

**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

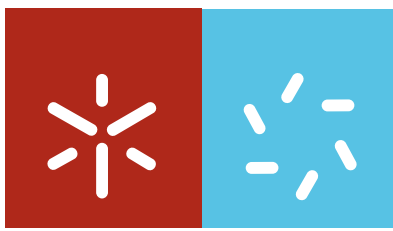
Paulo Daniel Araújo Pinto

## **Colorimetria Hiperespectral de Pinturas Artísticas**

Paulo Daniel Araújo Pinto **Colorimetria Hiperespectral de Pinturas Artísticas**

UMinho | 2010

Agosto de 2010



**Universidade do Minho**

Escola de Ciências

Paulo Daniel Araújo Pinto

## **Colorimetria Hiperespectral de Pinturas Artísticas**

Tese de Doutoramento em Ciências  
Área de Conhecimento em Física

Trabalho realizado sob a orientação do  
**Professor Doutor Sérgio Nascimento**

Agosto de 2010

## DECLARAÇÃO

Nome: Paulo Daniel Araújo Pinto

Endereço electrónico: [pdapinto@gmail.com](mailto:pdapinto@gmail.com) Telefone: 934258244

Número do Bilhete de Identidade: 11240357

Título da tese: **Colorimetria Hiperespectral de Pinturas Artísticas**

Orientador: Professor Doutor Sérgio Miguel Cardoso Nascimento

Ano de conclusão: 2010

**Doutoramento em Ciências, Ramo de Conhecimento em Física**

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

Universidade do Minho, 4 de Agosto de 2010

Assinatura: \_\_\_\_\_

*Uma dedicatória especial a várias pessoas que intervieram neste processo e nesta viagem, sendo esta uma etapa especial na minha formação pessoal e profissional. A ti Fátima, minha esposa e aos meus filhos pela paciência e apoio, aos meus pais pela visão, investimento e confiança e de uma forma especial a todas as pessoas que marcaram uma nova fase da minha vida; Carlos, António, Gois, Alexandra, Ricardo, Isabel, Ana, Eugénia, Inês, Gianluca Gallinotti, Pedro António, Javier e Marta e de uma forma geral a toda a equipa CIBA VISION Ibéria pelo acolhimento, pelo apoio e pela disponibilidade. Não poderia terminar sem deixar também um agradecimento especial ao meu orientador Sérgio Nascimento, pois ao longo de alguns anos contribuiu de forma determinante para o meu desenvolvimento pessoal e profissional sempre com rigor e profissionalismo.*



## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador científico, Professor Sérgio Nascimento, pelo apoio e incentivo que me deu e pelos conhecimentos que me transmitiu durante todos estes anos.

Aos meus colegas de trabalho, em especial ao colega João Linhares, que durante todos estes anos me têm ajudado e incentivado nos momentos mais difíceis.

À FCT pelo apoio financeiro através da Bolsa de Doutoramento SFRH BD 49112 2008.



## RESUMO

Os museus e galerias de arte recorrem a uma grande variedade de fontes de luz para iluminação de pinturas artísticas. A preocupação principal dos responsáveis na escolha das fontes de luz neste contexto é a prevenção dos danos provocados pela radiação nas obras de arte. No entanto, a impressão visual de uma pintura artística é fortemente influenciada pela intensidade e perfil espectral do iluminante. Consequentemente, este é também um aspecto importante a considerar na selecção da iluminação mais adequada. Apesar da óbvia importância dos aspectos visuais não existe neste momento uma metodologia segura de avaliação da qualidade global de reprodução cromática de uma fonte de luz nem estudos sistemáticos da relação entre os efeitos visuais e a distribuição espectral da iluminação. Esta relação, entre o perfil espectral da fonte de luz e a aparência visual dos cenários iluminados, assume particular relevância no desenvolvimento de novas fontes de luz, que podem hoje ter um espectro quase arbitrário, como, por exemplo, nas novas fontes de luz baseadas em LEDs. Os objectivos gerais deste trabalho foram determinar de forma empírica, através de experiências psicofísicas, o perfil espectral da iluminação preferida por observadores para apreciar pinturas artísticas e estudar, de forma sistemática, a relação entre perfil espectral e os efeitos cromáticos da fonte de luz em pinturas. A parte experimental e a parte computacional do trabalho basearam-se na análise dos espectros de reflectância de um conjunto de pinturas obtidos com um sistema de imagiografia hiperespectral parcialmente desenvolvido no âmbito do trabalho desta tese. Das experiências psicofísicas foi concluído que os observadores preferem uma luz do dia com uma temperatura correlacionada de cor de cerca de 5000 K e que essa preferência pode ser, em parte, determinada pela diversidade cromática percebida nas pinturas. Da análise computacional foi concluído que a diversidade cromática máxima não é obtida com espectros de iluminação com variações suaves mas sim com espectros muito estruturados e com um número de bandas espectrais reduzido e localizadas em zonas específicas do espectro visível. Além disso, à máxima diversidade cromática correspondem valores baixos do índice de reprodução cromático, sugerindo que cores naturais e boa discriminação de cores são, de alguma forma, incompatíveis. Estes resultados no seu conjunto põem em causas algumas práticas correntes em iluminação de pinturas artísticas e constituem um avanço significativo no conhecimento sobre os efeitos visuais da iluminação.





## ABSTRACT

The museums and art galleries use a large variety of light sources for lighting art paintings. The main concern of the curators when selecting a light source is the prevention of damage caused by light irradiation. However, the impression of an artistic painting is strongly influenced by the intensity and spectral profile of the illumination, and this is also an important issue to consider. Although the visual aspects are of obvious importance there is still no firm methodology to assess the global colour quality of lighting or systematic studies of the relationships between the visual effects and the spectral profile of the illumination. The relationship between illuminant spectral structure and visual appearance assumes particular relevance with the advent of light sources with almost arbitrary spectral distribution, like modern LED based lighting. The general goals of this work were to determine psychophysically the spectral profile of the illumination preferred by observers when seeing artistic paintings and to study systematically the relationships between spectral profile of the illumination and its chromatic effects on paintings. The experimental and the computational parts of this work were based on the analysis of the reflectance spectra of a set of paintings obtained with a spectral imaging system partly developed in the context of the work of this thesis. From the psychophysical experiments it was concluded that observers prefer daylight with a correlated colour temperature of about 5000 K and that the chromatic diversity perceived may influence the preference for a specific illuminant. From the computational analysis it was concluded that the maximum chromatic diversity is not obtained with smooth spectral variations but with spectrally structure spectra and with a small number of spectral bands located in specific regions of the visible spectrum. In addition, when the maximum chromatic diversity is obtained the colour rendering index is low suggesting that natural colours and large discrimination are incompatible. These results challenge some of the current practices in illumination of artistic paintings and represent a considerable advancement on the knowledge about the visual effects of illumination.



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO.....	V
ABSTRACT .....	VII
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE FIGURAS .....	XV
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1 Objectivos e estrutura da tese.....	21
1.2 Sistema visual humano.....	22
1.3 Colorimetria .....	25
1.4 Imagiografia hiperespectral.....	39
1.5 Número de cores.....	40
1.6 Iluminação e pinturas artísticas.....	42
<b>2 MÉTODOS.....</b>	<b>45</b>
2.1 Sistema de imagiografia hiperespectral.....	45
2.1.1 <i>Sistema de Imagiografia Hiperespectral I.....</i>	<i>45</i>
2.1.2 <i>Sistema de Imagiografia Hiperespectral II.....</i>	<i>47</i>
2.1.3 <i>Aquisição das imagens hiperespectrais .....</i>	<i>49</i>
2.2 Sistema de apresentação das imagens.....	50
2.3 Base de dados das pinturas.....	51
<b>3 DETERMINAÇÃO PSICOFÍSICA DA MELHOR ILUMINAÇÃO PARA APRECIAR PINTURAS ARTÍSTICAS.....</b>	<b>53</b>
3.1 Introdução.....	53
3.2 Métodos.....	54
3.2.1 <i>Imagiografia hiperespectral.....</i>	<i>54</i>
3.2.2 <i>Diversidade cromática.....</i>	<i>55</i>
3.2.3 <i>Estímulos e procedimento.....</i>	<i>56</i>
3.2.4 <i>Observadores.....</i>	<i>58</i>

3.3	Resultados .....	58
3.4	Discussão.....	61
<b>4</b>	<b>TEMPERATURA CORRELACIONADA DE COR DA ILUMINAÇÃO PREFERIDA POR OBSERVADORES NA APRECIÇÃO DE PINTURAS ARTÍSTICAS.....</b>	<b>65</b>
4.1	Introdução.....	65
4.2	Métodos.....	65
4.2.1	<i>Dados hiperespectrais .....</i>	<i>65</i>
4.2.2	<i>Estímulos.....</i>	<i>67</i>
4.2.3	<i>Procedimento.....</i>	<i>69</i>
4.2.4	<i>Instruções.....</i>	<i>70</i>
4.2.5	<i>Observadores.....</i>	<i>70</i>
4.3	Resultados .....	71
4.4	Discussão.....	74
<b>5</b>	<b>OPTIMIZAÇÃO ESPECTRAL DA ILUMINAÇÃO DE PINTURAS ARTÍSTICAS .....</b>	<b>79</b>
5.1	Introdução.....	79
5.2	Métodos.....	80
5.3	Resultados .....	81
5.4	Discussão.....	85
<b>6</b>	<b>EFEITOS CROMÁTICOS DE METÂMEROS DO ILUMINANTE D<sub>65</sub> EM PINTURAS ARTÍSTICAS ..</b>	<b>87</b>
6.1	Introdução.....	87
6.2	Métodos.....	88
6.3	Resultados .....	90
6.4	Discussão.....	94
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>95</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>97</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>105</b>
	Anexo 1 – Lista de publicações e comunicações em encontros científicos no âmbito deste trabalho.....	107

<i>Publicações de artigos em revistas internacionais</i> .....	107
<i>Publicações em actas de encontros científicos</i> .....	107
<i>Comunicações em encontros científicos</i> .....	108
Anexo 2 – Protocolo de Aquisição das Imagens Hiperespectrais .....	109
Anexo 3 – Fichas Originais das Pinturas .....	111



## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 Cor do iluminante expressa no espaço CIE ( $u', v'$ ), TCC e o índice de reprodução da cor geral $R_a$ para cada um dos iluminantes obtidos e para o iluminante médio. Por questões de comparação são apresentados também os mesmos dados para o iluminante $D_{65}$ e para o iluminante de energia constante E. ....	84
--	----





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Diagrama do olho humano. ....	23
Figura 1.2	Esquerda: estrutura da retina apresentada sob a forma de esquema [9]. Direita: estrutura da retina na zona macular obtida através de tomografia de coerência óptica (OCT) [10]. ....	24
Figura 1.3	Curvas de sensibilidade espectral Helmholtz [15]. ....	26
Figura 1.4	Curvas de sensibilidade relativa para os cones L, M e S [16]. ....	26
Figura 1.5	Colorímetro usado por Wright em 1928 para obter as funções de reprodução da cor [19]. ....	29
Figura 1.6	Funções de reprodução da cor $\bar{r}(\lambda)$ , $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$ para o Observador Standard CIE 1931. ....	30
Figura 1.7	Funções de reprodução da cor $\bar{x}(\lambda)$ , $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ para o Observador Standard CIE 1931. ....	31
Figura 1.8	Comparação entre as funções de reprodução de cor para o Observador Standard CIE 1931 e 1964. ....	31
Figura 1.9	Diagrama cromático CIE 1931 $(x, y)$ . O ponto $E$ corresponde ao branco, com coordenadas $x = 0.33$ . $y = 0.33$ . ....	33
Figura 1.10	Diagrama cromático CIE 1931 $(x, y)$ . As linhas representam diferenças de cor iguais [22]. ....	34
Figura 1.11	Diagrama cromático uniforme CIE 1976 $(u', v')$ . As linhas representam diferenças de cor iguais [22]. ....	35
Figura 1.12	Espaço CIE 1976 $(L^*, a^*, b^*)$ . ....	37
Figura 1.13	Representação de uma pintura no diagrama cromático CIELAB. ....	41
Figura 1.14	Esquerda: Segmentação em cubos. Direita: Segmentação em esferas. ....	41
Figura 2.1	Esquerda: Sistema hiperespectral com (1) computador; (2) caixa de controlo da câmara; (3) caixa de controlo do filtro. Direita: componentes ópticos do sistema hiperespectral; (1) Filtro infravermelho, (2) Filtro de cristais líquidos, (3) Lente, (4) Câmara arrefecida. ....	46
Figura 2.2	Aspecto do software de aquisição de imagens hiperespectrais I. ....	46
Figura 2.3	Imagem do sistema hiperespectral II. ....	48

Figura 2.4	Aspecto do software de aquisição de imagens hiperespectrais II. À esquerda está a imagem dada pelo sistema e à direita está a caixa de controlo, onde é possível ver o estado da câmara e do filtro. ....	48
Figura 2.5	Disposição utilizada para a aquisição de imagens hiperespectrais no museu.....	50
Figura 2.6	Imagens das pinturas usadas neste trabalho. ....	52
Figura 3.1	Imagens a cores das cinco pinturas a óleo em madeira datadas da época Renascentista da colecção do Museu Nogueira da Silva, Braga, Portugal.....	54
Figura 3.2	Representação de uma pintura sob os seis iluminantes utilizados.....	55
Figura 3.3	Representação de duas pinturas no diagrama CIELAB.....	55
Figura 3.4	Sequência de apresentação das imagens de cada par no monitor CRT. Em cada ensaio experimental foi apresentado sequencialmente ao observador um par de imagens da mesma pintura, mas sob dois iluminantes diferentes. Para permitir a adaptação cromática ao iluminante, cada imagem de cada par foi apresentada de forma temporalmente linear desde uma luminância de 1 cd/m <sup>2</sup> até 8 cd/m <sup>2</sup> demorando este processo um total de 5 segundos e permanecendo no ecrã a imagem com a luminância máxima durante 3 segundos. Entre a apresentação de cada par e de cada ensaio o ecrã ficava escuro. A cada observador foi pedido que indicasse, em cada ensaio, a imagem que preferiam de cada par.....	57
Figura 3.5	Número de cores discerníveis absoluto (a) e relativo (b) para cada uma das pinturas em função do iluminante sob o qual as pinturas foram reproduzidas.....	59
Figura 3.6	Percentagem de ensaios em que os observadores seleccionaram a imagem com maior número de cores em função do par de iluminantes (a) e em função da diferença relativa do número de cores (b). Os dados representados são a média dos cinco observadores e as barras de erro representam o valor positivo do SEM.....	60
Figura 4.1	Imagens a cores das 11 pinturas a óleo usadas neste trabalho. Estas pinturas constam da colecção do Museu Nogueira da Silva em Braga. A amostra é constituída por 11 pinturas a óleo, 7 da época da Renascença pintadas em madeira (A-E, H e I) e 4 (F, G, J e K) do século XX pintadas em tela. Duas das mais recentes pinturas (J e K) são de Henrique Medina, uma (F) de Carlos Reis e outra (G) de Veloso Salgado, todos pintores Portugueses.....	66

Figura 4.2	Esquerda: espectro normalizado do iluminante luz do dia para três TCC: 3600 K, 6500 K ( $D_{65}$ ) e 25000 K. Direita: <i>locus</i> das cromaticidades dos iluminantes da luz do dia usados neste trabalho representado no diagrama cromático CIE ( $x, y$ ).....	68
Figura 4.3	Percentagem de pixels fora do <i>gamut</i> (linha) e o erro cromático médio (linha tracejada) $\Delta E_{ab}$ no espaço CIELAB resultante da aproximação efectuada para duas pinturas diferentes H (esquerda) e K (direita). Todos os valores estão apresentados em função da coordenada CIE $x_0$ do iluminante. ....	69
Figura 4.4	Respostas dos observadores (círculos) para duas das onze pinturas, H à esquerda e K à direita, representadas pela frequência do iluminante seleccionado em função da coordenada CIE $x_0$ do iluminante. Os dados da figura, baseados em 40 observadores estudantes de licenciatura e em três ensaios por observador, foram obtidos com as pinturas sobre um fundo cinzento. As linhas representam ajustes Gaussianos aos dados e a TCC apresentada em cada um dos casos corresponde ao máximo de cada ajuste.....	72
Figura 4.5	Respostas dos observadores (círculos) representadas pela frequência do iluminante seleccionado em função da coordenada do iluminante para as quatro condições da experiência. Os dados representam as respostas de todos os observadores e para todas as pinturas, as linhas representam o ajuste Gaussiano aos dados, para cada uma das condições. Os valores de TCC indicados na figura são os correspondentes a cada máximo de cada Gaussiana. Está também representada (barras) a frequência de ocorrência do máximo das distribuições de respostas dos observadores para cada pintura (por questões de visualização as frequências estão escaladas por um factor de 10). ....	73
Figura 4.6	Varição relativa do número de cores para duas das pinturas (A e B) expressa em função da coordenada CIE $x_0$ do iluminante luz do dia. ....	76
Figura 4.7	Correlação entre a preferência dos observadores para cada pintura, expressa pela TCC correspondente ao máximo da resposta dos observadores e a TCC estimada através do máximo do número de cores para a pintura correspondente. São apenas visíveis nove símbolos devido a sobreposição. A	

	linha recta representa uma regressão linear. O valor do $R^2$ encontrado para esta regressão foi de 0,60, o qual é estatisticamente significativo ( $p = 0,02$ ). ....	76
Figura 5.1	Imagens a cor das onze pinturas analisadas. ....	80
Figura 5.2	Espectro normalizado dos iluminantes que maximizam o numero de cores para quatro pinturas (F, G, H e J). Para comparação é também apresentado o espectro do iluminante $D_{65}$ , o qual foi utilizado como ponto de partida para a rotina de optimização. ....	82
Figura 5.3	Espectro normalizado obtido pela média dos espectros individuais correspondentes às onze pinturas. Para comparação é também apresentado o espectro do iluminante $D_{65}$ , o qual foi utilizado como ponto de partida para a rotina de optimização. ....	83
Figura 5.4	Percentagem de aumento no número de cores perceptíveis obtido para cada pintura com o iluminante optimizado para cada uma das pinturas individualmente (barras brancas) e com o iluminante médio (barras cinzentas), onde é usado como referência o iluminante $D_{65}$ . ....	83
Figura 6.1	Imagens a cor das vinte pinturas analisadas. ....	88
Figura 6.2	Volumes de cor no espaço CIELAB de quatro pinturas reproduzidas sob o iluminante $D_{65}$ . ....	90
Figura 6.3	Distribuição espectral de quarto metâmeros do $D_{65}$ usados neste trabalho. M1 e M2 representam dois dos metâmeros espectralmente próximos do iluminante de energia constante E e M3 e M4 representam dois dos metâmeros espectralmente afastados do iluminante E. Para efeitos de representação todos os espectros foram normalizados. ....	91
Figura 6.4	Aspecto de duas das pinturas analisadas sob três distribuições espectrais diferentes; sob o iluminante $D_{65}$ (A), sob a estrutura espectral M3, que produz um baixo número de cores (B) e sob a estrutura espectral M4, que produz um alto número de cores (C). ....	92
Figura 6.5	(a) Variação do número de cores média das pinturas em função de $\delta$ , a distância absoluta ao iluminante E. (b) Índice de reprodução da cor geral em função de $\delta$ . (c) Diferença na cor média das pinturas no espaço CIELAB entre a cor média obtida para cada metâmero e a cor média obtida para o iluminante $D_{65}$ em função de $\delta$ . ....	93

Figura 6.6 Numero de bandas espectrais diferentes de zero, com largura de 10 nm, em função de  $\delta$ .  $\delta$  representa a diferença espectral em relação ao iluminante de energia constante.....93



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Objectivos e estrutura da tese

A disponibilização recente a preços moderados de tecnologia de cristais líquidos birefringentes, que permite a sintonização de bandas espectrais estreitas em todo o espectro visível em fracções de segundo, tornou possível para o laboratório de óptica médio a aplicação de técnicas de digitalização hiperespectral, anteriormente apenas utilizadas em aplicações espaciais. Estas técnicas estão na origem do desenvolvimento altamente concorrencial de aplicações nas áreas da robótica, da biomedicina, da agricultura e da arte, entre outras.

A aquisição de informação cromática e espectral sobre obras de arte é, em geral, feita com precisão apenas em zonas muito localizadas da ordem de centímetros quadrados. Alternativamente, usam-se técnicas multiespectrais que produzem imagens em sensores CCD através de filtros de banda larga e permitem obter com resolução espectral moderada o espectro de áreas correspondentes aos pixels do CCD [1-2]. A aplicação dos novos sistemas de digitalização hiperespectral permite uma caracterização com uma grande resolução espacial e espectral, que pode atingir 1 nm [3-4], e abre assim novas e excitantes perspectivas na área da análise de pinturas de arte como, por exemplo, o registo espectral completo de pinturas, o seu estudo colorimétrico, a caracterização da degradação, a obtenção de dados para o restauro e caracterização pigmentar.

Alguns dos principais museus do mundo estão já a desenvolver e aplicar estas técnicas na caracterização das suas obras de arte [5]. Assim, este trabalho de doutoramento propõe-se aproveitar as potencialidades do sistema para procurar determinar os factores colorimétricos que influenciam a percepção das pinturas e determinar as condições de iluminação ideais do ponto de vista visual.

Esta tese é constituída por sete capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma introdução geral onde é feita uma revisão de alguns tópicos fundamentais para contextualização do trabalho desenvolvido. No segundo capítulo é efectuada uma descrição geral dos métodos e



equipamentos utilizados no decorrer de todo o trabalho. No terceiro capítulo é apresentado um estudo que visou a determinação, através de uma experiência psicofísica, do perfil espectral da iluminação preferida pelos observadores ao apreciar pinturas artísticas e a sua correlação com a temperatura correlacionada de cor (TCC) e diversidade cromática. O quarto capítulo apresenta um estudo que teve como objectivo determinar qual a TCC da luz do dia preferida pelos observadores ao apreciar pinturas artísticas. No quinto capítulo é proposta a optimização espectral da iluminação de pinturas artísticas baseada na estimativa do número de cores discerníveis. No sexto capítulo são estudados os efeitos cromáticos de metâmeros do  $D_{65}$  em pinturas artísticas. Por último, no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões globais da tese.

## 1.2 Sistema visual humano

A Figura 1.1 mostra a representação de um corte vertical correspondente ao olho humano sob a forma de diagrama. A córnea e o cristalino actuam em conjunto, possibilitando assim a formação de uma imagem invertida na retina, superfície sensível à luz no olho humano. A maior parte da potência refractiva do olho advém da superfície curva da córnea. A função principal do cristalino é aumentar ou diminuir a potência refractiva do olho através da alteração da sua forma, tornando-se menos espesso para objectos que estão distantes e mais espesso para objectos próximos, mecanismo designado por acomodação. A íris funciona como pupila através da alteração da sua forma, tendo aproximadamente 2 mm de diâmetro em condições de intensidade luminosa elevada e aumenta o seu diâmetro à medida que os níveis de intensidade de luz diminuem, atingindo um diâmetro máximo de 8 mm para intensidades luminosas reduzidas. Esta alteração de diâmetro permite compensar os níveis de iluminação e ajuda a focar os objectos próximos, uma vez que o seu diâmetro também diminui com a acomodação, e assim aumenta a profundidade de campo.

A estrutura mais importante do olho humano, a retina, cobre a maior parte do globo ocular pelo lado interno, permitindo assim um amplo campo visual. No entanto esta estrutura não é uniforme em termos de sensibilidade. A visão da cor está limitada a cerca de 40 graus do eixo visual, uma vez que fora desta área a visão é praticamente acromática e usada maioritariamente

para detecção de luz e movimento [6]. Dentro dos 40 graus em redor do eixo visual a capacidade para ver cor e detalhe vai aumentando gradualmente à medida que nos aproximamos do eixo visual culminando na fóvea, sendo esta a área com maior capacidade para ver cor e detalhe. Dentro desta existe uma outra área designada foveola, que corresponde a um campo visual de aproximadamente 1 grau [7]. A fóvea e a foveola não estão centradas com o eixo óptico do olho, estando 4 graus desviadas para o lado temporal, como mostra a Figura 1.1.

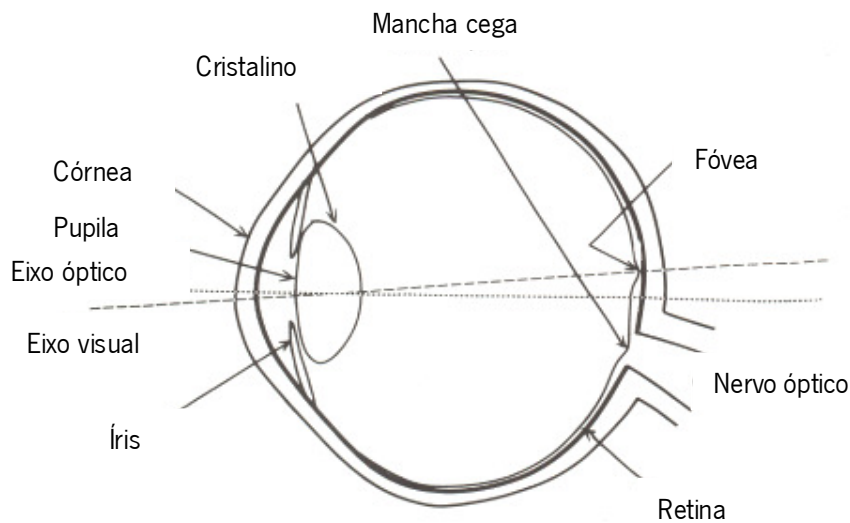


Figura 1.1 Diagrama do olho humano.

Aproximadamente 15 graus para o lado nasal encontra-se a papila óptica, local por onde saem todas as fibras nervosas que ligam a retina ao cérebro. Na foveola os fotorreceptores são apenas de um tipo, cones, fora desta área, para além dos cones existe um outro tipo de fotorreceptores designados por bastonetes. O rácio do número de cones para bastonetes varia continuamente desde apenas cones e ausência de bastonetes na foveola para quase apenas bastonetes e alguns cones na periferia [8]. Por fim, os cones e bastonetes estão ligados às fibras nervosas cerebrais de diferentes formas dependendo da posição na retina. Na foveola o número de fibras nervosas é sensivelmente igual ao número de cones, mas à medida que nos afastamos do eixo visual o número de fibras vai diminuindo continuamente até que existem centenas de cones e bastonetes ligados a uma única fibra nervosa [8].

