



UNIVERSIDADE CATÓLICA PORTUGUESA

IMAGENS HIPERESPETRAIS APLICADAS AO ESTUDO E CONSERVAÇÃO DE OBRAS PICTÓRICAS

Tese apresentada à Universidade Católica Portuguesa
para obtenção do grau de Doutor em
Conservação e Restauro de Bens Culturais - Especialização em Pintura

Por: Luís Emanuel Bravo de Abreu Santos Pereira

Sob orientação de

Prof.^a Doutora Ana María Calvo Manuel (orientadora)

Prof. Doutor Paulo Torrão Fiadeiro (coorientador)

ESCOLA DAS ARTES

Julho de 2013

Resumo (Abstract)

A ampla difusão presenciada, durante a última década, das câmaras fotográficas digitais do tipo Reflex (D-SLRs), veio abrir aos investigadores na área das Artes novas possibilidades, pois têm agora ao seu dispor uma ferramenta não apenas para documentar o estado de conservação de uma obra de arte, mas também para a examinar no espectro invisível (como por exemplo no infravermelho ou ultravioleta) ou para recolher e analisar informação no espectro visível, mas de uma forma inovadora e com novas aplicações.

É neste âmbito que se enquadra a presente tese, que apresenta os resultados obtidos na construção, calibração e validação de um sistema hiperespectral baseado numa câmara digital comercial (uma Nikon D300 D-SLR) e que mostrou ser possível, operando inteiramente dentro da região visível do espectro eletromagnético, capturar imagens hiperespectrais compostas por 28 bandas, entre os 420 nm e os 690 nm, em passos de 10 nm (22 bandas são capturadas diretamente com o sistema e 6 são interpoladas), um número de bandas em alguns casos superior ao que é possível de obter com outros sistemas de imagiografia multiespectral ou hiperespectral, equipamentos por vezes mais complexos e dispendiosos que o aqui apresentado.

Em comparação com o espectroradiómetro de referência (*Photoresearch* PR650), usando um alvo-padrão de 24 cores *ColorChecker X-Rite*, o sistema proposto mostrou bons resultados, apresentando uma boa precisão, suficiente para muitos dos usos, novos e promissores, associados à imagiografia hiperespectral.

Em termos espectrais o sistema proposto apresenta em média erros de aproximadamente 3,4%, quantificados em termos de erro quadrático médio (RMSE ou *Root Mean Square Error*), e de 99,3% quantificados em termos de coeficiente de ajuste (GFC ou *Goodness-of-Fit-Coefficient*). No que diz respeito à qualidade colorimétrica, o sistema hiperespectral apresenta diferenças de cor médias na ordem 6,0968 unidades de ΔE_{ab}^* , 3,8228 unidades de ΔE_{94}^* e de 3,6794 unidades de ΔE_{00} . Quanto aos índices de metamerismo, o sistema revela níveis de metamerismo médios de 1,1457, 1,2410, 0,8078 e 0,7777 para os pares de iluminantes “D65,A” e “D65,F2” quantificados em termos das diferenças de cor de ΔE_{ab}^* e ΔE_{00} , respetivamente.

A possibilidade de capturar imagens num número de bandas espectrais superior ao do que é possível com os modelos tradicionais de câmaras digitais, de três canais apenas, abre novas possibilidades uma vez que este tipo de registo contém valores de reflectâncias (informação que é independente do tipo de iluminante) e num número de bandas do espectro muito maior. Assim, com este tipo de registo é possível obter uma maior fidelidade na reprodução da cor do que o que seria possível apenas com fotografia convencional. Este tipo de registo apresenta também como vantagem o facto de não ser tão suscetível a problemas de metamerismo das cores, como é frequente em sistemas de reprodução tricromática.

Com o presente trabalho mostramos algumas das possíveis aplicações de imagiografia hiperespectral. Em dois casos práticos, utilizando uma pintura do século XVI (*Tríptico de Pentecostes*, em Miragaia, Porto) e uma outra obra de arte do século XX (*O Cabouqueiro*, por Júlio Pomar), é possível pela observação de imagens monocromáticas de bandas espectrais de certos comprimentos de onda do espectro visível, detetar alterações nas pinturas e áreas com desenho subjacente, zonas de reintegração, repintes e outro tipo de informação, tradicionalmente apenas acessível usando imagens de radiação invisível.

