância espectral de uma fonte de iluminação (iluminante) e se a reflectância espectral num determinado ponto da superfície de um objecto for expressa por  $r_e(\lambda)$ , então a distribuição da potência de radiação espectral, ou equivalentemente a radiância da luz reflectida por esse ponto da superfície, representa-se por  $R_e(\lambda)$  e pode, pela definição de reflectância, ser expressa pela Equação 3.1.

$$R_e(\lambda) = S(\lambda)r_e(\lambda) \quad (3.1)$$

A representação matemática deste sinal de cor, não tem em consideração os efeitos geométricos, por exemplo, que a reflectância espectral da superfície de um objecto pode depender dos ângulos de incidência da luz e de observação.

Existem vários tipos de iluminantes CIE, entre eles, como se pode visualizar na Figura 3.1, o *D65*, o *A* e o *F2*, constituindo os três representações standard, respectivamente, de iluminação da luz do dia, incandescente e de fontes fluorescentes[72].

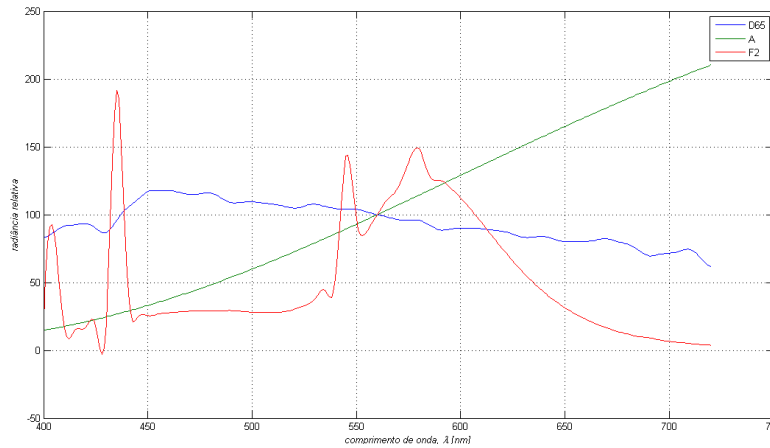


Figura 3.1: Distribuição da radiância relativa entre os iluminantes CIE D65, A e F2

### 3.1.1 Tipos de Iluminantes CIE

A CIE estabeleceu um número de intensidades espectrais de iluminantes para a colorimetria. Nestes, incluem-se os seguintes:

### Tungsténio & Halogéneo

Os iluminantes A, B e C (Figura 3.2) foram recomendados em 1931, com a intenção de representar, respectivamente, uma luz incandescente, a luz do sol e uma luz média do dia.

- **Iluminante A:** Este iluminante tende a representar um típico filamento de tungsténio. A sua radiância relativa é a de um radiador de Planck<sup>1</sup>:

1. À temperatura de  $2856K$ , emite (ou absorve) radiação electromagnética em todos os comprimentos de onda, de forma a que toda a radiação incidente seja completamente absorvida[72];
2. Em todos os comprimentos de onda, e em todas as direcções, a máxima radiação possível para a temperatura do corpo é emitida;

Esta radiação é isotrópica, isto é, não depende da direcção. Este iluminante deve ser usado em todas as aplicações que estejam relacionadas com a colorimetria, as quais envolvem o uso de luz incandescente. Apenas em situações específicas, por determinadas razões, deve ser usado um iluminante diferente.

- **Iluminante B:** Este iluminante foi desenvolvido para representar a luz do sol, com uma temperatura de cor de aproximadamente  $4900K$ [13].
- **Iluminante C:** Este iluminante foi desenvolvido para representar a luz média do dia, com uma temperatura de cor de aproximadamente de  $6800K$ [13].

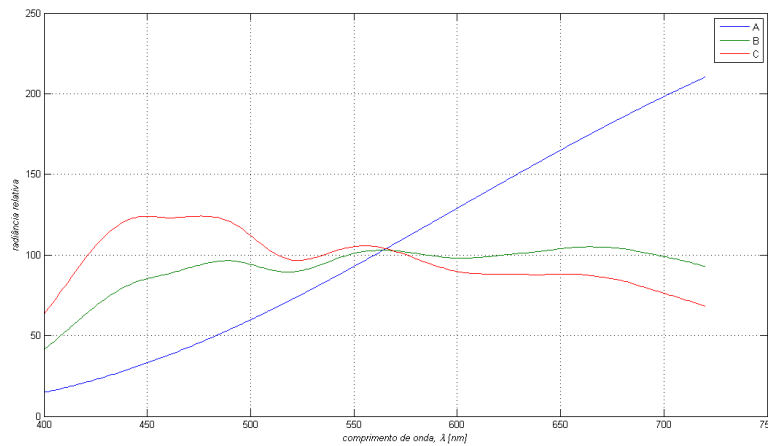


Figura 3.2: Distribuição da radiância relativa entre os iluminantes CIE A, B e C

<sup>1</sup>Radiador de Planck - emissor de corpo negro que muda a cor ao longo de um espectro contínuo quando aquecido a altas temperaturas, como determinou inicialmente Max Planck.

### Luz do Dia

A CIE definiu esta série de iluminantes (Figura 3.3) padrão de luz do dia, com base na combinação de diferentes medições, que variam tanto em relação à localização geográfica, como em relação aos horários de medição e às condições atmosféricas e climáticas.

Os iluminantes da série D (D50, D55, D75) foram definidos a partir de equações de cromaticidade e de distribuição espectral de potência. Na codificação desses iluminantes da CIE, os números representam a temperatura de cor em Kelvin, ou seja, os iluminantes D50, D55, e D75 correspondem a  $5000K$ ,  $5500K$  e  $7500K$ , respectivamente[72].

- **Iluminante D65:** Em 1963, a CIE recomendou o iluminante padrão D65. Apresenta uma temperatura de cor de  $6504K$  e é utilizado para representar a média da luz do dia, no espectro visível e também na região *UV*, até  $300\text{ nm}$ .

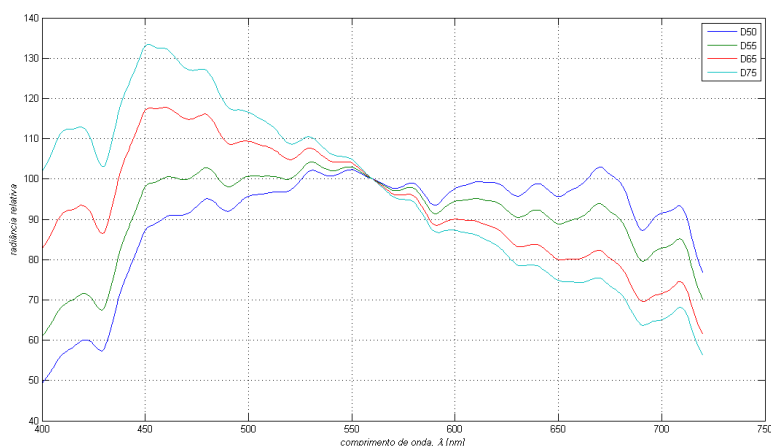


Figura 3.3: Distribuição da radiação relativa entre os iluminantes CIE D50, D55, D65, e D75

### Fluorescente

A CIE definiu esta série de iluminantes (12 no total) para representar o espectro de vários tipos de fontes fluorescentes, os quais estão apresentados na Figura 3.4, podendo considerar-se os seguintes:

- **Iluminante F2:** Este iluminante representa uma fonte de luz fluorescente branca e fria, com a Correlated Color Temperature (CCT) de  $4230K$ [13].
- **Iluminante F7:** Este iluminante representa uma fonte de luz fluorescente de banda larga, com a CCT de  $6500K$ , e simula o iluminante D65[10].

- **Illuminante F11:** Este iluminante representa uma fonte de luz fluorescente "triband", com a CCT de  $4000K$ . Estas fontes são muito populares, devido à sua eficiência, eficácia e boas propriedades no "color-rendering" [13].

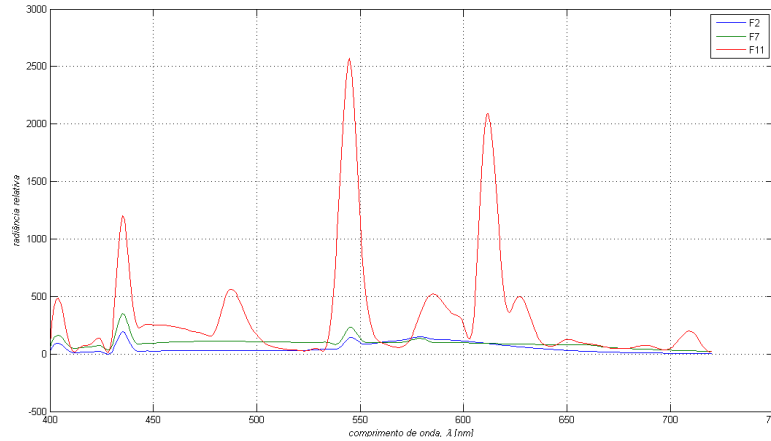


Figura 3.4: Distribuição da radiação relativa entre os iluminantes CIE F2, F7 e F11

## 3.2 Leis de Grassmann

As leis de Grassmann<sup>2</sup> representam uma das bases da colorimetria[66, 31, 72].

### 3.2.1 Primeira Lei de Grassmann

São necessárias, e suficientes, três variáveis independentes para a caracterização psicofísica da cor. Esta lei estabelece que o espaço cromático é tridimensional.

Qualquer estímulo de cor pode ser produzido a partir de três estímulos primários fixos, cujas potências radiantes podem ser ajustadas individualmente por um observador. A única restrição na escolha destes primários, é a necessidade destes serem colorimetricamente independentes, isto é, nenhum dos primários pode ser ajustado colorimetricamente pela mistura dos outros dois.

O conjunto de três primários mais comuns é constituído pelo vermelho(R), verde(G) e azul(B) . Esta lei é a base de sustentação das experiências de ajuste de cor[19].

$$C \equiv (\mathcal{R})R + (\mathcal{G})G + (\mathcal{B})B \quad (3.2)$$

<sup>2</sup>Hermann Günter Grassmann, 1809-1877, polímata alemão

Geralmente, e como se pode visualizar na Equação 3.2, representa-se o estímulo de cor pela letra  $C$ , que terá equivalência visual ( $\equiv$ ) igual à soma de  $R$  unidades de  $\mathcal{R}$ , com  $G$  unidades de  $\mathcal{G}$  e  $B$  unidades de  $\mathcal{B}$ . O termo RGB define os estímulos primários e o termo  $\mathcal{R}\mathcal{G}\mathcal{B}$  indica os factores de ajuste para cada primário.

### 3.2.2 Segunda Lei de Grassmann

O resultado de uma mistura aditiva de luz colorida depende unicamente da caracterização psicofísica, e não da composição espectral das cores; isto é, o olho humano não consegue diferenciar componentes, mas apenas a cor resultante. Por exemplo, é possível a visualização da cor amarela, mas, no entanto, não se pode identificar as componentes que lhe deram origem.

O termo de mistura aditiva significa que um estímulo de cor, a potência radiante em qualquer intervalo de comprimentos de onda, é igual à soma das potências radiantes, no mesmo intervalo dos constituintes dessa mistura[19]. Pode ser expressa, usando a mesma notação anterior, na Equação 3.3.

$$\begin{aligned}\forall C_1 &\equiv \mathcal{R}_1 R + \mathcal{G}_1 G + \mathcal{B}_1 B \\ \forall C_2 &\equiv \mathcal{R}_2 R + \mathcal{G}_2 G + \mathcal{B}_2 B \\ C_1 + C_2 &\equiv (\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2)R + (\mathcal{G}_1 + \mathcal{G}_2)G + (\mathcal{B}_1 + \mathcal{B}_2)B\end{aligned}\quad (3.3)$$

### 3.2.3 Terceira Lei de Grassmann

Se as componentes de uma mistura de estímulos de cor são amplificadas com um dado factor, o resultado psicofísico de cor é ponderado pelo mesmo factor[19]. Seja  $k$  uma constante, esta lei caracteriza-se na Equação 3.4.

$$\begin{aligned}C &\equiv (\mathcal{R})R + (\mathcal{G})G + (\mathcal{B})B \\ kC &\equiv k(\mathcal{R})R + k(\mathcal{G})G + k(\mathcal{B})B\end{aligned}\quad (3.4)$$

## 3.3 Síntese aditiva e síntese subtractiva

Como já foi referido na Secção 2.1.3, as hipóteses formuladas por Young, Helmholtz e, mais tarde, por Maxwell, deram origem à teoria tricromática, segundo a qual, com três luzes de cores diferentes e colorimetricamente independentes, seria possível reproduzir uma vasta gama de cores, por síntese aditiva destas.

Ao processo de projecção simultânea sobre um alvo branco (quando iluminado por uma luz branca), de feixes monocromáticos de igual intensidade, vermelho

(R), verde (G) e azul (B), chama-se *síntese aditiva* das cores. Como é demonstrado na Figura 3.5, quando se sobrepõem os feixes[18]:

- **Vermelho e Azul:** originam a cor Magenta;
- **Azul e Verde:** originam a cor Ciano;
- **Vermelho e Verde:** originam a cor Amarela.

As cores resultantes da sobreposição das cores primárias (Vermelho, Verde e Azul), duas a duas, designam-se de *cores secundárias*. Duas cores dizem-se *complementares* quando, por sobreposição, permitem obter a cor branca, como é o caso do azul e o amarelo.

O processo de filtragem dos feixes reflectidos dos espectros, designa-se *síntese subtractiva*. As cores correspondentes à luz reflectida e à luz absorvida, que somadas correspondem à luz branca incidente, são complementares[18]. Quando se mistura um pigmento amarelo e um pigmento ciano, obtém-se a cor verde, pois subtrai-se à luz branca as cores complementares do amarelo e ciano, que são, respectivamente, o azul e vermelho, como se pode ver na Figura 3.6.

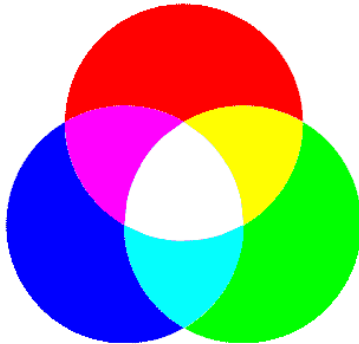


Figura 3.5: Síntese aditiva das cores primárias

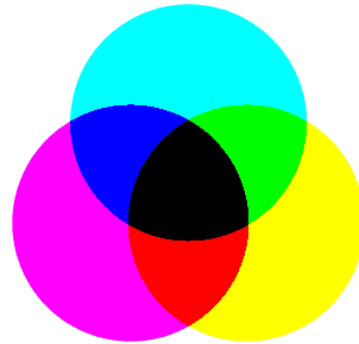


Figura 3.6: Síntese subtractiva das cores complementares

Em qualquer um dos casos de síntese, aditiva ou subtractiva, o conjunto de cores primárias, e o conjunto de cores secundárias, constituem as bases de um sistema de reprodução de cor, designados, respectivamente por sistema RGB e por sistema Cyan-Magenta-Yellow (CMY). Pode-se ainda proceder à transformação do espaço RGB para o espaço CMY, através da Equação 3.5, e de forma análoga, transformar o espaço CMY em RGB, pela Equação 3.6.

$$\begin{bmatrix} c \\ m \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c \\ m \\ y \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

O sistema RGB é usado na maior parte das tecnologias electrónicas que envolvem a transmissão de luz, como num ecrã Cathode Ray Tube (CRT) ou Thin-Film Transistor (TFT). O sistema CMY é utilizado nas tecnologias que envolvem a luz reflectida, como impressoras ou fotocopiadoras[18]. Por razões técnicas relacionadas com as propriedades físicas das tintas de impressão, a sobreposição das três cores (ciano, magenta e amarelo), com saturações máximas, pode não ser suficiente, para absorver todo o espectro, ficando assim a cor preta difícil de reproduzir. Foi assim implementado o sistema Cyan-Magenta-Yellow-blacK (CMYK), usando uma quarta cor, o preto (representado por K).

### 3.4 Atributos Percentuais da Cor

A caracterização subjectiva da cor de um objecto, por um observador normal, é, usualmente, descrita em função de três parâmetros que evidenciam a sua tridimensionalidade: tonalidade, saturação e brilho.

Pode-se dizer que a cor é uma sensação produzida no cérebro em resposta à incidência de luz sobre a retina do olho. A sensação de cor é causada por diferentes tipos de luz, emitidas por fontes luminosas ou reflectida pelos objectos. Pode ser definida em termos do observador, mas cada caso é um caso, podendo ser definida em termos percentuais ou subjectivos, isto é, dependerá do julgamento do observador. Também pode ser definida em termos de características da luz em que é analisada os tipos dos objectos e fontes de luz.

No entanto, a definição em termos das características da luz, está relacionada com a sensação vivida pelo observador; isto é, a luz recebida pela retina e que é composta por um espectro de diferentes energias em diferentes comprimentos de onda. Somente no olho, e posteriormente no cérebro, o espectro específico é traduzido e que lhe dará a sensação de uma determinada cor, embora muitos espectros diferentes sejam percebidos como a mesma cor. A este tipo de observação é chamado *metamerismo*[54]. É comum serem aceites ambas as especificações, podendo ser definidas com precisão num espaço tridimensional, ou seja, indicando três componentes.

Apesar da dificuldade na definição de cor, existem propriedades que podem ser definidas. Estes termos são de extrema importância para que exista uma determinada modelagem da aparência das cores.

### 3.4.1 Tonalidade

A tonalidade é o atributo de uma sensação visual, segundo a qual uma área aparenta ser semelhante, ou a cada uma das cores percebidas, ou à frequência dominante: vermelho, amarelo, verde e azul, ou através da combinação de duas delas. Numa descrição física da cor, este atributo está relacionado com o comprimento de onda dominante da luz que incide no olho. É possível classificar a percepção da cor, em duas categorias[13]:

- **Percepção Acromática:** Tipo de percepção, desprovida de tonalidade, isto é, associada à percepção do branco, preto e tons intermédios de cinzento.
- **Percepção Cromática:** Tipo de cor percebida, que possui tonalidade, isto é, associada à percepção do que se entende por cor, como vermelho, verde e azul.

### 3.4.2 Saturação

A saturação define o atributo da percepção visual que permite determinar a proporção da cor pura cromática na percepção total da cor. Diz respeito à proporção de branco que uma cor contém. Este atributo está relacionado com a acentuação do valor máximo do comprimento de onda dominante[13].

Já a coloração, é a parte de luz reflectida por um objecto. Este absorve luz e reflecte apenas uma parte do espectro visível. Quando existe uma mudança de luminosidade, é percebida uma mudança de saturação, já a coloração, que é associado ao sistema proposto por Munsell, não varia com a luminosidade[13, 50].

### 3.4.3 Luminosidade ou Brilho

A luminosidade ou brilho, representa a quantidade de luz emitida ou reflectida pela cor. O termo luminosidade referente a objectos está relacionado com a quantidade de luz reflectida. Por outro lado, o brilho é usado no contexto das fontes de luz, e está associado à quantidade de luz emitida[13].

## 3.5 Modelos de Cor

A teoria dos Tri-Estímulos sugere que bastará emitir três cores primárias que sejam detectáveis pelos três tipos de cones da retina, para que se possam reproduzir todas as cores visíveis, variando simplesmente a proporção das quantidades de luz emitida por cada uma das fontes primárias. Estas proporções seriam determinadas pelas curvas de resposta característica de cada um dos três tipos de cones.

Na prática, as três cores primárias emitidas por cada um dos tubos de raios catódicos de um monitor (vermelho a  $700\text{ nm}$ , verde a  $546\text{ nm}$  e azul a  $436\text{ nm}$ ), não correspondem às cores detectadas pelos cones. É necessário, então, modificar as funções peso aplicadas a cada uma das componentes primárias emitidas. Estas novas funções peso apresentam valores negativos em algumas gamas de comprimento. Isto significa que, com um monitor, não é possível reproduzir todos os comprimentos de onda de luz visível, isto é, não é possível reproduzir todas as cores do espectro visível pela combinação ponderada de luzes vermelha, verde e azul[26]. Existem ainda os modelos de cor CIE, que descrevem a cor em termos de tom (hue), de brilho (value) e de saturação (saturation), entre os quais estão incluídos os modelos CIE RGB, CIE XYZ e CIE LAB.

### 3.5.1 Modelo HSV

Os atributos percentuais da cor relacionam-se, respectivamente, *hue*, *chroma* e *value*, segundo o sistema proposto por Munsell<sup>3</sup>, baseado num sistema de coordenadas cilíndricas, em que o o brilho está representado na vertical, a saturação é dada pela medida do raio e a tonalidade em função do ângulo[50], como se pode ver na Figura 3.7. Este modelo é caracterizado por ser uma transformação não-linear do sistema de cores RGB.