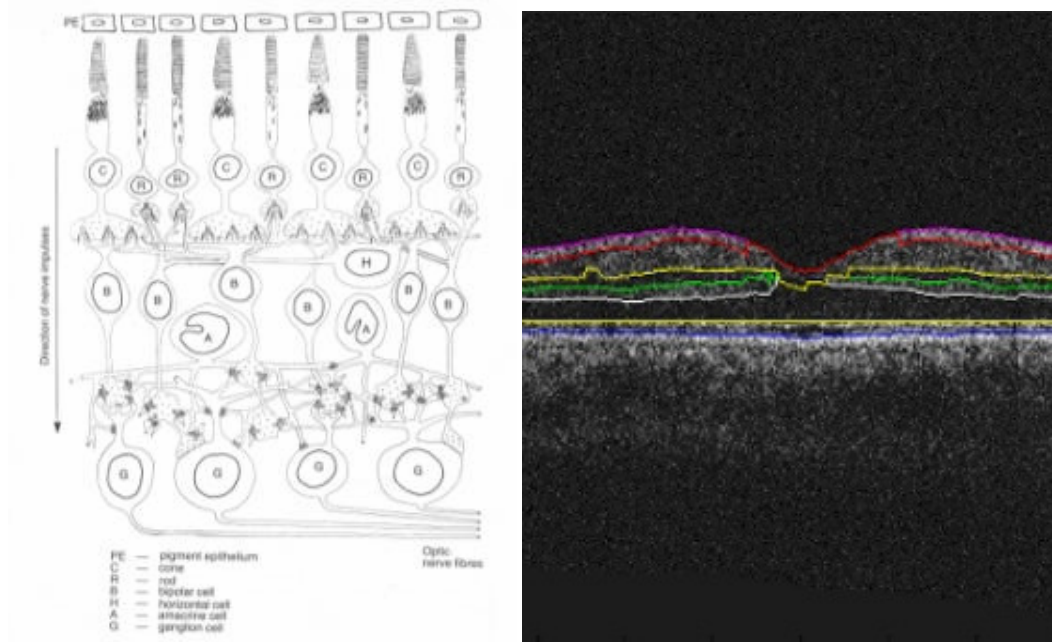


Figura 1.2 Esquerda: estrutura da retina apresentada sob a forma de esquema [9]. Direita: estrutura da retina na zona macular obtida através de tomografia de coerência óptica (OCT) [10].

Na retina a função dos bastonetes é assegurar a visão acromática em condições de baixa iluminação. Esta forma de visão, designada escotópica, opera quando o estímulo apresenta valores de luminância inferiores a  $0.001 \text{ cd/m}^2$  [11]. A função dos cones é proporcionar visão a cores em níveis normais de iluminação. Esta forma de visão, designada fotópica, opera quando o estímulo apresenta níveis de luminância superiores a  $3 \text{ cd/m}^2$  [11]. Entre  $0.001 \text{ cd/m}^2$  e  $3 \text{ cd/m}^2$  opera a visão mesópica [11] que corresponde a uma transição gradual desde a visão fotópica para a visão escotópica à medida que os níveis de iluminação vão baixando. Nestas condições quer os cones quer os bastonetes estão activos, esta forma de visão é designada mesópica.

Os comprimentos de onda para os quais a visão escotópica é mais sensível são mais curtos do que no caso da visão fotópica, assim sendo à medida que os níveis de iluminação se vão alterando na visão mesópica, o brilho das cores vermelho e azul alteram-se. Isto pode ser observado por exemplo num jardim ao fim do dia, onde as flores vermelhas que durante o dia

parecem mais claras que as azuis, aparecem agora mais escuras. Este facto é conhecido como fenómeno de Purkinje.

A razão da designação cones e bastonetes é a sua forma, no entanto todos eles são bastante pequenos, tendo apenas sensivelmente 1/35 de milímetro. Os cones e bastonetes estão posicionados paralelamente ao eixo visual virados para o lado posterior, assim a luz é absorvida à medida que vai percorrendo o seu comprimento. Estão ligados às fibras nervosas através de uma complexa malha de células. As fibras nervosas dirigem-se para a papila óptica, onde se juntam, formando o nervo óptico que por sua vez liga o olho ao cérebro. Em cada olho existem cerca de 6.8 milhões de cones, 100 milhões de bastonetes e 1 milhão de fibras nervosas [12].

### 1.3 Colorimetria

O conceito conhecido hoje como colorimetria surgiu talvez pela primeira vez em 1802 quando Thomas Young [13], sugeriu que a visão cromática era baseada em três tipos de sensores:

*“As it is almost impossible to conceive each sensitive point of the retina to contain an infinite number of particles, each capable of vibrating in perfect unison with every possible undulation, it becomes necessary to suppose the number limited, for instance to the three principal colours, red, yellow, and blue, and that each of the particles is capable of being put in motion more or less forcibly by undulations differing less or more from perfect unison. Each sensitive filament of the nerve may consist of three portions, one for each principal colour”.* (Thomas Young, 1802).

Mais tarde, a teoria proposta por Young foi desenvolvida por Helmholtz [14], contribuindo assim para a teoria da tricromacia, que mais tarde veio a ser a base da ciência moderna da cor. Helmholtz desenhou as três curvas de sensibilidade espectral representadas na Figura 1.3, correspondentes a cada uma dos sensores propostos por Young. Embora esta abordagem feita por Helmholtz tenha sido meramente qualitativa, as curvas de sensibilidade propostas são muito similares às que hoje em dia se podem medir e são usadas como curvas standard, sendo a base fundamental da colorimetria.

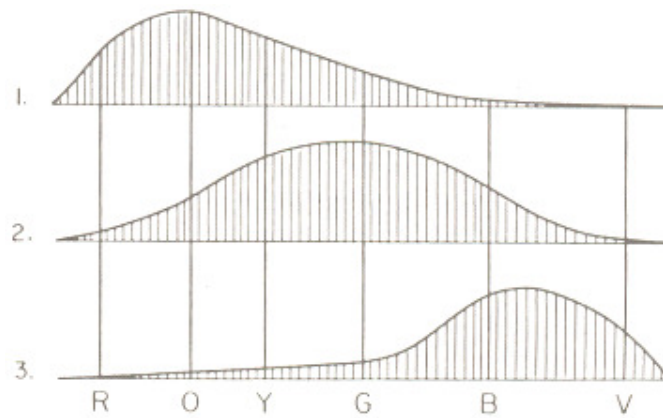


Figura 1.3 Curvas de sensibilidade espectral Helmholtz [15].

No olho humano existem três tipos de cones L, M e S, que correspondem à sensibilidade para comprimentos de onda longos, médios e curtos, de acordo com a região do espectro visível em que estes são mais sensíveis. Cada tipo de cone absorve a luz numa ampla gama de comprimentos de onda mas apresenta um máximo de sensibilidade apenas num determinado comprimento de onda (Figura 1.4).

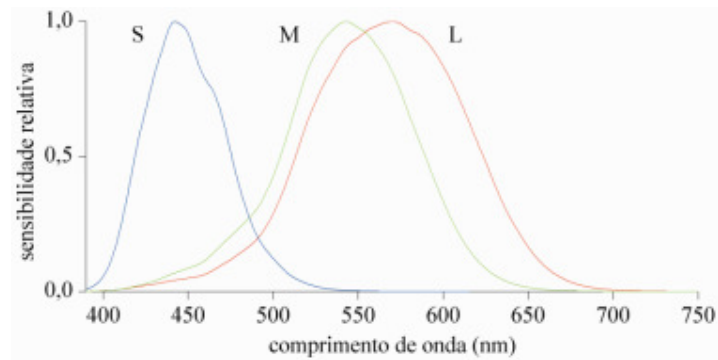


Figura 1.4 Curvas de sensibilidade relativa para os cones L, M e S [16].

Os cones são também ocasionalmente designados por R, G e B em vez de L, M, e S, mas esta nomenclatura não é a mais correcta. A sensação da cor vermelha não é devida à estimulação apenas dos cones sensíveis no vermelho mas sim devido a uma comparação entre os *cones* R e G (L e M) para além de, provavelmente, envolver também informação espacial.

As curvas de absorção dos cones representam a proporção de luz absorvida em cada comprimento de onda. Se  $L(\lambda)$ ,  $M(\lambda)$ , e  $S(\lambda)$  são os espectros de absorção dos três cones, então a potência luminosa total absorvida  $a_L$ ,  $a_M$ , e  $a_S$ , pelos cones quando iluminados por luz com distribuição de potência luminosa  $P(\lambda)$ , é:

$$\begin{aligned}
 a_L &= \int L(\lambda)P(\lambda)d\lambda \\
 a_M &= \int M(\lambda)P(\lambda)d\lambda, \\
 a_S &= \int S(\lambda)P(\lambda)d\lambda.
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Supondo que duas distribuições de potência luminosa,  $P_1(\lambda)$  e  $P_2(\lambda)$ , dão origem exactamente à mesma absorção dos cones  $a_L$ ,  $a_M$ , e  $a_S$ . A Equação 1.1, implica que:

$$\begin{aligned}
 \int L(\lambda)(P_1(\lambda) - P_2(\lambda))d\lambda &= 0, \\
 \int M(\lambda)(P_1(\lambda) - P_2(\lambda))d\lambda &= 0, \\
 \int S(\lambda)(P_1(\lambda) - P_2(\lambda))d\lambda &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

Isto não significa que  $P_1(\lambda) = P_2(\lambda)$ , porque é possível para diferentes distribuições de potência luminosa ter exactamente as mesmas absorções dos cones. Assim, estes pares de distribuições de potência luminosa diferentes têm a mesma cor e não podem de maneira alguma ser distinguidos visualmente. Diferentes mas indistinguíveis distribuições de potência luminosa são designados por metâmeros e são a base da mistura de cor em aparelhos de projecção de imagem. Estas tecnologias produzem metâmeros de cores naturais através da mistura da combinação de um grupo de cores independentes designadas primários.

Considerando um grupo de três luzes independentes, estas luzes podem ser misturadas por exemplo, projectando-as num ponto comum de um ecrã. Se a distribuição de potência luminosa normalizada dos primários é  $A(\lambda)$ ,  $B(\lambda)$  e  $C(\lambda)$ , e a sua respectiva potência luminosa total  $a$ ,  $b$  e  $c$ , então a distribuição de potência luminosa da luz resultante da mistura  $M(\lambda)$  é:

$$M(\lambda) = aA(\lambda) + bB(\lambda) + cC(\lambda). \quad (1.3)$$

A potência total absorvida pelos cones L, M e S da luz misturada é então:

$$a_L = a \int L(\lambda)A(\lambda)d\lambda + b \int L(\lambda)B(\lambda)d\lambda + c \int L(\lambda)C(\lambda)d\lambda,$$

$$a_M = a \int M(\lambda)A(\lambda)d\lambda + b \int M(\lambda)B(\lambda)d\lambda + c \int M(\lambda)C(\lambda)d\lambda, \quad (1.4)$$

$$a_S = a \int S(\lambda)A(\lambda)d\lambda + b \int S(\lambda)B(\lambda)d\lambda + c \int S(\lambda)C(\lambda)d\lambda.$$

Uma vez que os primários são seleccionados, todos os integrais são constantes e apenas as potências luminosas  $a$ ,  $b$  e  $c$  podem variar. É possível em determinadas condições especificar um grupo de absorções dos cones e calcular a potência luminosa dos primários necessária para as produzir. Qualquer luz pode ser decomposta em três funções de absorção dos cones mas nem sempre é possível obter a sua aparência através da mistura de três primários. No entanto em muitas situações práticas uma determinada luz pode ser obtida através da mistura de três luzes. Esta propriedade designa-se por tricromacia. A natureza desta mistura de luz será descrita mais adiante.

Com a necessidade de uniformizar a especificação de cor, surgiu em 1931 o sistema CIE (Commission International de l'Eclairage). O facto de a luz reflectida por uma superfície poder em determinadas condições ser obtida pela mistura aditiva de três primários nas proporções adequadas, sugere a possibilidade de existência de correlação entre a sensibilidade espectral dos três tipos de cones e os valores obtidos na mistura dos primários [17-18]. Quando a CIE foi estabelecida o espectro de sensibilidade dos cones ainda não era conhecido, mas foi assumido

que esses espectros podiam ser obtidos empiricamente através da combinação linear de funções obtidas experimentalmente.

Wright, em 1928 [19], construiu um colorímetro, no qual usou um prisma para obter dois canais de luz diferentes. Num deles colocou a mistura do vermelho, verde e azul com o objectivo de obter a comparação com a cor monocromática de teste projectada pelo outro canal. O estímulo vermelho, verde e azul era misturado usando um sistema de reflexão nas intensidades apropriadas para reproduzir a aparência do estímulo monocromático. A Figura 1.5 ilustra o colorímetro construído por Wright em 1928. Através do teste de vários observadores foi então possível obter a quantidade adequada de cada um dos primários para reproduzir a cor monocromática de teste. As três quantidades do primário vermelho, verde e azul para todos os comprimentos de onda correspondem às “colour matching functions” que são representadas por  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  e  $\bar{b}(\lambda)$  respectivamente e designam-se triestímulos. Estas funções foram obtidas através de múltiplos observadores com visão da cor normal, dando origem à designação Observador Standard CIE.

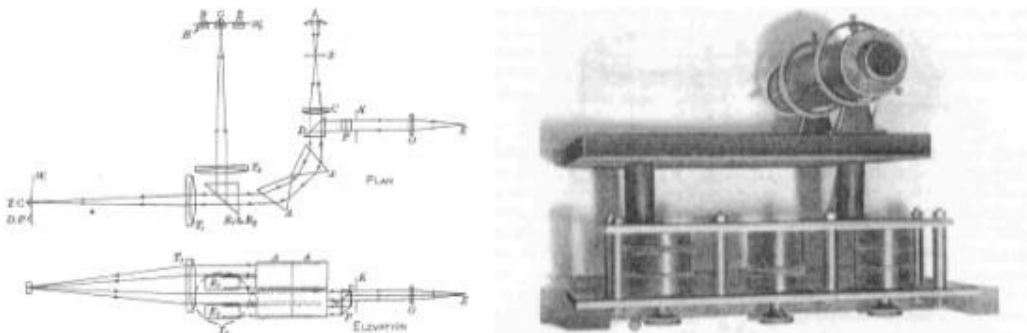


Figura 1.5 Colorímetro usado por Wright em 1928 para obter as funções de reprodução da cor [19].

Em 1931 foi recomendado pela CIE um grupo de funções de reprodução da cor, denominadas Observador Standard 1931 ou Observador 2°, para serem usadas na reprodução da cor para um campo visual entre 1° a 4°. Estas funções foram obtidas com base em dois grupos de resultados obtidos por Wright [20] e Guild [21] baseados em 10 e 7 observadores respectivamente. As funções  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  e  $\bar{b}(\lambda)$  foram expressas com base nos estímulos de comprimentos de



onda 700 nm, 546.1 nm e 435.8 nm, correspondentes ao vermelho, verde e azul respectivamente. As funções  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  e  $\bar{b}(\lambda)$  do sistema CIE 1931 estão representadas na Figura 1.6.

Com a intenção de eliminar os coeficientes negativos das funções de reprodução da cor  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  e  $\bar{b}(\lambda)$ , a CIE transformou estas funções numas novas  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  e  $\bar{z}(\lambda)$  através de uma transformação linear adequada. As novas funções  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  e  $\bar{z}(\lambda)$  do Observador Standard CIE 1931 estão representadas na Figura 1.7. O novo grupo de primários correspondente a estas novas funções não representa valores físicos, uma vez que estas funções não contêm valores negativos. Além disso, as três áreas sob as curvas são iguais e a função  $\bar{y}(\lambda)$  tem a mesma forma da eficiência luminosa fotópica  $V(\lambda)$ .

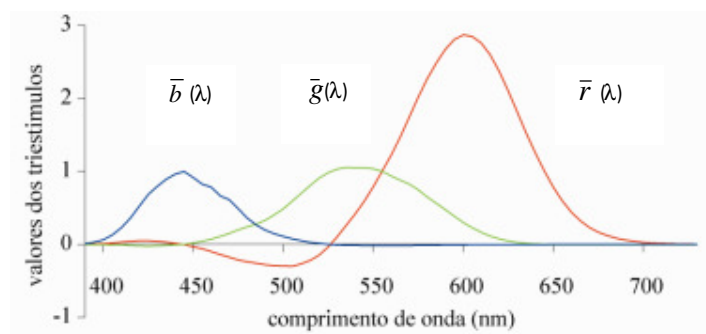


Figura 1.6 Funções de reprodução da cor  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  e  $\bar{b}(\lambda)$  para o Observador Standard CIE 1931.

Em 1964 um outro grupo de funções de reprodução da cor foi sugerido pela CIE, Observador Standard 1964, com a intenção de serem usadas para campos visuais superiores a 4 graus. Este grupo de funções para 10 graus foi obtido experimentalmente por Burch (1959) e Speranskaya (1959) e são representadas por  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$  e  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ . A Figura 1.8 apresenta a comparação entre as funções de reprodução de cor para o observador 2° e 10°.

Nas secções anteriores os elementos de percepção da cor apenas foram quantificados em termos das funções do espectro visível. O Observador Standard é definido pelas funções  $\bar{x}(\lambda)$ ,

$\bar{y}(\lambda)$  e  $\bar{z}(\lambda)$  ou  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$  and  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ . Cada superfície é definida pela sua função de reflectância  $R(\lambda)$  sob um determinado iluminante CIE  $S(\lambda)$ . Assim, qualquer cor pode ser definida por um conjunto de três valores  $(X, Y, Z)$  designados triestímulos, os quais resultam da Equação 1.5, que quantifica a cor definindo a quantidade de luz de cada primário, vermelho, verde e azul, necessária para produzir a cor pelo Observador Standard. O factor  $K$  é uma constante determinada pelo sistema de unidades usado.

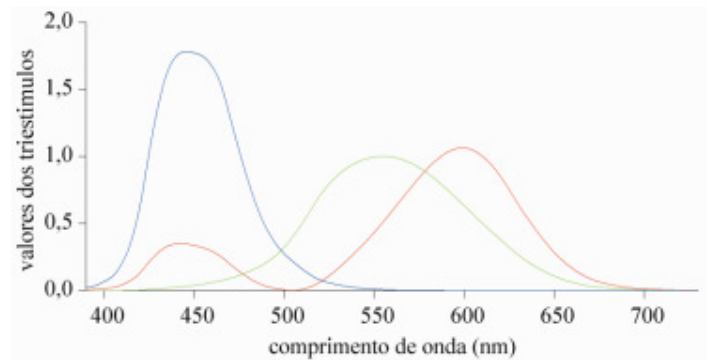


Figura 1.7 Funções de reprodução da cor  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  e  $\bar{z}(\lambda)$  para o Observador Standard CIE 1931.

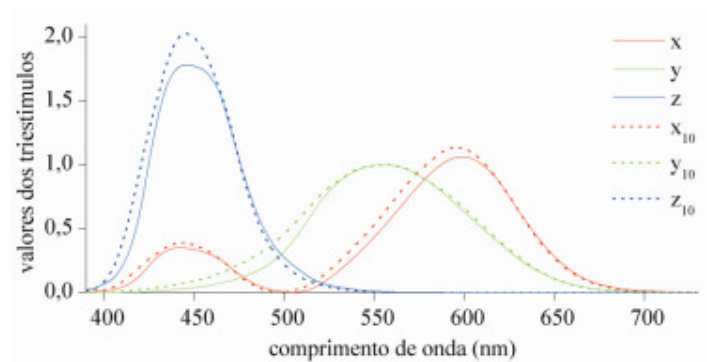


Figura 1.8 Comparação entre as funções de reprodução de cor para o Observador Standard CIE 1931 e 1964.

$$X = K \int_{\lambda=360}^{\lambda=780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda)d(\lambda),$$

$$Y = K \int_{\lambda=360}^{\lambda=780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda)d(\lambda), \quad (1.5)$$

$$Z = K \int_{\lambda=360}^{\lambda=780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda)d(\lambda)$$

Na prática os aparelhos de medida, como por exemplo os espectrofotômetros, não fazem um varrimento contínuo do comprimento de onda, mas sim em intervalos que podem variar de 1 nm a 20 nm. Assim as Equações 1.5 podem ser escritas aproximadamente da seguinte forma:

$$X = k \sum_{\lambda} S(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda,$$

$$Y = k \sum_{\lambda} S(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda, \quad (1.6)$$

$$Z = k \sum_{\lambda} S(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda.$$

A cor é normalmente representada no diagrama cromático CIE 1931 ( $x, y$ ) apresentado na Figura 1.9. As coordenadas cromáticas são calculadas segundo a Equação 1.7:

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

$$y = \frac{Y}{(X + Y + Z)} \quad (1.7)$$

A zona de todas as cores perceptíveis é delimitada pela linha que define a “ferradura” correspondente às cores espectrais monocromáticas puras com uma linha recta que une as coordenadas cromáticas extremas do vermelho e do azul (chamada a linha púrpura). O branco

encontra-se situado aproximadamente no centro da figura ( $E$ ) e as cores vão-se tornando mais saturadas para a periferia. A cor é normalmente representada por  $x$ ,  $y$  e  $Y$ .

Uma propriedade deste diagrama é que um ponto no diagrama que representa a mistura aditiva de duas cores encontra-se na linha recta definida pelos pontos correspondentes às coordenadas cromáticas das duas cores.

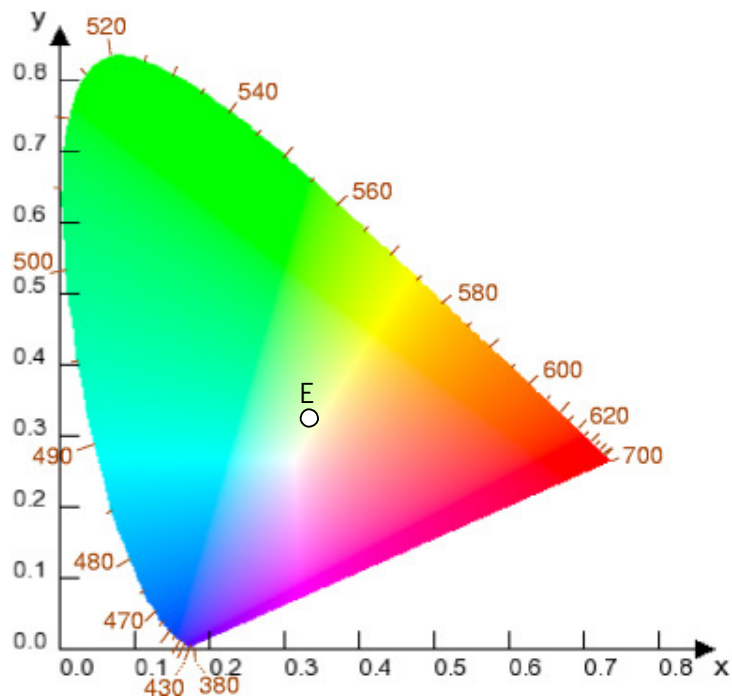


Figura 1.9 Diagrama cromático CIE 1931 ( $x$ ,  $y$ ). O ponto  $E$  corresponde ao branco, com coordenadas  $x = 0.33$ ,  $y = 0.33$ .

O diagrama cromático CIE 1931 ( $x$ ,  $y$ ) é um bom espaço para a representação da reprodução de cor, no entanto, não é um espaço uniforme, assim não pode ser usado para estimar diferenças de cor. A não uniformidade do diagrama cromático CIE 1931 ( $x$ ,  $y$ ) está representada na Figura 1.10. Cada linha nesta figura une dois pontos correspondentes a duas cores com o mesmo brilho e com a mesma diferença de percepção da cor. Num espaço de cor uniforme, estas diferenças de cor deveriam ser representadas por segmentos de igual comprimento. Resultados experimentais mostram que esta não uniformidade pode representar uma variação de 20:1 no

diagrama cromático CIE 1931  $(x, y)$  [22]. Na Figura 1.10 é possível observar que as linhas são mais compridas na zona do verde do que na zona do violeta. Para reduzir este problema a CIE sugeriu em 1976 um novo diagrama cromático, Diagrama Cromático Uniforme CIE 1976 (UCS 1976). Este novo diagrama foi obtido através de uma nova transformação dos valores dos triestímulos ou das coordenadas cromáticas.

$$u' = \frac{4X}{(X + 15Y + 3Z)} = \frac{4x}{(-2x + 12y + 3)}, \quad (1.8)$$

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

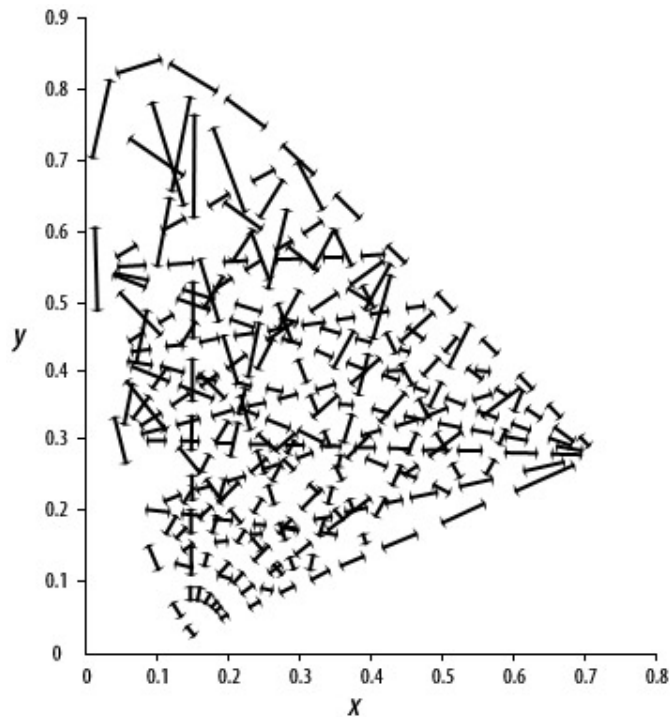


Figura 1.10 Diagrama cromático CIE 1931  $(x, y)$ . As linhas representam diferenças de cor iguais [22].

Na Figura 1.11 está representado o diagrama cromático melhorado CIE 1976 ( $u'$ ,  $v'$ ) relativamente ao CIE 1931 ( $x$ ,  $y$ ). A variação dos segmentos não é totalmente eliminada, mas é reduzida substancialmente de 20:1 na Figura 1.10 para 4:1 na Figura 1.11 [22].

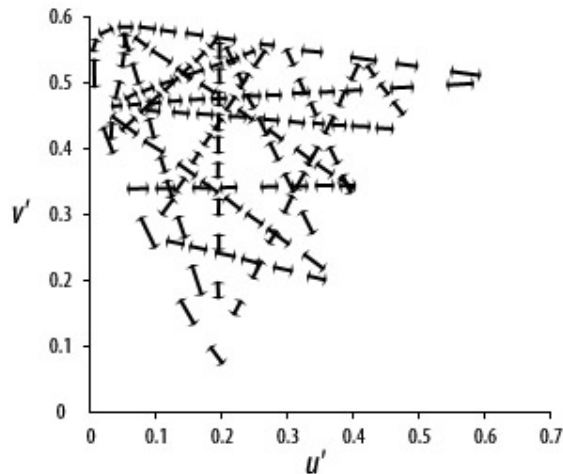


Figura 1.11 Diagrama cromático uniforme CIE 1976 ( $u'$ ,  $v'$ ). As linhas representam diferenças de cor iguais [22].

Os diagramas cromáticos anteriores tem diversas aplicações, mas como mostram apenas as proporções dos triestímulos e não as suas magnitudes, podem apenas ser aplicados a cores com o mesmo valor de luminância. Para definir sistemas uniformes de representação da cor que satisfaçam as comunidades científica e industrial, a CIE criou em 1976 os espaços tridimensionais CIELAB e CIELUV. Estes espaços foram determinados empiricamente, resultando da análise de uma grande quantidade de dados, permitindo uma melhor especificação da diferença de cor entre objectos coloridos.