Através de programação com *software* adequado, foi possível testar virtualmente a aparência de obra de arte quando submetida a diferentes tipos de iluminantes ou fontes de luz, evitando experiências mais demoradas ou, em algumas situações, evitando submeter a obra de arte a *stress* desnecessário ou a radiações do espectro mais destrutivas.

Palavras-chave: multiespectral; hiperespectral; D-SLR; metamerismo.

Abstract

The spread of digital photographic cameras (predominantly of D-SLR type) during the last decade has opened new possibilities to the investigators of work of arts, having now a tool not only to document the conservation state of a work of art but also to examine in the invisible spectrum (such as in Infrared or Ultraviolet) or to collect and analyze information in the visible spectrum in new ways. This is the case of the present work, which presents some results obtained on building, calibrating and testing a system using a commercial digital camera (a Nikon D300 D-SLR) that showed to be possible, entirely on the visible spectrum, to capture hyperspectral images composed of 28 bands, between 420 nm and 690 nm, in steps of 10 nm (22 bands are directly captured with the system and 6 are interpolated), a number of bands superior to many other multispectral and hyperspectral imaging systems built with more complex and expensive hardware.

Compared to a reference spectroradiometer (Photoresearch PR650) using a standard 24 color chart *ColorChecker X-Rite*, the proposed system showed good results, indicating that it presents an accuracy good enough to many of the new and promising uses in hyperspectral imaging.

It showed average values for RMSE (Root Mean Square Error) of 3,4% and 99,3% for GFC (Goodness-of-Fit-Coefficient); the colorimetric precision of the system presented values for color differences equations of 6,0968 units for ΔE_{ab}^* , 3,8228 units for ΔE_{94}^* and 3,6794 units for ΔE_{00} ; the tested metameric indices showed values of 1,1457, 1,2410, 0,8078 and 0,7777 for illuminant pairs "D65,A" and "D65,F2", all quantified in terms of color differences equations ΔE_{ab}^* and ΔE_{00} , respectively.

The possibility of capturing images in more bands than the traditional three channels color models (the RGB model, commonly used on digital camera's sensors), opens new possibilities, because this type of data contains reflectance values (data independent of the type of illuminant) and in an higher number of wavelength bands. This type of data is more colour accurate than conventional photography and it is not susceptible to colours metamerism, a frequent problem with trichromatic reproduction systems.

With the present work we have shown some of the possible applications of hyperspectral imaging. In a practical case using a XVI Century painting (*Triptico de Pentecostes de Miragaia*, Porto) and a XX Century work of Art (*O Cabouqueiro*, by Julio Pomar) observing and analyzing individual isolated bands in certain wavelengths of the visible spectrum, allowed us to detect alterations in paintings, areas with repainting, reintegration, under drawings and other type of information, traditionally only possible to obtain using invisible radiation imagery. Using adequate software programs it was possible to virtually test the appearance of the work of art in different types of illuminants or light sources, preventing more time-consuming experiences or, in both situations, avoiding submitting the work of art to unnecessary stress or more destructive radiations.

Keywords: multispectral; hyperspectral; D-SLR; metamerism.

Dedicatória

Dedico o presente trabalho a duas pessoas que muito me influenciaram enquanto fotógrafo e, como tal, deixaram em mim a semente que cresceu até fazer duma paixão profissão, sem a qual não seria possível realizar o presente trabalho:

- a meu pai, António Santos Pereira, um fotógrafo amador apaixonado; ainda hoje, quase na oitava década de existência, continua com muito entusiasmo a fotografar regularmente a Natureza; com ele dei os primeiros passos na fotografia, com ele ganhei o gosto e paixão por esta área; pertenceu à geração pioneira em Portugal na fotografia submarina e algumas das imagens de infância, de que me recordo bem, é presenciar o meu pai a construir as suas próprias câmaras estanques para equipamento fotográfico e de iluminação;

- ao Eng.º Rui Pinto, falecido em 1999, fotógrafo científico da Faculdade de Farmácia da Universidade do Porto, até ao dia em que, por razões de saúde, cessou funções; partilhou com o meu pai (de quem era um dos melhores amigos) a paixão pela fotografia, em especial a fotografia submarina, de que foi um dos pioneiros em Portugal; com ele aprendi muito sobre técnica, em especial sobre assuntos de revelação de película fotográfica e iluminação artificial; ainda hoje recordo com saudade as longas conversas técnicas que, com ele, tive o privilégio de usufruir, um verdadeiro mestre que nunca hesitou em partilhar com os mais novos a sua longa experiência e sabedoria.