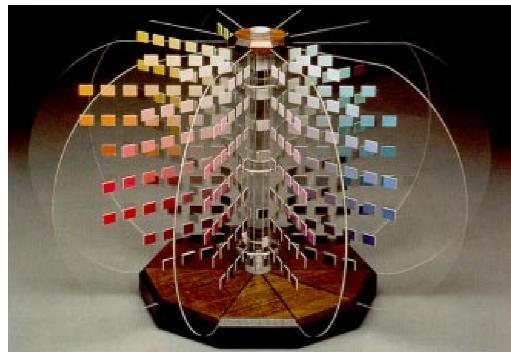


Figura 3.7: Modelo HSV[44]

### 3.5.2 Modelo CIE RGB

Em 1931, a CIE desenvolveu um espaço de cor, modelado à semelhança da visão humana, designado de RGB, de acordo com os resultados experimentais, que foram inicialmente combinados nas especificações do "CIE RGB color space"[12, 71]. No entanto, não foi possível, a partir das cores básicas (Vermelho  $700\text{ nm}$ , Verde  $546\text{ nm}$ , Azul  $436\text{ nm}$ ), representar todas as cores visíveis, como se pode verificar analisando a Figura 3.8, devido ao facto de as funções de ajuste

<sup>3</sup>Albert Henry Munsell, 1858-1918, pintor e professor de arte americano

apresentarem valores negativos para o vermelho ( $700\text{ nm}$ ). Os valores tri-estímulo RGB podem, assim, ser calculados através das Equações 3.7, 3.8, 3.9, onde  $\Phi(\lambda)$ , representa a radiância ao longo dos comprimentos de onda  $\lambda$  e  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$ , que são as funções de ajuste, tal como está representado na Figura 3.8.

$$R = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \quad (3.7)$$

$$G = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \quad (3.8)$$

$$B = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \quad (3.9)$$

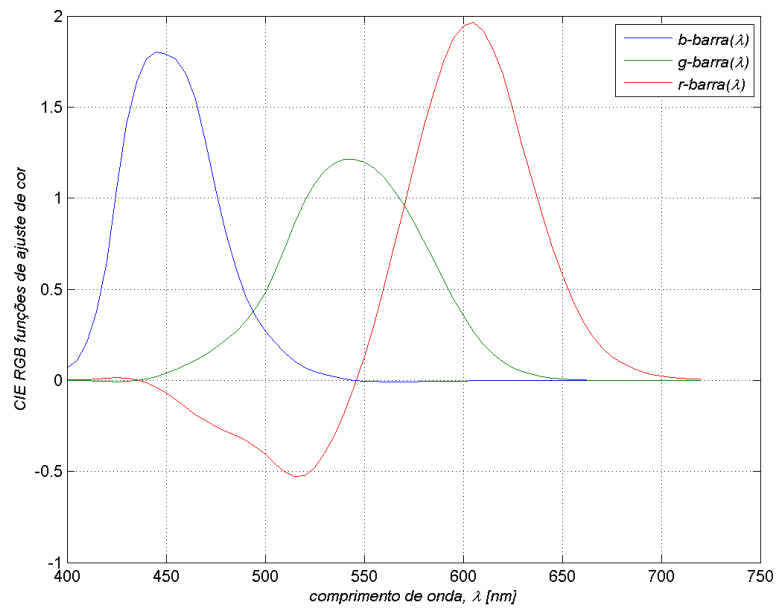


Figura 3.8: Funções de ajuste de cor da CIE 1931 RGB -  $\bar{r}(\lambda)$   $\bar{g}(\lambda)$   $\bar{b}(\lambda)$

### 3.5.3 Modelo CIE XYZ

A CIE definiu, e adoptou posteriormente, uma transformação do sistema tricromático baseado nos estímulos primários R, G e B, num outro, baseado num novo conjunto de primários X, Y e Z. Assim, um novo conjunto de funções de ajuste de cor foi definido como uma transformação linear das funções de

ajuste standard CIE RGB 1931. Essa transformação linear define o sistema colorimétrico standard CIE XYZ 1931, que pode ser expresso matricialmente pela Equação 3.10 [65].

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.49 & 0.31 & 0.2 \\ 0.17697 & 0.8124 & 0.01063 \\ 0.0 & 0.01 & 0.99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Os valores da matriz da transformação anterior, foram escolhidos pela CIE de forma a garantir que as coordenadas tricromáticas (x, y, z) e os correspondentes valores tri-estímulo XYZ, de qualquer estímulo de cor real sejam sempre positivos, como se pode visualizar na Figura 3.9.

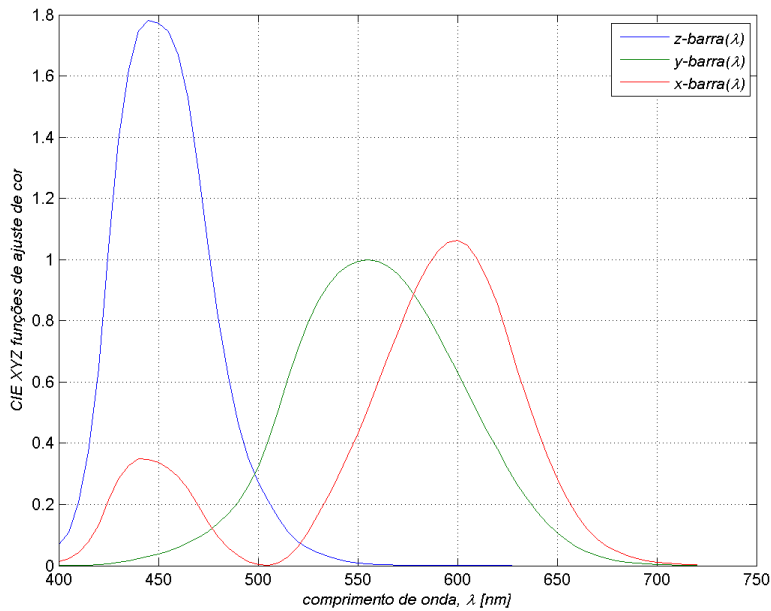


Figura 3.9: Funções de ajuste de cor da CIE 1931 XYZ -  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$   $\bar{z}(\lambda)$

Para se determinarem os valores tri-estímulo XYZ, que envolvem a radiância ou a distribuição de potência de radiação espectral  $\Phi(\lambda)$ , de um dado estímulo de cor, deve recorrer-se às Equações 3.12, 3.13, 3.14, nas mesmas condições anteriores e em que  $\kappa$ , definido pela Equação 3.11, é uma constante de normalização e  $\lambda_{Max}$  e  $\lambda_{Min}$  representam, em geral, os extremos do intervalo de comprimentos de onda da região visível.

$$\kappa = \frac{100}{\int_{\lambda} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda} \quad (3.11)$$

$$X = \kappa \int_{\lambda_{Min}}^{\lambda_{Max}} \Phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (3.12)$$

$$Y = \kappa \int_{\lambda_{Min}}^{\lambda_{Max}} \Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (3.13)$$

$$Z = \kappa \int_{\lambda_{Min}}^{\lambda_{Max}} \Phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3.14)$$

Para visualizar graficamente uma cor, em geral, utiliza-se um diagrama de cromaticidade CIE ( $x,y$ ), que se pode visualizar na Figura 3.10. Os valores das coordenadas tricromáticas são obtidos através das seguintes relações entre os valores tri-estímulo, descritas nas Equações 3.15, 3.16, 3.17.

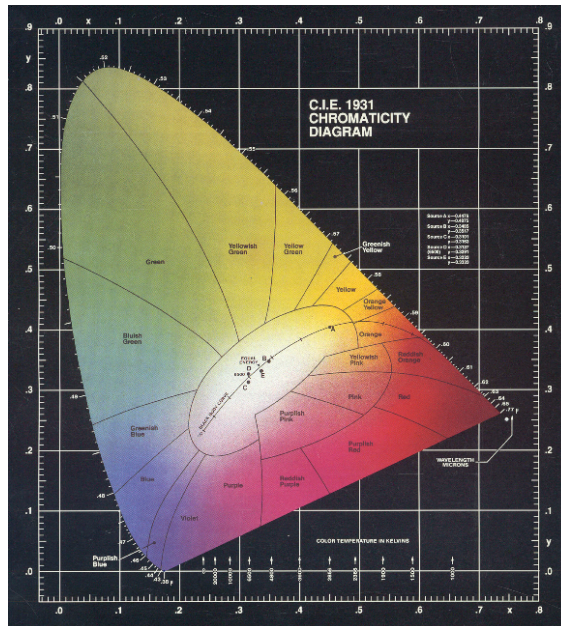


Figura 3.10: Diagrama de Cromaticidade CIE 1931 ( $x,y$ ) para um observador standard no sistema colorimétrico XYZ. (Retirado de *Photo Research Product Bulletin N<sup>o</sup> 66*, 100-4/89-7.50)

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (3.15)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (3.16)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (3.17)$$

Como só existem duas dimensões nas coordenadas de cromaticidade, a terceira coordenada pode sempre ser obtida através das outras duas. Deste modo,  $z$  pode ser calculado a partir de  $x$  e  $y$ , usando a Equação 3.18.

$$z = 1.0 - x - y \quad (3.18)$$

No entanto, os diagramas de cromaticidade apenas mostram as proporções dos valores tri-estímulo para uma dada cor, uma vez que estes só representam cores com o mesmo nível de luminância. Desta forma, os diagramas de cromaticidade são mapas que relacionam apenas estímulos de cor.

### 3.5.4 Modelo CIE LUV

Uma das grandes limitações do modelo de cor CIE XYZ, é a ausência de uniformidade, isto é, iguais variações nos valores de  $x$ ,  $y$  ou  $Y$  não correspondem à mesma diferença visual perceptível.

Na tentativa de obter uma expressão para a diferença de cromaticidades em que o valor obtido, em relação a um par de amostras, fosse proporcional à diferença visual observada, a CIE recomendou, em 1976, um novo diagrama cromático, o diagrama uniforme de cor CIE 1976 LUV, referido comunmente como diagrama  $(u', v')$ [9, 13].

Neste sistema, as coordenadas cromáticas são obtidas por transformação dos valores tri-estímulos ou das coordenadas cromáticas no sistema CIE XYZ, através das Equações 3.19 e 3.20. Este espaço de cor está representado na Figura 3.11.

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (3.19)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (3.20)$$

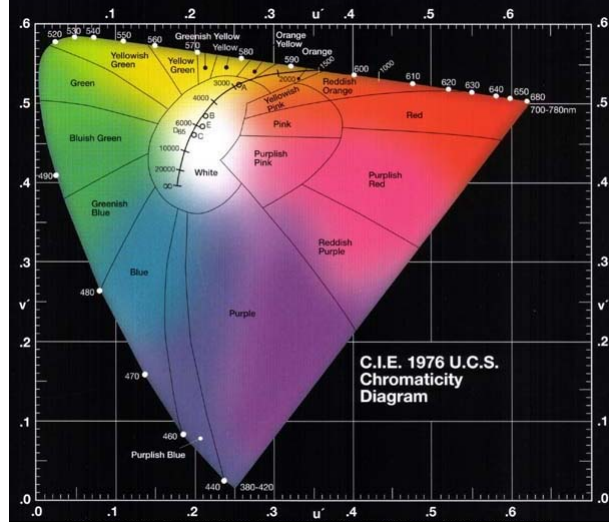


Figura 3.11: Diagrama de Cromaticidade CIE 1976 ( $u'$ ,  $v'$ ) para um observador standard no sistema colorimétrico LUV. (Retirado de *Photo Research Product Bulletin* Nº 66, 100-4/89-7.50)

### 3.5.5 Modelo CIE LAB

Em 1976, a CIE recomendou o uso de um novo espaço colorimétrico, por forma a contemplar, não só as variações cromáticas, como as variações em luminância. Este espaço foi designado como CIE 1976 ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) ou CIE LAB. O espaço CIE LAB permite a especificação de percepções de cores, em termos de um espaço tridimensional[10].

Os valores  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  são obtidos através das relações entre os valores tri-estímulo XYZ para uma dada cor e os respectivos valores tri-estímulo  $X_w Y_w Z_w$  para um branco de referência, tal como se pode verificar nas Equações 3.21, 3.22, 3.23 e através da Figura 3.12.

$$L^* = 116 \left[ f \left( \frac{Y}{Y_w} \right) - \left( \frac{16}{116} \right) \right] \quad (3.21)$$

$$a^* = 500 \left[ \left( \frac{X}{X_w} \right) - \left( \frac{Y}{Y_w} \right) \right] \quad (3.22)$$

$$b^* = 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_w} \right) - \left( \frac{Z}{Z_w} \right) \right] \quad (3.23)$$

Onde:

$$f \left( \frac{Y}{Y_w} \right) = \left( \frac{Y}{Y_w} \right)^{\frac{1}{3}}, \text{ para } \frac{Y}{Y_w} > 0.008856$$

$$f \left( \frac{Y}{Y_w} \right) = 7.787 \left( \frac{Y}{Y_w} \right) + \frac{16}{116}, \text{ para } \frac{Y}{Y_w} \leq 0.008856$$

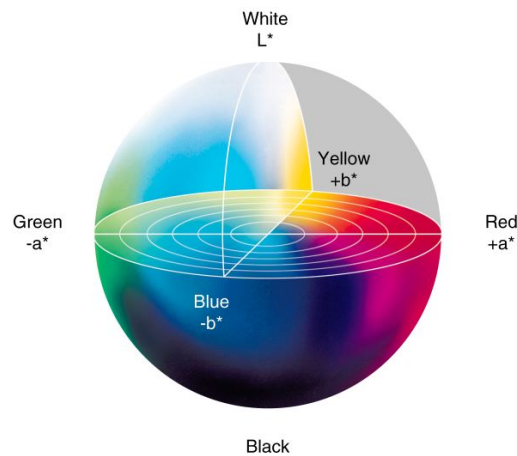


Figura 3.12: Diagrama de Cromaticidade CIE LAB [2]

A qualidade da reprodução colorimétrica é, geralmente, caracterizada e quantificada pela diferença entre duas cores representadas no mesmo espaço de cor.

#### Diferença de Cor - $\Delta E_{ab}^*$

Em 1976, a CIE definiu a diferença de cor, como a distância euclidiana entre dois pontos, que representam os dois estímulos, num dado espaço cromático[46]. Assim, a Equação A.1 determina a diferença de cor para o espaço CIE LAB.

### Diferença de Cor - $\Delta E_{2000}$

Posteriormente em 2001, a CIE definiu uma nova formula para calcular a diferença de cor, como a distância euclidiana entre dois pontos, que representam os dois estímulos, num dado espaço cromático[37]. Assim, a Equação A.2 determina a diferença de cor para o espaço CIE LAB.

## 3.6 Considerações Finais

A tecnologia da impressão tem evoluído ao longo dos séculos, e esse facto tem oferecido tempo aos investigadores para perceberem qual a melhor maneira de representar em formato de impressão, de modo a que o leitor tire o máximo partido com o menor esforço. Não sendo coincidência que a maioria dos livros têm formatos similares: o tipo/tamanho de fontes usadas, o número de palavras por linha e o número de linhas por página, são factores que têm sido optimizados para o leitor. Foi necessário o decorrer de séculos para obter este tipo de conhecimento e aprendizagem.

Por outro lado, a revolução electrónica e tecnológica que deram origem à representação digital de informação, aconteceram de uma forma de magnitude superior, em termos de rapidez. Demorou muito pouco tempo desde a primeira utilização dos dispositivos CRT, até à realidade virtual dos dias de hoje. Com toda esta rapidez, não houve tempo suficiente para avaliar plenamente a tecnologia e compreender a melhor forma de apresentação de informação. Por exemplo, mesmo os melhores dispositivos CRT e Liquid Crystal Display (LCD) actuais, não possuem resolução espacial suficiente para representar a mesma qualidade que uma fotografia oferece. No que respeita ao domínio da cor, restrições similares, limitam ainda a resolução e fidelidade da cor. Além disso, existem também restrições ao nível do *gamut*<sup>4</sup> dos próprios monitores, o que pode representar uma incompatibilidade na representação das mesmas.

Pode-se então definir alguns requisitos para obter uma razoável qualidade de imagem:

- **Luminância e contraste suficiente:** Ambas as características são fundamentais para uma boa qualidade de imagem. A utilização de uma quantidade deficiente de luminância e contraste, terá como resultado uma imagem dificilmente utilizável, ou mesmo completamente inútil.
- **Ausência de cintilação:** Os constituintes elementares do dispositivo que apresenta a imagem, utilizam uma tecnologia de refrescamento, isto é, o

---

<sup>4</sup>O *gamut* de cores de um dispositivo, é o conjunto de todas as cores, que esse dispositivo é capaz de representar.

conteúdo de informação a ser representado terá de ser constantemente atualizado. Isto provoca mudanças periódicas ao nível de flutuação da luminância da imagem. A frequência desta flutuação determina se o sistema visual irá perceber a cintilação (mudança periódica do brilho) ou não. Esta alteração de brilho é perceptível abaixo dos 50 ciclos por segundo, mas também depende das condições do dispositivo, e do observador.

- **Minimização dos efeitos de amostragem espacial:** Todos os dispositivos de visualização convertem modelos de imagens contínuas em imagens discretas. O tamanho do mais pequeno elemento da imagem (pixel), de uma imagem discreta, determina os efeitos de amostragem (também conhecido como *aliasing*)[17].
- **Percepção de imagem com compressão com perdas:** Com a utilização crescente de imagens com definição cada vez maior, que tem como efeito o aumento do seu tamanho, a compressão destas, é cada vez mais importante. Para atingir este objectivo, exigem-se altas taxas de compressão, e por isso é necessário recorrer a algoritmos de compressão com cada vez menos perdas. A perda de informação usando estes algoritmos pode, ou não, ser percebida pelo observador. É essencial que qualquer perda de informação durante o processo de compressão não afecte tomadas de decisões críticas, como por exemplo, a grande necessidade de visualização em perfeitas condições de aplicações com imagens no domínio médico.
- **Sensação de profundidade:** Imagens bidimensionais são muitas vezes utilizadas para transmitir cenários tridimensionais. Isto é feito através da criação da sensação de profundidade, sendo este efeito interpretado como que de uma ilusão se tratasse.
- **Utilização da cor efectiva:** A visualização num dispositivo e a subsequente discretização da cor de um cenário real, é bastante importante, quer para observadores normais, quer para observadores portadores de cromatopsia visual, sendo este um dos tópicos principais desta tese.

## Capítulo 4

---

# Estado da Arte

---

Como já foi referido na Secção 2.2, existem vários tipos de cromatopsias visuais. A classificação destes tipos de cromatopsias é, desde há muito tempo, tema de análise por parte de muitos investigadores, tendo sido, também, alvo de análise profunda nesta tese. Pode-se, portanto, classificar os testes de detecção de cromatopsias visuais em dois grupos: de detecção qualitativa e de detecção quantitativa.

### 4.1 Detecção Qualitativa

Entre os testes de detecção qualitativa de cromatopsia visual, pode-se referenciar alguns dos mais importantes: o teste das Lãs de Holmgren, o teste de Ishihara e o teste de Farnsworth-Munsell 100-Hue.

#### 4.1.1 Teste das Lãs de Holmgren

O teste das Lãs de Holmgren, concebido, em 1879, pelo Dr. Fithiof Holmgren<sup>1</sup>, foi a primeira tentativa de fazer com que os testes de detecção de cromatopsia visual fossem standard.

Este teste é baseado na teoria da percepção das cores de Young-Helmholtz, no qual se afirma que existem três tipos de células fotoreceptoras na retina. De acordo com esta teoria, uma anomalia num destes elementos, causaria cromatopsia visual. Holmgren concebeu, então, um teste do tipo de ajuste de cor, em substituição do teste de atribuição de cor. A execução deste teste consiste em pedir ao observador que separe uma porção de lãs, especialmente pintadas com cores ligeiramente diferentes. Estes feixes de lãs devem ser agrupados de forma

---

<sup>1</sup>Fithiof Holmgren, 1831-1897, psicólogo sueco

a que fiquem numa sequência de cor pré-determinada. Conforme a distorção na ordem das cores, pode-se determinar o tipo de cromatopsia visual[11].

#### 4.1.2 Teste de Ishihara

O teste de Ishihara foi concebido pelo Dr. Shinobu Ishihara, professor da Universidade Imperial de Tóquio, em 1917[27].

O teste completo consiste na exibição de 38 cartões coloridos, os quais se encontram representados na Figura 4.1. Em cada um destes cartões, existem vários círculos desenhados, com tamanhos e cores ligeiramente diferentes, em relação às cores situadas nas proximidades. Na secção central do cartão, alguns círculos formam, na sua totalidade, um número, o qual pode ser identificado por indivíduos portadores de visão normal das cores. Porém, um indivíduo com cromatopsia visual não consegue reconhecer ou identificar o número em questão, devido à incapacidade de discriminação das diferentes cores. Neste teste não existe um controlo dos iluminantes, por isso, poderá existir um erro na análise dos resultados, aquando da mudança de iluminante[20].

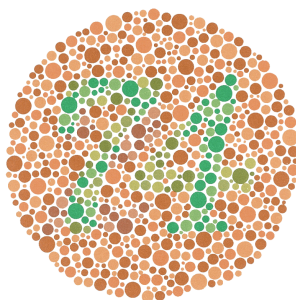


Figura 4.1: Exemplo do Teste de Ishihara - O número "74" deverá ser claramente visível para um observador com visão normal das cores. Observadores dicromatas ou tricromatas anómalos poderão visualizar o número "21" [27].

#### 4.1.3 Teste de Farnsworth-Munsell 100-Hue

O teste de Farnsworth-Munsell 100-Hue foi concebido por Dean Farnsworth<sup>2</sup>, em 1943. É um teste de fácil execução e altamente eficaz na medição de discriminação da cor. Foi utilizado pela indústria para avaliar e classificar a perspicácia na análise das cores, por parte dos observadores. Consiste na utilização de 85 papéis coloridos, colocados em pequenas bases de cor preta, sendo estas numeradas de forma consecutiva, como se pode visualizar na Figura 4.2. O utilizador não tem conhecimento desta numeração, tendo que ordenar as cores de forma

---

<sup>2</sup>Dean Farnsworth, (1902-1959), médico americano

consecutiva, obtendo as cores ordenadas por degradê. Todo este teste é executado sob influência de um iluminante do tipo C[14]. É um teste portátil e fácil de usar, existindo software recente que auxilia no tratamento dos resultados obtidos por cada indivíduo.



Figura 4.2: Teste de Farnsworth-Munsell 100-Hue[15]

Posteriormente, em 1988, Meyer e Greenberg implementaram o mesmo teste, melhorando a especificidade do seu diagnóstico. Recorrendo a um monitor a cores e relacionando os espaços de cor CIE XYZ e Large-Middle-Short (LMS), obtinham os resultados e comparavam-nos com os resultados do teste original.

Este foi, sem dúvida, um primeiro passo na utilização da cor em ambientes digitais gráficos, quer ao nível do próprio teste, quer ao nível da representação da forma como os indivíduos com cromatopsias visuais vêm na realidade[47].

## 4.2 Detecção Qualitativa e Quantitativa

Entre os testes de detecção qualitativa e quantitativa de cromatopsia visual, podem-se referenciar dois dos mais importantes: o Anamalcópio de Nagel e o Cambridge Colour Test.

### 4.2.1 Anamalcópio de Nagel

O anomalcópio de Nagel<sup>3</sup> foi desenvolvido, em 1907, com o objectivo de diferenciar cromatopsias na percepção da cor[5, 51].

O anomalcópio de Nagel consiste num aparelho em que o indivíduo vê dois campos iluminados. Um deles é iluminado por uma luz monocromática amarela padrão, enquanto o outro é iluminado por uma mistura de luzes monocromáticas verdes e vermelhas.

O objectivo do observador será ajustar os dois campos visuais, igualando ambas as tonalidades e alterando a razão entre a intensidade das luzes vermelha

---

<sup>3</sup>Willibald A. Nagel, 1870-1911, oftalmologista alemão

e verde, com alteração da intensidade da luz amarela. Através da comparação, entre a tonalidade real e a visualizada pelo observador, poderão classificar-se deficiências congénitas, diferenciando indivíduos tricromátas anómalos de indivíduos tricromátas normais, e, ainda dicromátas, de tricromátas anómalos[5].

#### 4.2.2 Cambridge Colour Test

O Cambridge Colour Test é um teste de visão das cores, em que se procura identificar o tipo de anomalia, pelo grau de discriminação entre um padrão definido (neste caso, um padrão que representa a letra C, de um padrão de fundo, ambos cromáticos).