O espaço CIELAB resulta de uma transformação não linear do espaço dos triestímulos que ainda hoje é amplamente utilizado na indústria dos corantes. Este espaço tridimensional está representado na Figura 1.12, com coordenadas definidas pelas Equações 1.9, onde  $(X, Y, Z)$  são os valores dos triestímulos. Os valores  $X_n$ ,  $Y_n$  e  $Z_n$  correspondem aos valores dos triestímulos do branco de referência. Normalmente o branco de referência é dado pela potência espectral de um dos iluminantes CIE, por exemplo  $D_{65}$ , projectado numa superfície reflectora difusora perfeita.

Nessas condições  $X_n$ ,  $Y_n$  e  $Z_n$  correspondem aos valores dos triestímulos do iluminante standard com  $Y_n = 100$ .

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16,$$

$$a^* = 500 \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right], \quad (1.9)$$

$$b^* = 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right].$$

Estas equações são aplicadas quando os quocientes  $X/X_n$ ,  $Y/Y_n$  e  $Z/Z_n$  são maiores que 0.008856. Se qualquer um dos quocientes  $X/X_n$ ,  $Y/Y_n$  e  $Z/Z_n$  for igual ou menor que 0.008856 é substituído na fórmula anterior por:

$$7.787 (\text{quociente}) + 16/116. \quad (1.10)$$

A luminosidade,  $L^*$  varia desde 0 para o preto até 100 para o branco. O ângulo de tonalidade,  $h$  definido por:

$$h = \arctan \left( \frac{b^*}{a^*} \right), \quad (1.11)$$

é obtido em termos de ângulo variando de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . O valor  $C^*$ , designado croma, é definido por:

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}}, \quad (1.12)$$

Está relacionado com o atributo perceptual pureza, que permite determinar o quanto um estímulo cromático difere de um estímulo acromático com o mesmo brilho. As cores neutras encontram-se próximas do eixo vertical [12].

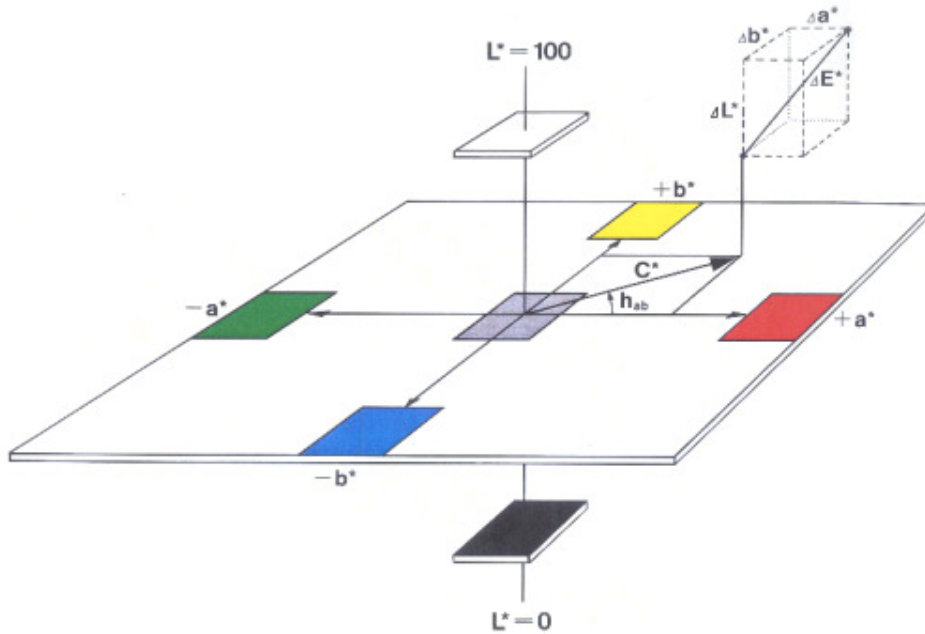


Figura 1.12 Espaço CIE 1976 ( $L^*, a^*, b^*$ ).

A diferença de cor entre dois estímulos representados na Figura 1.12 é dada pela Equação 1.3.

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

ou

(1.13)

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2]^{\frac{1}{2}}$$

em que:

$$\Delta C_{ab}^* = C_{ab\ c1}^* - C_{ab\ c2}^* \quad \text{e} \quad \Delta H_{ab}^* = [(\Delta E^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2]^{\frac{1}{2}}$$



Um espaço similar ao CIELAB foi também introduzido pela CIE, o espaço CIELUV que é mais usado na indústria que utiliza mistura aditiva como por exemplo a televisão. Este novo espaço cromático é definido pelas Equações 1.14,

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16$$

$$u^* = 13 L^* (u' - u'_n) \quad (1.14)$$

$$v^* = 13 L^* (v' - v'_n)$$

$$h = \arctan \left( \frac{v^*}{u^*} \right)$$

onde o  $u'$  e o  $v'$  são obtidos pelas Equações 1.5. a Equação 1.14 é apenas válida se  $Y/Y_n$  for maior que 0.008856, caso contrário:

$$L^* = 903.3 \left( \frac{Y}{Y_n} \right). \quad (1.15)$$

As diferenças de cor no espaço CIELUV são dadas pela Equação 1.16.

$$\Delta E^* = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.16)$$

Com o objectivo de melhorar a uniformidade do espaço de cor CIELAB, foi introduzida em 2000 pela CIE uma nova fórmula de diferença de cor CIEDE2000. Sendo  $\Delta L'$ ,  $\Delta C'$  e  $\Delta H'$  as medidas da luminosidade, croma e ângulo de tonalidade respectivamente,  $k_L$ ,  $K_C$ , e  $k_H$  os parâmetros que podem ser ajustados de acordo com as condições de visualização e  $R_T$  um factor par melhorar a diferença de cor na região do azul [23], a nova fórmula derivada do espaço de cor CIELAB e é descrita por:

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

## 1.4 Imagiografia hiperespectral

Um sistema de imagem hiperespectral é um sistema óptico capaz de adquirir imagens com alta resolução espacial em várias gamas de comprimento de onda muito próximas. Assim este sistema permite medir a distribuição espectral da luz proveniente de cada ponto da imagem. Este tipo de sistemas começou por ser usado nos programas espaciais, onde alguns satélites eram equipados com sistemas de imagiografia hiperespectral para recolherem dados espectrais da superfície terrestre. O Landstat I lançado em 1972 foi o primeiro satélite a usar este tipo de tecnologia, levando a bordo um sistema de imagiografia multispectral que continha quatro filtros e quatro detectores, adquirindo assim imagens em simultâneo em quatro bandas espectrais. Nas últimas três décadas a tecnologia utilizada nos sensores remotos dos satélites foi melhorada e é hoje muito mais sofisticada, mas a ideia básica mantêm-se. Estas técnicas de imagiografia são usadas hoje em dia em muitas outras áreas, tais como a medicina, agricultura, arte e investigação forense, entre outras [24-28].

Ao longo da última década foram desenvolvidos e melhorados vários sistemas para estudo das propriedades cromáticas de cenas naturais [3, 29-30]. Nos dias de hoje estes sistemas estão também a ser aplicados, quer no âmbito científico quer no âmbito comercial, às obras de arte, permitindo assim fazer um registo digital, por exemplo de pinturas, tornando assim uma pintura previamente digitalizada inconfundível com uma eventual reprodução.

A aplicação deste tipo de sistemas às pinturas artísticas foi inicialmente abordada por Roy Berns em 2001, com o objectivo de criar arquivos digitais de pinturas artísticas [1, 31]. Num dos estudos foi usada uma câmara digital tricromática combinada com múltiplos filtros para aquisição de uma pintura artística, posteriormente foram estimadas as reflectâncias espectrais originais, sendo o objectivo final criar, um arquivo digital e com uma impressora de 6 cores, uma reprodução da pintura original. O sistema utilizado foi capaz de reproduzir a pintura original com um erro  $\Delta E^*_{94}$  de 5,0 e um erro esperado na reprodução das reflectâncias espectrais de 3,1%.

Esta técnica permitiu posteriormente estudar a influência dos vernizes na aparência das pinturas através do desenvolvimento de modelos ópticos e simular pinturas sem a influência dos vernizes [32-34], assim como a identificação dos pigmentos presentes nas pinturas com base na reprodução das suas reflectâncias [35-39]. Num estudo realizado por Berns em 2008 [35] foi construído um mapa de pigmentos em várias pinturas através da análise espectral de cada pixel da pintura decompondo as reflectâncias nos seus pigmentos e determinando assim o peso relativo de cada pigmento. Estes trabalhos abrem caminho assim para as fortes potencialidades desta aplicação em arquivos digitais com informação inconfundível acerca da pintura e também na recuperação da informação em caso de danos causados às pinturas, permitindo assim o restauro com a maior fiabilidade possível e identificar possíveis falsificações.

## 1.5 Número de cores

O número de cores discerníveis pelo sistema visual humano é objecto de discussão já há algum tempo, existindo actualmente métodos para a sua estimativa. As primeiras estimativas relativamente ao número de cores discerníveis indicaram 10 milhões de cores [40], mas não é apontado nenhum método para o seu cálculo. Posteriormente foi apontada uma estimativa de 2,28 milhões de cores [41], usando como critério uma diferença de cor perceptual de  $\Delta E = 1$  no espaço cromático CIELAB. Linhares [42], no âmbito de um trabalho de mestrado desenvolveu um novo método para a estimativa do número de cores discerníveis, usando como base imagens hiperespectrais de cenas naturais.

Com as funções de reflectância das cenas, as coordenadas cromáticas de cada pixel eram representadas no diagrama cromático CIELAB (Figura 1.13), sendo assim possível obter um volume de cor para cada imagem, sendo essa a base para a estimativa do número de cores. Em seguida, o volume era segmentado em volumes cujo seu diâmetro e forma variam de acordo com os critérios pretendidos.

O primeiro método utilizado foi a segmentação em cubos correspondentes a um  $\Delta E = 1$  no espaço CIELAB, que contando o número de volumes preenchidos permitia obter uma estimativa para o número de cores correspondente à imagem. Para além da segmentação em cubos, foi

também utilizada a segmentação em esferas de diâmetro  $\Delta E = 1$  e ainda utilizada neste método a fórmula de diferença de cor CIEDE2000. Os resultados destes métodos mostram estimativas em valores absolutos diferentes, mas valores relativos semelhantes. Assim e devido aos requisitos computacionais, neste trabalho o método de cálculo do número de cores foi a segmentação em cubos.

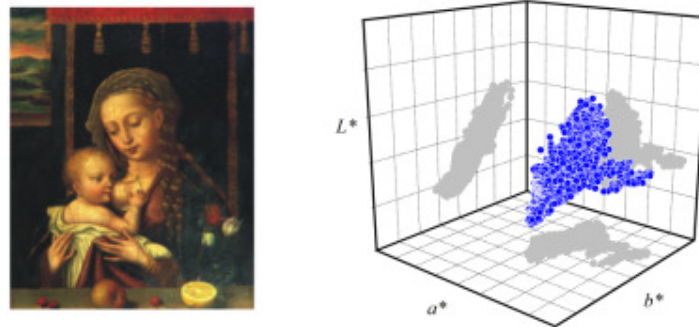


Figura 1.13 Representação de uma pintura no diagrama cromático CIELAB.

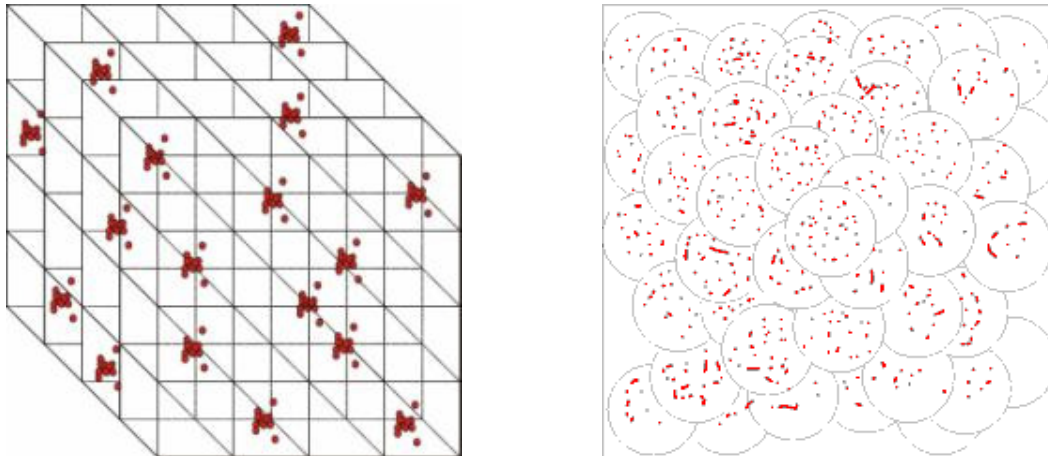


Figura 1.14 Esquerda: Segmentação em cubos. Direita: Segmentação em esferas.

## 1.6 Iluminação e pinturas artísticas

Nos museus as pinturas artísticas são iluminadas por uma grande variedade de fontes de luz tais como luz natural, lâmpadas de tungsténio e halogéneo e lâmpadas que se aproximam à luz do dia, as lâmpadas Solux [43]. Dois dos aspectos determinantes na escolha da iluminação para ser usada em pinturas artísticas são: o potencial dano que a iluminação pode causar na pintura e a impressão visual que a mesma iluminação possa produzir num observador. A protecção das pinturas dos danos causados pela iluminação normalmente implica a utilização de fontes de luz de baixa intensidade e baixa emissão na região do ultravioleta [44-46]. Assim, é de extrema importância filtrar a radiação ultravioleta e infravermelha para além de controlar os níveis de iluminação e os períodos de exposição à luz. Estas são as precauções básicas para proteger as obras de arte dos efeitos da iluminação [43, 47]. Apesar do facto de o sistema visual humano ser capaz de praticamente compensar as variações da composição espectral do iluminante [48-50], a percepção visual dos objectos é influenciada quer pela intensidade da luz, quer pela sua composição espectral [26, 51-53], assim os efeitos cromáticos são também aspectos importantes a ter em conta na exibição de obras de arte.

A escolha de uma fonte de luz para a visualização de pinturas talvez seja motivada por factores estéticos específicos, por exemplo, para produzir as impressões visuais que o artista pretendia com a sua criação. Vários artistas ao longo do tempo pintaram à luz natural [54], utilizando como estúdio ideal uma sala com as janelas orientadas para norte [55]. Existiram no entanto outros artistas que utilizavam, para a pintura, outras fontes de luz como velas, talvez para causar efeitos específicos [56-57]. Estes aspectos cognitivos são certamente importantes na contextualização da arte em geral. Uma outra forma de escolher a fonte de luz ideal para iluminar pinturas é ter em conta a preferência dos observadores, embora esta seja uma forma mais empírica. Por outro lado, a preferência pode ser determinada por várias propriedades, tais como a diversidade e naturalidade das cores ou contraste.

Foram já efectuados testes em laboratório para efeito de determinação da melhor iluminação usando reproduções em postais de vários tipos de pinturas [52]. Com este estudo foi determinando que embora os iluminantes que aproximam a luz do dia são aceitáveis, os observadores preferiam outros iluminantes TCC mais baixas, em particular um iluminante com

TCC na ordem dos 3600 K. A razão para esta preferência não é clara. Como supostamente esta luz é muito diferente daquela que foi usada pelos artistas para criar as pinturas, foi assumida a hipótese de a luz preferida ser aquela que origina uma sensação nem muito fria nem muito quente [53]. Por outro lado, o uso de reproduções de pinturas em postais em vez das pinturas originais, pode introduzir artefactos que distorçam a estrutura cromática que são intrínsecos do próprio processo de reprodução. Assim, parece ser necessário obter dados que não estejam afectados pela distorção cromática originada por processos de reprodução e impressão.

Que parâmetros quantitativos influenciam a impressão visual das pinturas e determinam a preferência por uma iluminação específica? Uma possibilidade de resposta para esta questão é o facto de os observadores poderem ser influenciados pelo número de cores que conseguem perceber na pintura, ou, por outras palavras, pela diversidade cromática.

Com o desenvolvimento de novas fontes de luz baseadas em LEDs, é possível produzir fontes de luz com distribuições espectrais quase arbitrárias [58]. Assim, a relação entre a estrutura espectral e os seus efeitos visuais assume particular relevância. Foram também já realizados estudos sobre os efeitos cromáticos de lâmpadas LEDs, os quais mostram algumas limitações na sua reprodução da cor [59-60]. Nestes estudos foram usados LEDs muito específicos, não sendo assim segura a generalização destes resultados a outros tipos de fontes de luz. Esta nova tecnologia de iluminação está também a ser aplicada para a iluminação de museus, sendo assim importante a sua caracterização neste contexto.

Os efeitos cromáticos causados pelas fontes de luz, podem ser caracterizados por parâmetros standard. Tipicamente a qualidade de reprodução da cor de uma fonte de luz é avaliada pelo índice de reprodução da cor (CRI) estandardizado pela CIE [61-62]. Esta quantidade compara a cor de uma amostra de superfícies sob o iluminante a testar com a cor das mesmas superfícies sob um iluminante de referência, que é tipicamente a luz do dia ou a radiação do corpo negro. Este índice (CRI) tem sido constantemente usado na optimização espectral de novas fontes de luz baseadas em LEDs [63-64], no entanto tem sido detectadas algumas limitações [65-66], tendo sido já sugeridas outras formas de descrição da qualidade de reprodução da cor das fontes de luz [67-69]. Para avaliar a qualidade de reprodução da cor foi recentemente proposto um novo método, baseado no volume de cor de um objecto, para a avaliação da qualidade de

cor produzida por fontes de luz, mas continua a depender de um iluminante de referência [70]. Devido à vasta complexidade do sistema de percepção humano, é claramente assumido que talvez seja necessária uma diversidade maior de índices para caracterizar devidamente a qualidade das várias fontes de luz existentes [71] e que neste momento não existe uma metodologia clara para quantificação da qualidade de cor da iluminação.

## 2 MÉTODOS

### 2.1 Sistema de imagiografia hiperespectral

Para digitalização de pinturas artísticas foram usadas duas versões do sistema de imagiografia hiperespectral. Estas duas versões representam evoluções de um primeiro sistema usado para o estudo de propriedades cromáticas em cenas naturais [29].

#### *2.1.1 Sistema de Imagiografia Hiperespectral I*

A primeira versão do sistema de imagiografia hiperespectral está ilustrado na Figura 2.1. A câmara é arrefecida por peltier (Hamamatsu modelo C4742-95-12ER), tem um CCD com 1344 x 1024 pixels, 12-bits de intensidade, 6.45 $\mu$ m x 6.45 $\mu$ m de tamanho dos pixels e com uma área sensível de 8.66 mm x 6.60 mm. O tempo de exposição da câmara é estimado e controlado por computador. A lente tem f/1.8, 12.5-75 mm, trabalhando normalmente a 75 mm e produzindo uma resolução angular máxima ideal de  $\sim 1$  min arc por pixel. Foi colocado permanentemente em frente do sistema um filtro de infravermelhos (ver Figura 2.1) para eliminar a contaminação da luz infravermelha quando o filtro está sintonizado para comprimentos de onda inferiores a 450 nm.

Para a aquisição das imagens foi usada uma placa gráfica com entrada digital (Matrox Meteor-II/Digital, Matrox Electronic Systems Ltd). Esta placa permitiu também controlar o tempo de exposição da câmara. A sincronização entre a placa gráfica, o filtro e a câmara foi efectuada através de software desenvolvido, em linguagem C, especificamente para o efeito, cuja aparência do seu front-end está representada na Figura 2.2.



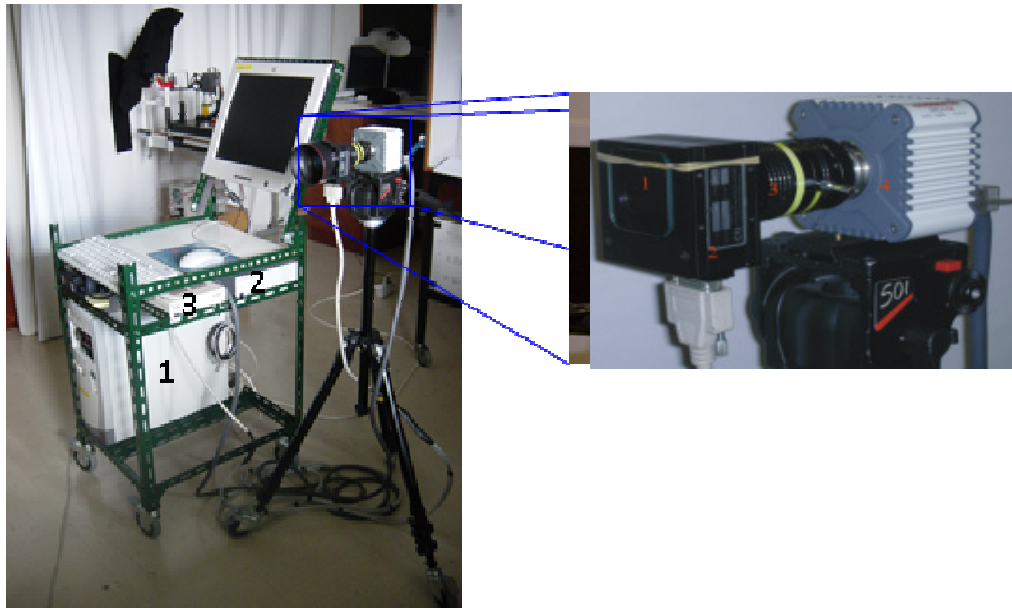


Figura 2.1 Esquerda: Sistema hiperespectral com (1) computador; (2) caixa de controlo da câmara; (3) caixa de controlo do filtro. Direita: componentes ópticos do sistema hiperespectral; (1) Filtro infravermelho, (2) Filtro de cristais líquidos, (3) Lente, (4) Câmara arrefecida.

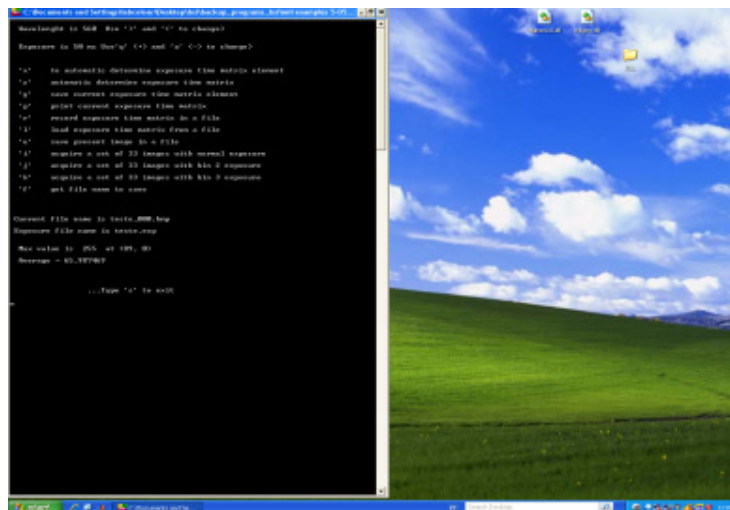


Figura 2.2 Aspecto do software de aquisição de imagens hiperespectrais I.

O tempo de exposição para cada comprimento de onda foi determinado de forma automática. Sendo  $S_m$  o sinal máximo obtido no CCD para a imagem em questão,  $S_{max}$  o sinal máximo possível no CCD e  $t$  o tempo de exposição foi determinado de forma a que o sinal máximo  $S_m$  ficasse entre 90% a 100% do valor máximo de saturação do CCD  $S_{max}$ . Por limitações da câmara, o tempo máximo de exposição deste sistema foi de 6 segundos, o que originava, por vezes um sinal reduzido para os comprimentos de onda mais curtos, intensificando assim o peso relativo do ruído nas funções de reflectância.

Toda a caracterização do sistema relativa à transmitância, linearidade, stray light, MTF e ruído foi efectuada no âmbito de um trabalho de mestrado e pode ser consultada na respectiva tese [72]. A referida caracterização mostrou que o sistema apresenta uma transmitância dependente do ângulo de incidência, ou seja, diminui do centro para a periferia, comporta-se de forma linear, sofre da influência de stray light, apresenta uma boa MTF e que o valor do ruído é dependente do tempo de exposição. O resultado desta caracterização originou a introdução das correcções necessárias no software para que o sistema fosse capaz de reproduzir com um elevado grau de precisão as funções de reflectância, sendo assim todos estes factores compensados automaticamente. A fiabilidade do sistema na reprodução das funções de reflectância foi devidamente testada e analisada no âmbito de um outro trabalho de mestrado [73], em que a precisão do sistema em reproduzir a reflectância espectral de amostras pintadas a óleo usando a fórmula de diferença de cor CIEDE2000 [23] foi em média 1,3 e de 2,2 usando o espaço cromático CIELAB. O erro espectral foi de 2% [73]. Esta precisão na reprodução da reflectância espectral está dentro dos valores aceitáveis para efeitos de visualização [1].

### ***2.1.2 Sistema de Imagiografia Hiperespectral II***

Esta nova versão do sistema foi essencialmente composta pelo mesmo tipo de equipamento, alterando apenas, em relação à versão anterior, o modelo da câmara (Hamamatsu modelo C4742-80 ORCAER), a compatibilidade dos diferentes elementos e o software de controlo. Este novo modelo tem essencialmente as mesmas características da versão anterior, apenas não impõe limites ao tempo de exposição. Embora este novo sistema seja muito semelhante em termos funcionais, é muito mais portátil do que o anterior (Figura 2.3) e mais rápido na

aquisição das imagens por força da alteração do software, agora desenvolvido em Matlab, o que o torna mais interactivo e mais fácil de manusear como se pode ver pela Figura 2.4.



Figura 2.3 Imagem do sistema hiperespectral II.

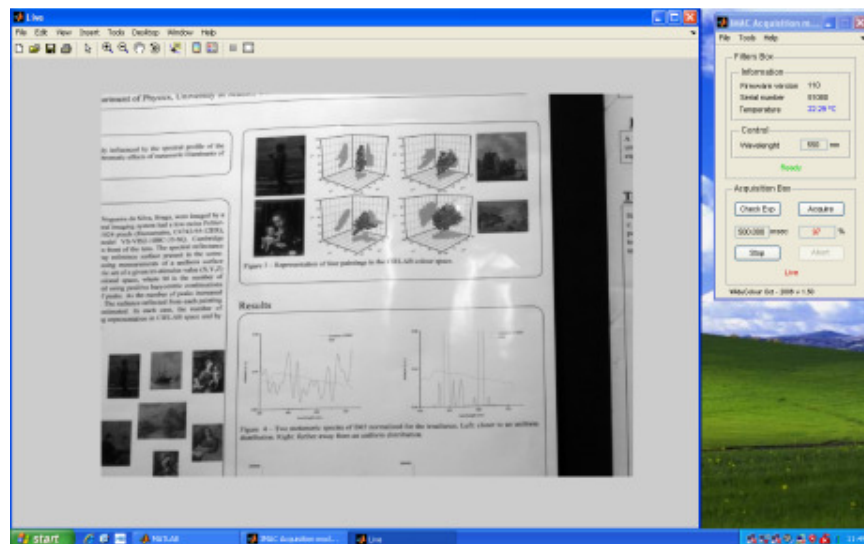


Figura 2.4 Aspecto do software de aquisição de imagens hiperespectrais II. À esquerda está a imagem dada pelo sistema e à direita está a caixa de controlo, onde é possível ver o estado da câmara e do filtro.