Agradecimentos

Correndo o risco de não mencionar todas as pessoas que de alguma forma me ajudaram e apoiaram em diferentes momentos - como é o caso de muitos colegas de trabalho, amigos e da minha família -, não quero deixar de referir alguns nomes em particular, a quem deixo os meus agradecimentos pelo papel que tiveram em alguns momentos no desenvolvimento da presente tese:

Ao Prof. Doutor Paulo Torrão Fiadeiro (UBI, coorientador da tese). Além de generosamente ter aceite a coorientação nesta tese, foi mais longe do que normalmente seriam as funções de orientação e permitiu-me o acesso a equipamento e instalações do Centro de Ótica da UBI (mesmo sendo eu aluno em outra instituição), sem o qual esta tese não poderia apresentar a mesma qualidade. Com o seu modo amável, que parece nunca ter limites, apoiou-me e incentivou-me em momentos de maior dificuldade - intrínsecos a qualquer processo de investigação científica.

À Prof.^a Doutora Ana María Calvo Manuel (Universidad Complutense de Madrid, orientadora da tese). Foi pela sua mão e por esta em mim ter acreditado que iniciei a minha carreira na fotografia científica de obras de arte, quer no Centro de Conservação e Restauro da UCP, quer como professor no Curso de Conservação e Restauro e como investigador no CITAR. Se assim não tivesse sido, certamente não estaria a escrever esta tese, razão pela qual lhe estarei eternamente grato.

Ao Hugo Miranda Pires (empresa “Superfície – Geomática”), amigo e companheiro em experiências de fotografia científica (de que resultaram já artigos e trabalhos em parceria, por muitos considerados inovadores) e um dos principais especialistas da Europa em fotogrametria aplicada a obras de arte. Foi com ele que tomei conhecimento, pela primeira vez, da aplicação da tecnologia multiespectral ao estudo de obras de arte, de que resultou a ideia que deu o tema à presente tese.

Ao Prof. Doutor Francisco Miguel Pereira Brardo Ferreira (UBI), por todo o apoio na componente experimental, partilha e troca de ideias, mas principalmente no uso e manuseio do equipamento científico da UBI, programação em MatLab, e generosa partilha do seu vasto conhecimento no tema em que esta tese incide. É mais que justo afirmar que, mesmo sem o ter sido oficialmente, na prática foi um verdadeiro coorientador desta tese.

Aos muito estimados Professor Doutor Roger Van Schoute (Universidade Católica de Louvain) e Prof.^a Doutora Carmen Garrido Pérez (Museu do Prado), agora jubilados, de quem tive o privilégio de ser aluno e deles ter recebido conhecimento, apoio e incentivo numa temática associada àquela que foi a sua própria paixão profissional, da investigação e aplicação de métodos de registo e documentação de obras de arte, com processos afins da fotografia e radiografia.

Ao Arq.^o José Bernardo Menéres de Tavares e Távora, por tão amavelmente ter disponibilizado a sua pintura de Júlio Pomar “O Cabouqueiro” para que fosse possível digitalizá-la no âmbito desta tese, num voto de confiança e apreço à investigação científica e académica que é muito raro encontrar nos nossos dias. A mesma pintura havia sido estudada, em outras vertentes, na tese da Dr.^a Ana Isabel Falcão Burmester Cudell Silva Pinto, colega de doutoramento, a quem agradeço pela sugestão da obra e por ter disponibilizado os resultados da análise de composição de pigmentos que efetuou sobre a mesma.