O observador interage com este tipo de software a partir do cursor do teclado. Aquando da visualização de um C no ecrã, previamente calibrado, o observador indica a orientação da abertura do padrão (C). Como se pode visualizar na Figura 4.3, o observador nesta situação terá de clicar no cursor (→), para fornecer ao software a resposta a este estímulo.

O teste determina elipses, discriminando a cor em que o observador poderá possuir deficiências. Quanto maiores forem os raios das elipses, maior será a deficiência nessa determinada cor[48].

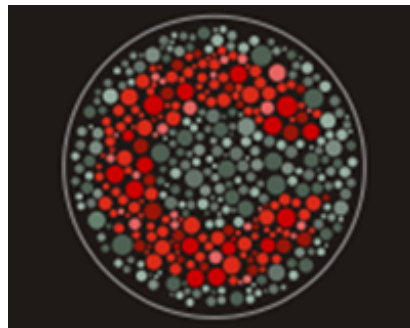


Figura 4.3: Cambridge Colour Test - Exemplo[48]

### 4.3 Cromatopsia Visual e Imagens Digitais

Pretende-se descrever, nesta secção, alguns estudos e investigações que, de alguma forma, contribuíram para o estado da arte desta tese. Destes trabalhos já realizados, podem-se salientar as várias simulações de cromatopsia visual efectuadas em imagens digitais, a correcção colorimétrica em imagens digitais para indivíduos com cromatopsia visual e, ainda, implementações de sistemas de

compensação de imagens digitais, em tempo real, para indivíduos portadores de cromatopsia visual.

#### 4.3.1 Simulação de Cromatopsia Visual em Imagens Digitais

Nesta subsecção, pretende-se dar a conhecer algumas das mais importantes simulações e algoritmos de transformação de imagens digitais, de modo a que a aparência destas imagens, seja percebida como aquela que é percebida por um indivíduo com cromatopsia visual.

Hans Brettel *et al.*, em 1997, propuseram um algoritmo que realiza transformações de imagens digitais, o qual é representado no espaço tridimensional LMS. O algoritmo de transformação substitui cada estímulo pela sua projecção numa superfície mais reduzida. Esta superfície é definida por um sistema de eixos neutro e pelas localizações dos estímulos monocromáticos do espaço de cores LMS, percebidos como sendo de tonalidade igual, por indivíduos tricromatas e por um determinado tipo de indivíduos dicromatas.

Estes estímulos monocromáticos são o amarelo ( $575\text{ nm}$ ) e o azul ( $475\text{ nm}$ ), para uma simulação de um indivíduo com protanopia e deuteranopia, e vermelho ( $660\text{ nm}$ ) e azul-verde ( $485\text{ nm}$ ), para a simulação de um indivíduo com tritanopia. Este algoritmo é aplicado a uma imagem de um mosaico constituído por várias cores. Esta imagem é apresentada, num CRT calibrado aos observadores portadores de protanopia e deuteranopia. São aplicados testes rigorosos ao algoritmo tendo os observadores que respondem se existem, ou não, diferenças entre a imagem original e a imagem modificada com o algoritmo proposto para cada tipo de cromatopsia visual.

Estes observadores foram sujeitos a uma bateria de testes standard, tais como o teste de Ishihara, o teste de Farnsworth-Munsell 100-Hue e ao anamalcópio de Nagel, para a certificação do tipo de cromatopsia associada a cada um deles. Concluiu-se, que, com a utilização deste algoritmo, não é possível prever outros tipos de sensações provocadas pela alteração de algumas cores nestas imagens digitais. Mesmo assim, esta simulação proporciona um meio de quantificação e de ilustração da informação disponível para dicromatas, numa imagem digital[4].

Em 1999, Cristine Rigden, propôs um método para simulação de representação de imagens visualizadas por indivíduos com cromatopsia visual. Tal foi realizado com o intuito de auxiliar designers gráficos a produzir interfaces, de modo a minimizar os riscos da não visualização de alguma informação, por parte de portadores de cromatopsia visual. Este método é baseado na simples alteração da paleta de cores standard web-safe[69, 58]. Mais tarde, em 2002, Cristine Rigden propôs ligeiras alterações a este método, tendo para isso idealizado uma alteração à paleta de cores standard web-safe. Procedeu, assim, ao agrupamento de cores,

dividindo cores frias e cores quentes, e posteriormente, subdividindo estas cores quentes e frias em termos de brilho relativo. Este método é, simplesmente, um método teórico, uma vez que não foi testado com indivíduos portadores de cromatopsia visual[59].

Posteriormente em 2004, Pascual Capilla *et al.* desenvolveram um novo algoritmo, fazendo estudos comparativos com os algoritmos de Hans Brettel *et al.*, de Boynton[3] e de De Valois & De Valois[67], de modo a corrigir algumas lacunas nestes métodos. Com a aplicação deste novo algoritmo, ficou demonstrado que as cores perceptíveis por um indivíduo dicromata podem ser simuladas, sem pressupostos sobre os espectros das cores perceptíveis, de modo idêntico para indivíduos com visão normal e indivíduos dicromatas. De outro modo, a percepção de um estímulo ( $T$ ) de uma determinada cor, por um indivíduo dicromata, pode ser descrita se for encontrado um estímulo ( $S$ ), de modo a que um observador com visão normal das cores, obtenha a mesma sensação ao observar ( $S$ ), tal como um indivíduo dicromata observa ( $T$ )[6].

### 4.3.2 Correção de Cor em Imagens Digitais

Nesta subsecção, pretende-se dar a conhecer alguns métodos de correção de cor em imagens digitais, de modo a que um indivíduo com cromatopsia visual diferencie pormenores que se tornam imperceptíveis para os portadores da anomalia em questão.

Curtis E. Martin *et al.* em 2000, propuseram um novo modelo visual, para testar a percepção das cores por indivíduos portadores de deuteranomia e para isso foi usado como ponto de partida o sistema visual humano. Neste sistema, Martin *et al.*, representava informação visual separando o componente de brilho ( $A$ ), dos outros dois componentes cromáticos ( $C_1$  e  $C_2$ )[40]. Este método relaciona o modelo de cores RGB com o modelo HVS, aplicando o método proposto, em 1979, por Fauderas[16]. Com o intuito de testar as capacidades deste novo método, foram feitos dois tipos de experiências com três indivíduos com cromatopsia visual. Os resultados obtidos na primeira experiência permitiram concluir que os indivíduos portadores de deuteranomia só foram capazes de distinguir variações do componente  $C_2$ . Estas experiências tinham como base a apresentação de três imagens num monitor calibrado, sendo estas imagens posteriormente alteradas aplicando o método de Fauderas. Os observadores teriam de escolher a imagem de sua preferência, bem como dar conhecimento de quais as cores que distinguiam e a justificação da escolha. Aplicando a transformação na imagem original ao componente  $C_1$ , resultou que os observadores escolheram quase sempre essa imagem, concluindo-se que a componente  $C_2$  era quase imperceptível[41].

Mais tarde, em 2003, S. Yang e Y. Ro, propuseram um método similar de adaptação de cores, para indivíduos com cromatopsia visual, tendo este método sido aplicado a indivíduos dicromátas e a indivíduos tricromátas anómalos. A transformação feita para indivíduos dicromátas destina-se a oferecer-lhes uma melhor percepção de cor, enquanto aos indivíduos tricromátas anómalos, é proposto oferecer-lhes a percepção das cores originais. Para a verificação dos métodos propostos, foram representadas, num monitor CRT calibrado, imagens originais e imagens alteradas por este método. Na análise dos resultados foram usadas medidas qualitativas e quantitativas, tendo sido os resultados quantitativos verificados através de medições de diferenças de cor,  $\Delta E_{ab}^*$ , entre as imagens alteradas e as imagens originais apresentadas, para os indivíduos dicromátas. Para os indivíduos tricromátas anómalos, os resultados quantitativos foram analisados através da diferença de cor seguindo o modelo LMS. Os resultados experimentais mostraram que a proposta de adaptação, reforça a legibilidade de informação de cor para indivíduos com cromatopsia visual[73].

Karl Rasche *et al.*, em 2005, propuseram um modelo de correcção de imagens digitais, procedendo à analogia de transformação de imagens a cores, em imagens em escala de cinzento, preservando o máximo detalhe, com a do processamento mas de imagens a cores para imagens perceptíveis para pessoas com cromatopsia visual[57]. Para fazer a simulação da visão de um indivíduo com cromatopsia visual foi utilizado o modelo proposto por Meyer e Greenberg's[47]. Posteriormente, em 2006, L. Jefferson e R. Harvey, baseando-se em estudos anteriores[29], procederam à correcção deste método e optimizaram resultados, acrescentando várias características inovadoras, usando critérios do World Wide Web Consortium (W3C)[8] e mapeando todo o algoritmo directamente ao *gamut* do dispositivo de output[28].

Em 2008, G. Kuhn *et al.*, apresentam uma técnica inovadora e eficiente para tratar o mesmo problema. Enquanto as técnicas anteriores se baseavam na alteração das cores das imagens originais, resultando como consequência a aparência não natural para indivíduos portadores de cromatopsia visual, a técnica proposta, preserva, tanto quanto possível, as cores originais da imagem. Foram testadas as alterações feitas por catorze indivíduos portadores de cromatopsia visual, submetidos anteriormente ao teste de Ishihara[27], em que estes testes indicaram que no conjunto total de indivíduos testados existiam alguns portadores de protanopia, de protanómia, de deuteranopia, e de deuteranómia. Estes observadores portadores de várias cromatopsias visuais, indicaram a sua preferência das imagens modificadas por esta técnica em relação às originais.[33].

Posteriormente, em 2009, Yu Ma *et al.*, desenvolveram um método de trans-

formação similar aos métodos anteriores. Para isso, utilizaram a redundância da informação colorimétrica de uma imagem, alterando-a, de forma a que dicromatas consigam discernir as cores que não conseguem visualizar, em comparação aos indivíduos com visão normal das cores. O método foi implementado com o algoritmo denominado de Self-Organizing Map (SOM)[30], aplicado com redes neuronais. Este algoritmo é usado para a construção de um mapa de cores não-linear, mantendo a relação entre as vizinhanças das cores em questão. Os resultados deste método são bastante significativos, uma vez que, através de uma observação subjectiva e avaliação qualitativa, foi demonstrado que é bastante eficiente na discriminação de cores, fornecendo uma forte base teórica para este tipo de correcção[38].

No mesmo ano, Jia-Bin Huang *et al.*, que já tinham proposto um método de preservação da informação de uma transformação de cor para indivíduos com protanopia e deuteranopia[24], propuseram um algoritmo que permite melhorar a acessibilidade para indivíduos com cromatopsia visual. Este modelo baseia-se no cálculo das cores mais representativas da imagem, procedendo-se posteriormente, ao mapeamento otimizado, de forma a preservar o contraste entre cada par dessas cores representativas. Os resultados obtidos foram bastante significativos, uma vez que, em comparação com o método de Jefferson *et al*[28], a eficácia do método proposto foi melhorada, mesmo sem proceder à análise de indivíduos com cromatopsia visual.[23]

### 4.3.3 Sistemas de Compensação em Tempo Real

No decorrer da investigação para o estado da arte em questão, optou-se por incluir dois tipos de sistema de compensação em tempo real, uma vez que, poderá ajudar a fornecer algum conhecimento sobre os métodos de captação, modelação e posterior apresentação de imagem a indivíduos portadores de cromatopsia visual.

Em 2008, T. Ohkubo e K. Kobayashi, fizeram a proposta de criação de um sistema de compensação de cor, para indivíduos com cromatopsia visual. O sistema desenvolvido consiste numa pequena câmara Charged Coupled Device (CCD) para captura, uma unidade de processamento da imagem capturada e um pequeno *display* gráfico Helmet Mounted Display (HMD), para apresentação ao observador em tempo real, como que de um par de óculos se tratasse. A imagem, capturada pelo CCD, no espaço de cor RGB, é convertida para o espaço de cor Hue-Lightness-Saturation (HLS), de forma a melhorar as diferenças de cor, dependendo do tipo de cromatopsia visual do indivíduo em teste. O processamento de imagem no espaço de cor HLS, sofre alteração apenas em termos de tonalidade (*Hue*), uma vez que, os outros dois componentes, *L* e *S*, permanecem inalterados. Este sistema de compensação foi testado com um sistema

de emulação de visualização de indivíduos com cromatopsia visual. O teste foi realizado por dez indivíduos com visão normal das cores, em que os resultados foram avaliados utilizando um sistema de avaliação semântico. Os resultados da avaliação deste sistema foram de uma clara melhoria de compensação de cor para a imagem simulada[55].

Posteriormente, em 2009, C. Lai e S. Chang, desenvolveram um sistema idêntico ao anterior. Este é um sistema *user-friendly*, portátil, que funciona em tempo real e que integra uma função de compensação visual para indivíduos com deficiências visuais, entre estas a cromatopsia. De forma análoga ao sistema anterior, as imagens são captadas com um dispositivo CCD, o processamento da imagem é idêntica, sendo a posterior apresentação no HMD, também similar. As principais diferenças residem na utilização de um algoritmo de processamento de imagens, onde são contempladas alterações nos três componentes do sistema HSL. Foram feitos testes com trinta indivíduos, quinze dos quais eram portadores de cromatopsia visual. Os resultados foram avaliados utilizando uma discriminação de descrição subjectiva da percepção da cor visualizada. Os resultados experimentais mostraram que, quer a estrutura do sistema, quer o próprio algoritmo de alteração da sensação visual, ajudam os indivíduos com deficiências visuais a interagir com o mundo que os rodeia e, deste modo, a melhorar a sua qualidade de vida[34].

## 4.4 Ajuste do Iluminante

O tipo de iluminante utilizado na visualização de objectos é muito importante, na medida em que, pormenores dos objectos podem ficar imperceptíveis aquando da utilização de uma iluminação errada. Na medida em que esta situação constitui um problema, muitas vezes possível de contornar, para pessoas com visão normal das cores, de que forma se poderá otimizar a utilização de um dado iluminante para as diferentes variantes de cromatopsias visuais?

J. Linhares *et al.*, em 2009, implementaram um modelo de avaliação da qualidade da iluminação, em obras de arte, para observadores com visão normal das cores e para observadores com cromatopsias visuais, de forma a estimar qual o número total de cores que aparentemente se podem distinguir, ao observar uma obra de arte. A análise foi efectuada a partir de imagens hiperespectrais de onze pinturas, alternando entre 55 tipos iluminantes CIE. Com este estudo ficou demonstrado que, existem alguns iluminantes que provocam sensações de cor diferentes, e, alguns destes, possibilitam uma melhoria significativa na forma como são visualizadas as imagens reais por vários tipos de observadores, sejam estes portadores de visão normal das cores ou de cromatopsia visual[36].

## 4.5 Considerações Finais

Procedendo à análise do capítulo em questão, no qual é feita uma apresentação da literatura relacionada com o tema abordado, conclui-se que existe informação relevante, referente ao assunto central do trabalho em questão. Vários investigadores tiveram já a capacidade de demonstrar, através de várias experiências, das quais, a importância das simulações de cromatopsia em imagens digitais, a correcção de cor em imagens digitais para indivíduos portadores de cromatopsia visual e até mesmo sistemas de correcção em tempo real, a importância da distinção que deve ser efectuada entre indivíduos portadores de cromatopsia visual e de indivíduos com visão normal das cores, e mesmo as diferenças entre vários tipos de deficiências a nível dos elementos fotoreceptores da retina humana.

No entanto, importa salientar que, de toda a literatura revista para a elaboração deste estado da arte, não foi encontrada qualquer matéria que abordasse o assunto da cor e da cromatopsia visual da mesma forma, ou por outras palavras, de forma semelhante ou, até, convergente, em relação à forma que tal tema foi abordado neste trabalho.

Como tal, e considerando que nenhuma investigação até então, interpretasse o assunto em questão de forma similar, tornou-se, portanto, essencial, desenvolver uma nova metodologia de forma a procurar "contornar" esta limitação visual, possibilitando aos portadores de cromatopsia visual a percepção das cores do mundo o mais parecido possível com a realidade.

Foi, assim, desenvolvida e testada uma metodologia inovadora, efectuando testes a observadores portadores de visão normal das cores e a observadores com cromatopsia visual, efectuada num cenário tridimensional com iluminantes controlados digitalmente para, procurar alcançar o objectivo anteriormente afirmado, ainda que apenas confinada ao mundo "virtual" e, a qual será apresentada no capítulo subsequente.

## Capítulo 5

---

# Metodologia

---

Com o propósito de obter resultados passíveis de fornecer dados credíveis, possibilitando uma análise profunda sobre as alterações cromáticas entre indivíduos com diversos tipos de cromatopsia visual, foi proposto um teste, com dois tipos de experiências, acentando cada uma destas no mesmo princípio básico: a medição do "desvio de cor", que cada indivíduo possui, em relação à cor real.

### 5.1 Sistema Óptico Experimental

A colorimetria clássica tem como princípio a medida da percepção cromática, em condições de observação artificiais. Usa campos visuais limitados e desprovidos de estrutura contextual e, em geral, estímulos empobrecidos, relativamente às condições naturais de observação.

O sistema óptico experimental utilizado permite medir, com precisão, algumas propriedades da visão das cores, em condições de observação naturais. Neste caso, o sistema óptico experimental serviu para comparar e medir numericamente as diferentes sensações visuais, entre observadores com visão normal e observadores portadores de cromatopsia, bem como o erro, ou desvio, da representação cromática de várias superfícies coloridas num cenário tridimensional.

O observador vê um cenário real através de um semi-espelho que cria uma imagem virtual do objecto de teste, na máscara tridimensional coberta de negro de fumo, como se encontra ilustrado na Figura 5.2.

Os iluminantes do cenário 3D, bem como a cor do objecto de teste, são controlados com elevada precisão, através de um campo bipartido, reproduzido num

projector RGB Barco RLM G5i Performer (Barco Corporate, Belgian) através da Visual Stimulus Generator (VSG) 2/5 (Cambridge Research Systems, UK), com uma resolução de 8-bit por cada canal RGB. Estes estímulos gerados pela VSG 2/5, são verificados e calibrados com um telespectroradiómetro portátil. Neste caso, foi usado o PR-650 *SpectraColorimeter*<sup>TM</sup> (Photo Research Inc., USA), utilizado para medições colorimétricas ópticas, representado na Figura 5.1.



Figura 5.1: Telespectroradiómetro - PR-650 *SpectraColorimeter*<sup>TM</sup>. (Retirado de *Photo Research Product Bulletin* Nº 66, 100-4/89-7.50)

Deste modo, o observador vê um objecto virtual (cubo central), que não distingue dos outros objectos reais, completamente integrado no cenário.

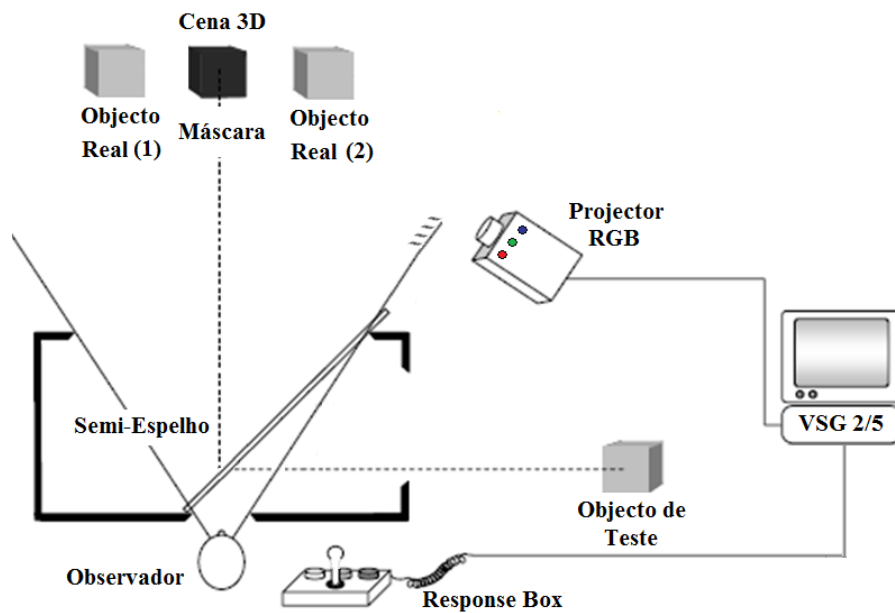


Figura 5.2: Diagrama do Sistema Óptico Experimental. O observador vê o cenário tridimensional através do semi-espelho que cria uma imagem virtual do objecto de teste tridimensional e colorido, sobre a máscara com negro de fumo. Os objectos da cena 3D e o objecto de teste, foram iluminados por um projector RGB, através de um campo bipartido.

### 5.1.1 Campo Bipartido

O projector RGB projectou um campo bipartido, ilustrado na Figura 5.3, o qual é constituído por dois rectângulos: um iluminou o cenário 3D e outro iluminou o objecto de teste. Foram ajustados cromaticamente, usando o PR-650 e a VSG 2/5, estando dispostos da seguinte forma:

- O campo de iluminação do cenário (representado do lado esquerdo), cria um iluminante com características de D55 ou D75, conforme os valores da Tabela 5.2.
- O campo de iluminação do objecto de teste (representado do lado direito), mostra aleatoriamente coordenadas cromáticas, de uma matriz igualmente espaçada, alterando a cor do objecto de teste.

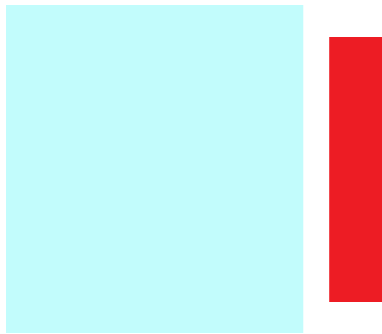


Figura 5.3: Exemplo do campo bipartido gerado pelo projector RGB. O rectângulo do lado esquerdo representa o iluminante do cenário, neste caso o D55. O rectângulo do lado direito ilumina o objecto de teste, neste caso, iluminado pela cor vermelha.

### 5.1.2 Response Box

Para a execução deste teste foi necessário a utilização, por parte do observador, de um dispositivo que interagisse com o software. Este dispositivo é constituído por sete micro *switches*, quatro dos quais com função de *joystick* e os outros três com função de botões, como se pode visualizar na Figura 5.4.

As funcionalidades do *joystick* neste teste foram omitidas, ficando só activas as funcionalidades dos três botões. Um destes botões foi utilizado aquando da resposta "sim", pelo observador, outro correspondia à resposta "não", enquanto o último era utilizado para interromper de forma definitiva e irreversível, a execução da experiência.