A redução do tempo de aquisição de imagem tem essencialmente a ver com o novo método implementado de aquisição dos tempos de exposição, que agora, tirando partido da linearidade entre o sinal no CCD e o tempo de exposição, é calculado usando uma função linear, ou seja para  $t = 0$   $S_m = 0$ ; então, é testado um tempo de exposição  $t$  e obtido o sinal  $S$ . Assim é calculado o declive da função linear através da fórmula:

$$m = \frac{t_1}{S}$$

Assim, usando o declive  $m$  o software calcula o tempo de exposição  $t$  através da fórmula:

$$t = m \cdot S_f$$

Onde  $S$  é o sinal pretendido, que será um valor entre 85% e 95% do valor máximo de saturação do CCD. Através deste método, ao contrário da versão anterior, o sistema apenas faz uma iteração, o que o torna bastante mais rápido.

### ***2.1.3 Aquisição das imagens hiperespectrais***

A aquisição das imagens hiperespectrais (Figura 2.5) foi efectuada segundo o protocolo constante em anexo. A iluminação usada para iluminar as pinturas era cuidadosamente posicionada de forma a ser o mais uniforme possível e de forma que a sua intensidade na pintura não ultrapassasse os 2000 Lux [43], isto para não correr riscos de causar danos nas pinturas [46]. Era ajustado o sistema de forma a ficar perpendicular à pintura. Depois de todos os ajustes da iluminação e posicionamento era então adquirida a matriz de tempos de exposição para os vários comprimentos de onda. De seguida era adquirida a imagem e em seguida era substituída a pintura por uma placa uniforme de reflectância conhecida para posteriormente ser compensada a não uniformidade do iluminante. Por ultimo a câmara era ocluída e adquirida uma imagem do ruído de fundo da câmara.

Depois dos dados recolhidos, era executado um software de processamento para a obtenção da matriz de reflectância, onde os dados eram compensados para todos os artefactos presentes na imagem, stray light ruído e não uniformidade do iluminante. A reflectância espectral de cada pixel das imagens das pinturas foi determinada através de uma referência cinzenta presente junto à pintura na altura da aquisição, enquanto que as não uniformidades da iluminação na pintura foram compensadas com a aquisição dos dados hiperespectrais de uma superfície uniforme localizada exactamente na mesma posição e sob as mesmas condições de iluminação da pintura como explicado acima.



Figura 2.5 Disposição utilizada para a aquisição de imagens hiperespectrais no museu.

## 2.2 Sistema de apresentação das imagens

Para a realização de experiências psicofísicas foi necessário encontrar um sistema que permitisse a reprodução das imagens de forma correcta, no que diz respeito à reprodução da cor. Assim, os dados hiperespectrais eram tratados computacionalmente, de forma a obter as simulações pretendidas e depois apresentados sob a forma de imagem num monitor CRT

devidamente calibrado (Sony GDM-F400T9). O monitor era controlado através de uma placa gráfica (VSG/5) da Cambridge Research Systems, a qual era responsável por converter os valores calculados dos triestímulos (X, Y, Z) de cada pixel, correspondentes aos dados espectrais, para valores RGB, os quais eram posteriormente projectados, sendo possível assim obter uma imagem o mais fiel possível a uma situação real. O sistema de apresentação das imagens permitia a interactividade através de controlo remoto sendo assim possível, na realização de experiências psicofísicas, a intervenção do observador, por exemplo na selecção de uma determinada imagem. Sempre que era iniciada uma nova experiência psicofísica, o sistema era devidamente calibrado e a respectiva calibração confirmada através do uso do telespectroradiómetro (SpectraColorimeter, PR-650; Photo Research Inc., Chatsworth, CA), onde eram comparados os valores pretendidos com os valores efectivamente obtidos no monitor.

## 2.3 Base de dados das pinturas

Para este trabalho foi construída uma base de dados hiperespectral de um total de vinte pinturas artísticas rerepresentadas na Figura 2.6. estas pinturas fazem parte da colecção existente no Museu Nogueira da Silva, Braga, Portugal. Os dados hiperespectrais das pinturas foram adquiridos em duas fases distintas. Onze das vinte pinturas (A, B, C, D, H, I, J, N, O, P e Q) foram adquiridas numa primeira fase e usando o sistema de imagiografia hiperespectral mais antigo, Sistema de Imagiografia Hiperespectral I, e as restantes nove (E, F, G, K, L, M, R, S e T) foram adquiridas posteriormente mas usando o novo sistema de imagiografia hiperespectral II.

A base de dados de pinturas foi composta por sete pinturas da época da Renascença pintadas em madeira, quatro do século XX pintadas em tela, duas do século XX pintadas em madeira, uma da época da Renascença pintada em cobre, uma do século XIX pintada em tela, três de época desconhecida pintadas em cobre, uma de época desconhecida pintada em madeira e uma de época desconhecida pintada em tela. Todas as fichas individuais constantes do arquivo do museu Nogueira da Silva podem ser consultadas no Anexo.



Figura 2.6 Imagens das pinturas usadas neste trabalho.

## 3 DETERMINAÇÃO PSICOFÍSICA DA MELHOR ILUMINAÇÃO PARA APRECIAR PINTURAS ARTÍSTICAS

### 3.1 Introdução

Actualmente os museus utilizam uma grande variedade de fontes de luz para iluminação de pinturas artísticas. O objectivo principal é a prevenção dos danos provocados pela radiação luminosa nas mesmas. Por outro lado a impressão visual de uma pintura artística é fortemente influenciada pela intensidade e perfil espectral do iluminante. O objectivo do trabalho descrito neste capítulo foi determinar a iluminação preferida pelos observadores ao apreciar reproduções de pinturas a óleo. Utilizou-se um monitor CRT devidamente calibrado e investigou-se como essa preferência se relaciona com a TCC da iluminação e com a diversidade cromática estimada a partir de imagens hiperespectrais das várias pinturas. As pinturas usadas foram todas da época da Renascentista e foram seleccionadas tendo em conta a compatibilidade do seu gamut de cor com o monitor CRT, uma condição necessária para a reprodução precisa da cor. A diversidade cromática das pinturas foi determinada através da representação das pinturas adquiridas no espaço de cor CIELAB e contando o número de cubos unitários preenchidos pelo volume de cor correspondente a cada pintura. Foi realizada uma experiência de comparação de pares com escolha forçada de imagens da mesma pintura mas sob pares de iluminantes diferentes com o objectivo de determinar a preferência dos observadores. De entre os cinco pares de iluminantes utilizados na experiência, os observadores preferiram sempre os iluminantes com maior TCC, à excepção de um par, onde segundo os dados obtidos, não foi expressa nenhuma preferência. Por outro lado o iluminante preferido foi também aquele que produz uma maior diversidade cromática nas pinturas. Para o caso do par em que não é obtida nenhuma preferência, o número de cores produzido por esses dois iluminantes é similar, sugerindo que a preferência possa ser influenciada pela diversidade cromática que a iluminação produz.



## 3.2 Métodos

### 3.2.1 *Imagiografia hiperespectral*

Foram adquiridas no Museu Nogueira da Silva, Braga, Portugal, imagens hiperespectrais de cinco de pinturas a óleo em madeira datadas da época Renascentista. A Figura 3.1 mostra as imagens a cores das cinco pinturas adquiridas. O sistema hiperespectral era composto por uma câmara digital arrefecida de baixo ruído com uma resolução espacial de 1344x1024 pixels e 12 bits (Hamamtsu, C4742-95-12ER, Hamamatsu Photonics K.K., Hamamatsu, Japão) e por um filtro de cristais líquidos electronicamente sintonizavel (Varispec, modelo VS-VIS2-10HC-35-SQ, Cambridge Research & Instrumentation, Inc., MA) montado em frente a uma objectiva. Os dados hiperespectrais foram adquiridos no museu sob níveis baixos de iluminação Solux.



Figura 3.1 Imagens a cores das cinco pinturas a óleo em madeira datadas da época Renascentista da colecção do Museu Nogueira da Silva, Braga, Portugal.

Através da multiplicação da reflectância espectral das pinturas pela radiância espectral dos cinco iluminantes utilizados, iluminantes standard CIE A, B e D<sub>65</sub> com TCC de 2856 K, 4874 K e 6500 K [12], respectivamente, lâmpada Solux com TCC de 4450 K e lâmpada de halogéneo com TCC de 3000 K, foi estimada a radiância espectral de cada pintura sob os cinco iluminantes (Figura 3.2).

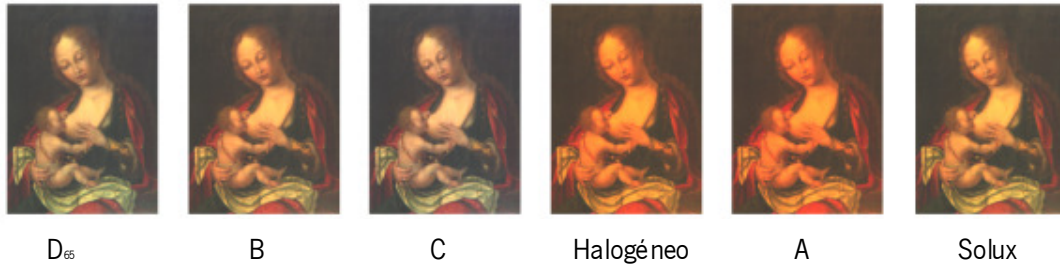


Figura 3.2 Representação de uma pintura sob os seis iluminantes utilizados.

### 3.2.2 Diversidade cromática

A diversidade cromática foi quantificada através da estimativa do número de cores discerníveis para cada pintura reproduzido sob cada um dos cinco iluminantes. A representação cromática das pinturas no espaço cromático aproximadamente uniforme CIELAB (Figura 3.3) foi determinada através da radiância espectral reflectida por cada pintura sob cada iluminante e através das funções de reprodução da cor CIE 1931 2 graus. Depois de obtido o volume de cor no espaço CIELAB, este foi segmentado em cubos unitários e assumido que o número de cubos preenchidos era igual ao número de cores discerníveis. Com este método de contagem, pares de cores representados em cubos diferentes são considerados como cores distinguíveis e pares de cores representados no mesmo cubo são considerados pares não distinguíveis. Este método assume que no espaço CIELAB as cores são distinguíveis apenas quando a distância euclidiana entre elas é de 1 unidade originando assim um número aproximado mas razoável do número de cores discerníveis [41, 74].

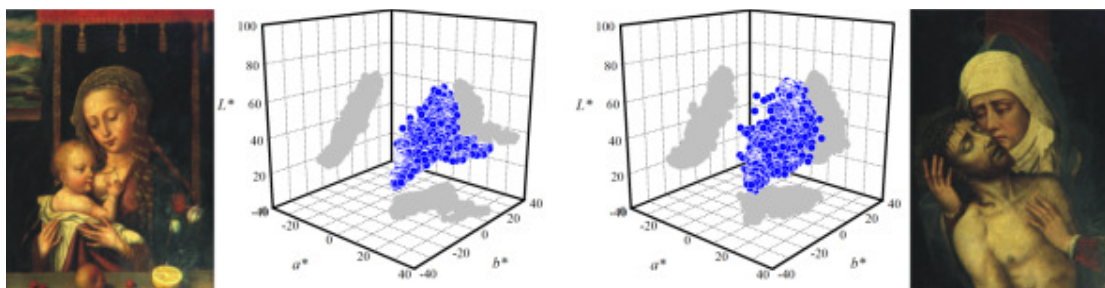


Figura 3.3 Representação de duas pinturas no diagrama CIELAB.

### 3.2.3 Estímulos e procedimento

As imagens das pinturas sob cada um dos cinco iluminantes foram apresentadas num monitor CRT a cores de ecrã plano de 17 polegadas (Trinitron, modelo GDM-F400T9; Sony Corp., Tokyo, Japão) controlado por uma placa gráfica de 24 bits por pixel em *true-color mode* (VSG 2/5; Cambridge Research Systems, Rochester, UK). A resolução do ecrã era de 750x600 pixels e tinha uma frequência de varrimento de 80 Hz. O sistema composto pela placa gráfica e monitor foi calibrado através do uso de um telespectroradiómetro (SpectraColorimeter, PR-650; Photo Research Inc., Chatsworth, CA). O erro de representação das coordenadas cromáticas CIE ( $x$ ,  $y$ ,  $Y$ ) de uma referência de teste branca foi inferior a 0,005 em ( $x$ ,  $y$ ) e inferior a 3% em  $Y$  (inferior a 5% para baixos níveis de luz). As imagens ocupavam um ângulo visual entre 8 e 15 graus. A posição de observação foi a 1 metro de distância do ecrã. A resolução das imagens foi reduzida para metade da original apenas para efeitos de visualização. A percentagem de pixels fora do gamut do monitor das imagens apresentadas foi em média inferior a 3,5%. Em todo o caso estes pixels foram aproximados para a cor mais próxima dentro do gamut.

Em cada ensaio experimental foi apresentado sequencialmente ao observador um par de imagens da mesma pintura, mas sob dois iluminantes diferentes. A Figura 3.4 ilustra a forma como foram apresentadas imagens. Foi utilizado um método de apresentação sequencial em alternativa ao método de comparação lado a lado pelo facto da apresentação sequencial permitir a adaptação cromática ao iluminante testado. Para permitir a adaptação cromática ao iluminante, cada imagem de cada par foi apresentada de forma temporalmente linear desde uma luminância de 1 cd/m<sup>2</sup> até 8 cd/m<sup>2</sup> demorando este processo um total de 5 segundos e permanecendo no ecrã a imagem com a luminância máxima durante 3 segundos. Os parâmetros temporais foram adequados tendo em conta que a maior parte da adaptação decorre durante 5 a 10 segundos [75-76]. Entre a apresentação de cada par e de cada ensaio o ecrã ficava escuro. Pelo facto de as pinturas serem relativamente escuras o máximo da luminância média de 8 cd/ m<sup>2</sup> corresponde a uma iluminação real nas pinturas entre os 200 e os 400 lux (dependendo da iluminação e da pintura), sendo o valor médio de 330 lux. Estes valores estão próximos dos níveis máximos de iluminação recomendados [43].

Foram utilizados na experiência quatro pares de iluminantes:  $D_{65}$ /Halogéneo, B/A, Solux/Halogéneo e  $D_{65}$ /Solux correspondendo a 209, 145, 108 e 71 *mired shifts* (unidade de medida para expressar as diferenças de temperatura de cor definida por:  $mired = 1000000/TCC$ ) respectivamente. Foi ainda utilizado um par adicional  $D_{65}/D_{65}$ , como par de controlo. Os pares B/A e Solux/Halogéneo têm TCC similares mas representam valores diferentes de *mired shifts*, para além disso, este último par representa fontes de luz reais utilizadas em museus em vez de iluminantes standards CIE.

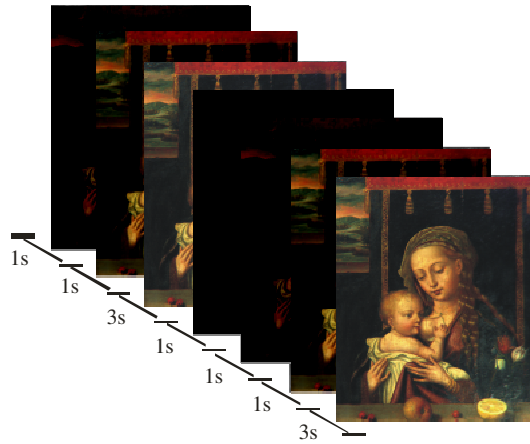


Figura 3.4 Sequência de apresentação das imagens de cada par no monitor CRT. Em cada ensaio experimental foi apresentado sequencialmente ao observador um par de imagens da mesma pintura, mas sob dois iluminantes diferentes. Para permitir a adaptação cromática ao iluminante, cada imagem de cada par foi apresentada de forma temporalmente linear desde uma luminância de  $1 \text{ cd/m}^2$  até  $8 \text{ cd/m}^2$  demorando este processo um total de 5 segundos e permanecendo no ecrã a imagem com a luminância máxima durante 3 segundos. Entre a apresentação de cada par e de cada ensaio o ecrã ficava escuro. A cada observador foi pedido que indicasse, em cada ensaio, a imagem que preferiam de cada par.

Foi pedido aos observadores que indicassem, em cada ensaio, a imagem que preferiam de cada par apresentado, dando as respectivas respostas através de um comando para o efeito (CB6 Response Box. Cambridge Research Systems, Rochester, UK). Não foi definido tempo limite para a resposta mas em média os observadores respondiam dentro do primeiro segundo após o final

da sequência de imagens. Cada novo ensaio iniciava dois segundos após a resposta anterior. Em cada sessão experimental era apenas testada uma pintura, sendo a ordem temporal das imagens em cada ensaio aleatória. Cada observador realizou vinte ensaios para cada par de iluminantes e assim foram realizados um total de 20x5x5 ensaios.

### ***3.2.4 Observadores***

Este estudo envolveu cinco observadores com acuidade visual de Snellen e visão das cores normais. A visão das cores foi testada através do teste de Farnsworth-Munsell 100-Tonalidades e do anomaloscópio de Rayleigh e Moreland. Foi obtido um consentimento informado por parte de todos os participantes e a experiência foi realizada de acordo com os princípios definidos pela Declaração de Helsinki.

## **3.3 Resultados**

A Figura 3.5a mostra o número de cores discerníveis estimado para cada pintura em função do iluminante sob o qual as pinturas foram reproduzidas. A Figura 3.5b representa os mesmos dados mas normalizados para a unidade. Pela análise dos dados pode-se constatar, que para todas as pinturas, o  $D_{65}$  origina o maior número de cores e o Halogéneo o menor. A variação do número de cores para os vários iluminantes é cerca de 10 % e é similar para todas as pinturas. O uso da fórmula de diferença de cor CIEDE2000 [23] ou o uso de esferas de diâmetro unitário em vez de cubos para calcular o número de cores discerníveis origina valores absolutos diferentes mas relações similares entre os pares de iluminantes testados.

A Figura 3.6a mostra, para cada pintura, a percentagem de ensaios em que os observadores seleccionaram a imagem com maior número de cores em função do par de iluminantes. Estes dados estão representados como a média dos cinco observadores e as barras de erro representam o valor positivo do SEM. A Figura 3.6b mostra os mesmos dados mas representados em função da diferença relativa do número de cores entre os pares de iluminantes. Nos pares  $D_{65}$ /Halogéneo, B/A, Solux/Halogéneo os observadores preferiram as imagens com maior número de cores que correspondem ao iluminante com maior temperatura

de cor. Nos pares  $D_{65}/\text{Solux}$  e  $D_{65}/D_{65}$  a preferência foi de 50%, ou seja, não foi demonstrada nenhuma preferência.

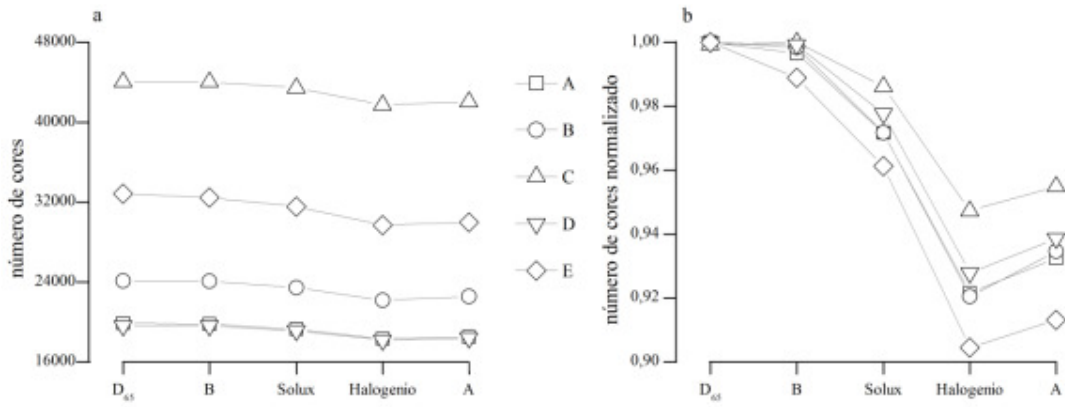


Figura 3.5 Número de cores discerníveis absoluto (a) e relativo (b) para cada uma das pinturas em função do iluminante sob o qual as pinturas foram reproduzidas.

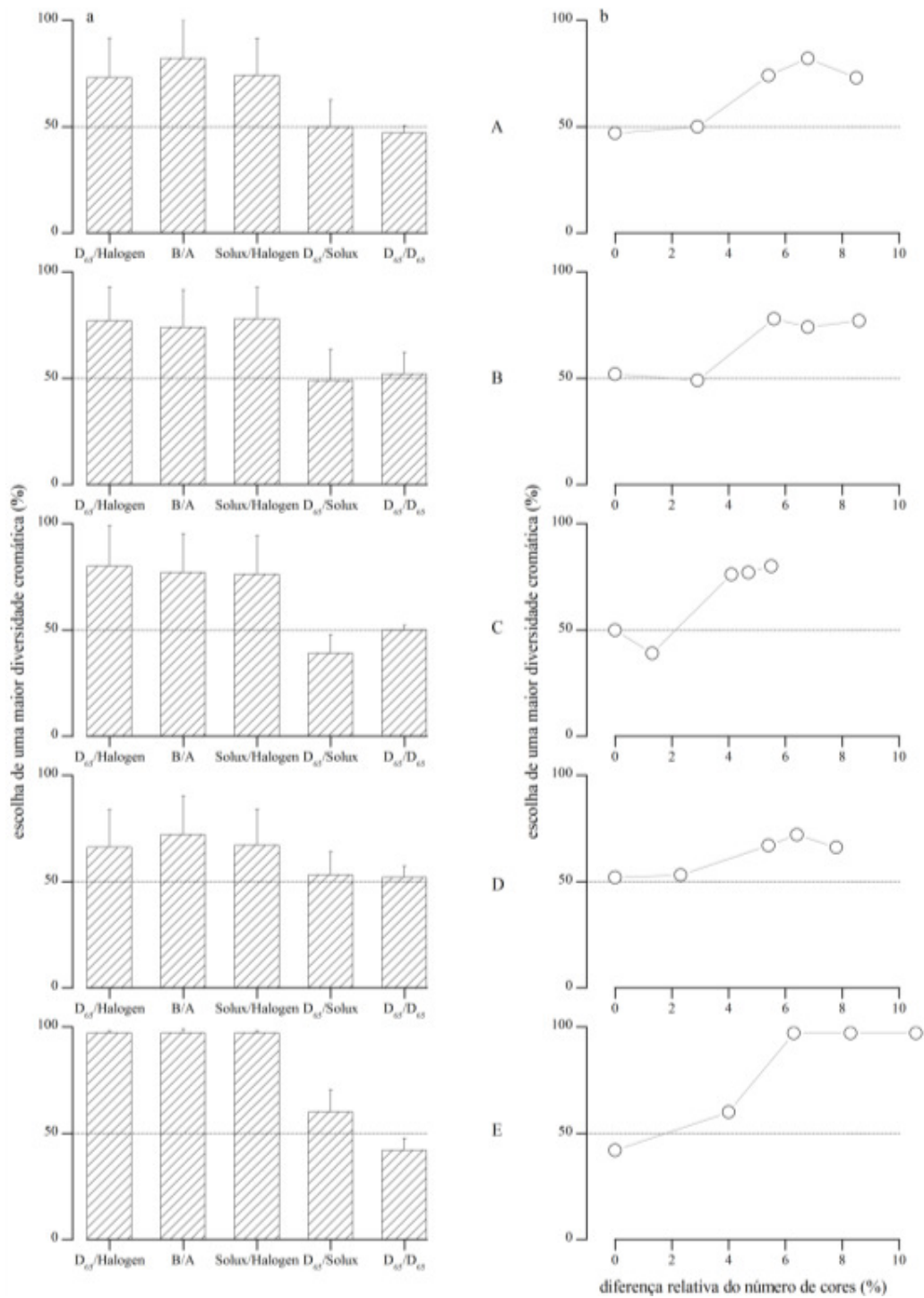


Figura 3.6 Percentagem de ensaios em que os observadores seleccionaram a imagem com maior número de cores em função do par de iluminantes (a) e em função da diferença relativa do número de cores (b). Os dados representados são a média dos cinco observadores e as barras de erro representam o valor positivo do SEM.

As análises de variância mostram um efeito significativo dos pares de iluminantes ( $F(4, 16) = 7.1, P < 0.01$ ) mas não mostram efeito das pinturas ( $F(4, 16) = 1.2, P > 0.1$ ). A Figura 3.6b mostra ainda que para o par de iluminantes em que a preferência é de 50%, a diferença do número de cores entre as imagens do respectivo par é baixa, cerca de 3%, o que não acontece nos pares onde existe uma preferência clara, em que as diferenças de números de cores são bastante maiores.

### 3.4 Discussão

Como se pode ver pelos resultados obtidos, para os iluminantes e pinturas testados neste estudo os observadores preferiram os iluminantes com maior TCC, excepto para o par  $D_{65}/\text{Solux}$ , ao qual correspondente a uma TCC de 6500 K e 4450 K e um *mired shift* de 71, em que não foi demonstrada qualquer preferência. Um outro resultado deste estudo é o facto do iluminante preferido ser o que produz uma maior diversidade cromática nas pinturas, assumindo que a diversidade cromática é quantificada através do número de cores discerníveis nas pinturas. Na situação em que não é demonstrada nenhuma preferência, o número de cores discerníveis produzido pelos respectivos iluminantes é bastante similar. Este resultado sugere que a preferência dos observadores possa ser influenciada pela diversidade cromática que o iluminante produz e não pela TCC. Por outro lado, pode argumentar-se que a diferença da TCC para o mesmo par,  $D_{65}/\text{Solux}$ , é demasiado baixa para ser percebida, embora seja pouco provável, uma vez que a constância da cor apenas funciona de forma aproximada nestas condições [77]. Para além disso o nível de intensidade da iluminação é igualmente importante para a impressão visual de uma pintura, sendo que este aspecto não foi testado neste trabalho.