À Confraria do Santíssimo Sacramento de S. Pedro de Miragaia, pela amabilidade de permitir o acesso à digitalização do Tríptico flamengo de Pentecostes, assim como ao incansável e sempre disponível Sr. Graciano Barbosa, que mais que um guardião do Tríptico é um verdadeiro apaixonado e promotor da sua divulgação, recebendo sempre com apreço e generosidade todos os investigadores da UCP que ali se têm dirigido.

À Prof.^a Doutora Jorgelina Carballo Martinez (UCP) - companheira na aventura que representa a investigação científica, praticamente desde que iniciei funções

no Centro de Conservação e Restauro da UCP -, pela ajuda na interpretação dos dados das pinturas analisadas e pelos dados fornecidos relativos ao Tríptico de Miragaia.

Ao Doutor António Mendes, ao Mestre. Marco Bernardo e ao Dr. Jorge Santos, colegas investigadores da UBI, pela partilha e troca de impressões, em especial na programação em MatLab, ferramenta em que são peritos. No caso do último, acresce um especial agradecimento por ter também possibilitado a digitalização hiperespectral de parte da sua montagem de amostras de pigmentos, usados por este no âmbito dos seus próprios trabalhos de investigação.

Ao Prof. Doutor Henrique Manuel S. Pereira, à Dr.^a Miriam Oliveira Ribeiro Silva, Dr. Jorge Paulo Bravo de Abreu Santos Pereira e Mestre Joana Madalena Tavares Martins Guedes, pelo ajuda no trabalho na revisão de textos e das referências bibliográficas e todo o apoio e incentivo em momentos críticos. À Dr.^a Ana de Castro Salgado, lexicóloga da Porto Editora, pelo esclarecimento de dúvidas relativas à ortografia de alguns termos técnicos de acordo com o novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo apoio com a Bolsa SFRH/BD/39192/2007, essencial para assegurar a viabilidade material deste projeto.

Abreviaturas e símbolos

AOTF: do inglês ***A**cousto-**O**ptic **T**unable **F**ilter.*

CCD: do inglês ***C**harge **C**oupled **D**evice.*

CFA: do inglês ***C**olour **F**ilter **A**rray.*

CIE: do francês, ***C**omission **I**nternational de l'**É**clairage*

CIELAB: forma abreviada para designar o espaço de cor CIE L*a*b* (1976).

CIELUV: forma abreviada para designar o espaço de cor CIE L*u*v* (1976).

CIEXYZ: forma abreviada para designar o espaço de cor CIE XYZ (1931).

CMOS: do inglês ***C**omplementary **M**etal-**O**xide-**S**emiconductor.*

CMY: do inglês ***C**yan **M**agenta **Y**ellow.*

CMYK: do inglês ***C**yan **M**agenta **Y**ellow **K**ey (ou de *Black*).*

CRI: do inglês ***C**olor **R**endering **I**ndex.*

CRISATEL: do inglês ***C**onservation **R**estoration **I**nnovation **S**ystems for image capture and digital **A**rchiving to enhance **T**raining **E**ducation and lifelong **L**earning.*

CRT, monitor: do inglês ***C**athodic **R**ays **T**ube.*

D-SLR: do inglês ***D**igital **S**ingle **L**ens **R**eflex.*

EDXRF: do inglês ***E**nergy **D**ispersive **X**-**R**ay **F**luorescence analysis.*

EM, espectro: espectro **E**letromagnético.

ETF: do inglês *Electronic Tunable Filter*.

EV: do inglês *Exposure Value*.

FCT: **F**undação para a **C**iência e a **T**ecnologia.

FPA: do inglês *Focal Plane Array*.

FTI: do inglês *Fourier Transformed Interferometer*.

FWHM: do inglês *Full Width at Half Maximum*.

GFC: do inglês *Goodness of Fit Coefficient*.

HgCdTe: dos símbolos químicos para **T**elureto de **M**ercúrio (**Hg** do latim *Hydrargyrum*) e **C**ádmio.

HID: do inglês *High Intensity Discharge*.

HMI: do inglês *Hydrargyrum (Mercúrio) Medium-arc Iodides*.

HQI: do inglês *Hydrargyrum (Mercúrio) Quartz Iodide*.