Figura 5.4: *Response Box* utilizada para a execução do teste

O observador apenas necessita de responder "sim" ou "não", conforme lhe pareça ou não a imagem virtual visualizada na máscara, igual à cor dos objectos reais 1 e 2. Estes sinais, "sim" ou "não", emitidos pela *Response Box*, foram contabilizados pelo software.

## 5.2 Cenário Experimental

O cenário experimental tridimensional, como se pode visualizar na Figura 5.5, é composto por um fundo negro e por um suporte, com vários degraus, revestidos com papel mate de cor neutra, neste caso cinzento. No degrau central do suporte, foram colocados os objectos de teste.

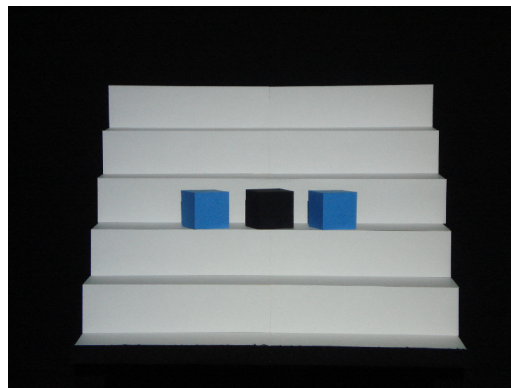


Figura 5.5: Exemplo do Cenário Experimental Tridimensional

### 5.2.1 Objectos de Teste

O conjunto de objectos de teste foi constituído por três cubos sólidos, colocados no degrau central do suporte. O cubo central foi revestido de negro de fumo e coincidia com a imagem virtual do objecto de teste, estando à mesma distância

do semi-espelho, do que o objecto de teste.

Os dois cubos laterais foram alinhados pelo cubo central e colocados e direccionados de uma forma equidistante. A superfície destes dois cubos foi revestida com papel mate de cor.

### 5.2.2 Cores de Teste

Foi executado um estudo exaustivo das propriedades cromáticas de vinte e sete tipos de papéis coloridos, iluminados por quatro tipos de diferentes iluminantes (D50, D55, D65 e D75), alternando com diferentes intensidades de luminância ( $45 \text{ cd/m}^2$ ,  $50 \text{ cd/m}^2$ ,  $55 \text{ cd/m}^2$  e  $60 \text{ cd/m}^2$ ). Com este estudo, verificou-se que existem inúmeras limitações no que diz respeito à representação da cor no objecto de teste. Estes tipos de limitações estão relacionadas com o facto de, quer a carta geradora de estímulos, quer o projector RGB, terem um *gamut* limitado, na representação de determinadas cores.

Então, por limitações de *gamut*, para o presente trabalho, foram escolhidas três cores de teste, sendo estas o vermelho, o verde e o azul, descritas com as coordenadas cromáticas representadas na Tabela 5.1. Foram fixados, também, os iluminantes do tipo D55 e D75, com luminâncias de  $55 \text{ cd/m}^2$ .

Ilu.	Vermelho			Verde			Azul		
	$u'$	$v'$	$L$	$u'$	$v'$	$L$	$u'$	$v'$	$L$
<b>D55</b>	0.3683	0.4922	6.17	0.1670	0.5420	21.62	0.1686	0.3875	9.08
<b>D75</b>	0.3387	0.4730	5.32	0.1585	0.5348	21.25	0.1675	0.3501	8.93

Tabela 5.1: Coordenadas cromáticas no espaço CIE 1976 das cores escolhidas sob iluminantes D55 e D75

### 5.2.3 Iluminantes de Teste

Tal como se verificou na escolha do tipo de cores de teste, as limitações de *gamut* por parte da carta geradora de estímulos e do projector RGB, tiveram preponderância, também, na escolha do tipo de iluminantes e no valor das suas luminâncias.

A escolha de, pelo menos, dois tipos de iluminantes, teve como objectivo a comparação das diferentes sensações, percebidas com as diferentes cores, pelos diferentes observadores. Escolheram-se, portanto, os iluminantes D55, luz amarelada, (Figura 5.6) e D75, luz azulada, (Figura 5.7), com luminâncias de  $55 \text{ cd/m}^2$ . As coordenadas cromáticas no espaço de cor CIE 1976, são descritas na

Tabela 5.2.

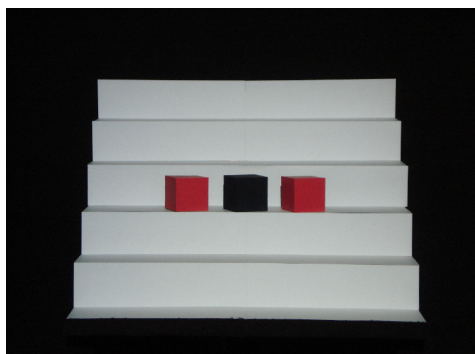


Figura 5.6: Iluminante D55

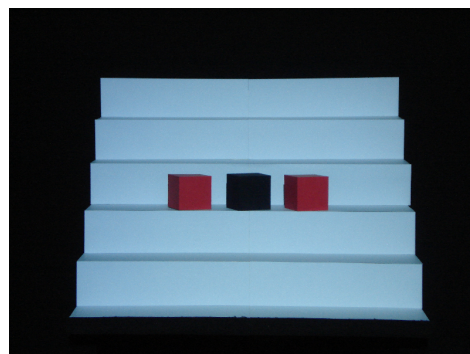


Figura 5.7: Iluminante D75

**Exemplo da sensação provocada pelos diferentes iluminantes no cenário de teste**

Iluminante	$u'$	$v'$	$L(cd/m^2)$
<b>D55</b>	0.2044	0.4807	55
<b>D75</b>	0.1935	0.4585	55

Tabela 5.2: Coordenadas cromáticas no espaço CIE 1976 dos Iluminantes D55 e D75

### 5.3 Observadores

Em ambas as experiências, foram testadas e registadas as características cromáticas de quatro observadores do sexo masculino (MAB, PTF, GMS e TVC), sendo dois deles (GMS e TVC), observadores naïve. Os observadores foram sujeitos ao Cambridge Colour Test, possuindo dois deles visão normal das cores (PTF e GMS), um portador de protanopia (TVC) e um portador de deuteranopia (MAB), podendo-se consultar os resultados no Anexo B.

### 5.4 Calibração e Verificação

Os processos de calibração, medida e verificação foram efectuados com o auxílio de várias aplicações de software, desenvolvidas em MATrix LABoratory (MATLAB), com o auxílio da Cambridge Research Systems (CRS) (*VSG Toolbox for MATLAB*) e do telespectrorradiómetro PR-650.

O projector RGB teve um período de aquecimento de, sensivelmente, trinta minutos antes de cada sessão de calibração; tal procedimento foi necessário para que o projector permanecesse em condições óptimas de estabilização.

O erro máximo permitido para a cromaticidade dos iluminantes e das cores de teste foi de 0.002, no espaço CIE 1931  $(x, y)$  e de  $0.25 \text{ cd/m}^2$ , em termos de luminância  $L$ . A verificação das coordenadas cromáticas dos iluminantes, e das cores de teste, foi efectuada no início de cada sessão de testes aos observadores. O espaço de realização dos testes teve uma climatização artificial, e constante, de  $21^\circ\text{C}$ .

Importa, ainda, salientar que o Cambridge Colour Test foi efectuado a partir de um monitor CRT, devidamente calibrado com o auxílio do PR-650 e do Optical Photometer (Cambridge Research Systems, UK), para uma correcta correcção de *gamma* do monitor.

#### 5.4.1 Iluminantes de Teste

O telespectroradiómetro PR-650, no caso da calibração do iluminante, incidia sobre uma superfície de  $\text{BaSO}_4$  (Sulfato de Bário), colocada na parte superior da máscara, no cenário de teste, como se pode visualizar na Figura D.1. Através de uma aplicação de software, foi possível calcular as coordenadas cromáticas da carta VSG 2/5, emitidas para representação correcta dos iluminantes requeridos, como exemplificado na Figura D.2.

#### 5.4.2 Cores de Teste

De forma semelhante, para a calibração das cores de teste, o telespectroradiómetro PR-650 incidiu sobre um papel colorido (da cor em questão), colocado na parte superior da máscara e com a mesma orientação, como se pode visualizar na Figura D.3. Através de uma aplicação de software, foi possível calcular as coordenadas cromáticas da carta VSG 2/5, emitidas para representação correcta das cores requeridas, como exemplificado na Figura D.4.

#### 5.4.3 Matrizes de Teste

O cálculo das matrizes de teste foi uma das fases fundamentais na implementação do teste proposto, sendo este, dividido em dois tipos de experiências, tal como referido em pormenor na Secção 5.5.

### Implementação da Experiência nº 1

Para a implementação da Experiência nº1, procedeu-se à construção de várias matrizes de dimensão  $M1_{(11 \times 11)}$ , com o intuito de testar a capacidade de discernimento de cromaticidades, por parte dos observadores, mantendo a componente da luminância  $L$  da cor de teste constante. Estas matrizes  $M1_{(11 \times 11)}$  são construídas para todas as cores de teste e sob a influência dos dois tipos de iluminantes, D55 e D75.

Os elementos da matriz  $M1_{(11 \times 11)}$ , posicionados em  $M1_{(6,6)}$ , contêm as coordenadas cromáticas  $(u', v')$  da cor de teste. Através destas coordenadas, e com um factor de 0.0175, foi construída a referida matriz  $M1_{(11 \times 11)}$ , igualmente espaçada no espaço de cor uniforme CIE 1976, com o auxílio de uma aplicação que contempla a calibração, medição e verificação, implementada em MATLAB, como se pode visualizar na Figura D.5.

### Implementação da Experiência nº 2

De forma semelhante à anterior, para a implementação da Experiência nº2, procedeu-se à construção de várias matrizes de dimensão  $M2_{(1 \times 21)}$ , com o intuito de testar a capacidade de discernimento de luminância, por parte dos observadores, mantendo constantes as componentes  $u'$  e  $v'$ , variando, somente, a componente da luminância  $L$  da cor de teste. Estas matrizes  $M2_{(1 \times 21)}$  são construídas para todas as cores de teste e sob a influência dos dois tipos de iluminantes D55 e D75.

Os elementos da matriz  $M2_{(1 \times 21)}$ , posicionados em  $M2_{(1,11)}$ , contêm as coordenadas cromáticas  $L$  da cor de teste. Através destas coordenadas, e com um factor de  $0.25 \text{ cd/m}^2$ , foi construída a referida matriz  $M2_{(1 \times 21)}$ , igualmente espaçada no espaço de cor uniforme CIE 1976, com o auxílio de uma aplicação que contempla a calibração, medição e verificação, implementada em MATLAB, como se pode visualizar na Figura D.6.

## 5.5 Procedimento

De forma a poderem ser medidos, e analisados, os erros cromáticos cometidos pelos observadores, foram realizadas duas experiências psicofísicas complementares. Uma, permitiu verificar a discriminação no diagrama de cromaticidade CIE 1976  $(u', v')$  da cor do objecto real, enquanto a outra, permitiu verificar a discriminação de luminância  $L$ .

Para obtenção de resultados fidedignos, foram realizadas duas sessões de testes, totalizando vinte e cinco *trial's*, para cada cor e para cada iluminante, nos dois tipos de experiência, perfazendo, assim, o total de cento e cinquenta *trial's* por observador.

### 5.5.1 Experiência nº 1 - Variação $u'v'$

Pretendia-se, com a experiência nº1, e de acordo com o protocolo de teste (Anexo C), que os observadores, ao visualizarem o cenário tridimensional, composto pelos objectos de teste, respondessem na modalidade SIM/NÃO, se o cubo central era, ou não, igual à cor dos cubos laterais.

Para este caso, foi implementada uma aplicação (Figura D.9) que mostrava aleatoriamente, ao observador, estímulos cromáticos ( $u', v'$ ), mantendo constante a luminância  $L$ , como se pode exemplificar nas Figuras D.7 e D.8. Estas coordenadas foram anteriormente calculadas para a matriz  $M1_{(11 \times 11)}$ , sendo posteriormente contabilizado o número de respostas SIM/NÃO, das várias *trial's* efectuadas, para fins de análise probabilística.

### 5.5.2 Experiência nº 2 - Variação $L$

De forma semelhante, pretendia-se nesta experiência nº2, que os observadores, respondessem na modalidade SIM/NÃO, se o cubo central era, ou não, igual à cor dos cubos laterais.

Para este caso, foi, também, implementada uma aplicação (Figura D.12) que mostrava aleatoriamente, ao observador, estímulos cromáticos ( $u', v'$ ) constantes, alternando com diferentes valores de luminância  $L$ , como se pode exemplificar nas Figuras D.10 e D.11. Estas coordenadas foram anteriormente calculadas para a matriz  $M2_{(1 \times 11)}$ , sendo posteriormente contabilizado o número de respostas SIM/NÃO, das várias *trial's* efectuadas, para fins de análise probabilística.

## 5.6 Cálculo Probabilístico

Com base no processamento dos resultados registados da Experiência nº 1, e com o auxílio de uma aplicação implementada em MATLAB, foi criado um mapa *contour* com a distribuição probabilística  $P(u', v')$ , calculadas a partir da Equação 5.1 do ajuste cromático dos observadores, no espaço de cor CIE 1976. O ponto de probabilidade máxima foi identificado, a partir do ponto de coordenadas ( $u', v'$ ), calculadas na Equação 5.2, correspondente à média ponderada das probabilidades. Desta forma foi possível calcular três erros cromáticos associados

às diferenças cromáticas no espaço LAB.

Assim, após as transformações adequadas para o espaço LAB, foram calculados os erros  $\Delta E_{Prob.Max}$ ,  $\Delta E_{Med.Pesada}$  e ainda  $\Delta E_{2000_{Med.Pesada}}$ . Um método similar foi, efectuado também para a Experiência nº 2.

$$P(u', v') = \frac{\text{Numero de Respostas Afirmativas em } (u', v')}{\text{Total de Trial's}} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} u'_{Med.Pesada} &= \frac{\sum_{n=1}^{ingamut} (u' \times P(u', v'))}{\sum_{n=1}^{ingamut} P(u', v')} \\ v'_{Med.Pesada} &= \frac{\sum_{n=1}^{ingamut} (v' \times P(u', v'))}{\sum_{n=1}^{ingamut} P(u', v')} \end{aligned} \quad (5.2)$$

## Capítulo 6

---

# Resultados e Discussão

---

### 6.1 Interpretação dos Resultados

Nesta secção será realizada a apresentação dos resultados das experiências N<sup>o</sup>1 e N<sup>o</sup>2, feitas pelos quatro observadores, e considerando apenas o erro cromático  $\Delta E_{2000}$ , relativo às coordenadas das médias mesadas das probabilidades.

#### 6.1.1 Observador - MAB

##### Influência do Iluminante D55

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>1 (Figura 6.1), verifica-se que este indivíduo, em relação à cor vermelha, apresenta uma visão com um erro  $\Delta E_{2000}$ , no espaço LAB, inferior a 1 unidade. Contudo, no que respeita às cores verde e azul, este indivíduo mostra ter erros de percepção elevados em ambas, na medida em que o erro  $\Delta E_{2000}$ , apresenta um valor superior, a 6 unidades, nas duas cores, tendo obtido o pior resultado na cor azul.

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>2 (Figura 6.2), verifica-se um erro cromático baixo para as três cores, apresentando um mínimo na cor verde.

##### Influência do Iluminante D75

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>1 (Figura 6.3), verifica-se que, para este indivíduo, com o aumento da temperatura de cor do iluminante, há um aumento da confusão ao nível da percepção dos comprimentos de onda relativos a todas as cores, evidenciando-se mais esta alteração na cor verde e azul. Contudo, o valor do erro  $\Delta E_{2000}$ , para a cor vermelha não é significativo.

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>2 (Figura 6.4), verifica-se os erros cromáticos baixam na generalidade, havendo uma troca na discriminação das

cores, vermelho e verde, em relação ao iluminante D55, sendo mantido o erro cromático na cor azul.

### 6.1.2 Observador - PTF

#### Influência do Iluminante D55

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>1 (Figura 6.1), verifica-se que este indivíduo detém uma visão, com o erro  $\Delta E_{2000}$ , no espaço LAB, inferior a 4 unidades, para as três cores. Apresenta, um pico na cor verde, sendo este insignificante. Mantém, assim, uma boa precisão ao nível da distinção das três cores.

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>2 (Figura 6.2), verifica-se os erros cromáticos são igualmente baixos, inferiores a 1.5 unidades de  $\Delta E_{2000}$ , com um mínimo para a cor verde.

#### Influência do Iluminante D75

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>1 (Figura 6.3), verifica-se que este indivíduo mantém o erro  $\Delta E_{2000}$ , no espaço LAB, inferior a 4 unidades, para as três cores. Mantém uma boa precisão, ao nível da distinção das três cores, embora, apresente um decréscimo de precisão em relação ao iluminante D55.

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>2 (Figura 6.4), verifica-se um aumento do erro, o que significa uma diminuição da discriminação cromática, sendo mais significativa na cor verde.

### 6.1.3 Observador - GMS

#### Influência do Iluminante D55

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>1 (Figura 6.1), verifica-se que este indivíduo detém uma visão, com o erro  $\Delta E_{2000}$ , no espaço LAB, inferior a 2 unidades, para as três cores. Mantém, assim, uma boa precisão ao nível da distinção das três cores.

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>2 (Figura 6.2), verifica-se os erros cromáticos são igualmente baixos, inferiores a 1.5 unidades de  $\Delta E_{2000}$ , com um mínimo para a cor azul.

#### Influência do Iluminante D75

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>1 (Figura 6.3), verifica-se que este indivíduo diminui sem significado, o erro  $\Delta E_{2000}$ , no espaço LAB, para as três cores, inferior a 1 unidade. Mantém uma boa precisão, ao nível da distinção das três cores, e, em relação ao iluminante D55, tem um acréscimo de precisão.

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>2 (Figura 6.4), verifica-se um aumento do erro, o que significa uma diminuição da discriminação cromática, sendo mais significativa na cor azul.

#### 6.1.4 Observador - TVC

##### Influência do Iluminante D55

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>1 (Figura 6.1), verifica-se que este indivíduo, em relação à cor vermelha, apresenta uma visão, com o erro  $\Delta E_{2000}$ , no espaço LAB, inferior a 1 unidade. Contudo, no que respeita às cores verde e azul, este indivíduo mostra ter erros de percepção elevados de ambas, na medida em que o  $\Delta E_{2000}$ , no espaço LAB, apresenta um valor superior, nas duas cores, a 7 unidades, tendo obtido o pior resultado na cor azul.

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>2 (Figura 6.2), verifica-se um erro cromático baixo para as três cores, apresentando um mínimo na cor verde.

##### Influência do Iluminante D75

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>1 (Figura 6.3), verifica-se que para este indivíduo, com o aumento da temperatura de cor do iluminante, há um aumento da confusão ao nível da percepção dos comprimentos de onda relativos a todas as cores, evidenciando-se mais esta alteração nas cores verde e azul. Contudo, o valor do erro  $\Delta E_{2000}$ , para a cor vermelha não é significativo.

Após a análise do gráfico da Experiência n<sup>o</sup>2 (Figura 6.4), verifica-se os erros cromáticos baixam na generalidade, havendo uma decida na discriminação das cores, vermelho e verde, porque aumenta o erro cromático, em relação ao iluminante D55, sendo mantido o erro cromático na cor azul.

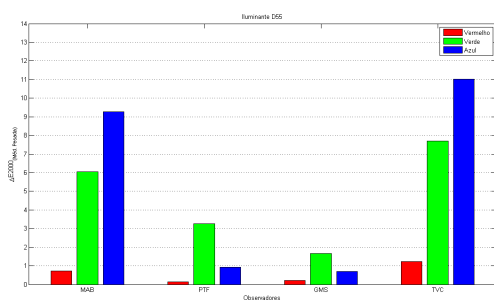


Figura 6.1:  $\Delta E_{2000}$  Experiência n<sup>o</sup>1 - D55

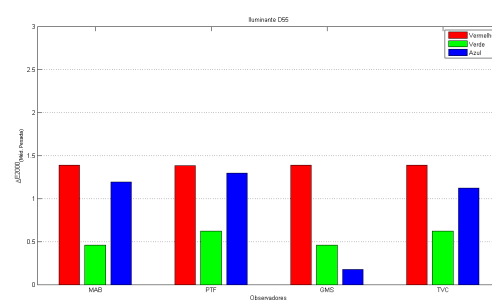
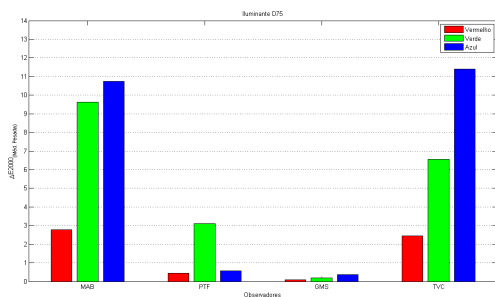
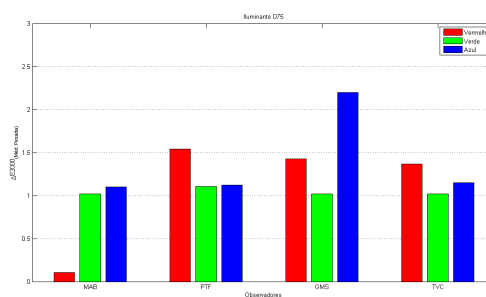


Figura 6.2:  $\Delta E_{2000}$  Experiência n<sup>o</sup>2 - D55

Cor	MAB	PTF	GMS	TVC
Vermelho	0,724	0,129	0,215	1,224
Verde	6,039	3,254	1,651	7,698
Azul	9,264	0,930	0,690	11,011

Tabela 6.1:  $\overline{\Delta E}_{2000}$  resultante das Experiências n<sup>o</sup>1 - D55

Cor	MAB	PTF	GMS	TVC
Vermelho	1,388	1,381	1,388	1,388
Verde	0,459	0,622	0,459	0,621
Azul	1,193	1,296	0,178	1,123

Tabela 6.2:  $\overline{\Delta E}_{2000}$  resultante das Experiências n<sup>o</sup>2 - D55Figura 6.3:  $\overline{\Delta E}_{2000}$  Experiência n<sup>o</sup>1 - D75Figura 6.4:  $\overline{\Delta E}_{2000}$  Experiência n<sup>o</sup>2 - D75

## 6.2 Interpretação dos Resultados do Cambridge Color Test

### 6.2.1 Observador - MAB

A execução do Cambridge Color Test pelo observador MAB (B), permitiu concluir que, este observador detém anomalia nos três tipos de cones, com as três elipses a apresentar um rácio compreendido entre 7,56 e 11,47 unidades, possuindo, ainda, aproximadamente, a mesma orientação no plano e de forma paralela ao eixo verde-vermelho. Por isso, este observador representa uma situação de deuteranopia.