O iluminante encontrado como sendo óptimo noutros estudos com TCC de 3600 K [52] não foi testado neste trabalho, mas foi estimada a diversidade cromática para a luz do dia com TCC de 3600 K e foi obtido um valor que se encontra entre o valor produzido pela Solux e pelo iluminante A [73]. Assim, tendo em conta o factor diversidade cromática, esta não deve ser a iluminação ideal para as pinturas testadas neste trabalho. Existem vários factores que possivelmente explicam as diferenças obtidas entre os resultados deste trabalho e os resultados obtidos por Scuello et al. 2004, os quais são apresentados de seguida. No estudo realizado por



Scuello e tal., foram usadas pinturas com paletes de cores diferentes, factor este que pode influenciar o iluminante ideal. Também os artefactos devidos à distorção cromática possivelmente introduzida pelo processo de impressão dos postais, uma vez que foram usadas reproduções das pinturas em postais, podem influenciar o iluminante ideal para as pinturas. Os resultados deste trabalho são, no entanto, consistentes com a nota de que a iluminação preferida está próxima da iluminação usada para a criação das próprias pinturas, considerando neste ponto que existem fortes evidências de que a luz natural era utilizada nos estúdios de pintura [54] e que o estúdio ideal deveria receber a luz de norte [55].

O contexto espacial actual das pinturas nos ambientes de museus é variado, as pinturas tanto podem ser iluminadas por fontes de luz localizadas, pela iluminação difusa da sala ou pela combinação de ambas. O estímulo visual provocado por um monitor CRT quando este mostra uma pintura está muito próximo da primeira condição enumerada anteriormente e por consequência, os efeitos de adaptação visual a uma campo aberto como o de uma sala de um museu não foram testados. Por outro lado, a TCC e os níveis de iluminação da sala talvez possam influenciar a impressão que os observadores têm das pinturas. Assim, os resultados deste trabalho talvez se apliquem apenas no caso de a iluminação ser uniforme.

A comparação entre os diferentes iluminantes é sequencial em vez de lado a lado com o objectivo de permitir a adaptação visual mas é possível que mesmo assim a memória visual da cor tenha influenciado este tipo de comparação [78]. Estes efeitos são constantes para todas as condições da experiência, sendo assim minimizados pelo design da experiência.

A técnica de determinação do número de cores é apenas uma aproximação, uma vez que não tem em conta os efeitos de adaptação, estrutura espacial e não foi considerada também a não uniformidade do espaço CIELAB [79]. Para além disso o facto de serem usados cubos para estimar o número de cores, provavelmente, origina uma estimativa por defeito. Este facto não compromete os resultados principais, onde o aspecto principal é a relação do número de cores gerada pelos diferentes iluminantes sendo esta menos susceptível de ser afectada pelas aproximações do que os valores absolutos do número de cores.

As pinturas testadas são todas do mesmo tipo e são constituídas pelo mesmo género de pigmentos, assim, as conclusões deste trabalho não devem ser generalizadas para outros tipos de pinturas sem a realização dos devidos estudos. Porém, a ideia de que a diversidade cromática pode influenciar a impressão e a preferência dos apreciadores de pinturas pode ser útil para o desenho da iluminação dos museus.



## 4 TEMPERATURA CORRELACIONADA DE COR DA ILUMINAÇÃO PREFERIDA POR OBSERVADORES NA APRECIÇÃO DE PINTURAS ARTÍSTICAS

### 4.1 Introdução

Tendo em conta os resultados do capítulo anterior, o objectivo do trabalho descrito neste capítulo foi testar a preferência dos observadores para uma amostra de iluminantes maior ao longo da curva de TCC da luz do dia. O estudo foi realizado com uma amostra de 80 observadores, estudantes e visitantes de museus, e com 11 pinturas de épocas diferentes. A experiência foi baseada em estímulos criados a partir dos dados hiperespectrais das pinturas, o que permitiu representações precisas das pinturas num monitor CRT colorimetricamente calibrado. Os observadores ajustaram a TCC do iluminante para obter a melhor impressão visual. Os resultados obtidos mostram que a distribuição das preferências dos observadores tem um máximo para uma TCC de cerca de 5100 K e este valor não depende do tipo de observadores, estudantes ou visitantes de museus, nem do grau de adaptação à cor da iluminação. Estes resultados mostram que os observadores preferem uma iluminação mais azulada do que aquela que normalmente é usada nos museus.

### 4.2 Métodos

#### *4.2.1 Dados hiperespectrais*

Na Figura 4.1 estão representadas as imagens a cores das 11 pinturas usadas neste trabalho, estas foram seleccionadas da colecção do Museu Nogueira da Silva em Braga. A amostra é constituída por 11 pinturas a óleo, 7 da época da Renascença pintadas em madeira (A-E, H e I) e 4 (F, G, J e K) do século XX pintadas em tela. Duas das mais recentes pinturas (J e K) são de Henrique Medina, uma (F) de Carlos Reis e outra (G) de Veloso Salgado, todos pintores Portugueses.



Figura 4.1 Imagens a cores das 11 pinturas a óleo usadas neste trabalho. Estas pinturas constam da colecção do Museu Nogueira da Silva em Braga. A amostra é constituída por 11 pinturas a óleo, 7 da época da Renascença pintadas em madeira (A-E, H e I) e 4 (F, G, J e K) do século XX pintadas em tela. Duas das mais recentes pinturas (J e K) são de Henrique Medina, uma (F) de Carlos Reis e outra (G) de Veloso Salgado, todos pintores Portugueses.

Cada uma das pinturas foi digitalizada no museu através da utilização do sistema hiperespectral I. Durante a aquisição, as pinturas foram iluminadas com baixos níveis de luz utilizando para o efeito lâmpadas Solux. A distância de aquisição da imagem e os ajustes do sistema óptico produziram uma resolução espacial cerca de 0,5 mm.

#### 4.2.2 Estímulos

Foi assumido que as pinturas foram iluminadas por iluminantes da luz do dia com TCC desde 25000 K até 3600 K gerados com base num grupo de funções através de análise de componentes principais e com base em 622 amostras da luz do dia [12, 80] e correspondente aos iluminantes D recomendados pela CIE [81] (excepto para o limite inferior que fica abaixo dos 4000 K recomendados). O *locus* da luz do dia natural pode ser representado por uma linha no espaço cromático CIE 1931 ( $x, y$ ) e assim cada iluminante pode ser representado pela sua coordenada cromática CIE. No contexto deste trabalho foram seleccionados 21 iluminantes igualmente espaçados segundo a coordenada cromática CIE  $x$ ; seguidamente estes foram referidos de acordo com a sua TCC ou pela sua correspondente CIE  $x$ , representada por  $x_6$ . A radiância espectral reflectida por cada uma das pinturas sob cada um dos iluminantes foi estimada através da multiplicação das funções de reflectância espectral das pinturas pela radiância espectral dos iluminantes. A Figura 4.2 (esquerda) representa o espectro normalizado do iluminante luz do dia para três TCC: 3600 K, 6500 K ( $D_{65}$ ) e 25000 K; à direita está representado, no diagrama cromático CIE ( $x, y$ ), o *locus* das cromaticidades dos iluminantes da luz do dia usados neste trabalho. Foram seleccionados os iluminantes da luz do dia pelo facto de estes representarem uma larga variedade de TCC, com extremos representativos da iluminação ao amanhecer e ao pôr do sol [82]. O iluminante Halogéneo e o iluminante Standard A têm TCC baixas e para além disso foram já testados noutra estudo (capítulo anterior) [26].

As imagens das pinturas reproduzidas sob cada um dos iluminantes foram apresentadas num monitor CRT a cores RGB de ecrã plano de 17 polegadas (Trinitron, modelo GDM-F400T9; Sony Corp., Tokyo, Japão) controlado por uma placa gráfica de 24 bits por pixel em *true-color mode* (VSG 2/5; Cambridge Research Systems, Rochester, UK). O sistema composto pela placa gráfica e monitor foi calibrado para a cor e luminância através do uso de um telespectroradiómetro (SpectraColorimeter, PR-650; Photo Research Inc., Chatsworth, CA). O erro de representação das coordenadas cromáticas CIE ( $x, y, Y$ ) de uma referência de teste branca foi inferior a 0,005 em ( $x, y$ ) e inferior a 3% em  $Y$  (inferior a 5% para baixos níveis de luz). A resolução do ecrã era de 750x600 pixels e tinha uma frequência de varrimento de 80 Hz. As imagens ocupavam um ângulo visual entre 12 e 19 graus e a distância de observação foi 1 metro de distância do ecrã. A resolução das imagens foi reduzida para metade da original apenas para efeitos de visualização.

Todas as imagens foram apresentadas com uma luminância média de 8 cd/m<sup>2</sup>, correspondendo este nível de luminância a uma iluminação real nas pinturas de 200 a 400 lux (dependendo do iluminante e da pintura) sendo a média de 330 lux, valor que está próximo do nível de iluminação máximo recomendado [43]. Devido às limitações do *gamut* de cor do monitor, nem todos os pixels foram reproduzidos com exactidão, a percentagem de pixels fora do gamut foi em média inferior a 2,3%, sendo esses pixels aproximados aos valores RGB mas próximos que se encontravam dentro do *gamut* do monitor. Esta aproximação produziu um erro médio  $\Delta E_{ab} = 0,30$  no espaço CIELAB. A Figura 4.3 representa, para duas pinturas diferentes H (esquerda) e K (direita), a percentagem de pixels fora do *gamut* (linha) e o erro cromático médio (linha tracejada)  $\Delta E_{ab}$  no espaço CIELAB resultante da aproximação efectuada. Todos os valores estão apresentados em função da coordenada CIE  $x_0$  do iluminante. O nível de precisão obtido é adequado para o tipo de trabalho em causa, uma vez que a percentagem de pixels fora do *gamut* é baixa e em média o erro de cor é inferior ao limite detectável [1, 83].

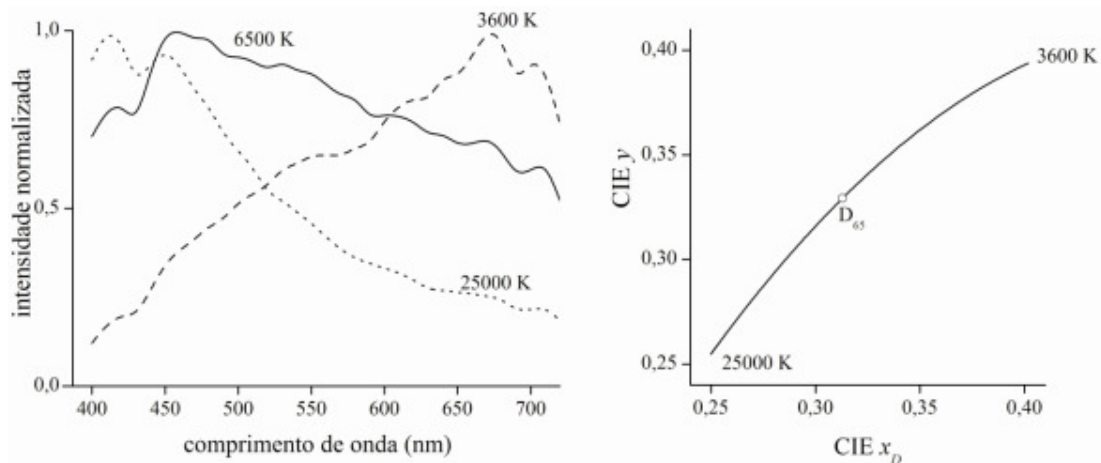


Figura 4.2 Esquerda: espectro normalizado do iluminante luz do dia para três TCC: 3600 K, 6500 K (D<sub>65</sub>) e 25000 K. Direita: *locus* das cromaticidades dos iluminantes da luz do dia usados neste trabalho representado no diagrama cromático CIE (x, y).

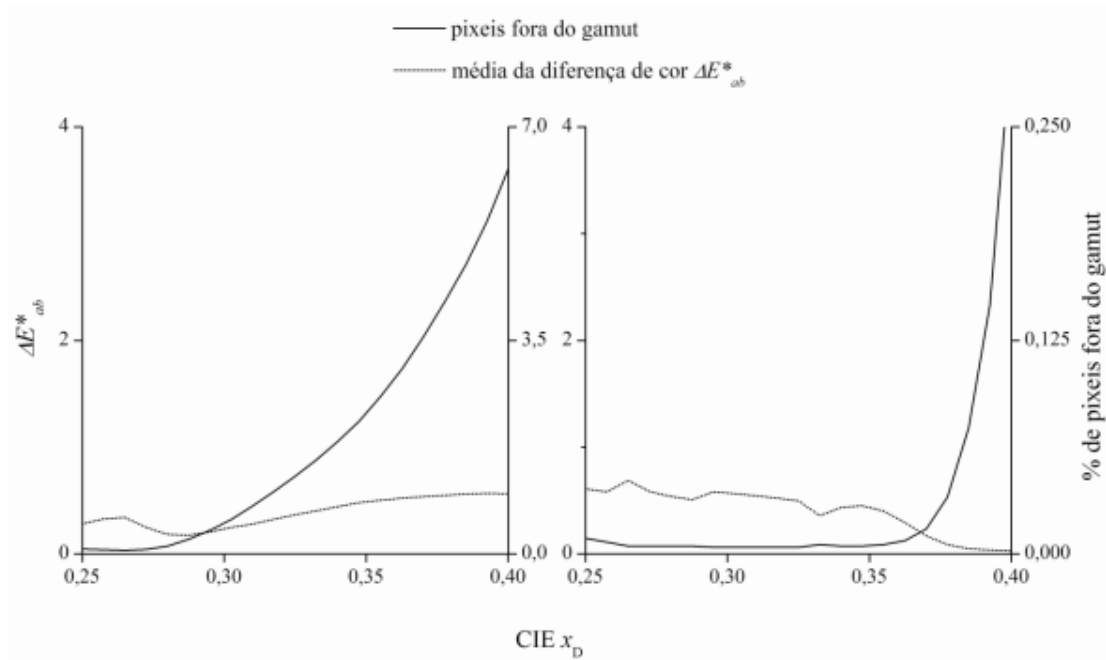


Figura 4.3 Percentagem de pixels fora do *gamut* (linha) e o erro cromático médio (linha tracejada)  $\Delta E_{ab}^*$  no espaço CIELAB resultante da aproximação efectuada para duas pinturas diferentes H (esquerda) e K (direita). Todos os valores estão apresentados em função da coordenada CIE  $x_D$  do iluminante.

#### 4.2.3 Procedimento

Metade das sessões experimentais foram realizadas no laboratório, tendo como amostra de observadores estudantes de licenciatura; a outra metade das sessões foi realizada no museu, tendo como amostra de observadores os visitantes do próprio museu. O sistema de visualização foi o mesmo em ambas as localizações, sendo sempre colocado numa sala cujo nível de iluminação não ultrapassava em média as 2 cd/m<sup>2</sup>. Com o objectivo de estudar a influência da adaptação à cor do iluminante foram testadas duas condições diferentes, numa as pinturas eram apresentadas sobre um fundo preto e noutra as pinturas eram apresentadas sobre um fundo cinzento subentendendo um ângulo visual de 22 graus e iluminado com o mesmo iluminante da pintura com uma luminância de 8 cd/m<sup>2</sup>. Os observadores foram instruídos para ajustarem a TCC da iluminação para que esta produzisse a melhor impressão visual da pintura. As instruções experimentais foram dadas aos observadores de forma escrita (ver texto abaixo) e



apresentadas no ecrã, antes do início de cada sessão experimental. Em cada ensaio o observador seleccionava a iluminação preferida para a pintura através de um comando remoto (CB6 Response Box. Cambridge Research Systems, Rochester, UK) que permitia a alteração do iluminante dentro do intervalo de TCC seleccionado. Não foi estabelecido tempo limite para resposta e em cada sessão eram testadas todas as pinturas nas duas condições espaciais, ou seja, com fundo preto e com fundo cinzento. As pinturas e as condições espaciais foram apresentadas em ordem aleatória. A amostra de observadores estudantes fez um total de três sessões em dias diferentes, em quanto que a amostra de observadores visitantes do museu fez apenas uma sessão.

#### ***4.2.4 Instruções***

O texto apresentado com as instruções foi o seguinte: “Imagine que está a apreciar uma pintura num museu e tem a possibilidade de controlar a iluminação. Com o comando fornecido é possível controlar a iluminação da pintura presente no monitor. A tarefa que lhe pedimos é que regule a iluminação da pintura de forma a escolher aquela que prefere usar para a sua apreciação.”

#### ***4.2.5 Observadores***

Como já foi referido, foram utilizados dois grupos de observadores nas sessões experimentais. Um grupo foi composto por 40 estudantes de licenciatura, 12 do género masculino e 28 do género feminino com idades médias de 22 anos com um desvio padrão da amostra de 1 ano. O outro grupo foi composto por 40 observadores 20 do género masculino e 20 do género feminino, com uma idade média de 35 anos, sendo o desvio padrão da amostra de 13 anos. Os observadores do segundo grupo foram seleccionados de entre os visitantes do museu durante o verão de 2006. Os observadores foram devidamente informados acerca do estudo e apresentavam acuidade visual de Snellen e visão das cores normal. A visão das cores foi testada através do anomaloscópio de Rayleigh e Moreland. Foi obtido um consentimento informado por parte de todos os participantes e a experiência foi realizada de acordo com os princípios definidos pela Declaração de Helsinki.

### 4.3 Resultados

A Figura 4.4 mostra as respostas dos observadores (círculos) para duas das onze pinturas (H e K à esquerda e direita, respectivamente) representadas pela frequência do iluminante seleccionado em função da coordenada CIE  $x_0$ . Os dados da figura, baseados em 40 observadores estudantes de licenciatura e em três ensaios por observador, foram obtidos com as pinturas sobre um fundo cinzento. As linhas representam ajustes Gaussianos aos dados e a TCC apresentada em cada um dos casos corresponde ao valor máximo de cada Gaussiana. As distribuições de respostas apresentam claramente diferentes máximos mas podem ser razoavelmente ajustadas a uma função Gaussiana. Os dados para as restantes pinturas e condições apresentam padrões similares embora com valores máximos da Gaussiana diferentes, dependendo da pintura em causa. A

Figura 4.5 mostra as respostas dos observadores (círculos) no mesmo formato da Figura 4.4 para as quatro condições da experiência. Os dados representam as respostas de todos os observadores e para todas as pinturas, as linhas representam o ajuste Gaussiano aos dados, para cada uma das condições. Os valores de TCC indicados na figura representam a TCC correspondente a cada máximo de cada Gaussiana. A posição do máximo da Gaussiana tem pouca variação em função da condição testada, sugerindo que estas são equivalentes. Através da utilização do teste de Kruskal-Wallis não foram detectadas diferenças significantes entre as quatro condições testadas ( $p > 0,9$ ). A largura da distribuição de respostas é maior para as medidas efectuadas no museu do que para as medidas efectuadas no laboratório, isto pode dever-se ao facto de os observadores no museu apenas terem efectuado uma sessão e no laboratório terem efectuado três sessões. Também, os observadores no museu estavam menos familiarizados com o computador e seus controlos do que os estudantes, facto este que pode ter contribuído para o aumento do ruído nos dados dos observadores do museu.

Na Figura 4.5 está também representada (barras) a frequência de ocorrência do máximo das distribuições de respostas dos observadores para cada pintura (por questões de visualização as frequências estão escaladas por um factor de 10). Estes valores foram obtidos através do ajuste de curvas Gaussianas aos dados de cada uma das pinturas e determinando o valor da TCC correspondente ao máximo do ajuste. Estes dados, para as pinturas individuais, mostram que a

preferência dos observadores está próxima da preferência obtida para os dados globais, mostrando apenas uma variação moderada ao longo das várias pinturas.

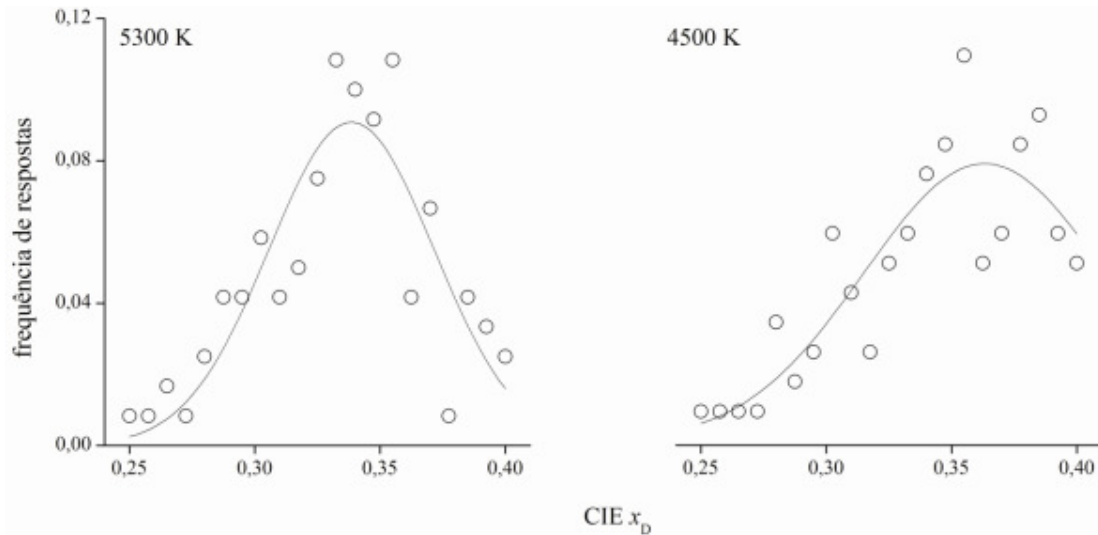


Figura 4.4 Respostas dos observadores (círculos) para duas das onze pinturas, H à esquerda e K à direita, representadas pela frequência do iluminante seleccionado em função da coordenada  $CIE x_D$  do iluminante. Os dados da figura, baseados em 40 observadores estudantes de licenciatura e em três ensaios por observador, foram obtidos com as pinturas sobre um fundo cinzento. As linhas representam ajustes Gaussianos aos dados e a TCC apresentada em cada um dos casos corresponde ao máximo de cada ajuste.

Para avaliar o quanto uma fonte de luz com uma TCC obtida através dos dados globais é adequada para cada pintura individualmente, foi determinada a relação entre a frequência máxima obtida para cada pintura e a sua correspondência com a TCC obtida através dos dados globais. Os valores médios obtidos foram de 89% e 92% para os fundos preto e cinzento, respectivamente, para os dados obtidos no museu e de 89% e 94% para o fundo preto e cinzento, respectivamente, para os dados obtidos no laboratório. Estes resultados mostram que uma única TCC pode ser adequada para o conjunto de pinturas testadas neste trabalho.

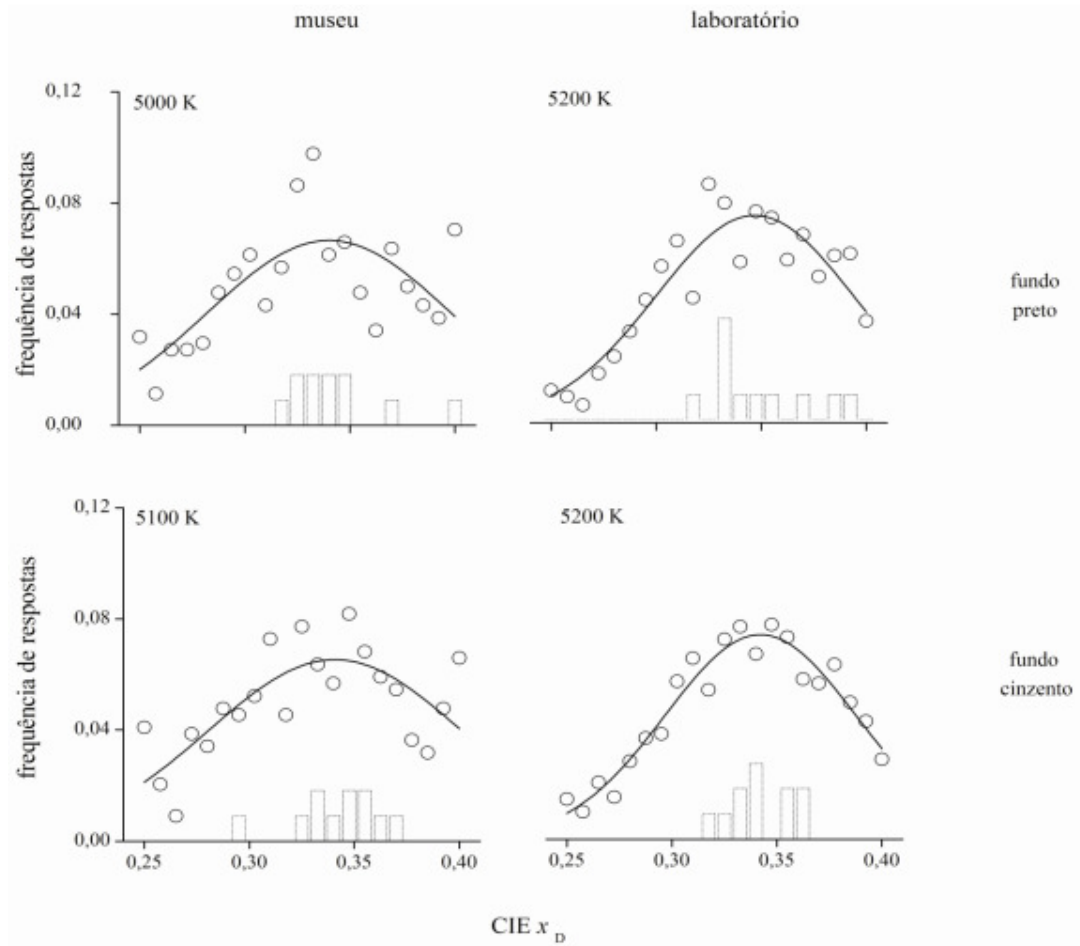


Figura 4.5 Respostas dos observadores (círculos) representadas pela frequência do iluminante seleccionado em função da coordenada do iluminante para as quatro condições da experiência. Os dados representam as respostas de todos os observadores e para todas as pinturas, as linhas representam o ajuste Gaussiano aos dados, para cada uma das condições. Os valores de TCC indicados na figura são os correspondentes a cada máximo de cada Gaussiana. Está também representada (barras) a frequência de ocorrência do máximo das distribuições de respostas dos observadores para cada pintura (por questões de visualização as frequências estão escaladas por um factor de 10).

## 4.4 Discussão

Neste trabalho foi encontrada uma iluminação da luz do dia com uma temperatura correlacionada de cor de cerca de 5100 K como sendo a que representa de forma mais adequada a preferência dos observadores. Foi detectada alguma variação com as pinturas, no entanto esta TCC parece ser adequada para todas elas. Este resultado mostrou-se bastante robusto quer em relação ao tipo de observadores, estudantes ou visitantes de museus, quer em relação à adaptação ao iluminante. Os resultados são ainda consistentes com os resultados do estudo anterior, o qual usou um método diferente e uma amostra de observadores e pinturas significativamente mais reduzida [26]. Este trabalho é ainda mais robusto e mais consistente pelo facto de permitir a escolha do iluminante de entre um largo espectro de TCC. Estes resultados estão também de acordo com um estudo onde se conclui que o *gamut* de cor associado com TCC inferiores a 5500K era menor do que o associado com TCC mais elevadas [70].

Em estudos efectuados com recurso a reproduções de pinturas em postais [52], o iluminante óptimo encontrado foi um iluminante com uma TCC de 3600 K. Os dados decorrentes do trabalho aqui apresentado mostram que para essa TCC (correspondente a uma coordenada  $x_0$  cerca de 0,4) a frequência de selecção desse iluminante é cerca de 65% do máximo, que torna este iluminante aceitável mas não óptimo para as pinturas testadas, porém, um estudo posterior [53] dos mesmos autores sugeriu que devido aos largos intervalos das amostras, o valor da TCC óptimo poderia estar subestimado.