InGaAs: do inglês *Indium Gallium Arsenide* (Arseniato de Índio e Gálio).

InSb: dos símbolos químicos para Antimoneto (**Sb** do latim *Stibium*) de **Í**ndio.

IPCR: Instituto **P**ortuguês de **C**onservação e **R**estauro.

IPM: Instituto **P**ortuguês de **M**useus.

IV, radiação: radiação infravermelha.

LBP: abreviatura do nome do autor, **L**uís **B**ravo **P**ereira.

MARC: do inglês *Methodology for Art Reproduction in Colour*.

MCT: do inglês ***M**ercury **C**admium **T**elluride* (Telureto de Mercúrio e Cádmiio).

MTF: do inglês ***M**odulation **T**ransfer **F**unction*.

nm: nanómetro.

NTSC: do inglês ***N**ational **T**elevisi**S**ystem **C**ommittee*.

PAL: do inglês ***P**hase **A**lternating **L**ine*.

PbO-PbS: dos símbolos químicos para Óxido de Chumbo - Sulfureto de Chumbo (**Pb** símbolo químico do chumbo, em latim *Plumbum*).

PGP: do inglês ***P**ris**M**-**G**rating-**P**ris**M***.

PRISMS: do inglês ***P**ortable **R**emote **I**maging **S**ystem for **M**ultispectral **S**canning*.

PTFE: politetrafluoroetileno (nome comercial Teflon).

PtSi: do inglês ***P**latinum **S**ilicide* (Siliceto de Platina).

RAW: traduzido do inglês “cru” ou “em bruto” (ficheiros de imagem).

RGB: do inglês ***R**ed, **G**reen and **B**lue*.

RMSE: também designado por RMS, do inglês ***R**oot **M**ean **S**quare **E**rror*.

RYB: do inglês ***R**ed, **Y**ellow and **B**lue*.

SPD: do inglês ***S**pectral **P**ower **D**istribution*.

TCC: Temperatura de **C**or **C**orrelacionada.

TFT, filtro: no âmbito desta tese, sempre que nos queremos referir a um filtro de interferência sintonizável de cristais líquidos “VariSpec” modelo VIS-10, da *Cambridge Research & Instrumentation, Inc.*

TFT, monitor de cristais líquidos; do inglês *Thin Film Transistor*.

TIFF: do inglês **T**agged **I**mage **F**ile **F**ormat.

TTL: do inglês *Trough The Lens*.

UBI: **U**niversidade da **B**eira **I**nterior

UCP: **U**niversidade **C**atólica **P**ortuguesa.

UM: **U**niversidade do **M**inho

USB: do inglês *Universal Serial Bus*.

UV, radiação: radiação **u**ltravioleta.

VASARI: do inglês *Visual Arts System for Archiving and Retrieval of Images*.

VSFM: do inglês *Visual Structure From Motion*.

λ : letra grega “Lambda”, símbolo para o comprimento de onda da radiação EM.

μm : abreviatura de micrómetro.

Índice

Resumo (Abstract)	3
Dedicatória.....	5
Agradecimentos	6
Abreviaturas e símbolos.....	9
Índice	13
Índice de Figuras.....	18
1.- Introdução.....	23
1.1- Motivação e Objetivo do estudo.....	25
1.2- Estrutura e metodologia.....	29
2.- Enquadramento Teórico	33
2.1- Radiação eletromagnética, luz e cor.....	35
2.1.1- Pioneirismo de Newton, Herschel e Ritter	37
2.2- Percepção da cor.....	40
2.2.1- Tricromatismo	40
2.2.2- Sistema Visual Humano	49
2.3- Colorimetria.....	57
2.3.1- Observadores-padrão e sistema colorimétrico da CIE	59
2.3.2- Iluminantes-padrão da CIE.....	65
2.3.3- Espaços de cor uniformes da CIE.....	69
2.3.4- Fórmulas de diferenças de cor.....	72
2.3.5- Reflectância espectral.....	81
2.4- Sistemas espectrais	84
2.4.1- Introdução e fundamentos	84
2.4.2- Instrumentação	88
2.4.2.1- Detetores.....	88
2.4.2.2- Fontes de luz.....	91
2.4.2.3- Sistemas de seleção de bandas espectrais.....	93
2.4.2.4- Sistemas de imagiografia espectral.....	94
2.5- Uso de imagens Multiespectrais e Hiperespectrais em Obras de Arte	96
2.5.1- Introdução.....	96
2.5.2- Aplicações práticas em pintura artística	99