Cor	MAB	PTF	GMS	TVC
Vermelho	2,778	0,447	0,0948	2,460
Verde	9,622	3,118	0,1978	6,547
Azul	10,742	0,581	0,362	11,395

Tabela 6.3:  $\overline{\Delta E}_{2000}$  resultante das Experiências n<sup>o</sup>1 - D75

Cor	MAB	PTF	GMS	TVC
Vermelho	0,103	1,539	1,426	1,366
Verde	1,020	1,103	1,020	1,020
Azul	1,100	1,125	2,198	1,147

Tabela 6.4:  $\bar{\Delta}E_{2000}$  resultante das Experiências n<sup>o</sup>2 - D75

### 6.2.2 Observador - PTF

Com base no mesmo teste (B), comprova-se que o observador PTF detém uma boa precisão ao nível das cores, estando os rácios das elipses de cada campo, compreendidos entre 1,99 e 2,31 unidades.

### 6.2.3 Observador - GMS

Com base nos resultados obtidos com o Cambridge Color Test (B), comprova-se que o observador GMS é o que detém maior precisão ao nível das cores, estando os rácios das elipses de cada campo, compreendidos entre 1,1 e 2.3 unidades.

### 6.2.4 Observador - TVC

Os resultados obtidos no Cambridge Color Test (B), pelo observador TVC, permitiram concluir que, este observador detém anomalia nos três tipos de cones, com as três elipses a apresentar um rácio compreendido entre 5.29 e 9.84 unidades, possuindo, ainda, uma orientação no plano de forma a que o prolongamento dos eixos das elipses obtenha o ponto máximo de cor vermelha no espaço CIE 1976. Como tal, este observador representa uma situação de protanomalia.

## 6.3 Discussão

Analisando os resultados obtidos, adquire-se uma determinada perspectiva em termos de similaridade entre os observadores com visão normal das cores e os observadores portadores de cromatopsia visual. Embora o teste efectuado seja composto por dois tipos de experiências, pode concluir-se que os resultados mais significativos são os fornecidos pela Experiência n<sup>o</sup>1.

Os resultados obtidos por esta experiência contrariam, de certa forma, os resultados do Cambridge Color Test, uma vez que o observador MAB, portador de deuteranopia, possui uma dificuldade acrescida na visualização das cores verde e azul, apresentando um maior erro cromático na cor azul do que na cor verde. No que concerne ao observador TVC, portador de protanopia, os resultados são completamente contraditórios, na medida em que este observador, segundo o Cambridge Color Test, possui uma capacidade reduzida de visualização da cor

vermelha; porém, esta anomalia não se verifica aquando da utilização, por exemplo, do iluminante D55.

Em termos de luminância (Experiência nº 2), os resultados mostram que os indivíduos portadores de cromatopsia visual, discriminam melhor e com menores erros as cores, do que os indivíduos com visão normal de cores. Essa sensibilidade é mais notória no iluminante com temperaturas de cor mais elevadas, neste caso o D75.

Concluída a execução e a interpretação dos resultados dos testes, pode-se então afirmar com certeza que, quer para um observador deuteranope, quer para um observador protanope, a influência do iluminante é muito significativa, uma vez que quanto mais baixa for a temperatura de cor do iluminante, menor será o erro cromático.

Os resultados dos testes podem fornecer também conhecimento para afirmar que existe uma forma de alterar imagens digitais para observadores com deuteranopia e protanopia. Esta alteração poderá acentar no simples facto da redução cromática do espaço de cores, para cada tipo de cromatopsia visual. Esta redução deve ser executada de forma a que o espaçamento entre as cores representadas nessa imagem, seja, pelo menos de 0,0350 unidades de medida em  $(u', v')$ , relacionadas com o espaçamento das matrizes propostas na Experiência nº 1.

Embora a imagem resultante, seja claramente diferente da visualizada, por um observador normal, e com uma definição mais baixa a nível colorimétrico, existirá um elevado grau discriminativo a nível colorimétrico para indivíduos portadores de cromatopsia visual.

O estudo a nível probabilístico poderá, analisado de outras formas, ser crucial para uma maior precisão no cálculo do factor de redução colorimétrico de um modelo de cor a implementar, uma vez que pelos resultados obtidos, a abordagem efectuada não foi a mais eficaz. Além disso, seria necessário não só proceder, a um maior número de experiências, como também seria necessário um maior número de cores e iluminantes, para diferenciar com maior precisão as diferenças de erro cromático cometido pelos portadores dos mais diversos tipos de cromatopsia visual.

## Capítulo 7

---

# Considerações Finais

---

### 7.1 Conclusões

Após todo o trabalho de pesquisa e de investigação, quer na componente teórica, quer na componente prática, pode concluir-se que a metodologia inovadora praticada no desenvolvimento desta tese, constitui uma mais valia no estudo da área da colorimetria para indivíduos portadores de cromatopsia visual e, também, no âmbito das ciências informáticas, na área dos ambientes e representações gráficas.

Estas mais valias poderão trazer benefícios, quer no que concerne à melhoria da qualidade de vida para portadores deste tipo de anomalias, quer para processos de investigação. Estes mesmos processos poderão ser aplicados a uma grande diversidade de tecnologias ou ramos científicos, tais como, por exemplo, a adaptação de imagens digitais e a sua posterior apresentação a indivíduos com visão normal das cores, para que estes se apercebam do modo como os indivíduos com limitações colorimétricas vêem o mundo que nos rodeia.

No que respeita à informática e ao estudo de modelos de cor para ambientes gráficos, poderão ainda surgir novos dados que contribuam para um estado de arte que relacione modelos de adaptação cromática existentes, com os resultados das experiências efectuadas.

A área de compressão de imagens digitais também poderá ter o seu interesse, uma vez que este tipo de experiências efectuadas permitem, de certa forma, calcular o nível de discriminativo colorimétrico para cores visualizadas por indivíduos possuidores de visão normal. Este nível discriminativo poderá ser utilizado para aumentar a performance da compressão de imagens digitais, uma vez que, com a remoção de cores não discriminadas, diminui a quantidade de informação presente

em imagens digitais.

## 7.2 Trabalho Futuro

Em relação ao âmbito desta tese, como proposta de trabalho futuro, e de forma a obter um maior nível de conhecimento, poderão ser aplicadas estas experiências a um maior número de indivíduos, quer sejam portadores de visão normal das cores, quer sejam indivíduos que possuem cromatopsia visual, variando também o número de cores de teste, da aplicação em cenários de teste complexos, com vários tipos de objectos, de forma a criar confusão ao nível da percepção de estímulos, e, ainda, um número superior de iluminantes com variações de luminância.

Numa fase posterior, poderá existir vantagem na aplicação de sistemas inteligentes às bases de dados de resultados fornecidos por estas experiências, de forma a encontrar um maior número de padrões, e, através destes, ser possível extrair conhecimento. Poderia, assim, nesta base, ser possível agrupar diferentes tipos de portadores de cromatopsia visual, proceder à quantificação do grau(%) de anomalia, ou até mesmo uma definir nova regra de definição de cromatopsia visual.

Espera-se que o desenvolvimento deste tipo de aplicações informáticas, bem como a sua posterior aplicação, não só aos mais variados tipos de tecnologias, tais como os dispositivos gráficos e os dispositivos de impressão, mas também a nível de software, como um plug-in para web-browser, ou, até mesmo, um plug-in para aplicações de design gráfico e multimédia, possibilite aos portadores de cromatopsia visual a percepção das cores de um modo o mais real possível, ainda que confinado ao mundo virtual, para que estes consigam ver as cores tal como vê um indivíduo com visão normal e, conseguindo, assim obter uma melhor qualidade de vida.

---

# Bibliografía

---

- [1] Luis R. Barone. *Anatomy and Physiology of the Human Body*. CLASA, Buenos Aires, Argentina, 2004.
- [2] Mauro Bicchierini, Angelo Davalli, Rinaldo Sacchetti, and Sauro Paganelli. Colorimetric analysis of silicone cosmetic prostheses for upper-limb amputees. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 42(5):655–664, 2005.
- [3] R. M. Boynton. A system of photometry and colorimetry based on cone excitations. *Color Res. Appl*, 11:244–252, 1986.
- [4] H. Brettel, F. Viénot, and J.D. Mollon. Computerized simulation of color appearance for dichromats. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 14(10):2647–2655, 1997.
- [5] L. F. Bruni and A. A. Cruz. Chromatic sense: types of defects and clinical evaluation tests. *Arq. Bras. Oftalmol.*, 69(5):766–75, 2006.
- [6] P. Capilla, M.A. Díez-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*, 21(2):173–186, 2004.
- [7] Neil R. Carlson. *Physiology of Behavior*. Allyn and Bacon, Boston, Massachusetts, 9th edition, 2006.
- [8] Wendy Chisholm, Gregg Vanderheiden, and Ian Jacobs. Web content accessibility guidelines 1.0, 1999.
- [9] CIE. *CIE recommendations on uniform color spaces-color difference equations, psychometric color terms*. CIE Publication, 1978.
- [10] CIE. *Colorimetry*. CIE Publication 15.2, Vienna: CIE Central Bureau, 2nd edition, 1986.
- [11] Mary Collins and James Drever. *Colour-blindness: with a comparison of different methods of testing colour-blindness*. Harcourt, Brace & Company, Inc., New York, 1925.

- [12] Mark D. Fairchild. Color forum: The CIE 1931 standard colorimetric observer: Mandatory retirement at age 65? *Color Res. Appl*, 18:129–134, 1993b.
- [13] Mark D. Fairchild. *Color Appearance Models*. Jonh Wiley & Sons, Inc., 2nd edition, 2005.
- [14] Dean Farnsworth. The farnsworth-munsell 100-hue and dichotomous tests for color vision. *Journal of the Optical Society of America*, 33(10):568–574, 1943.
- [15] Dean Farnsworth. *The Farnsworth-Munsell 100-hue test for the examination of color discrimination manual*. Munsell color company, Baltimore, 1957.
- [16] O. D. Faugeras. Digital color image processing within the framework of a human visual model. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, 27(4):380–393, 1979.
- [17] James D. Foley, Andries Van Dam, Steven K. Feiner, and John F. Hughes. *Computer graphics: principles and practice*. Addison-Wesley Professional, 2nd edition, 1995.
- [18] Edward J. Giorgianni and Thomas E. Madden. *Digital Color Management: Encoding Solutions*. Jonh Wiley & Sons, Inc., 2nd edition, 2008.
- [19] Hermann G. Grassmann. Zur theorie der farbenmischung. *Annalen der Physik (Leipzig)*, 89:60–84, 1853.
- [20] Legrand H. Hardy, Gertrude Rand, and M. Catherine Rittler. Tests for the detection and analysis of color-blindness. *Journal of the Optical Society of America*, 35(4):268–271, 1945.
- [21] WM Hart. Acquired dyschromatopsias. *Surv Ophthalmol.*, 32:10–31, 1987.
- [22] Hemman L. Helmholtz. Über die zusammensetzung von spectralfarben. *Annalen der Physik*, 94:1–28, 1855.
- [23] Jia-Bin Huang, Chu-Song Chen, Tzu-Cheng Jen, and Sheng-Jyh Wang. Image recolorization for the colorblind. In *Acoustics, Speech and Signal Processing. ICASSP. IEEE International Conference*, pages 1161–1164, April 2009.
- [24] Jia-Bin Huang, Yu-Cheng Tseng, Se-In Wu, and Sheng-Jyh Wang. Information preserving color transformation for protanopia and deuteranopia. *Signal Processing Letters, IEEE*, 14(10):711–714, 2007.
- [25] R. W. G. Hunt. *Measuring Color*. Ellis Horwood, New York, 2nd edition, 1991.
- [26] R. W. G. Hunt. *The Reproduction of Colour*. Jonh Wiley & Sons, Inc., England, 6th edition, 2004.
- [27] Shinobu Ishihara. *Tests for colour-blindness*. Hongo Harukicho, Handaya, Tokyo, 1917.
- [28] Luke Jefferson and Richard Harvey. Accommodating color blind computer users. In *Assets '06: Proceedings of the 8th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, pages 40–47, New York, USA, 2006. ACM.

- [29] Luke Jefferson and Richard Harvey. An interface to support color blind computer users. In *CHI '07: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 1535–1538, New York, USA, 2007. ACM.
- [30] Huidong Jin, Wing-Ho Shum, Kwong-Sak Leung, and Man-Leung Wong. Expanding self-organizing map for data visualization and cluster analysis. *Inf. Sci.*, 163(1-3):157–173, 2004.
- [31] P. Kowaliski. *Vision et mesure de la couleur*. Masson et CIE, 2nd edition, 1990.
- [32] J. von Kries. Über farbensysteme. *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*, 13:241–324, 1897.
- [33] Giovane R. Kuhn, Manuel M. Oliveira, and Leandro A. F. Fernandes. An efficient naturalness-preserving image-recoloring method for dichromats. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 14(6):1747–1754, 2008.
- [34] Chin-Lun Lai and Shu-Wen Chang. An image processing based visual compensation system for vision defects. In *Consumer Electronics. ISCE. IEEE 13th International Symposium on*, pages 472–476, May 2009.
- [35] Haim Levkowitz. *Color Theory and Modeling for Computer Graphics, Visualization, and Multimedia Applications*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 1997.
- [36] João M. Linhares, Paulo A. Pinto, and Sérgio 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*, 26(7):1668–1677, 2009.
- [37] M. R. Luo, G. Cui, and B. Rigg. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. *Color Research and Application*, 2001.
- [38] Yu Ma, Xiaodong Gu, and Yuanyuan Wang. Color discrimination enhancement for dichromats using self-organizing color transformation. *Inf. Sci.*, 179(6):830–843, 2009.
- [39] Elaine N. Marieb. *Human Anatomy & Physiology*, chapter 15. Benjamin-Cummings Publishing Company, 7th edition, 2007.
- [40] C.E. Martin, S.K. Rogers, and M. Kabrisky. Digital production of color mach bands using a color human visual system model. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 28(1):127–130, 1998.
- [41] Curtis E. Martin, J. O. Keller, Steven K. Rogers, and Matthew Kabrisky. Color blindness and a color human visual system model. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, 30(4):494–500, 2000.
- [42] James C. Maxwell. Experiments on colour as perceived by the eye, with remarks on colour blindness. *Transactions Of The Royal Society Of Edinburgh*, 21:275–298, 1855.
- [43] William R. McCluney. *Introduction to Radiometry and Photometry*. Artech House, Inc., Boston, London, 1994.

- [44] Roderick McDonald. *Colour Physics for Industry*. Society of Dyers and Colourists, England, 2nd edition, 1997.
- [45] D. A. McIntyre. *Colour blindness: causes and effects*. Dalton Publishing, 2002.
- [46] K. McLaren. Development of CIE 1976 (Lab) uniform color space and color-difference formula. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 92:338–341, 1976.
- [47] Gary W. Meyer and Donald P. Greenberg. Color-defective vision and computer graphics displays. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 8(5):28–40, 1988.
- [48] J. D. Mollon and B. C. Regan. *Cambridge Colour Test - Handbook*. Cambridge Research Systems, Ltd, Cambridge University, 2000.
- [49] Ján Morovic. *Color Gamut Mapping*, chapter Basics of Color Science. Jonh Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [50] Albert H. Munsell. *A Color Notation*. Munsell Color Company, Boston, MA, 1905.
- [51] W.A Nagel. Zwei apparate für die augenärztliche funktionsprüfung. adaptometer und kleines spektralphotometer (anomaloskop). *Zeitschrift für Augenheilkunde*, 17:201–22, 1907.
- [52] Kurt Nassau. The causes of color. *Scientific American*, 243:124–154, 1995.
- [53] Kurt Nassau. *The Physics and Chemistry of Color: The Fifteen Causes of Color*. Jonh Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 2nd edition, 2001.
- [54] Isaac Newton. *Opticks: Or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*. Dover Publications, Inc., New York, N.Y., 1952.
- [55] T. Ohkubo and K. Kobayashi. A color compensation vision system for color-blind people. In *SICE Annual Conference*, pages 1286–1289, Aug. 2008.
- [56] Joel Pokorny, Vivianne C. Smith, and Margaret Lutze. Aging of the human lens. *Appl. Opt.*, 26(8):1437–1440, 1987.
- [57] Karl Rasche, Robert Geist, and James Westall. Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 25(3):22–30, 2005.
- [58] Chistine Rigden. The eye of the beholder - designing for colour-blind users. *British Telecommunications Engineering*, 17:291–295, 1999.
- [59] Christine Rigden. Now you see it, now you don't. *Computer*, 35(7):104–105, 2002.
- [60] Valerie C. Scanlon. *Essentials of Anatomy and Physiology*. F. A. Davis Company, Philadelphia, PA, 5th edition, 2007.
- [61] Brooke E. Scheffrin and John S. Werner. Age-related changes in the color appearance of broadband surfaces. *Color Research & Application*, 18(6):380–389, 1993.
- [62] Rod R. Seeley, Trent D. Stephens, and Philip Tate. *Anatomy and Physiology*, chapter 15. McGraw Hill Higher Education, 6rd edition, 2003.

- [63] R. Sekuler and R. Blake. *Perception*. McGraw-Hill Publishing Company, New York, NY, 2nd edition, 1990.
- [64] L. T. Sharpe, A. Stockman, H. Jägle, and J. Nathans. *Color Vision: From Genes to Perception*, chapter Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness, pages 3–51. Cambridge University Press, 1999.
- [65] Thomas Smith and John Guild. The C.I.E. colorimetric standards and their use. *Transactions of the Optical Society*, 33(3):73–134, 1931.
- [66] Robert Sève. *Physique de la couleur: de l'apparence colorée à la technique colorimétrique*. Masson, 1st edition, 1996.
- [67] R. L. De Valois and K. K. De Valois. A multi-stage color model. *Vision Res.*, 33:1053–1065, 1993.
- [68] Brian A. Wandell. *Foundations of Vision*. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, MA, 1st edition, 1995.
- [69] Lynda Weinmann and Bruce Heavin. *Coloring Web Graphics*. New Riders Publishing, 2 edition, 1997.
- [70] John S. Werner and Brooke E. Schefrin. Loci of achromatic points throughout the life span. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 10(7):1509–1516, 1993.
- [71] William D. Wright. 50 years of the 1931 CIE standard observer for colorimetry. *AIC Color 81*, 1981b.
- [72] G. Wyszecki and W. S. Stiles. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative and Formulae*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982.
- [73] Seungji Yang and Yong Man Ro. Visual contents adaptation for color vision deficiency. In *Image Processing. ICIP. Proceedings. International Conference*, volume 1, pages 453–456, 2003.
- [74] Thomas Young. The bakerian lecture: On the theory of light and colours. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 92:12–49, 1802.



# Apêndices



## Apêndice A

---

# Diferenças de Cor

---

Diferença de Cor -  $\Delta E_{ab}^*$

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (\text{A.1})$$

Diferença de Cor -  $\Delta E_{2000}$

$$\Delta E_{2000} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{\kappa_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{\kappa_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{\kappa_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{\kappa_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{\kappa_H S_H}\right)} \quad (\text{A.2})$$

Onde:

$$\begin{aligned}
L' &= L^* \\
a' &= (1 + G)a^* \\
b' &= b^* \\
C' &= \sqrt{(a')^2 + (b')^2} \\
h' &= \tan^{-1}(b'/a')
\end{aligned}$$

$$G = 0.5 \left( 1 - \sqrt{\frac{\overline{\Delta E_{ab}^*}^7}{\overline{\Delta E_{ab}^*}^7 + 25^7}} \right)$$

$$\begin{aligned}
\Delta L' &= L'_b - L'_s \\
\Delta C' &= C'_b - C'_s \\
\Delta H' &= 2\sqrt{C'_b C'_s} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right) \\
\Delta h' &= h'_b - h'_s
\end{aligned}$$

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

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

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

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

$$\Delta\theta = 30 \exp\{-[(\overline{h'} - 275^\circ)/25]^2\}$$

$$R_C = 2\sqrt{\frac{\overline{h'}^7}{\overline{h'}^7 + 25^7}}$$

e onde:

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

## **Apêndice B**

---

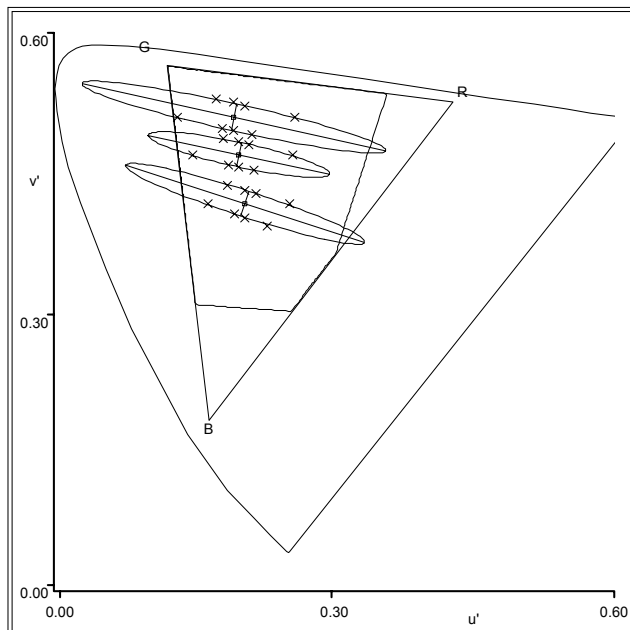
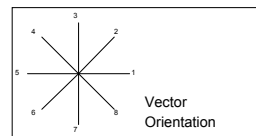
# **Cambridge Colour Test**

## Cambridge Colour Test Results

Subject Details	
Name	MAB,
Gender	Male
Date of Birth	21/10/1980
Test Date	31-07-2009 19:40:54

Test Type	Ellipse	
Field Point 1	0.198	0.469
Field Point 2	0.193	0.509
Field Point 3	0.204	0.416

Results	Field 1	Field 2	Field 3
Length	0.1984	0.3333	0.2691
Axis ratio	7.56	11.47	9.60
Angle (deg)	167.8	167.5	162.1



Vector	Field 1	Field 2	Field 3
1	0.0576	0.0650	0.0476
2	0.0146	0.0166	0.0158
3	0.0139	0.0158	0.0141
4	0.0242	0.0268	0.0274
5	0.0489	0.0605	0.0394
6	0.0162	0.0174	0.0160
7	0.0134	0.0144	0.0151
8	0.0230	0.0265	0.0334