Depois de se analisar os resultados aqui apresentados e outros estudos semelhantes é suscitada uma questão fundamental: o que determina a preferência dos observadores? Num dos estudos efectuados acerca deste tópico foi sugerido que os observadores escolhiam o iluminante que causava uma impressão visual nem de muito quente nem de muito frio [53]. No decorrer do trabalho aqui apresentado e usando a mesma configuração descrita nos métodos, mas apenas mostrando no monitor um fundo cinzento com a cor do iluminante, foi pedido a 10 observadores (nenhum deles esteve envolvido na experiência com as pinturas) para ajustar a cor do iluminante por forma a que este causasse uma impressão de nem muito quente nem muito frio. De facto foi obtido como resultado a este teste a selecção por parte dos observadores de uma TCC de cerca

de 5100 K, sugerindo que realmente a impressão subjectiva de nem muito quente nem muito frio possa ter determinado a preferência, mas fica por explicar as variações de preferência para as diferentes pinturas.

O trabalho anterior [26] (capítulo anterior) sugeriu que a diversidade cromática, considerada como sendo o número de cores discerníveis [42, 74, 84], poderia influenciar a preferência dos observadores. Com o objectivo de testar a influência deste factor, foi estimado o número de cores discerníveis para cada pintura e para cada um dos 21 iluminantes usados. Foi determinada a representação cromática das pinturas no espaço aproximadamente uniforme CIELAB e calculado o número de volumes unitários preenchidos nesse espaço (para mais detalhes acerca deste cálculo ver Capítulo 3). Este procedimento produz uma estimativa aproximada mas razoável do número de cores discerníveis [41, 70, 74]. A Figura 4.6 representa, como ilustração, a variação relativa do número de cores para duas das pinturas (A e B à esquerda e direita, respectivamente) expressa em função da coordenada CIE  $x_0$  do iluminante luz do dia. Através do uso de um outro método para estimar o número de cores discerníveis, o qual em vez de usar cubos como volumes unitários usa esferas de diâmetro unitário [42], ou através do uso da fórmula de diferença de cor CIEDE2000 [23], foram obtidos valores absolutos diferentes mas valores relativos semelhantes. A correlação entre a preferência dos observadores para cada pintura, expressa pela TCC correspondente ao máximo da resposta dos observadores e o número de cores discerníveis, correspondente ao máximo da distribuição do número de cores é apresentada na Figura 4.7. O gráfico apresentado na figura é baseado nos dados experimentais psicofísicos obtidos e a linha recta representa uma regressão linear. O valor do  $R^2$  encontrado para esta regressão foi de 0,60, o qual é estatisticamente significativo ( $p = 0,02$ ). Estes dados sugerem que a diversidade cromática, estimada através do número de cores discerníveis, pode estar envolvida na preferência dos observadores.

O factor diversidade cromática, que é quantificado neste trabalho, representa apenas um dos métodos para caracterizar os efeitos cromáticos de uma fonte de luz. Um outro método utilizado para quantificar esses efeitos é a avaliação da reprodução da cor, que normalmente é avaliado pelo *Color Rendering Index* (CRI) definido pela CIE [7, 85-86]. Este índice tem no entanto algumas limitações, uma vez que por exemplo não consegue quantificar o número de cores que

conseguimos ver numa cena complexa [87] tornando assim necessário encontrar uma quantidade complementar [70].

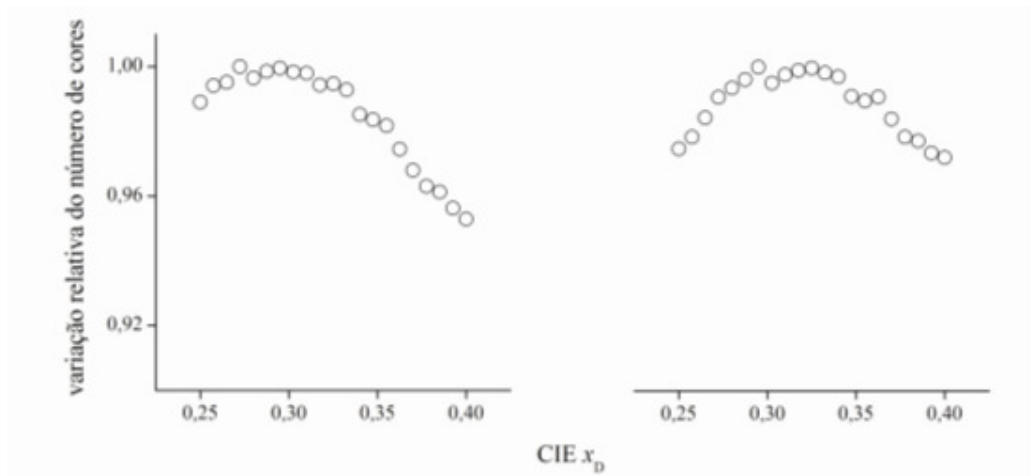


Figura 4.6 Variação relativa do número de cores para duas das pinturas (A e B) expressa em função da coordenada CIE  $x_D$  do iluminante luz do dia.

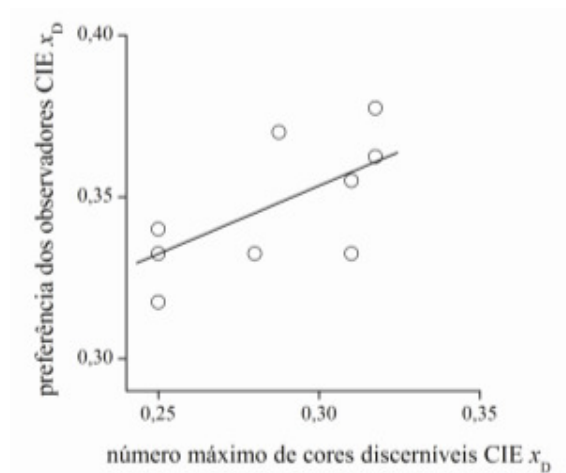


Figura 4.7 Correlação entre a preferência dos observadores para cada pintura, expressa pela TCC correspondente ao máximo da resposta dos observadores e a TCC estimada através do máximo do número de cores para a pintura correspondente. São apenas visíveis nove símbolos devido a sobreposição. A

linha recta representa uma regressão linear. O valor do  $R^2$  encontrado para esta regressão foi de 0,60, o qual é estatisticamente significativo ( $p = 0,02$ ).

Muitos outros factores, difíceis de quantificar, podem influenciar a preferência dos observadores. Alguns desses factores podem ser o contraste de luminância, o contraste cromático e a naturalidade das cores dos elementos naturais nas cenas representadas pelos pintores. Estes e outros aspectos podem naturalmente ser otimizados através da criação de condições de iluminação semelhantes às utilizadas na altura da criação da pintura. É assumido por alguns investigadores que as pinturas mais antigas eram pintadas à luz do dia [54-55], correspondendo esta iluminação a uma TCC de pelo menos 5700 K [82]. Esta linha de interpretação, da forma como eram pintadas as obras de arte, deve ser explorada com algum cuidado uma vez que, embora muitos artistas tivessem seguido a indicação de Leonardo da Vinci [88] ao pintar à luz do dia, eram também usadas fontes de luz artificiais para pintar [56-57]. Um outro aspecto com relevância na apreciação de pinturas é o padrão da posição do olhar dos observadores quando estes estão a visualizar uma pintura, estes padrões revelam uma saliência perceptual para zonas específicas da pintura e que podem ser influenciadas igualmente pela iluminação [89].

Neste trabalho foram testadas vários tipos de pinturas, mas a amostra é limitada, o que implica algum cuidado na generalização destes resultados para outros tipos de pinturas ou obras de arte. Também a experiência foi efectuada com o recurso a um monitor, que embora este seja capaz de representar as cores com uma precisão bastante elevada, o estímulo continua a ser apenas uma representação da pintura e não a pintura real. Talvez as pinturas visualizadas com o tamanho real no museu causem uma impressão visual diferente. Neste trabalho não foi testado o efeito da intensidade luminosa, este pode igualmente influenciar a temperatura de cor preferida pelos observadores para o iluminante [51], embora a sensação de nem muito quente nem muito frio parecer não ser influenciada pela intensidade [53].





## 5 OPTIMIZAÇÃO ESPECTRAL DA ILUMINAÇÃO DE PINTURAS ARTÍSTICAS

### 5.1 Introdução

Os efeitos visuais na reprodução da cor em pinturas causados por diversas fontes de luz foram já estudados de forma empírica [26, 28, 52] e os resultados obtidos em laboratório (capítulos anteriores) usando dados hiperspectrais de diversas pinturas para experiências em monitores CRT calibrados, mostram que uma iluminação correspondente à luz do dia com uma TCC de cerca de 5100 K representa a preferência de um grupo de observadores independentes (Capítulo 4). Porém, a questão acerca da possível existência de outras distribuições espectrais para além da luz do dia melhores no contexto da apreciação de pinturas não foi ainda testada, sendo este um tópico com particular relevância hoje em dia, quando estão a ser desenvolvidos LEDs com uma vasta variedade de distribuições espectrais [58].

As análises efectuadas com experiências psicofísicas usando dados hiperspectrais de pinturas sugerem uma correlação significativa entre a preferência dos observadores e o número de cores percebidos ao olhar para as pinturas [26, 28]. Por outro lado, um estudo recente acerca dos efeitos visuais causados por lentes coloridas, mostrou que um espectro de transmitância compostos por três bandas maximiza o número de cores percebido por tricromatas normais [90]. Este resultado sugere que talvez possa ser obtido uma optimização semelhante através do espectro do iluminante.

Neste capítulo é apresentado um método de optimização espectral para iluminação de pinturas artísticas baseado nas estimativas do número de cores percebidos ao olhar para as respectivas pinturas e a obtenção de um espectro óptimo para uma determinada colecção de pinturas.

Os resultados mostram uma pequena variação do perfil do espectro do iluminante ideal ao longo das várias pinturas e um espectro médio com três máximos bem definidos, um na região do

azul, outro no verde e outro no vermelho e com uma TCC correspondente de cerca de 5800K. Estes espectros maximizados produzem um aumento do número de cores de cerca de 80% em relação ao iluminante  $D_{65}$ . Estes resultados sugerem que um iluminante com uma distribuição espectral de três bandas talvez seja ideal para a apreciação de pinturas artísticas e suportam os recentes desenvolvimentos na criação de fontes de luz sintonizáveis.

## 5.2 Métodos

Para a análise efectuada neste trabalho, foi usada uma base de dados hiperespectral composta por onze pinturas adquiridas no Museu Nogueira da Silva, Braga, Portugal. A Figura 5.1 mostra as imagens das onze pinturas utilizadas. Esta amostra é composta por sete pinturas da época da Renascença pintadas em madeira (de A a E, G e J) e quatro (F, H, I e K) do século XX pintadas em tela. Duas das pinturas mais recentes (F e K) foram criadas por Henrique Medina, uma (H) por Carlos Reis e outra (I) por Veloso Salgado, todos pintores portugueses.

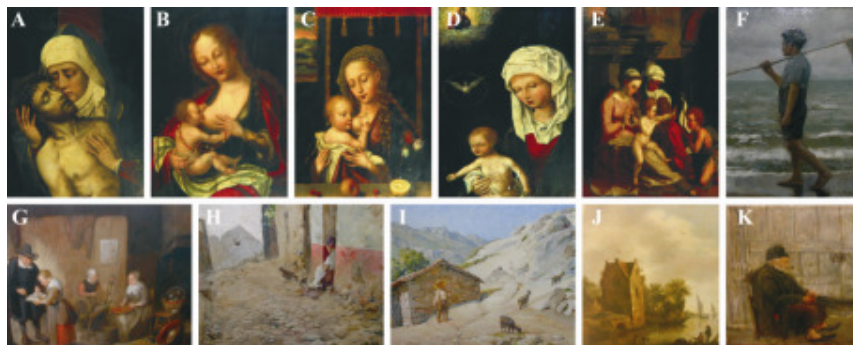


Figura 5.1 Imagens a cor das onze pinturas analisadas.

Depois de obtidas as funções de reflectância, foi calculado o volume de cor para cada pintura no espaço CIELAB assumindo o iluminante standard  $D_{65}$  e o Observador Standard CIE 1931. Em seguida foi estimado o número de cores, para isso, o volume de cor correspondente a cada pintura foi segmentado em cubos de lado unitário e o número de cores correspondia assim ao número de cubos preenchidos, ou seja, que continham pelo menos um pixel da imagem. Esta metodologia origina uma aproximação mas é uma estimativa razoável [41] e no processo de

otimização é preferível utilizar esta metodologia do que outras mais complexas, como por exemplo a segmentação em esferas, uma vez que esta última necessita de uma maior poder de computação [70, 91]. Pelo facto de a fórmula de diferença de cor CIELAB apenas representar uma aproximação às diferenças perceptivas [92-94], depois da otimização foi também estimado o número de cores com base na fórmula de diferença de cor CIEDE2000 [23], em que os parâmetros  $k_L$ ,  $k_C$  e  $k_H$  da fórmula CIEDE2000 foram fixados para unidade [81], valores por defeito [95]. Para mais detalhes acerca deste método consultar [91].

No processo de otimização espectral, inicialmente cada pintura foi reproduzida sob o iluminante  $D_{65}$ , foi obtido o seu volume de cor correspondente no espaço CIELAB e calculado o respectivo número de cores como o descrito anteriormente. Em seguida foi aplicado um “simplex search method” para modificar o espectro do iluminante  $D_{65}$ , com uma resolução de 10 nm, até que o número de cores obtido fosse maximizado [96]. Depois de obtidos os espectros do iluminante otimizado para cada pintura foi efectuada uma média, obtendo-se assim um espectro médio, tendo sido calculado o número de cores de cada pintura sob este iluminante. Foi também calculado, para cada iluminante a sua cromaticidade no diagrama CIE ( $u'$ ,  $v'$ ), a TCC e o índice de reprodução da cor geral  $R_s$  [61].

### 5.3 Resultados

Na Figura 5.2 são apresentados os espectros dos iluminantes otimizados para quatro das onze pinturas analisadas. Os espectros otimizados para as pinturas representadas têm uma estrutura semelhante, com máximos localizados na região do azul, verde e vermelho do espectro visível, sendo os resultados para as restantes pinturas semelhantes. Na Figura 5.3 é representado o espectro do iluminante obtido pela média dos onze iluminantes otimizados individuais. Este espectro apresenta também na sua estrutura máximos localizados aproximadamente nas mesmas regiões do espectro visível referidas anteriormente. É importante notar que os máximos destes espectros estão próximos, mas não coincidentes com os máximos de sensibilidade dos cones. Por uma questão de comparação, nas Figuras 5.2 e 5.3 é também apresentado o espectro do iluminante  $D_{65}$ , o qual foi utilizado como ponto de partida para a otimização do número de cores.

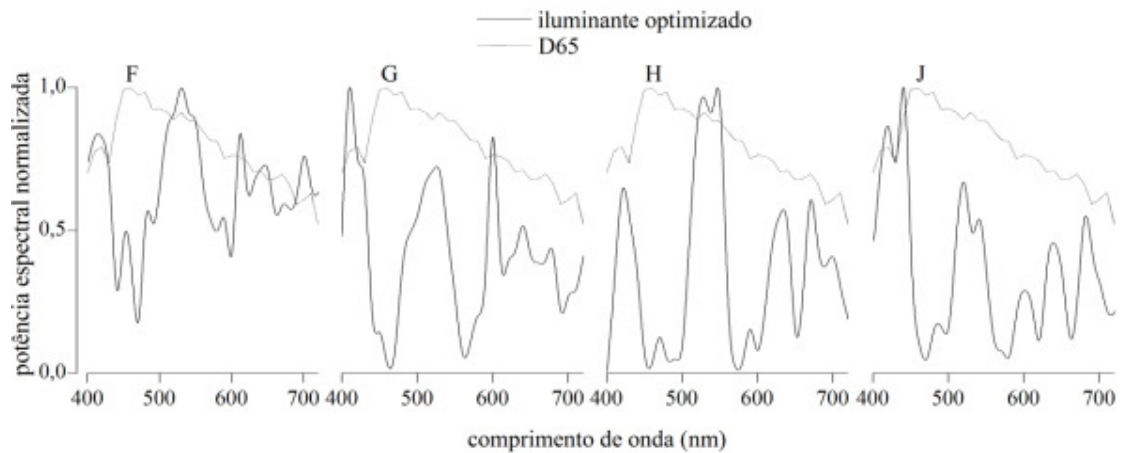


Figura 5.2 Espectro normalizado dos iluminantes que maximizam o número de cores para quatro pinturas (F, G, H e J). Para comparação é também apresentado o espectro do iluminante  $D_{65}$ , o qual foi utilizado como ponto de partida para a rotina de otimização.

Na Figura 5.4 é apresentado, para cada uma das pinturas, o incremento do número de cores perceptíveis obtido através do espectro do iluminante otimizado (barras brancas), onde o  $D_{65}$  foi usado como referência. O aumento do número de cores é bastante considerável, situando-se entre os 48% e os 93% sendo em média de 77%. As estimativas do número de cores baseadas na fórmula CIEDE2000, descrita anteriormente, apresentam resultados semelhantes. Na Figura 5.4 é também apresentado o incremento no número de cores, para cada pintura, obtido com o iluminante médio (barras escuras) representado na Figura 5.3. Os aumentos no número de cores obtidos com o iluminante médio são, em geral, próximos dos obtidos com o iluminante otimizado individual, sugerindo assim, que o iluminante médio é parecido com os espectros otimizados individuais para as pinturas analisadas. Embora não representado, o número de cores obtido com o iluminante de energia constante E é maior do que o obtido com o  $D_{65}$ .

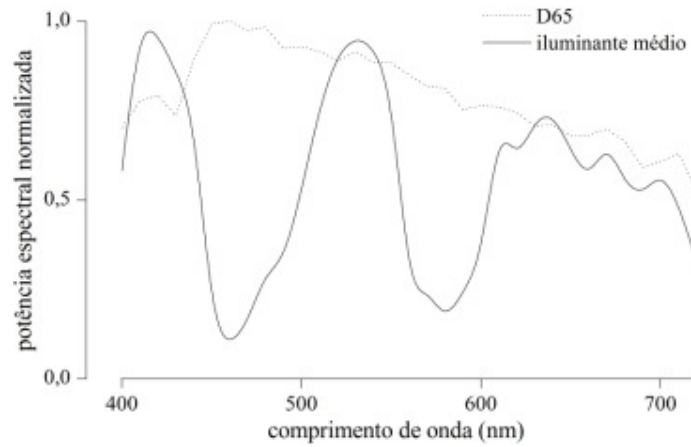


Figura 5.3 Espectro normalizado obtido pela média dos espectros individuais correspondentes às onze pinturas. Para comparação é também apresentado o espectro do iluminante D<sub>65</sub>, o qual foi utilizado como ponto de partida para a rotina de otimização

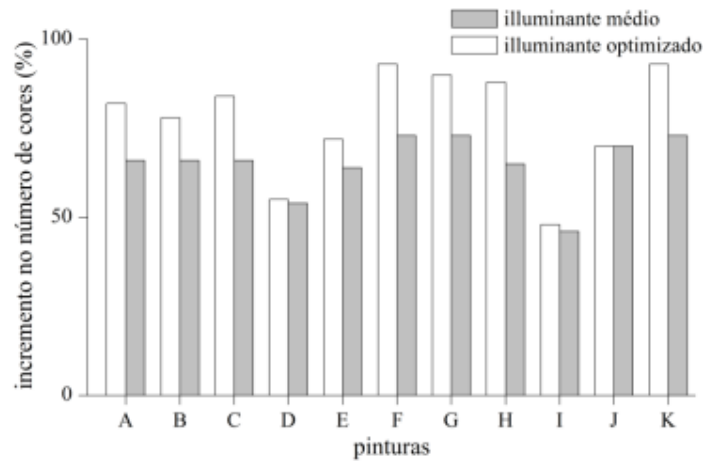


Figura 5.4 Percentagem de aumento no número de cores perceptíveis obtido para cada pintura com o iluminante otimizado para cada uma das pinturas individualmente (barras brancas) e com o iluminante médio (barras cinzas), onde é usado como referência o iluminante D<sub>65</sub>.

A Tabela 5.1 apresenta a cor do iluminante, expressa no espaço CIE ( $u', v'$ ), a TCC e o índice de reprodução da cor geral  $R_a$  para cada um dos iluminantes obtidos e para o iluminante médio. Por

questões de comparação são apresentados também os mesmos dados para o iluminante  $D_{65}$  e para o iluminante de energia constante E. pela análise da tabela, podemos verificar que todos os iluminantes apresentam um índice de reprodução da cor baixo e uma TCC entre 4000 K e 11352 K.

Tabela 5.1 Cor do iluminante expressa no espaço CIE ( $u', v'$ ), TCC e o índice de reprodução da cor geral  $R_a$  para cada um dos iluminantes obtidos e para o iluminante médio. Por questões de comparação são apresentados também os mesmos dados para o iluminante  $D_{65}$  e para o iluminante de energia constante E.

<b>Iluminante Optimizado</b>	<b><math>u'</math></b>	<b><math>v'</math></b>	<b>TCC (K)</b>	<b><math>R_a</math></b>
A	0.30	0.50	4850	46.5
B	0.30	0.48	6058	50.6
C	0.25	0.51	6187	<0
D	0.30	0.47	6223	44.9
E	0.31	0.49	5064	63.5
F	0.23	0.52	6230	<0
G	0.25	0.52	5987	<0
H	0.35	0.49	4000	45.3
I	0.28	0.44	11,352	61.2
J	0.29	0.50	5270	28.3
K	0.27	0.46	8772	57.0
Médio	0.29	0.49	5781	41.8
$D_{65}$	0.29	0.47	6500	100.0
E	0.32	0.47	5455	71.5

O iluminante médio apresenta uma TCC de 5781 K, valor próximo dos 5100 K obtidos empiricamente para iluminantes da luz do dia (Capítulo 4). Com o objectivo de quantificar a alteração na cor média entre o iluminante  $D_{65}$  e o iluminante médio, foi calculada, para cada pintura, a cor média obtida, expressa no diagrama CIELAB, sob cada um dos dois iluminantes. A diferença de cor máxima  $\Delta E_{ab}$  entre as cores médias foi de 4.8 e mínima de 1.7, sendo em média de 2.8. Estas pequenas diferenças sugerem que este procedimento de optimização não introduz distorções cromáticas globais significativas.

## 5.4 Discussão

A conclusão principal deste estudo é a possibilidade de obter aumentos significativos no número de cores perceptíveis nas pinturas artísticas através de um iluminante com três bandas espectrais, com máximos no vermelho, verde e azul. Por outro lado o espectro óptimo para cada pintura varia ligeiramente para as diferentes pinturas; porém, o iluminante obtido através da média dos espectros individuais origina aumentos no número de cores semelhantes, sugerindo assim que uma fonte de luz única pode ser adequada para uma sala de museu ou sala de exibição de pinturas. O espectro obtido neste trabalho pode, em princípio, ser obtido por fontes de luz baseadas em LEDs espectralmente sintonizáveis ou lâmpadas fluorescentes.

Estes resultados não podem ser obtidos através do índice de reprodução da cor pelo facto de todos os espectros otimizados terem um baixo índice de reprodução da cor, indicando assim que é diferente otimizar o iluminante para o número de cores e para o índice de reprodução da cor. Por outro lado, embora o iluminante médio e o iluminante de energia constante tenham TCC similares, produzem um número de cores bastante diferente, mostrando assim que o perfil espectral é importante na maximização do número de cores perceptíveis.

Pelo facto de este estudo estar apenas baseado em análises computacionais, não existe a certeza de que os iluminantes aqui obtidos são realmente preferidos pelos observadores, uma vez que existem outros factores que influenciam a impressão visual e determinam a preferência dos observadores (Capítulos 3 e 4). Mas, a correlação empírica obtida entre a preferência dos observadores e o número de cores através de estudos psicofísicos sugerem que os iluminantes obtidos sejam uma boa escolha para a iluminação de pinturas artísticas.





## 6 EFEITOS CROMÁTICOS DE METÂMEROS DO ILUMINANTE $D_{65}$ EM PINTURAS ARTÍSTICAS

A impressão visual causada por uma determinada pintura artística é influenciada quer pela cor, quer pela estrutura espectral da iluminação usada. Esta relação entre a estrutura espectral e a aparência visual assume particular relevância no desenvolvimento de fontes de luz que permitem a obtenção de um espectro quase arbitrário, como por exemplo as novas fontes de luz baseadas em LEDs. O objectivo do trabalho descrito neste capítulo foi estudar computacionalmente os efeitos cromáticos de iluminantes com a mesma cor do iluminante  $D_{65}$  mas com estrutura espectral diferente, ou seja, metâmeros. Para a análise foram utilizados os dados hiperespectrais de uma colecção de 20 pinturas artísticas, assim como uma vasta amostra de metâmeros do iluminante  $D_{65}$  gerada computacionalmente. Para cada um dos metâmeros foram estimadas as radiâncias de cada um dos pixéis das pinturas. Para cada uma das pinturas e iluminante foi determinado computacionalmente o número de cores discerníveis e correlacionado com a estrutura espectral do referido iluminante. Os resultados obtidos mostram que o número de cores gerado por cada um dos iluminantes varia consideravelmente ao longo da amostra de metâmeros sendo produzidas mais cores à medida que o espectro do iluminante se torna mais estruturado, ou seja, menos uniforme. Este resultado sugere que a sintonização espectral pode ter relevância prática no desenvolvimento de fontes de luz.

### 6.1 Introdução

Os estudos empíricos descritos nos capítulos anteriores mostraram que os observadores preferem a luz do dia com uma determinada TCC para reproduzir pinturas artísticas [26, 28, 53] e que é possível aumentar a diversidade cromática através do ajuste espectral. Por outro lado os estudos computacionais realizados sugerem que são necessários outros iluminantes para além da luz do dia para otimizar a visualização das pinturas artísticas [30]. Estes estudos foram limitados a fontes de luz existentes e não exploraram as potenciais propriedades de iluminação com distribuições espectrais arbitrárias. O objectivo deste trabalho foi estudar, computacionalmente, como é que a estrutura espectral da iluminação influencia a percepção

cromática de pinturas artísticas. A cor dos iluminantes usados foi a cor do iluminante  $D_{65}$  e este estudo foi baseado na análise dos dados hiperespectrais de 20 pinturas artísticas a óleo. Para a avaliação dos efeitos cromáticos foram usados como parâmetros o número de cores discerníveis e o índice de reprodução da cor (CRI), sendo que estes representam informação complementar.