2.5.2.1- Monitorização do estado de conservação das obras.....	99
2.5.2.2- Imagens para documentação, conservação e publicação	102
2.5.2.3- Identificação e mapeamento de constituintes da camada pictórica.....	107
2.5.2.4- Rejuvenescimento e restauro virtual de pinturas	114
2.5.2.5- Visualização de alterações e desenho subjacente	119
2.5.2.6- Simulação da aparência da obra perante diferentes iluminantes	121
2.5.3- Principais sistemas aplicados a pintura artística.....	125
2.5.3.1- Projetos VASARI e MARC	126
2.5.3.2- Istituto de Ricerca Sulle Onde Electromagnetiche	131
2.5.3.3- École Nationale Supérieure des Télécommunications	132
2.5.3.4- National Gallery of Art - Conservation Division	134
2.5.3.5- Art Innovation.....	136
2.5.3.6- Foundation for Research & Technology – Hellas.....	138
2.5.3.7- Munsell Color Science Laboratory - Rochester Institute of Technology	141
2.5.3.8- Projeto CRISATEL.....	146
2.5.3.9- Universidade do Minho	151
2.5.3.10- Universidade da Beira Interior	153
2.5.3.11- Projeto PRISMS.....	155
3.- Material e Métodos	159
3.1- Introdução	161
3.2- Caracterização da fonte de luz.....	161
3.2.1- Sistema de iluminação e sua geometria:.....	162
3.2.2- Fonte de luz: a lâmpada SoLux	163
3.2.3- Propriedades espectrais da fonte de luz.....	165
3.2.4- Estabilidade e repetibilidade.....	167
3.3- Caracterização da objetiva.....	169
3.4- Câmaras digitais fotográficas D-SLR.....	172
3.4.1- Metodologia para caracterização dos sensores.....	176
3.4.2- Caracterização e seleção das câmaras	179
3.4.2.1- Nikon D70	179
3.4.2.2- Fujifilm Finepix IS Pro	182
3.4.2.3- Sigma SD-14	187
3.4.2.4- Nikon D300.....	191

3.5- Seleção dos filtros.....	195
3.5.1- Montagem e protocolo para caracterização dos filtros.....	196
3.5.2- Filtros caracterizados.....	197
3.5.3- Combinação dos filtros com o sensor.....	198
3.6- Alvo branco de referência	200
3.7- Alvo de cor	203
3.8- O espectralímetro de referência	204
3.9- O sistema Hiperespectral.....	205
3.9.1- Protocolo para digitalização Hiperespectral com o sistema final	212
3.9.2- Determinação da exposição em função do filtro e banda de espectro EM a selecionar	215
4.- Aplicações experimentais e Resultados.....	219
4.1- Introdução.....	221
4.1.1- Métricas de avaliação da qualidade dos resultados	222
4.1.1.1- <i>Interpretação dos resultados das métricas</i>	224
4.1.2- Análise subjetiva dos gráficos das curvas espectrais	226
4.2- Resultados experimentais	230
4.2.1- Alvos (em ambiente de estúdio).....	230
4.2.1.1- <i>Testes de consistência</i>	230
4.2.1.2- <i>Alvo ColorChecker, montagem intermédia de 5 filtros</i>	235
4.2.1.3- <i>Alvo ColorChecker, montagem final com 13 filtros</i>	236
4.2.2- Obras de Arte (pinturas artísticas).....	241
4.2.2.1- <i>Pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc. XVI)</i>	241
4.2.2.2- <i>Pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX)</i>	248
4.3- Simulações de visualização a partir do cubo hiperespectral	257
4.3.1- Pintura artística “ <i>Tríptico de Miragaia</i> ” (séc. XVI).....	260
4.3.2- Pintura artística “ <i>O Cabouqueiro</i> ” (séc. XX).....	264
5.- Conclusões.....	269
Referências Bibliográficas	279
Publicações e comunicações	309
Anexos	315
Anexo A: Funcionamento das Lâmpadas SoLux	317
Anexo B: Panfleto da objetiva Coastal Optics 60mm f/4.....	318
Anexo C: Pigmentos analisados da pintura artística “ <i>O Cabouqueiro</i> ” (séc. XX).....	321