# Cambridge Colour Test Results

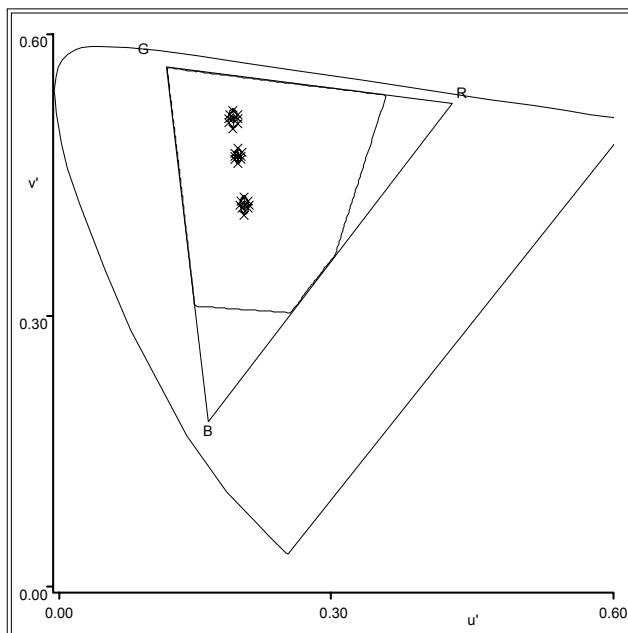
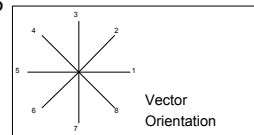
## Subject Details

Name PTF,  
 Gender Male  
 Date of Birth 22/2/1961  
 Test Date 31-07-2009 20:13:50

## Test Type

Ellipse  
 Field Point 1 0.198 0.469  
 Field Point 2 0.193 0.509  
 Field Point 3 0.204 0.416

Results	Field 1	Field 2	Field 3
Length	0.0161	0.0203	0.0195
Axis ratio	2.31	1.99	2.29
Angle (deg)	87.7	91.5	94.4



Vector	Field 1	Field 2	Field 3
1	0.0033	0.0051	0.0046
2	0.0054	0.0064	0.0056
3	0.0080	0.0089	0.0093
4	0.0046	0.0058	0.0056
5	0.0029	0.0050	0.0051
6	0.0046	0.0064	0.0042
7	0.0077	0.0115	0.0104
8	0.0049	0.0074	0.0053

# Cambridge Colour Test Results

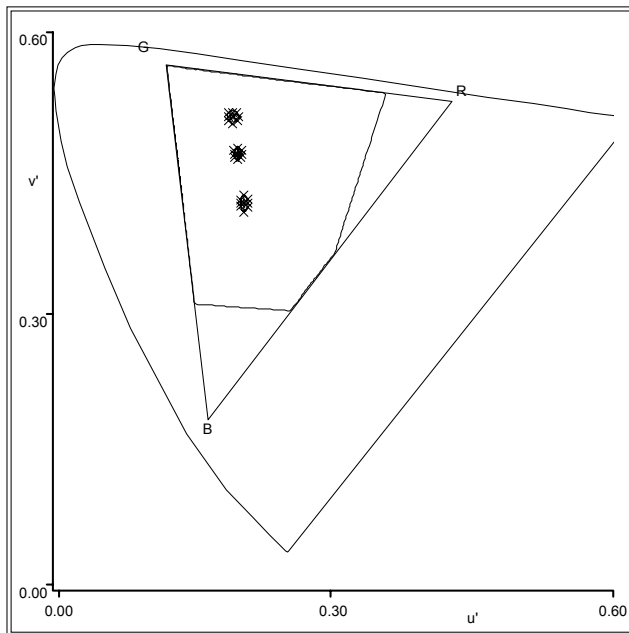
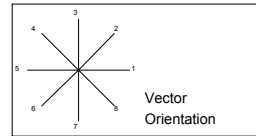
## Subject Details

Name           GMS,  
 Gender         Male  
 Date of Birth   2/12/1985  
 Test Date      31-07-2009 17:44:42

## Test Type        Ellipse

Field Point 1   0.198   0.469  
 Field Point 2   0.193   0.509  
 Field Point 3   0.204   0.416

Results	Field 1	Field 2	Field 3
Length	0.0132	0.0126	0.0177
Axis ratio	1.59	1.10	2.30
Angle (deg)	88.3	124.9	90.2



Vector	Field 1	Field 2	Field 3
1	0.0046	0.0062	0.0039
2	0.0053	0.0058	0.0055
3	0.0066	0.0046	0.0083
4	0.0059	0.0062	0.0046
5	0.0033	0.0051	0.0036
6	0.0053	0.0062	0.0046
7	0.0062	0.0074	0.0093
8	0.0045	0.0069	0.0056

# Cambridge Colour Test Results

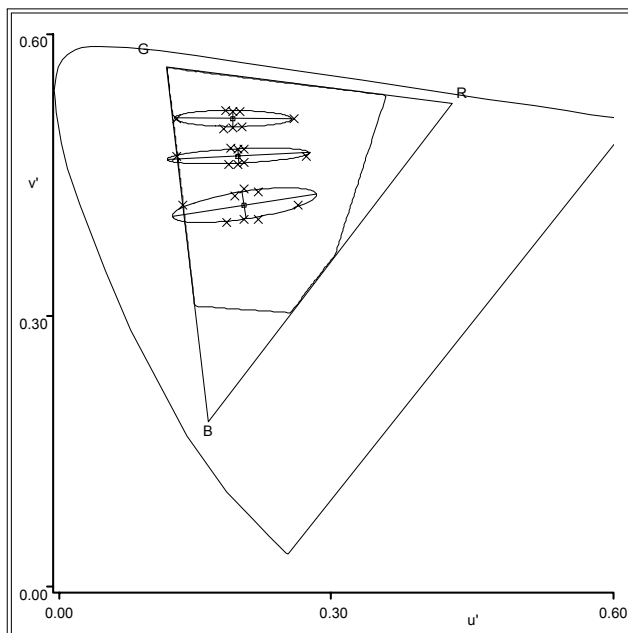
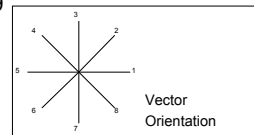
## Subject Details

Name TVC,  
 Gender Male  
 Date of Birth 23/6/1988  
 Test Date 31-07-2009 18:41:26

## Test Type

Ellipse  
 Field Point 1 0.198 0.469  
 Field Point 2 0.193 0.509  
 Field Point 3 0.204 0.416

Results	Field 1	Field 2	Field 3
Length	0.1522	0.1257	0.1559
Axis ratio	9.84	7.30	5.29
Angle (deg)	2.7	179.6	8.6



Vector	Field 1	Field 2	Field 3
1	0.0734	0.0650	0.0578
2	0.0095	0.0097	0.0209
3	0.0069	0.0074	0.0173
4	0.0116	0.0115	0.0141
5	0.0655	0.0605	0.0660
6	0.0137	0.0152	0.0261
7	0.0088	0.0096	0.0150
8	0.0093	0.0132	0.0210



## Apêndice C

---

# Protocolo para o Observador

---

### Experiência Psicofísica de Ajuste de Cor

Ao observador será apresentado um cenário tridimensional que é composto por um conjunto de degraus de cor neutra, onde estão colocados de forma simétrica três cubos. Os dois cubos extremos terão, ao longo da experiência a realizar, uma cor igual enquanto que o cubo central terá uma cor variável.

Pretende-se nesta experiência psicofísica que o observador olhe para o cenário tridimensional e responda, na modalidade SIM/NÃO, se a cor do cubo central é ou não igual à cor dos cubos laterais.

- A cor do cubo central varia no tempo e essa variação de cor é acompanhada por um sinal sonoro (beep).
- Existe um tempo para que observador dê a sua resposta; uma não resposta implica uma nova alteração de cor.
- As respostas SIM e NÃO serão accionadas através de dois botões de pressão instalados num joystick.
- Ao botão (vermelho) colocado no lado esquerdo do joystick está associado à resposta NÃO, e ao botão (verde) colocado no lado direito está associado à resposta SIM.
- A duração da experiência irá depender da destreza do observador ao dar as suas respostas.

Em qualquer altura no decorrer da experiência o observador pode e deve, se sentir algum sinal de cansaço visual, sair do lugar de realização da experiência, interrompendo as respostas, retomando o seu lugar após uma pequena pausa para repouso.



## Apêndice D

# Calibração, Medição e Verificação

### D.1 Iluminantes de Teste

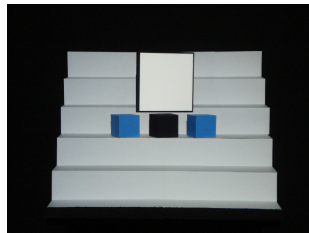


Figura D.1: Posicionamento da superfície de  $BaSO_4$  no cenário para calibração dos iluminantes

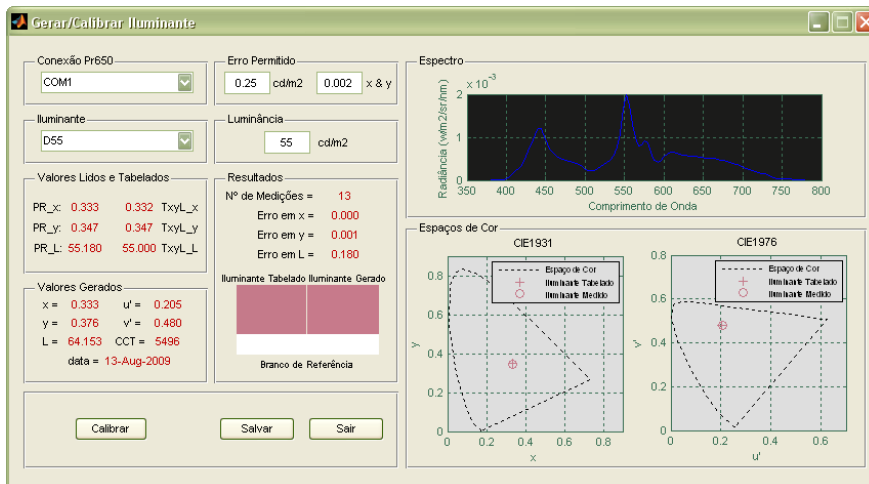


Figura D.2: Exemplo da aplicação para calibração do Iluminante

## D.2 Cores de Teste

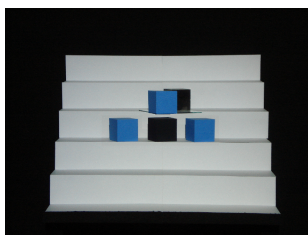


Figura D.3: Exemplo do posicionamento de um papel colorido no cenário para calibração

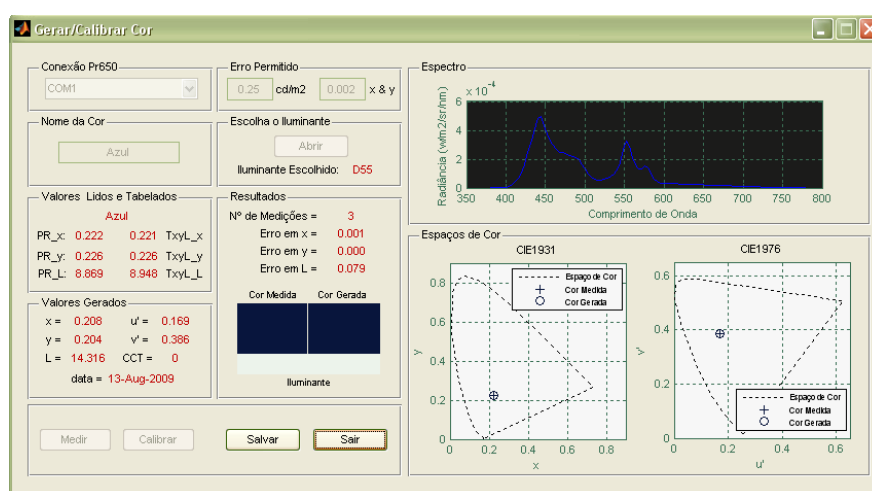


Figura D.4: Exemplo da aplicação para calibração de uma cor de teste

### D.3 Matrizes de Teste

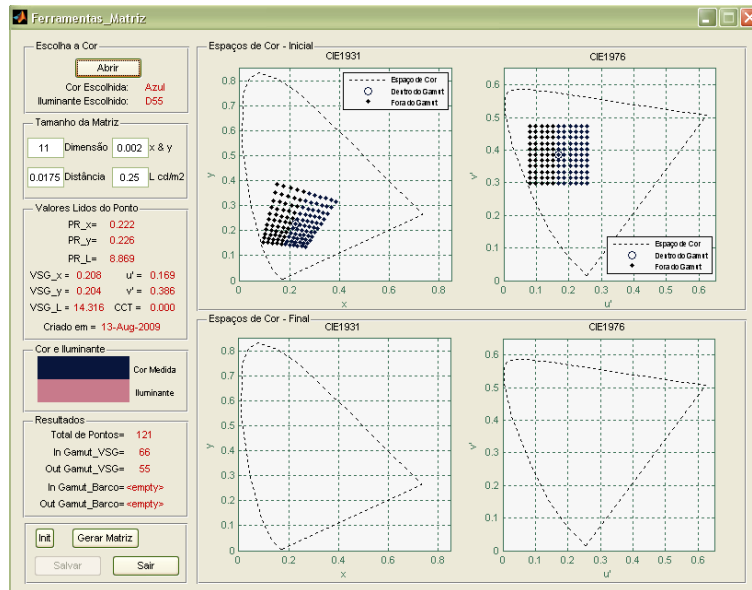


Figura D.5: Exemplo da aplicação para geração da matriz  $M1_{(11 \times 11)}$  da cor azul sob influência do iluminante D55

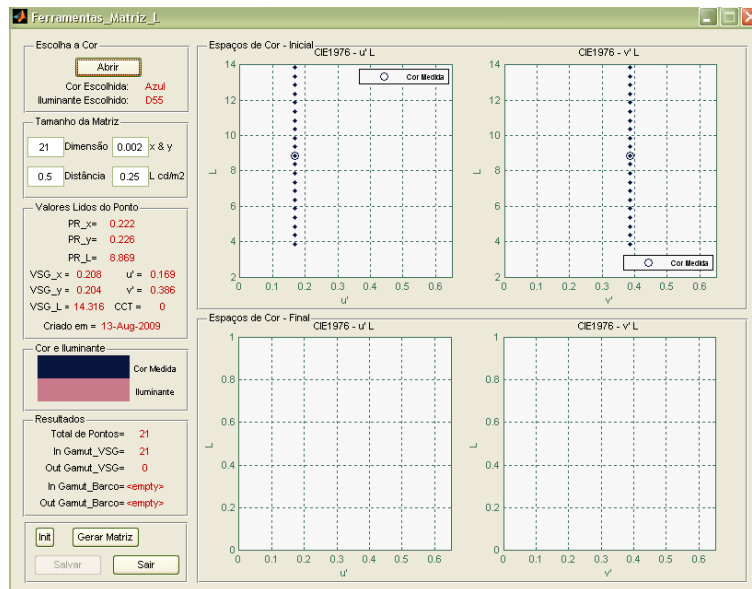


Figura D.6: Exemplo da aplicação para geração da matriz  $M2_{(1 \times 21)}$  da cor azul sob influência do iluminante D55

## D.4 Experiência nº 1 - Variação $u'v'$

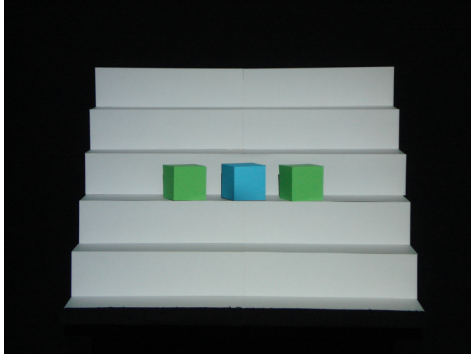


Figura D.7: Experiência nº 1 à cor verde sob o iluminante D55

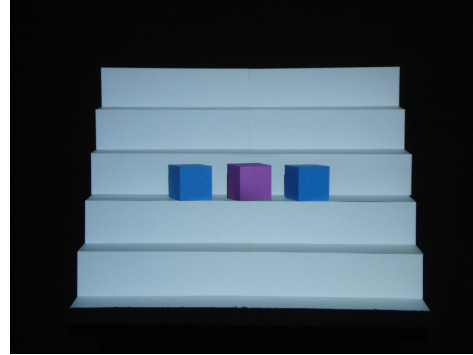


Figura D.8: Experiência nº 1 à cor azul sob o iluminante D75

### Exemplo Experiência nº 1

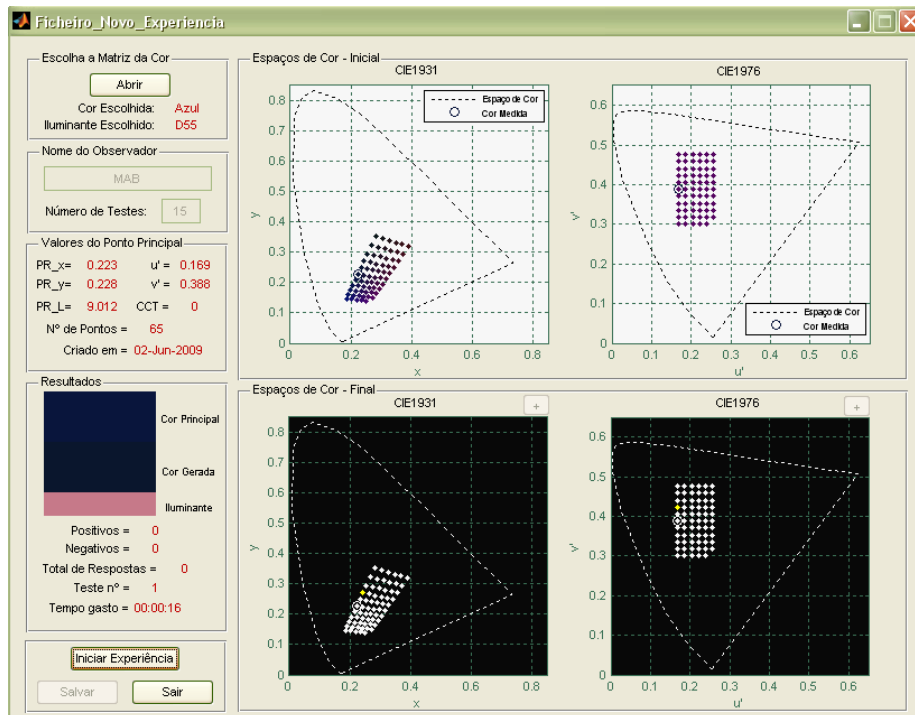


Figura D.9: Exemplo da aplicação para a execução da experiência nº1 da cor azul sob o iluminante D55

## D.5 Experiência nº 2 - Variação L

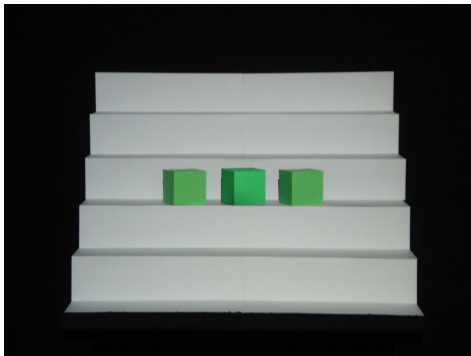


Figura D.10: Experiência nº 2 à cor verde sob o iluminante D55

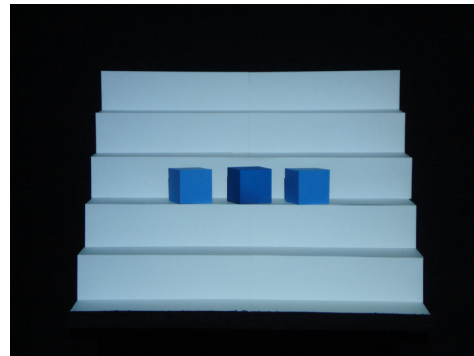


Figura D.11: Experiência nº 2 à cor azul sob o iluminante D75

### Exemplo Experiência nº 2

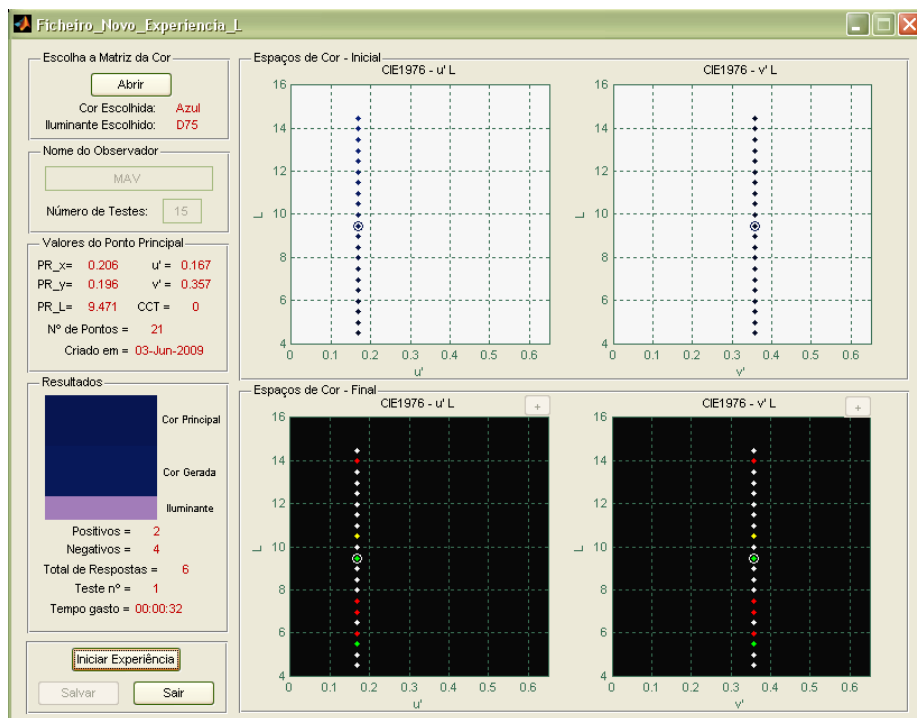


Figura D.12: Exemplo da aplicação para a execução da experiência nº2 da cor azul sob o iluminante D55