## 6.2 Métodos

Para a análise efectuada, foi usada uma base de dados hiperespectral composta por vinte pinturas adquiridas no Museu Nogueira da Silva, Braga, Portugal. A Figura 6.1 mostra as imagens das vinte pinturas utilizadas. Esta amostra é composta por sete pinturas da época da Renascença pintadas em madeira (de A a D, H, N e O), quatro (I, J, P e Q) do século XX pintadas em tela. Duas (K e M) do século XX pintadas em madeira, uma (E) da época da Renascença pintada em cobre, uma (G) do século XIX pintada em tela, três (F, S e T) de época desconhecida pintadas em cobre, uma (R) de época desconhecida pintada em madeira e uma (L) de época desconhecida pintada em tela.



Figura 6.1 Imagens a cor das vinte pinturas analisadas.

Dado um observador standard definido por três funções de reprodução da cor, existe um número infinito de funções espectrais, o grupo de metâmeros, que produz os mesmos valores de triestímulo XYZ [12]. Existem várias abordagens para a criação de metâmeros [97-99], para simplificar, neste estudo foi escolhida a abordagem de Schmitt para a criação da amostra de metâmeros do iluminante D<sub>65</sub> [100]. Uma amostra de metâmeros  $F$  pode ser descrita por um volume hiper-poliedrono convexo num espaço de dimensão  $M$ , onde  $M$  é o número de bandas espectrais consideradas. Os vértices do referido hiperpoliedrono  $S_j$  são funções que contêm até três coordenadas diferentes de zero, ou seja, não mais de três bandas espectrais. Qualquer elemento  $f_i$  da amostra pode ser escrito como uma combinação positiva de elementos simples, isto é, para qualquer  $f_i \in F$  existe pelo menos um grupo  $N$  de números positivos  $\alpha_j$  de modo que:

$$f_i = \sum_{j=1}^N \alpha_j S_j$$

onde,

$$\sum_{j=1}^N \alpha_j = 1$$

Com o objectivo de gerar uma amostra adequada de metâmeros, foi utilizada a seguinte metodologia. Considerando  $\delta$ , a diferença espectral absoluta entre  $f_i$  e o espectro de energia constante  $E$ , definido por:

$$\delta_i = \sum_{k=1}^{33} |f_{i,k} - E_k|$$

um total de 4844 metâmeros do iluminante D<sub>65</sub> foi gerado escolhendo pesos relativos de  $\alpha_j$  de modo que a distribuição de  $\delta$  fosse aproximadamente uniforme no intervalo 0.3 a 2. Todos os metâmeros foram normalizados para a sua energia e gerados no intervalo 400-720 nm com

uma resolução espectral de 10 nm. É importante notar que pelo facto de E ser um espectro de energia constante, o espectro menos estruturado,  $\delta$  é uma medida do quanto o espectro  $f_i$  é estruturado.

O volume de cor de cada pintura no espaço CIELAB foi também calculado para cada metâmero e estimado assim o correspondente número de cores discerníveis, tal como o efectuado para o iluminante  $D_{65}$ . Para cada metâmero foi também calculado o seu correspondente índice de reprodução da cor  $R_s$  de acordo com a CIE [61].

### 6.3 Resultados

Para efeitos de ilustração, a Figura 6.2 representa o volume de cor no espaço CIELAB para quatro das vinte pinturas utilizadas no estudo sob o iluminante  $D_{65}$ . A estrutura espectral dos metâmeros usados neste trabalho está representada na Figura 6.3.

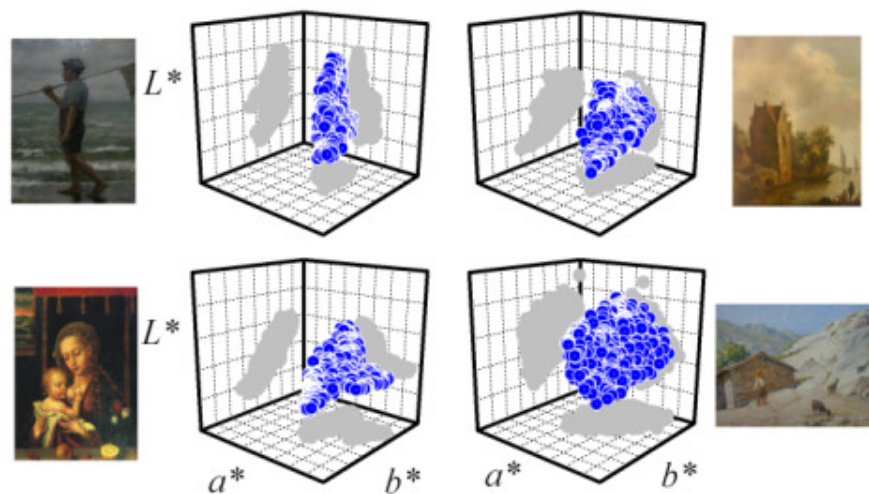


Figura 6.2 Volumes de cor no espaço CIELAB de quatro pinturas reproduzidas sob o iluminante  $D_{65}$ .

A Figura 6.3(a) representa dois metâmeros M1 e M2 que são espectralmente próximos do iluminante de energia constante E e a Figura 6.3 (b) representa dois metâmeros M3 e M4 que

são espectralmente distantes do iluminante de energia constante  $E$ . para efeitos de representação os espectros dos metâmeros foram normalizados para a sua máxima energia.

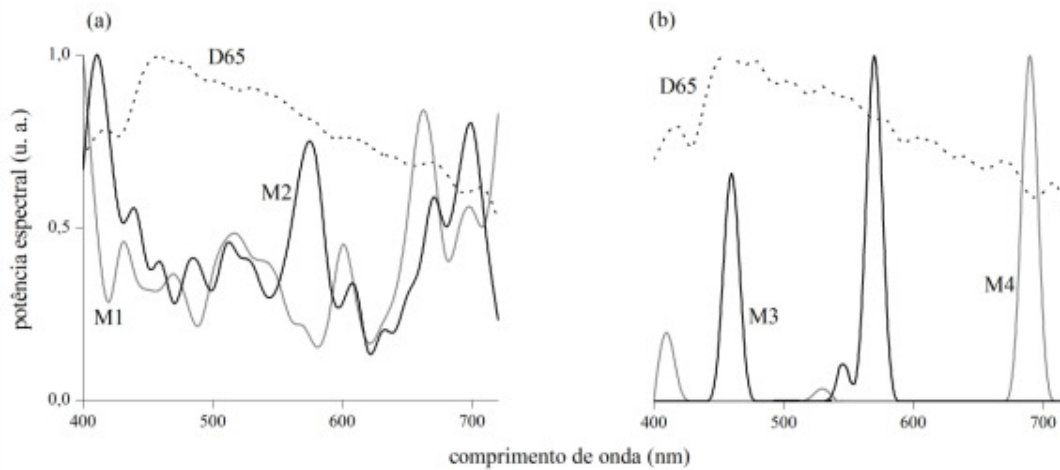


Figura 6.3 Distribuição espectral de quatro metâmeros do  $D_{65}$  usados neste trabalho. M1 e M2 representam dois dos metâmeros espectralmente próximos do iluminante de energia constante  $E$  e M3 e M4 representam dois dos metâmeros espectralmente afastados do iluminante  $E$ . Para efeitos de representação todos os espectros foram normalizados.

Para efeitos de ilustração a Figura 6.4 mostra a aparência de duas das pinturas sob três distribuições espectrais diferentes: sob o iluminante  $D_{65}$  (A), sob a estrutura espectral M3, que produz um baixo número de cores (B) e sob a estrutura espectral M4, que produz um elevado número de cores (C).

A Figura 6.5 (a) mostra a variação do número de cores discerníveis médio das pinturas em função de  $\delta$ , a diferença espectral absoluta em relação ao iluminante  $E$ . À medida que  $\delta$  aumenta, a variabilidade obtida para o número de cores também aumenta, resultando assim em efeitos mais extremos à medida que utilizamos iluminantes espectralmente mais marcados estruturalmente. A Figura 6.5 (b) mostra o índice de reprodução da cor geral  $R_c$  para cada metâmero, também em função de  $\delta$ . À medida que  $\delta$  aumenta os valores obtidos para  $R_c$  diminuem.



Figura 6.4 Aspecto de duas das pinturas analisadas sob três distribuições espectrais diferentes; sob o iluminante  $D_{65}$  (A), sob a estrutura espectral M3, que produz um baixo número de cores (B) e sob a estrutura espectral M4, que produz um alto número de cores (C).

Com o objectivo de estudar a variação da cor média das pinturas ao longo da amostra de metâmeros em relação à cor média obtida com o  $D_{65}$ , foi calculada no plano CIE ( $a^*$ ,  $b^*$ ) a respectiva diferença. A Figura 6.5 (c) mostra a variação na cor média em função de  $\delta$ . À medida que  $\delta$  aumenta a variação na cor média também aumenta, embora as variações médias sejam relativamente pequenas, em média de 2.99. no espaço CIELAB.

Para clarificar a relação entre  $\delta$  e a estrutura espectral dos metâmeros, o valor de  $\delta$  foi comparado com o número de bandas espectrais diferentes de zero para cada metâmero, sendo estes resultados apresentados na Figura 6.6. A medida que  $\delta$  aumenta, o número de bandas espectrais diferentes de zero diminui, estes resultados em conjunto com os obtidos na Figura 6.5 sugerem que o valor máximo de número de cores é obtido com metâmeros mais estruturados espectralmente, ou seja, menos uniformes.

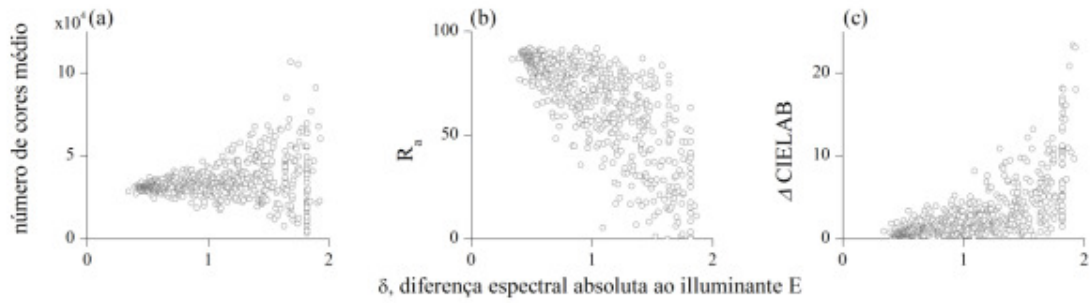


Figura 6.5 (a) Variação do número de cores média das pinturas em função de  $\delta$ , a distância absoluta ao iluminante E. (b) Índice de reprodução da cor geral em função de  $\delta$ . (c) Diferença na cor média das pinturas no espaço CIELAB entre a cor média obtida para cada metâmero e a cor média obtida para o iluminante  $D_{65}$  em função de  $\delta$ .

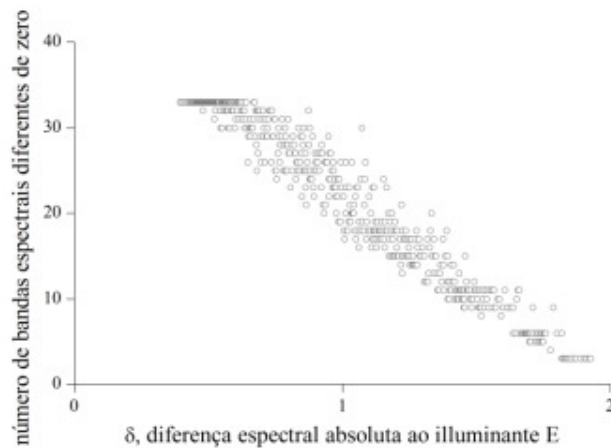


Figura 6.6 Numero de bandas espectrais diferentes de zero, com largura de 10 nm, em função de  $\delta$ .  $\delta$  representa a diferença espectral em relação ao iluminante de energia constante.

Os resultados apresentados foram obtidos para uma determinada amostra de metâmeros gerada pelo método descrito anteriormente. Com o objectivo de testar a robustez do método, foram repetidos os cálculos para amostras diferentes geradas com o mesmo método e para amostras geradas com outros métodos, sendo os resultados obtidos semelhantes.



## 6.4 Discussão

O principal resultado obtido no trabalho descrito neste capítulo foi a possibilidade de produzir matematicamente uma vasta diversidade cromática, ou seja, um elevado número de cores discerníveis através do uso de uma fonte de luz com um número reduzido de bandas espectrais. Este resultado poder ser bastante importante no design e desenvolvimento de novas fontes de luz, permitindo com estas a optimização da discriminação cromática.

Depois da obtenção deste resultado coloca-se a seguinte questão: por que razão um espectro com um número reduzido de bandas espectrais dá origem a um grande número de cores? Este resultado não é óbvio nem intuitivo e parece contradizer de certa forma trabalho já efectuado de forma empírica a cerca dos efeitos cromáticos de LEDs [59-60]. Este facto pode ser explicado pela posição espectral das bandas. Por exemplo, na Figura 6.3 (b) ambos os espectros M3 e M4 contem três bandas espectrais, mas M4 produz mais cores, num factor de dez.

Este trabalho é apenas um estudo computacional, por este facto a generalização a aplicações práticas deve ser abordada com algum cuidado. A metodologia utilizada para estimar o número de cores é apenas uma aproximação e não um método exacto. Por outro lado, alguns dados empíricos sugerem que o número de cores discerníveis influencia a preferência por uma iluminação específica [28]. Um dos resultados deste trabalho é a incompatibilidade entre altos índices de reprodução da cor e alta diversidade cromática, mas continua em aberto a questão relativa à preferência dos observadores. Neste sentido, as novas metodologias desenvolvidas para definir e melhorar a obtenção do índice de reprodução da cor [101], talvez venham melhorar a compatibilidade entre o índice de reprodução da cor e a diversidade cromática. É importante notar ainda que a aparência global de uma pintura é também influenciada por outros factores, como o contraste, sendo que este parâmetro não foi quantificado. Por outro lado, o aumento da discriminação cromática através da expansão do volume de cor pode levar a uma diminuição da discriminação em algumas regiões do espaço [59, 102]. De qualquer modo, os resultados aqui apresentados sugerem que a sintonização espectral pode e deve ser explorada, com vantagens práticas relevantes para a iluminação de objectos.

## 7 CONCLUSÕES

O primeiro estudo referente à determinação psicofísica do melhor iluminante para a apreciação de pinturas artísticas mostra que de entre os pares de iluminantes utilizados na experiência, os observadores preferiram sempre os iluminantes com maior TCC com a excepção de apenas um par para o qual não foi expressa nenhuma preferência. Por outro lado o iluminante preferido foi também aquele que produz uma maior diversidade cromática nas pinturas. Para o caso do par em que não é revelada nenhuma preferência o número de cores produzido pelos dois iluminantes é similar, sugerindo que a preferência, quando existe, possa ser influenciada pela diversidade cromática que a iluminação produz.

O segundo estudo referente à TCC preferida para apreciar pinturas artísticas, mostra que os observadores preferem uma iluminação mais azulada do que aquela que é normalmente usada nos museus. Foi assim obtida uma iluminação da luz do dia com uma TCC de cerca de 5100 K como sendo a que representa de forma mais adequada a preferência dos observadores. Foi detectada alguma variação com as pinturas; no entanto esta TCC parece ser adequada para todas as pinturas. Este resultado mostrou-se bastante robusto quer em relação ao tipo de observadores, estudantes ou visitantes de museus, quer em relação à adaptação ao iluminante. Estes resultados são ainda consistentes com os resultados obtidos no estudo anterior. Este trabalho mostrou-se ainda mais robusto e mais consistente pelo facto de permitir a escolha do iluminante de entre um largo espectro de TCC e de ter usado uma amostra significativa de pinturas e observadores.

O terceiro estudo referente à optimização espectral para a diversidade cromática mostra aumentos significativos no número de cores perceptíveis nas pinturas artísticas através da utilização de um iluminante com apenas três bandas espectrais, com máximos no vermelho, verde e azul. Por outro lado o espectro óptimo para cada pintura varia ligeiramente com as pinturas; porém, o iluminante obtido através da média dos espectros individuais origina aumentos no número de cores semelhantes em todas elas, sugerindo assim que uma fonte de luz única pode ser adequada para uma sala de museu ou sala de exibição de pinturas. O

espectro obtido neste trabalho pode, em princípio, ser obtido por fontes de luz baseadas em LEDs espectralmente sintonizáveis ou lâmpadas fluorescentes.

O último estudo tem como conclusão principal a possibilidade de produzir matematicamente uma grande diversidade cromática, ou seja, um elevado número de cores discerníveis através do uso de uma fonte de luz com um número reduzido de bandas espectrais. Este resultado poder ser bastante importante no design e desenvolvimento de novas fontes de luz, permitindo com estas o aumento e optimização da discriminação cromática.

Como continuação deste trabalho, recorrendo à mais recente tecnologia no que diz respeito ao desenvolvimento de fontes de luz espectralmente sintonizáveis, seria interessante testar em ambiente real e com iluminação real os resultados dos estudos aqui apresentados, pois estes estão limitados pelo facto das experiências e simulações terem utilizado reproduções das pinturas em monitor e não imagens reais. Além disso alguns dos espectros considerados não são até ao momento reprodutíveis por nenhuma fonte de luz. Assim, quando estiverem disponíveis fontes de luz espectralmente sintonizáveis adequadas, será de todo o interesse confirmar os resultados aqui obtidos.

## REFERÊNCIAS

1. R. S. Berns, "The science of digitizing paintings for color-accurate image archives: A review," *J. Imaging Sci. Techn.* **45**, 305-325 (2001).
2. F. H. Imai, R. S. Berns, and D. Y. Tzeng, "A comparative analysis of spectral reflectance estimated in various spaces using a trichromatic camera system," *J. Imaging. Sci. Techn.* **44**, 280 (2000).
3. D. H. Foster, S. M. C. Nascimento, and K. Amano, "Information limits on neural identification of colored surfaces in natural scenes," *Visual Neurosci.* **21**, 331-336 (2004).
4. S. M. C. Nascimento, D. H. Foster, and K. Amano, "Psychophysical estimates of the number of spectral-reflectance basis functions needed to reproduce natural scenes," *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 1017-1022 (2005).
5. F. H. Imai, D. R. Wyble, R. S. Berns, and D. Y. Tzeng, "A feasibility study of spectral color reproduction," *J. Imaging Sci. Techn.* **47**, 543-553 (2003).
6. L. M. Hurvich, *Color Vision* (Sinauer Associates Inc., U.S., 1981).
7. R. W. G. Hunt, *Measuring Colour*, Third ed. (Fountain Press, Kingston-upon-Thames, England, 1998).
8. C. A. Curcio, K. R. Sloan, R. E. Kalina, and A. E. Hendrickson, "Human Photoreceptor Topography," *J Comp Neurol* **292**, 497-523 (1990).
9. R. McDonald, *Colour physics for industry* (Society of Dyers and Colourists 1987).
10. D. C. Fernandez, H. M. Salinas, and C. A. Puliafito, "Automated detection of retinal layer structures on optical coherence tomography images," *Opt. Express* **13**, 10200-10216 (2005).
11. J. Pokorny, V. C. Smith, G. Verriest, and A. J. L. G. Pinckers, eds., *Congenital and Acquired Color Vision Defects* (Grune & Stratton, New York, 1979).
12. G. Wyszecki and W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, 2nd Edition ed. (John Wiley & Sons, New York, 1982).
13. T. Young, "On the Theory of Light and Colors " *Trans. Opt. Soc.* **92** 20-21 (1802).
14. H. Helmholtz, *Treatise on physiological optics* (Dover, New York, 1962), Vol. 3.

15. H. Helmholtz, *Handbuch der physiologischen Optik*, second ed. (Voss, Hamburg, 1896).
16. A. Stockman and L. T. Sharpe, "The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype," *Vision Res.* **40**, 1711-1737 (2000).
17. P. K. Kaiser and R. M. Boynton, *Human color vision*, Second ed. (Optical Society of America, Washington, D.C., 1996).
18. J. Schanda, *Colorimetry: Understanding the CIE System* (John Wiley & Sons, Inc., Hungary, 2007).
19. W. D. Wright, "A trichromatic colorimeter with spectral primaries.," *Trans. Opt. Soc.* **XXX**, 225-242 (1928).
20. W. D. Wright, "A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours.," *Trans. Opt. Soc.* **30**, 141 (1929).
21. J. Guild, "The colorimetric properties of the spectrum.," *Philos. T. R. Soc. A* **230**, 149-187 (1932).
22. R. W. G. Hunt, *Measuring Colour* Second ed. (Fountain Press, England, 1991).
23. M. R. Luo, G. Cui, and B. Rigg, "The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000," *Color Res. Appl.* **26**, 340-350 (2001).
24. M. Carrara, A. Bono, C. Bartoli, A. Colombo, M. Lualdi, D. Moglia, N. Santoro, E. Tolomio, S. Tomatis, G. Tragni, M. Santinami, and R. Marchesini, "Multispectral imaging and artificial neural network: mimicking the management decision of the clinician facing pigmented skin lesions," *Phys. Med. Biol.* **52**, 2599-2613 (2007).
25. S. G. Bajwa, P. Bajcsy, P. Groves, and L. E. Tian, "Hyperspectral image data mining for band selection in agricultural applications," *Trans. Am. Soc. Agr. Eng.* **47**, 895-907 (2004).
26. P. D. Pinto, J. M. M. Linhares, J. A. Carvalhal, and S. M. C. Nascimento, "Psychophysical estimation of the best illumination for appreciation of Renaissance paintings," *Visual Neurosci.* **23**, 669-674 (2006).
27. B. M. Donald and R. O. William, "Hyperspectral imaging applied to forensic medicine," in *Proceedings of SPIE*, 2000), 108-116.
28. P. D. Pinto, J. M. M. Linhares, and S. M. Nascimento, "Correlated Color Temperature Preferred by Observers for Illumination of Artistic Paintings," *J. Opt. Soc. Am. A*, in press (2008).

29. S. M. C. Nascimento, F. P. Ferreira, and D. H. Foster, "Statistics of spatial cone-excitation ratios in natural scenes," *J. Opt. Soc. Am. A* **19**, 1484-1490 (2002).
30. J. M. M. Linhares, P. D. A. Pinto, and S. M. C. Nascimento, "Color rendering of art paintings under CIE illuminants for normal and color deficient observers," *J. Opt. Soc. Am. A* **26**, 1668-1677 (2009).
31. F. H. Imai, M. R. Rosen, and R. S. Berns, "Multi-spectral imaging of van Gogh's self-portrait at the National Gallery of Art, Washington, DC," *Proceedings of the IS&T PICS Conference*, 185-189 (2001).
32. R. S. Berns and E. R. de la Rie, "Evaluating the effect of varnishes on the color and spatial image quality of paintings," in *Proceedings of the IS&T PICS Conference*, 2001), 181-184.
33. R. S. Berns and E. R. De la Rie, "Exploring the optical properties of picture varnishes using imaging techniques," *Stud. Conserv.* **48**, 73-82 (2003).
34. R. S. Berns and E. R. de la Rie, "The effect of the refractive index of a varnish on the appearance of oil paintings," *Stud. Conserv.* **48**, 251-262 (2003).
35. Y. H. Zhao, R. S. Berns, L. A. Taplin, and J. Coddington, "An investigation of multispectral imaging for the mapping of pigments in paintings," *P. Soc. Photo-Opt. Ins.* **6810**, 71-79 (2008).
36. R. S. Berns and F. H. Imai, "Pigment identification of artist materials via multi-spectral imaging," in *Proceedings of the IS&T/SID Ninth Color Imaging Conference*, 2001), 85-90.
37. F. H. Imai and R. S. Berns, "Spectral estimation of artist oil paints using multi-filter trichromatic imaging," in *Proceedings of the AIC, 9th Congress of the International Colour Association*, 2002), 504-507.
38. R. S. Berns, J. Krueger, and M. Swicklik, "Multiple pigment selection in painting using visible reflectance spectrophotometry," *Stud. Conserv.* **47**, 46-61 (2002).
39. M. R. Rosen and R. S. Berns, "Spectral reproduction research for museums at the Munsell color science laboratory," in *Proceedings of the IS&T'S NIP21: International Conference on Digital Printing Technologies.*, 2005), 73-77.
40. D. B. Judd and G. Wyszecki, *Color in Business, Science and Industry*, 3rd ed. (Wiley, New York, 1975).

41. M. R. Pointer and G. G. Attridge, "The number of discernible colours," *Color Forum* **23**, 52-54 (1998).
42. J. M. M. Linhares, "Estimating Chromatic Diversity from Hyperspectral Images," MPhil (The University of Manchester, Manchester, 2005).
43. G. Thomson, *The Museum Environment*, second ed. (Butterworth-Heinemann Ltd, 1986).
44. W. S. Taft, J. W. Mayer, R. Newman, D. Stulik, and P. Kuniholm, *The Science of Paintings* (Springer, New York, 2000).
45. K. Nassau, *Color for Science, Art and Technology* (Elsevier Science B.V., 1998).
46. T. B. Brill, *Light: Its Interactions with Art and Antiques* (Plenum Press, New York, 1980).
47. CIE, "Control of Damage to Museum Objects by Optical Radiation," CIE 157:2004 (Vienna, 2004).
48. L. T. Maloney, "Physics-based approaches to modeling surface color perception," in *Color Vision: From Genes to Perception*, K. R. Gegenfurtner and L. T. Sharpe, eds. (Cambridge University Press, Cambridge, 1999), pp. 387-416.
49. D. H. Foster, "Does colour constancy exist?," *Trends Cogn. Sci.* **7**, 439-443 (2003).
50. H. E. Smithson, "Sensory, computational and cognitive components of human colour constancy," *Philos. T. R. Soc. B* **360**, 1329-1346 (2005).
51. R. G. Davis and D. N. Ginthner, "Correlated color temperature, illuminance level, and the Kruithof curve," *J. Illum. Eng. Soc.* **19**, 27-38 (1990).
52. M. Scuello, I. Abramov, J. Gordon, S. Weintraub, and S. Weintra, "Museum lighting: Optimizing the illuminant," *Color Res. Appl.* **29**, 121-127 (2004).
53. M. Scuello, I. Abramov, J. Gordon, and S. Weintraub, "Museum lighting: Why are some illuminants preferred?," *J. Opt. Soc. Am. A* **21**, 306-311 (2004).
54. M. Kemp, *The Science of Art* (Yale University, 1990).
55. J. Turner, *The Dictionary of Art* (Macmillan Publishers Limited, 1996).
56. J. F. Alves, *Do tirar polo natural / Francisco D'Holanda: introdução, notas e comentários de José da Felicidade Alves* (Horizonte, 1984).
57. E. J. Olszewski, "Distortions, shadows, and conservations in sixteenth century italian art," *Artibus et Historiae* **6**, 101-124 (1985).
58. J. B. Protzman and K. W. Houser, "LEDs for general illumination: The state of the science," *Leukos* **3**, 121-142 (2006).