Apêndices.....	323
Apêndice A: Tabela das reflectâncias medidas no alvo ColorChecker de 24 cores com o espectroradiómetro PR650.....	325
Apêndice B: Tabela descritiva dos filtros fotográficos analisados	326
Apêndice C: Sensibilidade espectral dos sensores das câmaras, com e sem os filtros externos	342
Apêndice D: Exposição em função dos filtros e canais seleccionados para separação de bandas espectrais.....	347
Apêndice E: Resultados das reflectâncias medidas no ColorChecker com o sistema hiperespectral de 5 filtros.....	348
Apêndice F: Resultados das reflectâncias medidas no ColorChecker com o sistema hiperespectral de 13 filtros.....	349
Apêndice G-1: Diferenças de cor e espectrais - ColorChecker - sistema hiperespectral de 5 filtros	350
Apêndice G-2: Diferenças de cor e espectrais - ColorChecker - sistema hiperespectral de 13 filtros	351
Apêndice H-1: Índices de metamerismo - ColorChecker - sistema hiperespectral de 5 filtros	352
Apêndice H-2: Índices de metamerismo - ColorChecker - sistema hiperespectral de 13 filtros	353
Apêndice I: Gráficos de reflectâncias espectrais medidas no ColorChecker	354
Apêndice J: Reflectâncias no alvo ColorChecker, por comprimento de onda e Sensibilidade espectral do sensor+filtro correspondente.....	358
Apêndice K: Mapas de sinalização das áreas digitalizadas na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc. XVI)	366
Apêndice L: Resultados das reflectâncias medidas na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc.XVI).....	369
Apêndice M: Diferenças de cor e espectrais medidas na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc.XVI).....	370
Apêndice N: Índices de metamerismo medidos na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc.XVI).....	371
Apêndice O: Gráficos de reflectâncias espectrais medidas na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc.XVI).....	372
Apêndice P: Mapas de sinalização das áreas digitalizadas na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX).....	375
Apêndice Q: Resultados das reflectâncias medidas na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX).....	377

Apêndice R: Diferenças de cor e espectrais medidas na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX)	379
Apêndice S: Índices de metamerismo medidos na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX)	381
Apêndice T: Gráficos de reflectâncias espectrais medidas na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX)	383