## **Apêndice E**

---

# **Resultados - Experiência nº 1**

---

## E.1 Cor de Teste - Vermelho

### E.1.1 Iluminante de Teste - D55

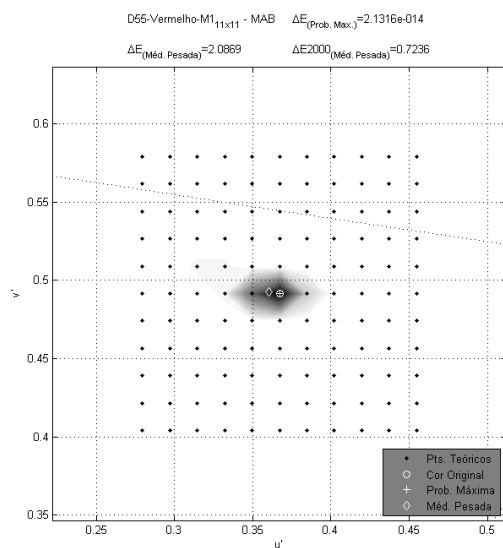


Figura E.1: MAB-Vermelho-D55

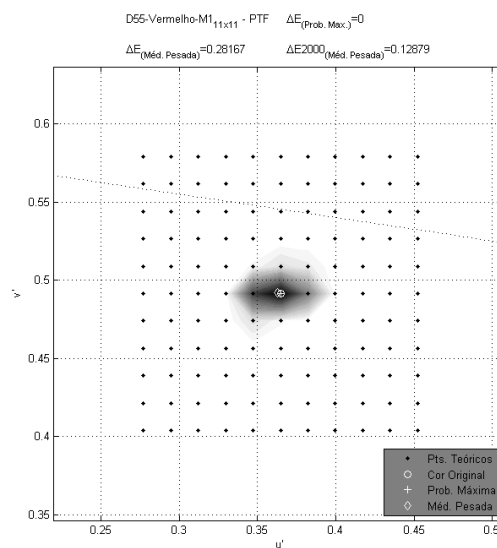


Figura E.2: PTF-Vermelho-D55

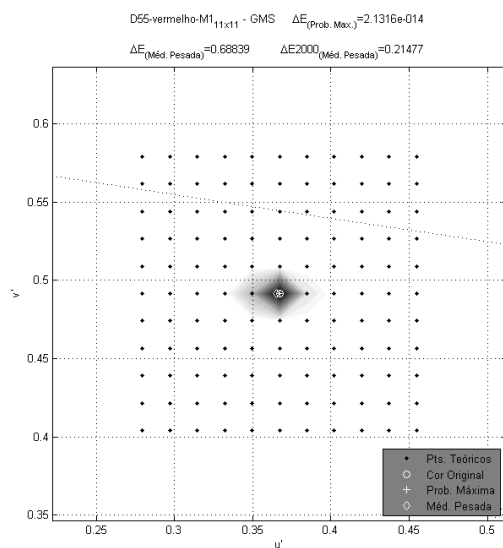


Figura E.3: GMS-Vermelho-D55

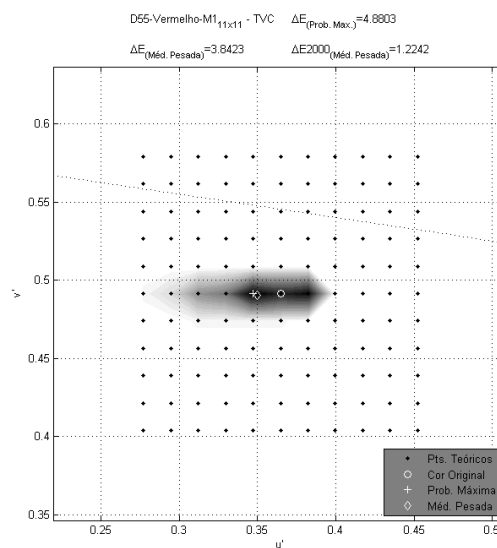


Figura E.4: TVC-Vermelho-D55

E.1.2 Iluminante de Teste - D75

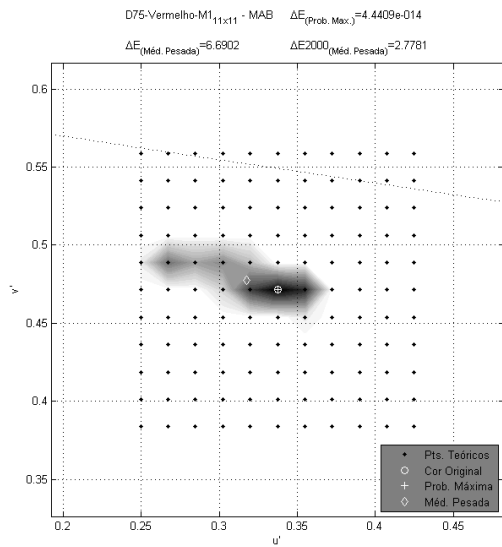


Figura E.5: MAB-VermeHo-D75

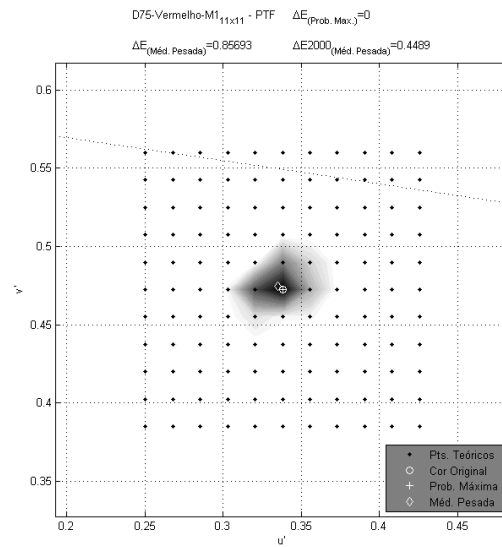


Figura E.6: PTF-VermeHo-D75

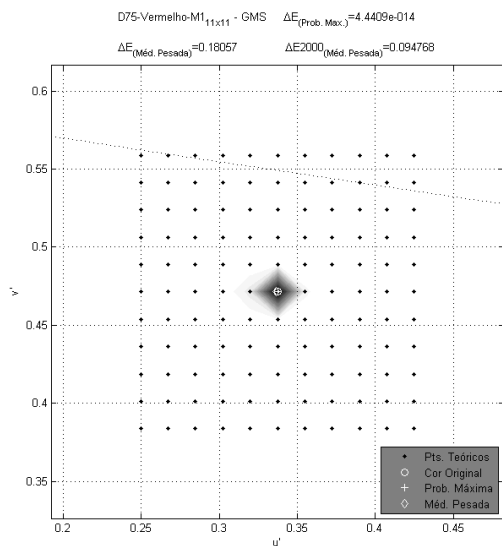


Figura E.7: GMS-VermeHo-D75

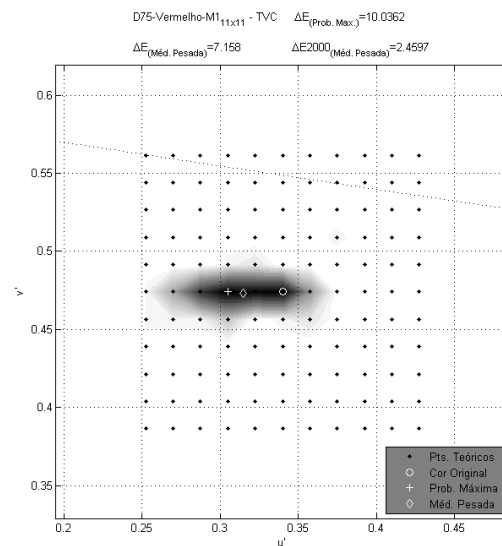


Figura E.8: TVC-VermeHo-D75

## E.2 Cor de Teste - Verde

### E.2.1 Iluminante de Teste - D55

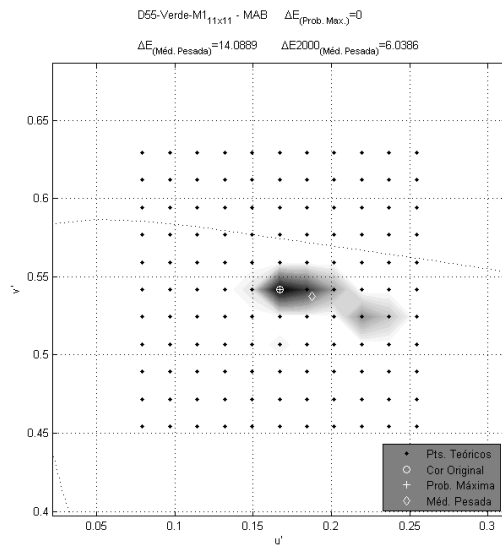


Figura E.9: MAB-Verde-D55

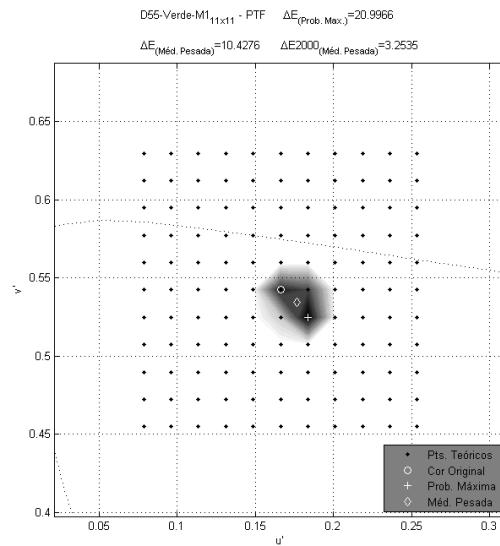


Figura E.10: PTF-Verde-D55

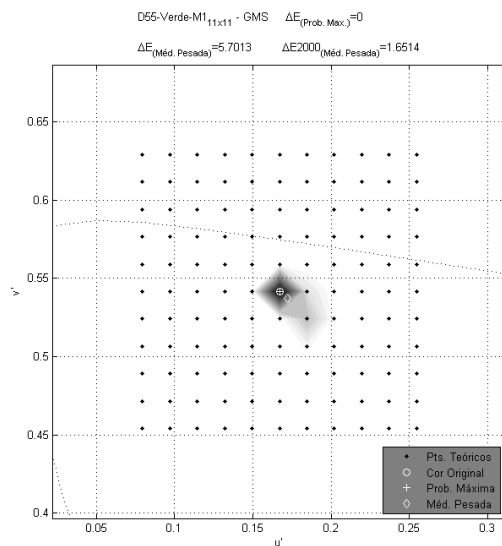


Figura E.11: GMS-Verde-D55

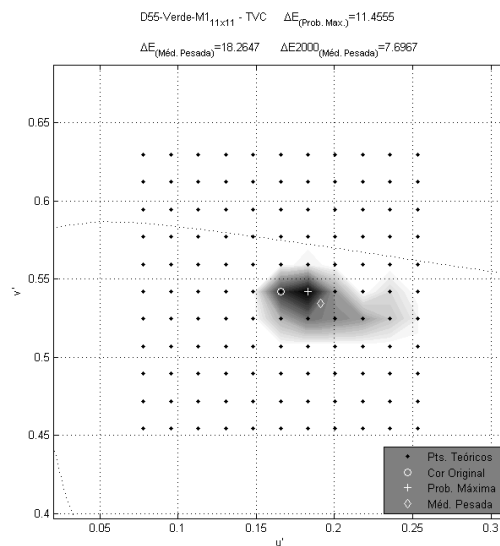


Figura E.12: TVC-Verde-D55

E.2.2 Iluminante de Teste - D75

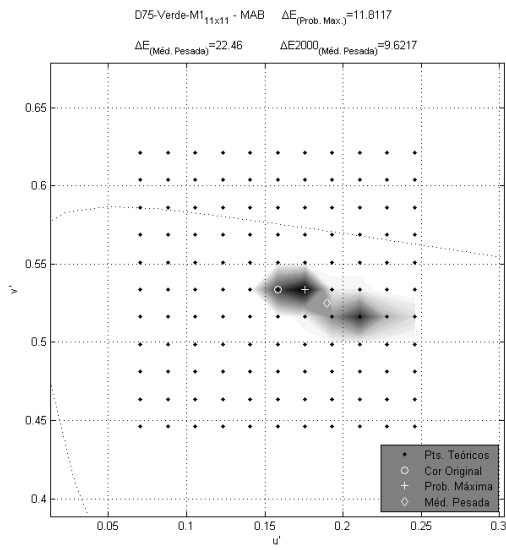


Figura E.13: MAB-Verde-D75

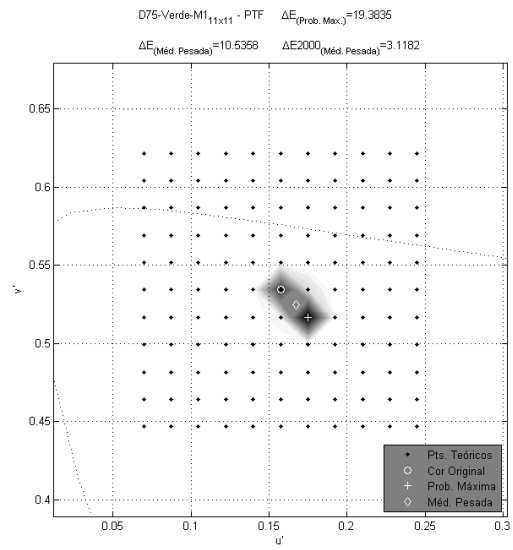


Figura E.14: PTF-Verde-D75

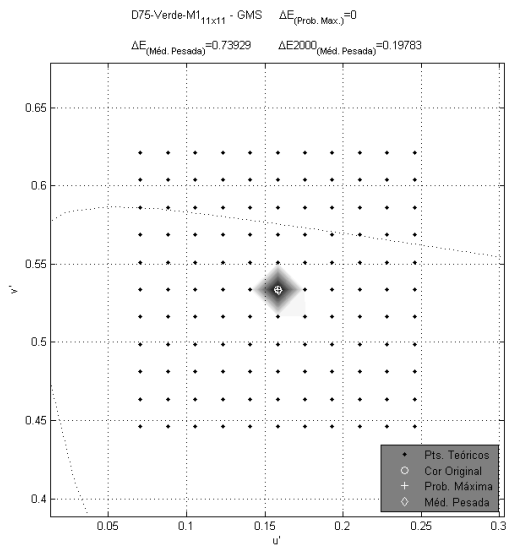


Figura E.15: GMS-Verde-D75

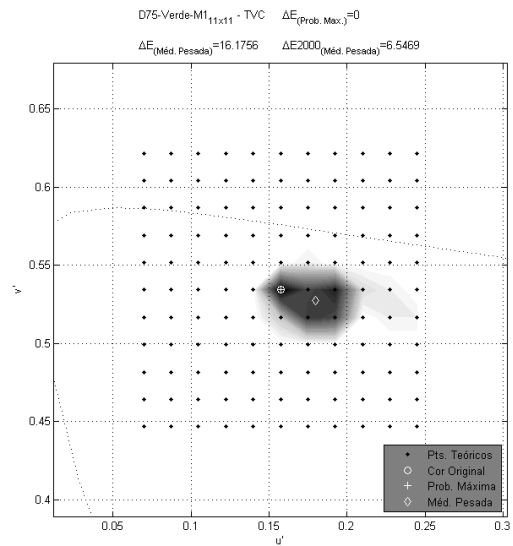


Figura E.16: TVC-Verde-D75

## E.3 Cor de Teste - Azul

### E.3.1 Iluminante de Teste - D55

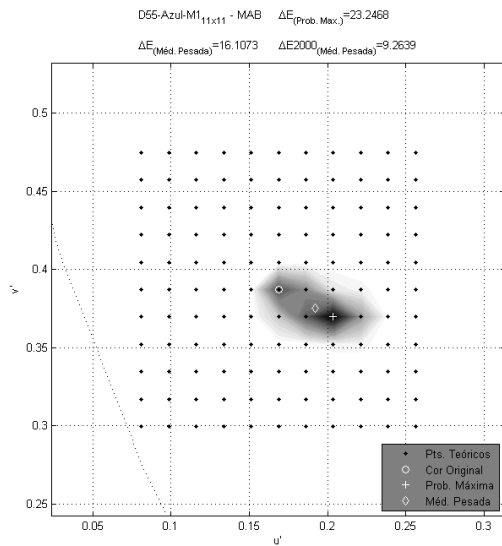


Figura E.17: MAB-Azul-D55

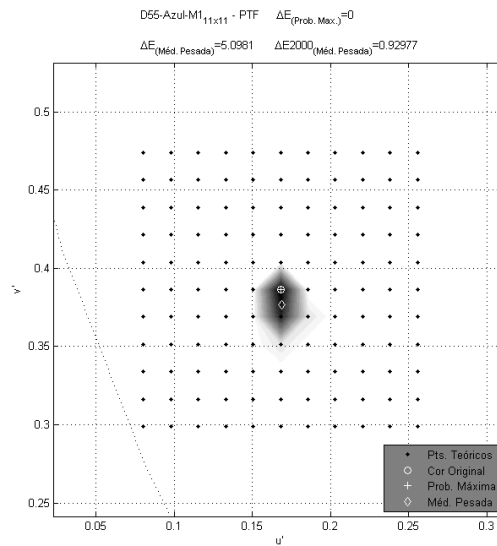


Figura E.18: PTF-Azul-D55

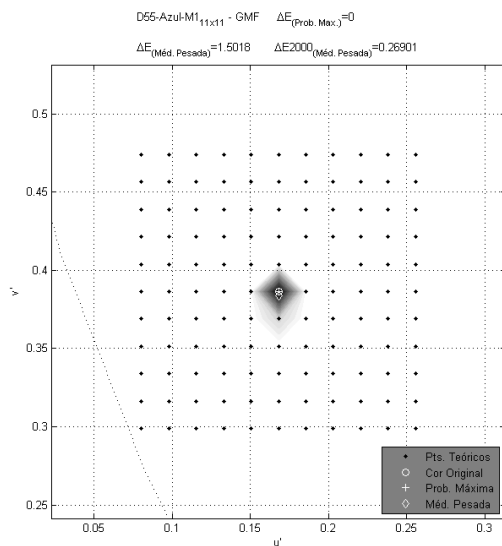


Figura E.19: GMS-Azul-D55

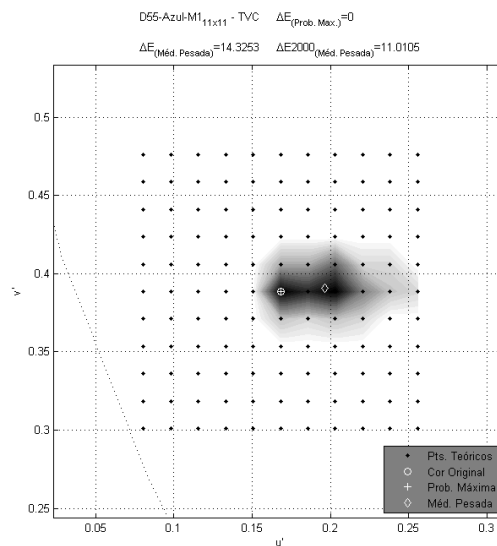


Figura E.20: TVC-Azul-D55

E.3.2 Iluminante de Teste - D75

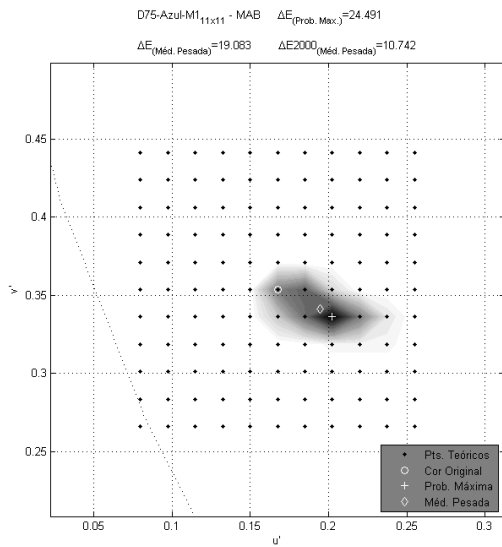


Figura E.21: MAB-Azul-D75

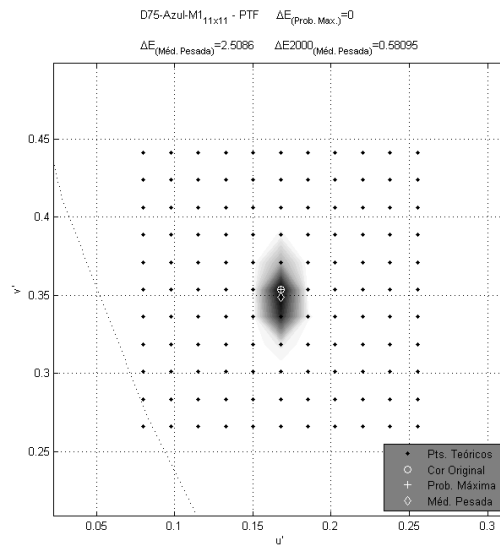


Figura E.22: PTF-Azul-D75

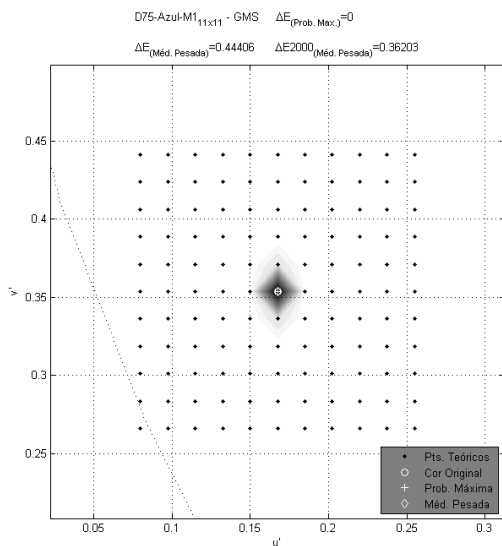


Figura E.23: GMS-Azul-D75

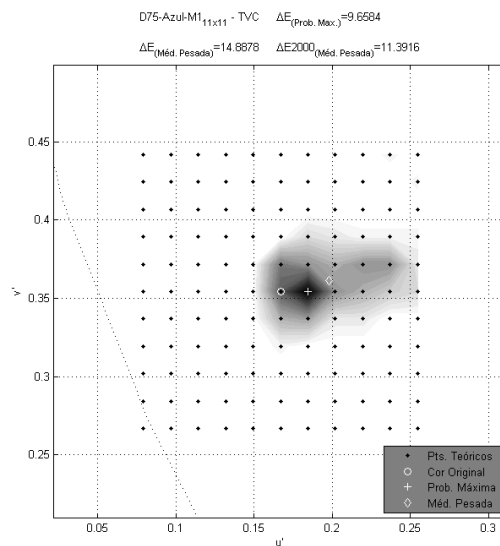


Figura E.24: TVC-Azul-D75