59. E. Mahler, J. J. Ezrati, and F. Vienot, "Testing LED Lighting for Colour Discrimination and Colour Rendering," *Color Res. Appl.* **34**, 8-17 (2009).
60. F. Vienot, E. Mahler, L. Serreault, M. Harrar, and J.-J. Ezrati, "Discriminating colours under LED illumination," in *Proceedings of the AIC, 10th Congress of the International Colour Association, 2005*, 33-36.
61. CIE, "Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources," CIE 13:3 (1995).
62. CIE, "Colour rendering, TC 1-33 closing remarks," CIE 135:2 ( , 1999).
63. A. Zukauskas, R. Vaicekauskas, F. Ivanauskas, H. Vaitkevicius, and M. S. Shur, "Spectral optimization of phosphor-conversion light-emitting diodes for ultimate color rendering," *Appl. Phys. Lett.* **93**, 051115 (2008).
64. A. Zukauskas, R. Vaicekauskas, F. Ivanauskas, H. Vaitkevicius, and M. S. Shur, "Rendering a color palette by light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.* **93**, 021109 (2008).
65. H. Xu, "Assessing the effectiveness of colour rendering," *Lighting Res. Technol.* **29**, 89 (1997).
66. C. van Trigt, "Color rendering, a reassessment," *Color Res. Appl.* **24**, 197-206 (1999).
67. D. B. Judd, "A flattery index for artificial illuminants," *Illum. Eng.* **62**, 593-598 (1967).
68. J. Schanda, "A combined colour preference-colour rendering index," *Lighting Res. Technol.* **17**, 31-34 (1985).
69. W. A. Thornton, "Color-Discrimination Index," *J. Opt. Soc. Am.* **62**, 191-194 (1972).
70. F. Martinez-Verdu, E. Perales, E. Chorro, D. de Fez, V. Viqueira, and E. Gilabert, "Computation and visualization of the MacAdam limits for any lightness, hue angle, and light source," *J. Opt. Soc. Am. A* **24**, 1501-1515 (2007).
71. J. Schanda, "Color Rendering of Light Sources," in *Colorimetry: Understanding the CIE System*, J. Schanda, ed. (John Wiley & Sons, Inc., Hungary, 2007).
72. P. D. Pinto, "Chromatic properties of natural scenes and their influence on gaze position," MPhil Thesis (University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester, 2004).
73. M. J. A. T. Carvalho, "Digitalização de pintura artística com imagiografia hiperespectral," M.Sc. Thesis (Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2004).



74. J. M. M. Linhares, S. M. C. Nascimento, D. H. Foster, and K. Amano, "Chromatic diversity of natural scenes," *Perception* **33**, 65-65 (2004).
75. M. D. Fairchild and L. Reniff, "Time-course of chromatic adaptation for color-appearance judgments," *J. Opt. Soc. Am. A* **12**, 824-833 (1995).
76. A. Werner, L. T. Sharpe, and E. Zrenner, "Asymmetries in the time-course of chromatic adaptation and the significance of contrast," *Vision Res.* **40**, 1101-1113 (2000).
77. L. Arend and A. Reeves, "Simultaneous color constancy," *J. Opt. Soc. Am. A* **3**, 1743-1751 (1986).
78. K. Uchikawa and M. Ikeda, "Temporal deterioration of wavelength discrimination with successive comparison method.," *Vision Res.* **21**, 591-595 (1981).
79. M. D. Fairchild, *Color Appearance Models* (John Wiley & Sons Ltd., 2005).
80. D. B. Judd, D. L. MacAdam, and G. Wyszecki, "Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature," *J. Opt. Soc. Am.* **54**, 1031-1040 (1964).
81. CIE, "Colorimetry," CIE 15:2004 (2004).
82. J. Hernández-Andrés, J. Romero, J. L. Nieves, and R. L. Lee, "Color and spectral analysis of daylight in southern Europe," *J. Opt. Soc. Am. A* **18**, 1325-1335 (2001).
83. M. A. Aldaba, J. M. M. Linhares, P. D. Pinto, S. M. C. Nascimento, K. Amano, and D. H. Foster, "Visual sensitivity to color errors in images of natural scenes," *Visual Neurosci.* **23**, 555-559 (2006).
84. J. M. M. Linhares, J. A. Carvalhal, S. M. C. Nascimento, M. H. Regalo, and M. C. V. P. Leite, "Estimating the best illuminant for art paintings by computing chromatic diversity," *Perception* **34**, 88-89 (2005).
85. CIE, "Standard method of assessing the spectral quality of daylight simulators for visual appraisal and measurement of colour," CIE DS 012:2001 (2001).
86. CIE, "A method for assessing the quality of daylight simulators for colorimetry," CIE 51.2 (1999).
87. H. Xu, "Color-Rendering Capacity of Light," *Color Res. Appl.* **18**, 267-269 (1993).
88. L. d. Vinci, "Treatise on Painting (Codex. Urbinus Latinus 1270)," (Princeton Univ. Press, Princeton, 1956., 1270).
89. U. Leonards, R. Baddeley, I. D. Gilchrist, T. Troscianko, P. Ledda, and B. Williamson, "Mediaeval artists: Masters in directing the observers' gaze," *Curr. Biol.* **17**, R8-R9 (2007).

90. J. M. M. Linhares, P. D. Pinto, and S. M. C. Nascimento, "The number of discernible colors perceived by dichromats in natural scenes and the effects of colored lenses," *Visual Neurosci.*, in press (2008).
91. J. M. M. Linhares, P. D. Pinto, and S. M. C. Nascimento, "The number of discernible colors in natural scenes," *J Opt. Soc. Am. A* **25**, 2918-2924 (2008).
92. R. S. Berns, D. H. Alman, L. Reniff, G. D. Snyder, and M. R. Balononrosen, "Visual Determination of Suprathreshold Color-Difference Tolerances Using Probit Analysis," *Color Res. Appl.* **16**, 297-316 (1991).
93. M. R. Luo and B. Rigg, "Chromaticity-Discrimination Ellipses for Surface Colors," *Color Res. Appl.* **11**, 25-42 (1986).
94. K. Witt, "Geometric relations between scales of small colour differences," *Color Res. Appl.* **24**, 78-92 (1999).
95. G. M. Johnson and M. D. Fairchild, "A top down description of S-CIELAB and CIEDE2000," *Color Res. Appl.* **28**, 425-435 (2003).
96. J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright, and P. E. Wright, "Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions," *SIAM J. Optim.* **9**, 112-147 (1998).
97. G. Wyszecki, "Evaluation of Metameric Colors," *J. Opt. Soc. Am.* **48**, 282-282 (1958).
98. G. D. Finlayson and P. Morovic, "Metamer sets," *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 810-819 (2005).
99. K. Takahama and Y. Nayatani, "New Method for Generating Metameric Stimuli of Object Colors," *J. Opt. Soc. Am.* **62**, 1516-& (1972).
100. F. J. M. Schmitt, "Method for Treatment of Metamerism in Colorimetry," *J. Opt. Soc. Am.* **66**, 601-608 (1976).
101. W. Davis and Y. Ohno, "Toward an improved color rendering metric," in *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, 2005), 59411G.59411-59411G.59418.
102. F. Vienot, E. Mahler, J.-J. Ezrati, C. Boust, A. Rambaud, and A. Bricoune, "Color appearance under LED illumination: The visual judgment of observers," *J. Light Visual Environ.* **32**, 208-213 (2008).



## ANEXOS



## **Anexo 1 – Lista de publicações e comunicações em encontros científicos no âmbito deste trabalho**

### **Publicações de artigos em revistas internacionais**

PINTO, P. D., LINHARES, J. M. M. & NASCIMENTO, S. M. C. (2009). Estimation of the chromatic effects of metamers of D65 on art paintings. *Ophthal Physl Opt* (in Press).

PINTO, P. D., LINHARES, J. M. M. & NASCIMENTO, S. M. C. (2008). Correlated Color Temperature Preferred by Observers for Illumination of Artistic Paintings. *J Opt Soc Am A* **25** 623-630.

PINTO, P. D., LINHARES, J. M. M., CARVALHAL, J. A. & NASCIMENTO, S. M. C. (2006). Psychophysical estimation of the best illumination for appreciation of Renaissance paintings. *Visual Neuroscience* **23** **3-4** 669-674.

### **Publicações em actas de encontros científicos**

PINTO P. D., LINHARES J. M. M. & NASCIMENTO S. M. C., (2008). Chromatic diversity of art paintings under light-emitting diodes. *Perception* 37 ECVF Abstract Supplement, 20-20.

PINTO P. D., LINHARES J. M. M. & NASCIMENTO S. M. C., (2008). Illuminant spectrum maximizing the number of perceived colors in art paintings. *CGIV 2008 Proceedings* 505-507.

PINTO P. D., LINHARES J. M. M. & NASCIMENTO S. M. C., (2007). The colour of the best illumination for appreciation of art paintings is bluish-white. *Perception* 36 ECVF Abstract Supplement, 16-16.

## Comunicações em encontros científicos

- ICVS 2009, 20th Symposium of the International Colour Vision Society, Braga, Portugal, 24 a 28 Julho 2009: apresentação em poster do trabalho de investigação “Chromatic effects of metameric illuminants on art paintings”.
- European Conference on Visual Perception, Utrecht, Holanda, 24 a 28 de Agosto 2008: apresentação em poster do trabalho de investigação “Chromatic diversity of art paintings under light-emitting diodes”.
- CGIV, Terrassa, Espanha, 9 a 13 de Junho 2008: apresentação em poster do trabalho de investigação “Illuminant spectrum maximizing the number of perceived colors in art paintings”.
- European Conference on Visual Perception, Arezzo, Itália, 27 a 31 de Agosto 2007: apresentação em poster do trabalho de investigação “The colour of the best illumination for appreciation of art paintings is bluish-white”.
- TECHNART, Lisboa, Portugal, 25 a 28 de Abril 2007: apresentação em poster do trabalho de investigação “Hyperspectral imaging of artistic paintings and applications in illumination”
- International Colour Vision Society, Lyon, França, 8 a 12 de Julho 2005: Apresentação em poster do trabalho de investigação “Psychophysical estimation of the best illumination for appreciation of Renaissance paintings”.

## Anexo 2 – Protocolo de Aquisição das Imagens Hiperespectrais

### Protocolo de aquisição de pinturas (v 1.2 <> 12-3-2007)

Data	Localização	Objecto	Hora de início / Hora de fim									
<i>Montar Sistema de iluminação e ligar as lâmpadas</i>												
Colocação da Referência Invertida (Anotar tipo de referência: _____)												
<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Medir profundidade do quadro _____</li> <li>b. Posicionar a referência invertida consistente com a profundidade do quadro e centrada com o centro do cavalete</li> <li>c. Verificar perpendicularidade da referência.</li> <li>d. Marcar extremos do quadro (maior dimensão na horizontal) _____ X _____</li> <li>e. Colar grelha de focagem no centro dos extremos do quadro e verificar profundidade da referência medida no ponto – b.</li> <li>f. Verificar perpendicularidade e horizontalidade</li> </ul>												
<i>Montar sistema e posicionamento da câmara</i>		<i>Aquisição com software IMAC (iniciar na directoria DATA):</i>										
<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Distância (S/I - teórica)</li> <li>b. Verificar horizontalidade com nível nas duas direcções</li> <li>c. Centrar as marcas dos extremos do quadro, na horizontal e na vertical, com os extremos do monitor</li> <li>d. Colocar a câmara à mesma distância dos extremos do quadro usando o laser</li> <li>e. Fazer o mesmo que no ponto anterior para a vertical, se a horizontalidade da câmara não estiver garantida</li> <li>f. Confirmar, na H e na V, com o nível e o laser</li> <li>g. Trancar a óptica e o tripé</li> <li>h. Garantir que as luzes ambientes estão apagadas</li> <li>i. Distância pintura-filtro efectiva _____ m.</li> <li>j. Tirar foto do "setup" (nº foto)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Ligar os cabos da Câmara e do Filtro e iniciar MatLab</li> <li>b. Run imac &amp; premir live</li> <li>c. Verificar settings – Tools &gt; Acquisition settings</li> <li>d. File &gt; New scene acquisition &gt; Filename</li> <li>e. Fechar a imagem live</li> <li>f. Premir Check exposure time, e aguardar sinal verde</li> <li>g. Premir Acquire new take</li> <li>h. Verificar se há saturação, em quantos pixels/Comp. Onda, e registar</li> <li>i. Retirar Refpr650 da imagem e garantir que Refiluminante abrange posição da RefPR650</li> <li>j. Premir Acquire illuminant</li> <li>k. Verificar se há saturação, se houver é necessário adquirir novos tempos de exposição (fechar abertura lente??)</li> <li>l. Premir Acquire Noise</li> </ul>										
<i>Ajustar abertura, zoom e foco: Abertura      Zoom      Foco</i>												
Sistema de iluminação:												
<table border="1"> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>										
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>										
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>										
Luxímetro:												
<table border="1"> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>										
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>										
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>										
<i>Verificar definições de aquisição (não gravar se estão correctas)</i>												
Comp. de onda: Min(400nm) Max(720nm)		Intervalo(10nm)										
Sinal      Tolerância(85%)		Intervalo(5%)										
<i>Posicionamento da pintura</i>												
<i>Posicionar a RefPR650 em zona a ser abrangida pela Ref iluminante e no mesmo plano da pintura</i>												
<i>Medir temperatura</i> °C		<i>Tirar foto com pintura</i> (nº foto)										
<i>Estimar tempos de exposição</i>		<i>Adquirir pintura – takes necessários (anotar pixels saturados)</i>										
<i>Medir iluminante c/ PR650 na referência central #</i> (file)												
<i>Posicionamento da referência, alinhada com o centro do cavalete e verificar perpendicularidade</i>												
<i>Tirar fotografia c/ referência</i> (nº fotografia)												
<i>Adquirir referência de iluminante (novos tempos de exposição se houver saturação)</i>												
<i>Tapar a câmara e adquirir ruído</i>		<i>Fazer backup dos dados, descarregar PR650 e fotos, processar e verificar - visualizar</i>										
<ul style="list-style-type: none"> <li>d. Premir Processing e seleccionar área na referência da imagem. Aguardar sinal verde para avançar</li> <li>e. Fechar Imagem e premir Visualize data</li> <li>f. Abrir a file ref ***** .mat</li> </ul>												

Notas:





### Anexo 3 – Fichas Originais das Pinturas

<b>U.M.</b>	<b>MUSEU DA CASA NOGUEIRA DA SILVA</b>	<b>6395</b>	inventário geral	<b>PN-116</b>	registo classifica
<b>REGISTO CLASSIFICADO</b>		secção: <b>PINTURA</b>			
fotografia:		objecto: <i>Paisagem ✓</i>			
		matéria: <b>CONTRAPLACADO</b>		fabrico:	
		autor: <b>CARLH RAMM</b>		oficina:	
		assunto:		estilo:	
		escola:		época: <i>See XX</i>	
		dimensões: <i>l-29,7cm; a-24,7cm</i>		peso:	
		observações: <b>SERVE: MOLDURA - DIV/340</b>			

descrição: <i>Pintura a óleo sobre base de Contraplacado, representando um campo com mechas de feno.</i>	<b>137</b>	relação do legado	<b>JACQUISTIA - 3º PISO</b>	registo de localização
	registo de informações:		registo fotográfico: <b>1834</b>	
	deslocações internas:		deslocações externas:	
	outros registos:			

<b>U.M.</b>	<b>MUSEU DA CASA NOGUEIRA DA SILVA</b>	<b>6682</b>	inventário geral	<b>PN-162</b>	registro classificad
-------------	--	-------------	------------------	---------------	----------------------

**REGISTO CLASSIFICADO**

fotografia:



secção:

**PINTURA**

objecto:

**Paisagem**

matéria:

**TELA**

fabrico:

autor:

oficina:

assunto:

**PAISAGEM**

estilo:

escola:

época:

dimensões:

**L- 50,2cm ; A- 43,2cm**

peso:

observações:

**Serve - Div/460**

**TEM CARTELA - J. LONDON**

**ESCOLA INGLESA - Sé. XVIII-XIX  
(ESTILO DE GUARDI)**

descrição:

**Pintura a óleo si tela.**  
**Paisagem com a ruínas de um**  
**monumento. Em 1º plano**  
**uma coluna com algumas pessoas**  
**em 2º plano um conjunto**  
**de casas que têm como**  
**pomo de fundo o mar.**

**20**

relação do legado

**Jacinta da Capela**

**Novo-3º Piso**

registro de localização:

registro de informações:

registro fotográfico:

**1869**

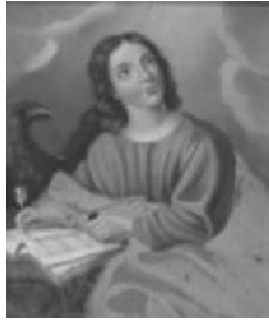
deslocações internas:

deslocações externas:

outros registos:

**REGISTO CLASSIFICADO**

fotografia:



secção:

PINTURA

objecto:

P. Religiosa

materia:

COBRE

fabrico:

autor:

oficina:

assunto:

S. JOÃO EVANGELISTA

estilo:

escola:

época:

dimensões:

L-18,7cm ; a-24cm

peso:

observações:

SELVURA - DIV/406  
SEM CARTELA - SÃO JOÃO EVANGELISTA

descrição: Pintura sobre cobre representando  
S. João Evangelista sentado.

1000

relação do legado

Salte do Quarto 25 da  
Residência - 3º Piso  
registro de localização


registro de informações:

registro fotográfico:

deslocações internas:

deslocações externas:

outros registros:

<b>U.M.</b>	<b>MUSEU DA CASA NOGUEIRA DA SILVA</b>	<b>6668</b>	inventário geral	<b>PA-155</b>	registro classifica:
<b>REGISTO CLASSIFICADO</b>		secção: <b>PINTURA</b>			
fotografia:		objecto: <b>paisagem</b>			
		matéria:	fabrico:		
		<b>MADEIRA</b>			
		autor:	oficina:		
		<b>ANTÓNIO SAUDE</b>			
		assunto:	estilo:		
		<b>MARGENS DO RIO SENA</b>			
		escola:	época:		
	<b>1913</b>				
dimensões:	peso:				
<b>L - 39,6 cm ; A - 34,5 cm</b>					
observações:		<b>SERVE - DIV/453</b> <b>TEM CARTELA - ANTÓNIO SAUDE</b> <b>PARIS - 1913</b>			
<p>descrição: Pintura a óleo sobre madeira apresentando as margens do Sena. Pintura em tons de verde, azul, cinza e amarelo claro. A pintura está assinada no canto inferior direito acrescentando-se a data em no canto inferior esquerdo.</p>		<b>845</b>	relação do legado	<b>Sacristia da Capela</b>	registro de localiza:
				<b>Nova - 5º Piso</b>	
		registro de informações:	registro fotográfico:		
			<b>1863</b>		
deslocações internas:		deslocações externas:			
<b>Gala de Estar - 3º Piso</b>					
outros registos:					

**REGISTO CLASSIFICADO**

fotografia:



descrição: pintura a óleo sobre madeira,  
representando barcos.

secção:

PINTURA

objecto:

Marinha

materia:

óleo sobre madeira

fabrico:

autor:

oficina:

assunto:

estilo:

escola:

época:

dimensões:

l-15,5cm a-19,2cm

peso:

observações:

Assinado - A.H.  
moldura: DIV-162

712

relação do legado

SE-W

registro de localização

registro de informações:


registro fotográfico:


134 E.3.1  
135 E.3.2

deslocações internas:

deslocações externas:

outros registos:

<b>U.M.</b>	<b>MUSEU DA CASA NOGUEIRA DA SILVA</b>	716 <small>inventário geral</small>	PN-44 <small>registro classificado</small>
<b>REGISTO CLASSIFICADO</b>		seção: <b>PINTURA</b>	
fotografia:  		objecto:  matéria: óleo sobre tela fabrico:  autor: H. Eugénia oficina:  assunto:  estilo:  escola:  época:  dimensões: 1-19,3cm a-42,3cm peso:  observações: moldura : DIV-142	
descrição: pintura a óleo sobre tela representando ramo de flores.		735 <small>relação do legado</small> registro de informações:	ES - W <small>registro de localização</small> registro fotográfico: 107 E.4.4 103  deslocações internas:  deslocações externas:  outros registos:


<b>REGISTO CLASSIFICADO</b>	seção: PINTURA	
fotografia:  	objecto: P. Religiosa	
	matéria: óleo sobre metal	fábricao:
	autor:	oficina:
	assunto:	estilo:
	escola:	época:
	dimensões: 1.18cm a-23cm	peso:
	observações: moldura DN-161	


descrição: pintura a óleo sobre metal, representando N. S. senhora, S. João e o Menino.


Adq. (Dinastia - 25/2/ ) 11.800\$  
 \*Virgília Nossa Senhora com o Menino e S. João - Pintura a óleo sobre cobre, século XVIII

713	7E-W
relação do legado	registro de localização
registro de informações:	registro fotográfico:
	137 E.3.3
	136 E.3.4
deslocações internas:	deslocações externas:
outros registos:	



<b>U.M.</b>	MUSEU DA CASA NOGUEIRA DA SILVA	6397	inventário geral PN-117	registro classificado		
<b>REGISTO CLASSIFICADO</b>		secção: <b>PINTURA</b>				
fotografia:		objecto: <b>Retrato</b>				
		matéria: <b>COBRE</b>	fabricio:			
		autor:	oficina:			
		assunto:	estilo:			
		escola:	época:			
		dimensões:	peso:			
		observações:		<b>SERVE: MOLDURA - DIV/341</b>		
		descrição: <i> Pintura sobre cobre pta. tendo a Rainha Maria da Escócia que segura na sua mão esquerda um pequeno cão.</i>  <i>Prof. João de Sousa Sobral; Rainha Maria Stuart.</i>		2	relação do legado	<b>SACRISTIA - 3º PISO</b>
registro de informações:			registro fotográfico: <b>1887</b>			
deslocações internas:		<i>Sala Reuniões - 2º Piso</i>		deslocações externas:		
outros registos:						

U.M.	MUSEU DA CASA NOGUEIRA DA SILVA	708	PN-36
		inventário geral	registro classificado
REGISTO CLASSIFICADO		seção: PINTURA	
fotografia: 7 		objecto: P. RELIGIOSA matéria: óleo sobre madeira fabrico: autor: oficina: assunto: estilo: escola: época: dimensões: a-38 cm l-22,4 cm peso: observações: moldura: DIV-131 caixilho: DIV-132	
pintura representando a Senhora e o Menino  Pintura - "A Virgem e o Menino com o Padre Eterno e o Espírito Santo - "Escola Flamenega Sé. XVI" Prof. Dr. Thomas De Corte Kaufmann Sé. XVI - cópia de outro. Holanda e não Flandres. Países Baixos do Norte. Ha. Leu ou Amsterdão. Cherchez dans la Direction de Cornelis Engelbrechtsg ou Adriaen Isebraudt		744	S.E-W
		refeição do legado	registro de localização
registro de informações:		registro fotográfico: 88 F.1.3 89 F.1.4 90	
deslocações internas:		deslocações externas:	
outros registros:		outros registros: Cornelis Engelbrechtsg ou Adriaen Isebraudt	

<b>U.M.</b>	<b>MUSEU DA CASA NOGUEIRA DA SILVA</b>	704 <small>inventário geral</small>	PIV-32 <small>registro classificado</small>
<b>REGISTO CLASSIFICADO</b>		seção: <b>PIINTURA</b>	
fotografia: 3 	objecto: <b>P. RELIGIOSA</b> matéria: <i>óleo sobre madeira</i> fabrico: autor: oficina: assunto: estilo: escola: época: dimensões: <i>l-29cm a-35cm</i> peso: observações: <i>moldura: DIV-127</i>		
descrição: <i>piintura representando Cristo nos braços da Senhora.</i>  GN: <i>Pietà. Escola flamenga, 2ª metade sec. XVI</i>  <i>Prof. Kaufmann: Pietá meio do séc. XVI flamengo Antuerpia ou Bruxelas.</i>		740 <small>relação do legado</small>	S.E-W <small>registro de localização</small>
		registro de informações:	registro fotográfico: 91 F.2.3 92
		deslocações internas:	deslocações externas:
outros registos:			

REGISTO CLASSIFICADO

fotografia:

2



secção:

PINTURA

objecto:

P. RELIGIOSA

matéria:

óleo sobre madeira

fabrico:

autor:

oficina:

assunto:

estilo:

escola:

época:

dimensões:

f. 26,7 cm a. 32,4 cm

peso:

observações:

moldura: DIV-133  
com pintura no verso (hasas)

Pintura a óleo sobre madeira representando N. Senhora a amamentar o Menino.

G.M.

Virgem do leite. Flandres-flamengo  
do século XVI

Prof. Kaufmann:  
Cópia XVI flamengo  
Fins XVI Vers 1600  
Historisaut

745

relação do legado

S.E-W

registo de localização

registo de informações:

registo fotográfico:


78 F.1.1  
79 F.2.6  
80  
81

deslocações internas:

Sala de Pintura Antiga

deslocações externas:

outros registos:

<b>U.M.</b>	<b>MUSEU DA CASA NOGUEIRA DA SILVA</b>	707 <small>inventário geral</small>	PN-35 <small>registro classificado</small>
<b>REGISTO CLASSIFICADO</b>		seção: <b>PINTURA</b>	
fotografia: 4  	objecto: <b>P. RELIGIOSA</b> matéria: <b>óleo sobre madeira</b> fabrico: autor: oficina: assunto: estilo: escola: época: dimensões: <b>l-24,9cm a-34,8cm</b> peso: observações: <b>moldura DIV-130</b> <b>assinado no verso da moldura.</b> <b>Wan Kteben</b> <b>Reproduzido pela Postal</b>		
descrição: <b>pintura a óleo sobre madeira representando N. Senhora a amamentar o Menino</b> <b>GM</b> <b>Vigam do lute. Escola flamenca.</b> <b>1ª metade séc. XVI</b> <b>Prof. Kaufmann; AMBROSIOUS BENSON ou seguidor (XVI) flamengo.</b>	742 <small>relação do legado</small> registro de informações:	S.E - W <small>registro de localização</small> registro fotográfico: <b>75 F.2.5</b> <b>76</b> <b>77</b>	
deslocações internas:		deslocações externas:	
outros registos: <b>Cartela: A Virgem e o Menino com o Padre Estevão e o Espírito Santo</b> <b>Escola Flamenca</b> <b>séc. XVI</b>			

REGISTO CLASSIFICADO

fotografia:



secção:

PINTURA

objecto:

P. RELIGIOSA

materia:

óleo sobre madeira

fabrico:

autor:

oficina:

assunto:

estilo:

escola:

epoca:

dimensões:

1722 cm a 128 cm

peso:

observações:

replana: DIV-139  
caixilho: DIV-142  
Replana de Vitor Serrão -> Cópia flamenga (Rafael) de 154d?. Boa Pintura.  
Rafael ???

733

relação do legado

S.E - E

registro de localização

registro de informações:

registro fotográfico:

113 7.2.3  
114 7.2.4  
115  
116  
117

deslocações internas:

galéria/pintura

deslocações externas:

outros registros:

Pintura a óleo sobre madeira representando a Senhora, o Menino, S<sup>ta</sup> Ana e S. João

Prof. Dr. T. de Costa Kaufmann  
concordo com Italo Flamengo  
meados sé. XVI

Óficina de Dirk de Quade van Ravesteyn

**Virgem com o Menino e  
S. João Baptista**

(abas: S. Miguel e S. Rafael)

**Óleo sobre cobre**  
**Cerca de 1600**

(PN-33)