## **Apêndice F**

---

# **Resultados - Experiência nº 2**

---

## F.1 Cor de Teste - Vermelho

### F.1.1 Iluminante de Teste - D55

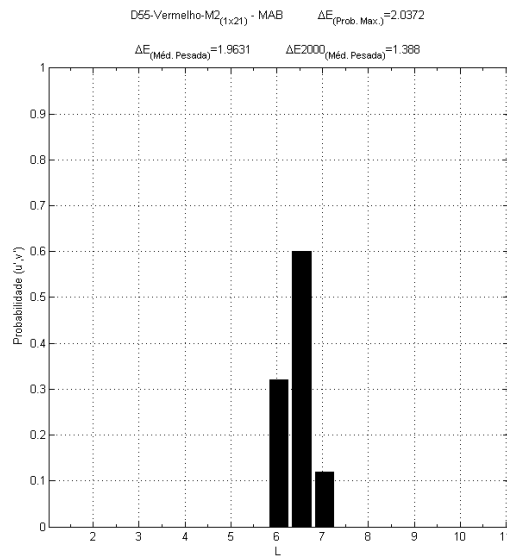


Figura F.1: MAB-Vermelho-D55

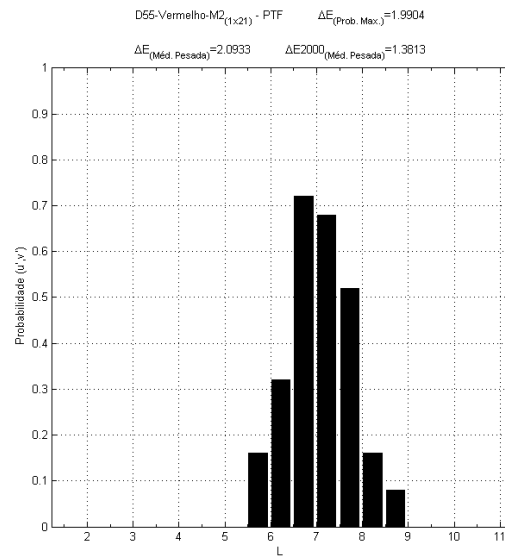


Figura F.2: PTF-Vermelho-D55

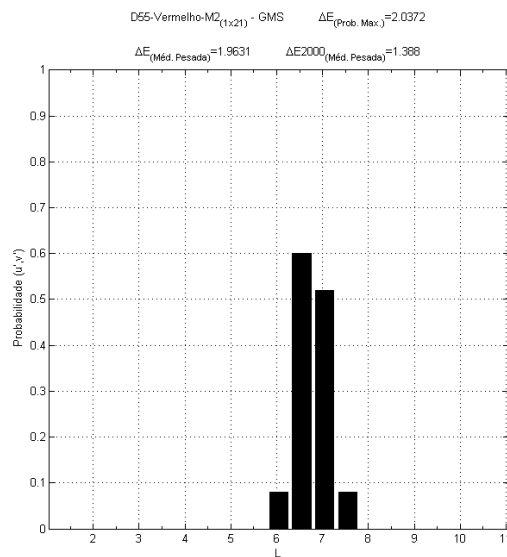


Figura F.3: GMS-Vermelho-D55

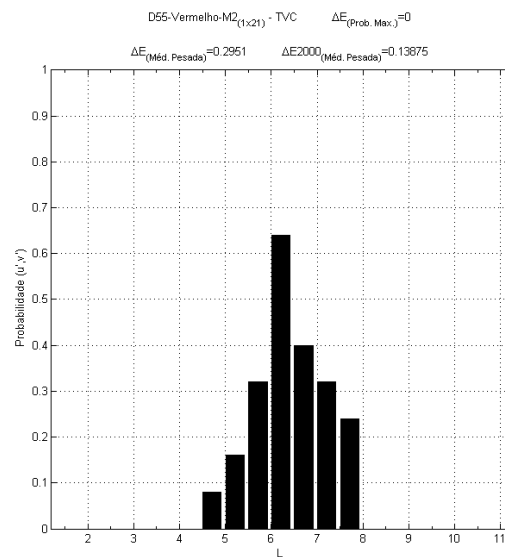


Figura F.4: TVC-Vermelho-D55

F.1.2 Iluminante de Teste - D75

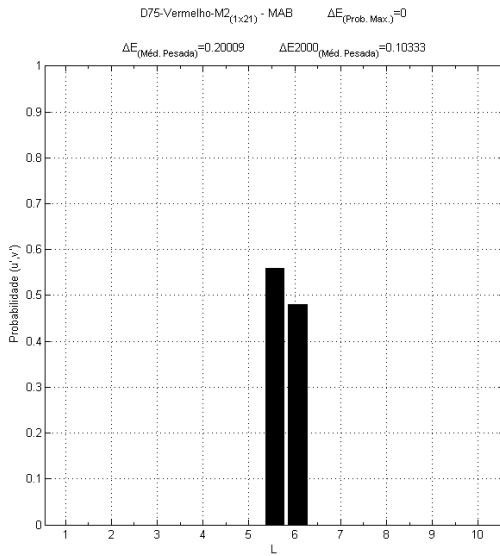


Figura F.5: MAB-VermeHo-D75

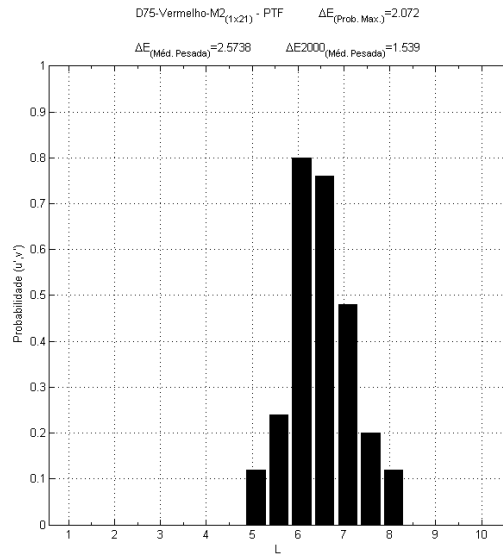


Figura F.6: PTF-VermeHo-D75

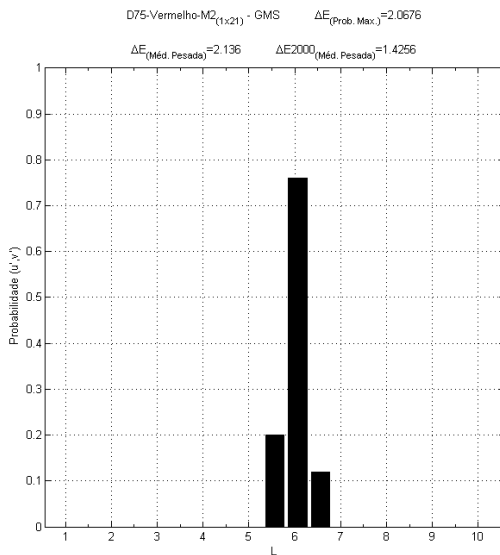


Figura F.7: GMS-VermeHo-D75

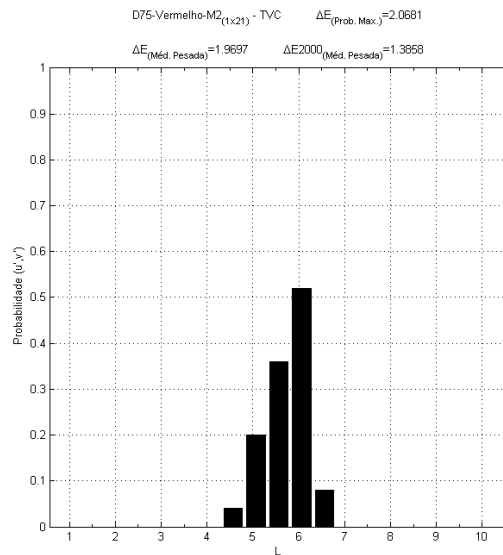


Figura F.8: TVC-VermeHo-D75

## F.2 Cor de Teste - Verde

### F.2.1 Iluminante de Teste - D55

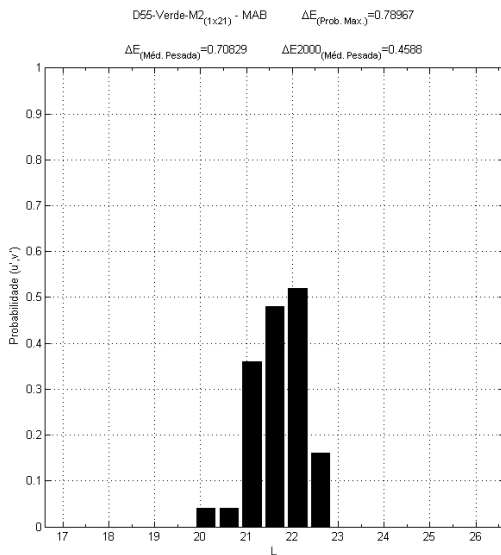


Figura F.9: MAB-Verde-D55

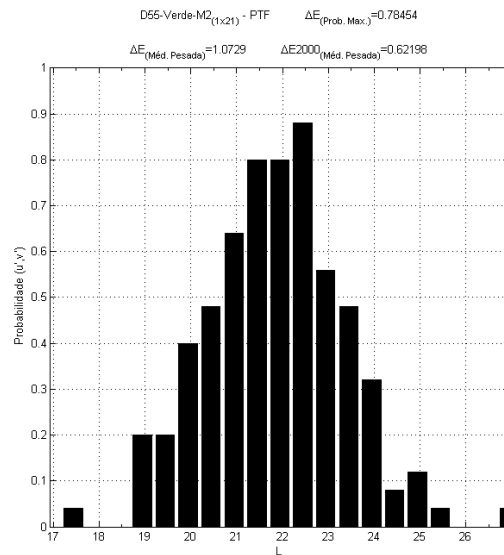


Figura F.10: PTF-Verde-D55

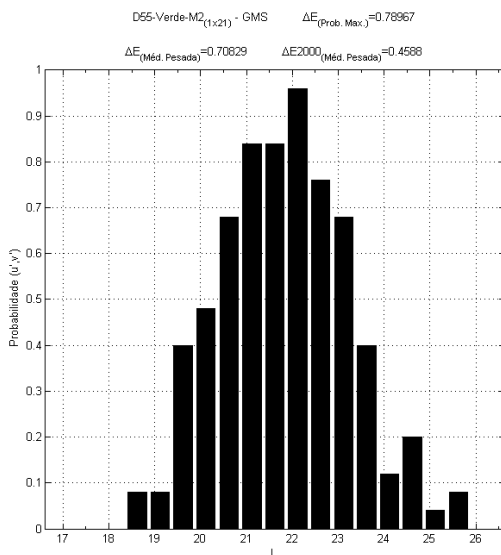


Figura F.11: GMS-Verde-D55

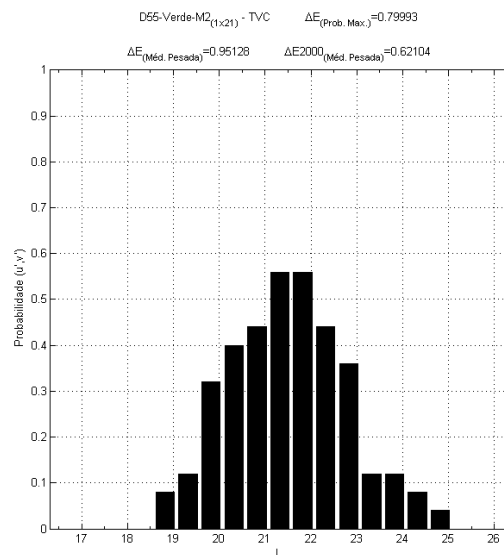


Figura F.12: TVC-Verde-D55

F.2.2 Iluminante de Teste - D75

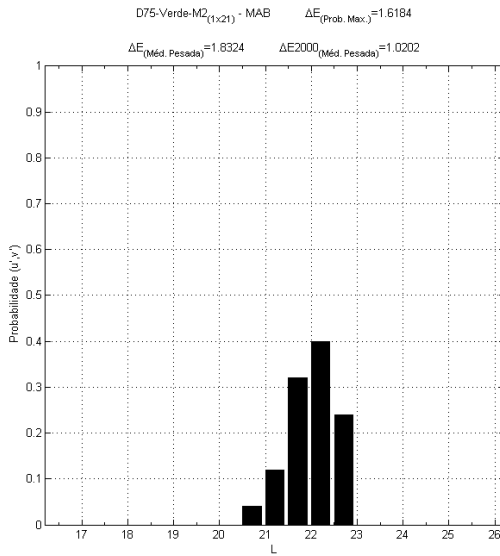


Figura F.13: MAB-Verde-D75

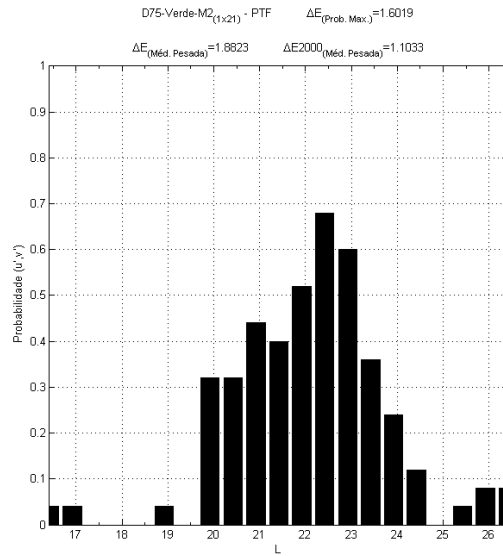


Figura F.14: PTF-Verde-D75

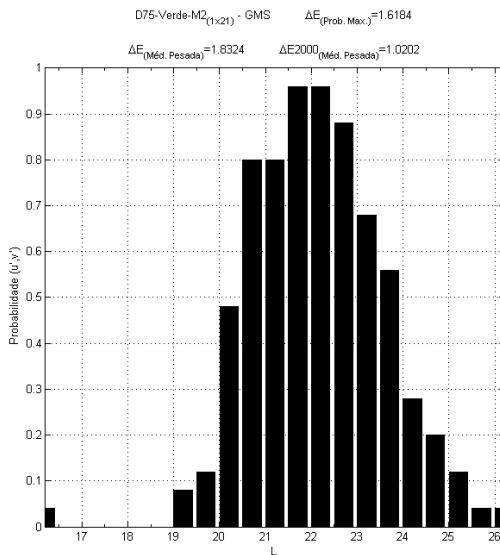


Figura F.15: GMS-Verde-D75

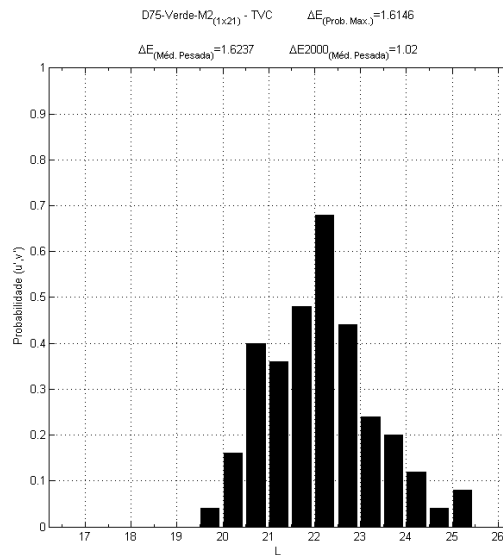


Figura F.16: TVC-Verde-D75

### F.3 Cor de Teste - Azul

#### F.3.1 Iluminante de Teste - D55

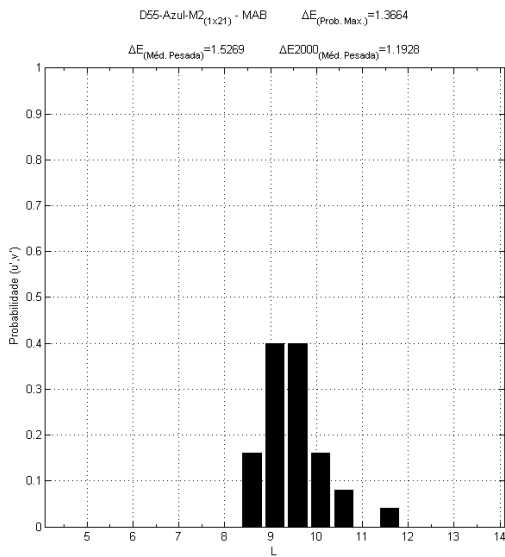


Figura F.17: MAB-Azul-D55

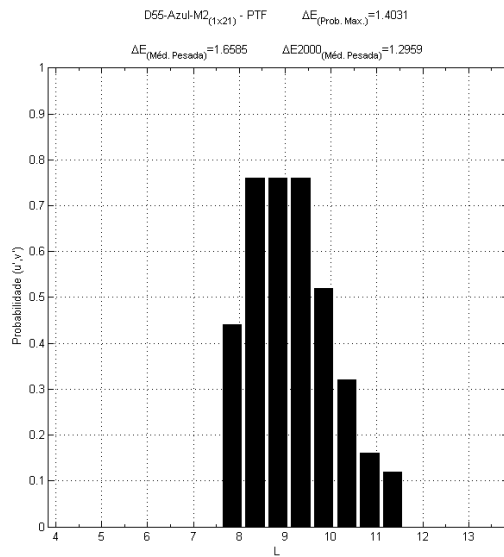


Figura F.18: PTF-Azul-D55

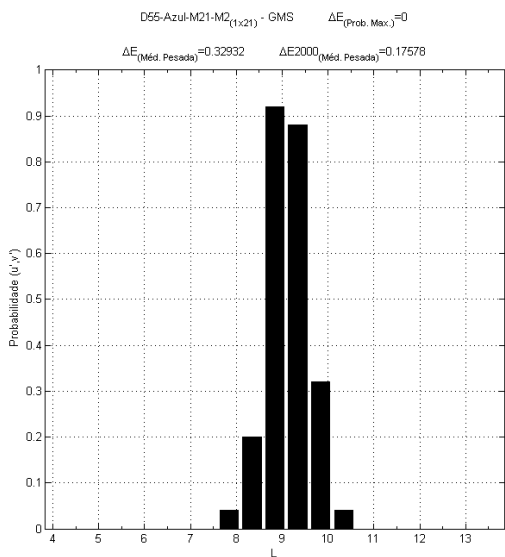


Figura F.19: GMS-Azul-D55

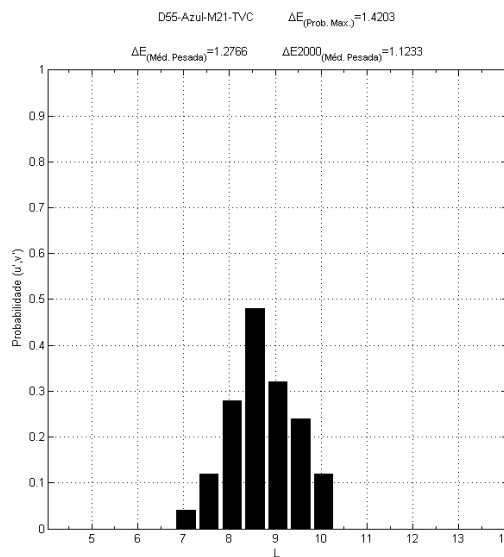


Figura F.20: TVC-Azul-D55

F.3.2 Iluminante de Teste - D75

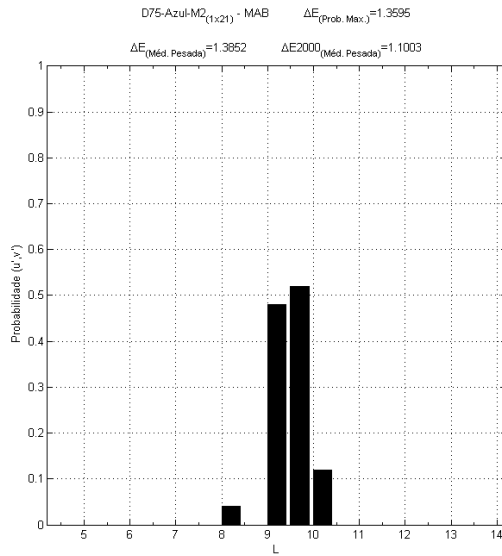


Figura F.21: MAB-Azul-D75

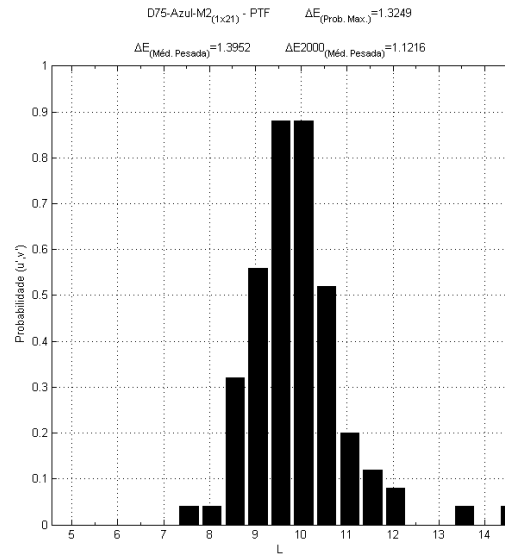


Figura F.22: PTF-Azul-D75

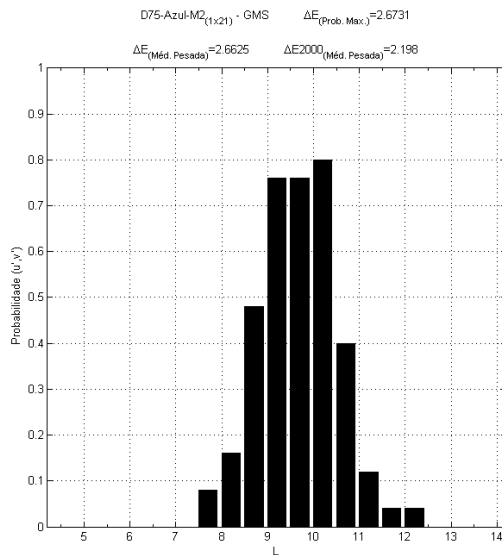


Figura F.23: GMS-Azul-D75

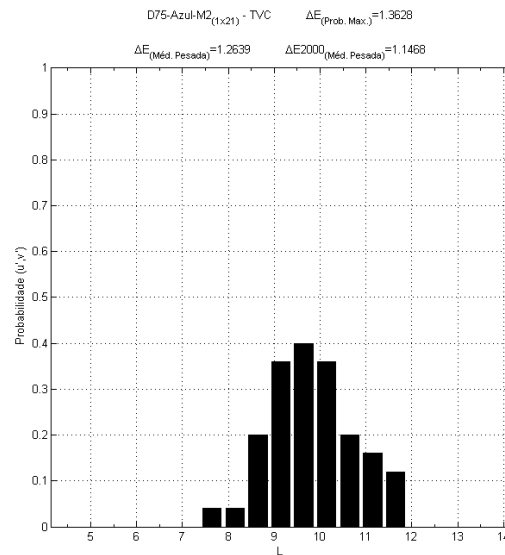


Figura F.24: TVC-Azul-D75