Índice de Figuras

<i>Figura 1: Espectro Eletromagnético.</i>	36
<i>Figura 2: Experiência de Newton de separação do espectro luminoso.</i>	37
<i>Figura 3: Sínteses Aditiva (esquerda) e Subtrativa (direita) na reprodução de cores.</i>	49
<i>Figura 4: Principais estruturas anatômicas do olho humano.</i>	51
<i>Figura 5: Esquema de secção transversal da retina do olho humano.</i>	53
<i>Figura 6: Gráfico representativo da sensibilidade espectral relativa dos cones.</i>	55
<i>Figura 7: Funções de ajuste de cor $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ e $b(\lambda)$ para o observador-padrão CIE 1931.</i>	60
<i>Figura 8: Funções de ajuste de cor $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ e $z(\lambda)$ para o observador-padrão CIE 1931.</i>	62
<i>Figura 9: Diagrama de cromaticidade CIE 1931 (x,y).</i>	64
<i>Figura 10: Iluminantes-padrão CIE A, B e C.</i>	66
<i>Figura 11: Iluminantes-padrão CIE D50, D55, D65 e D75.</i>	67
<i>Figura 12: Iluminantes-padrão CIE F2, F7 e F11.</i>	68
<i>Figura 13: Diagrama representativo do espaço de cor CIE 1976 ($L^*a^*b^*$).</i>	72
<i>Figura 14: Representação esquemática de uma “imagem RGB” versus “cubo de imagens Multiespectral”.</i>	98
<i>Figura 15: Monitorização do estado de conservação com o sistema VASARI, na National Gallery, Londres.</i>	101
<i>Figura 16: Espaços de cor mais usados em fotografia digital, projetados no diagrama de cromaticidade CIE 1931 (x,y).</i>	104
<i>Figura 17: Representação esquemática de um cubo espectral - obtido por imagiografia multiespectral - e possível leitura do espectro num ponto na imagem.</i>	108
<i>Figura 18: Diferenciação e mapeamento de pigmentos em pintura artística.</i>	110
<i>Figura 19: Imagens multiespectrais e gráficos de distribuições de reflectância de seis pigmentos azuis.</i>	111
<i>Figura 20: Imagens multiespectrais e gráficos de distribuições de reflectância de pigmentos azuis na pintura “La Mousmé”, de Vincent van Gogh.</i>	112
<i>Figura 21: Identificação de pigmentos na pintura “A dama com um arminho” (Museu Czartoryski, em Cracóvia).</i>	114
<i>Figura 22: Rejuvenescimento virtual da pintura “A dama com um arminho” (Museu Czartoryski, em Cracóvia).</i>	116
<i>Figura 23: Rejuvenescimento virtual da pintura “Mona Lisa” (Museu do Louvre, em Paris).</i>	116
<i>Figura 24: Restauro virtual de pigmentos na pintura “A conversão de Madalena” (National Gallery, Londres).</i>	117
<i>Figura 25: Restauro virtual de pigmentos na pintura “Lucas o Evangelista” (museu De Waag, em Deventer).</i>	119

<i>Figura 26: Pormenor de uma pintura sobre madeira “A prisão de Cristo” (The Strauss Center for Conservation, em Cambridge).</i>	120
<i>Figura 27: Mapas de danos e restauros e de IV de falsa cor; pintura “A dama com um arminho” (Museu Czartoryski, em Cracóvia).</i>	121
<i>Figura 28: Representação esquemática da interação entre a luz e as superfícies.</i>	123
<i>Figura 29: Simulação virtual da aparência perante diferentes iluminantes da pintura “Mona Lisa” (Museu do Louvre, em Paris).</i>	124
<i>Figura 30: Scanner VASARI na National Gallery, Londres.</i>	126
<i>Figura 31: câmara digital MARC (versão I).</i>	129
<i>Figura 32: câmara digital de alta resolução MARC II .</i>	130
<i>Figura 33: Câmara multiespectral “The Artist”, da Art Innovation (Holanda).</i>	136
<i>Figura 34: Câmaras multiespectrais MuSIS, da FORTH-Photonics (Grécia).</i>	139
<i>Figura 35: Sistema hiperespectral com câmara digital IBM Pro3000 scanning camera.</i>	142
<i>Figura 36: Sistema hiperespectral com câmara digital CCD Quantix, com filtro sintonizável e objetiva.</i>	143
<i>Figura 37: SinarBack54, espectroradiómetro PR-704 e fonte de luz do tipo Monocromador.</i>	144
<i>Figura 38: exemplar de uma camara de alta resolução multiespectral CRISATEL.</i>	147
<i>Figura 39: sistema de filtros dicroicos usados na versão JumboScan do sistema CRISATEL.</i>	148
<i>Figura 40: sistema de iluminação Jumbolux, do sistema CRISATEL de Paris. ...</i>	148
<i>Figura 41: sistema rotativo de filtros, usados na versão CRISATEL da National Gallery.</i>	150
<i>Figura 42: sistema de digitalização hiperespectral da UM.</i>	151
<i>Figura 43: sistema de digitalização hiperespectral da UBI.</i>	153
<i>Figura 44: sistema de digitalização hiperespectral PRISMS.</i>	156
<i>Figura 45: Foco de iluminação PAR16 com lâmpada SoLux.</i>	163
<i>Figura 46: Gráfico da Distribuição de Energia Espectral de uma lâmpada Solux.</i>	166
<i>Figura 47: Objetiva Coastal Optics 60mm f/4 UV-VIS-IR Apo Macro.</i>	170
<i>Figura 48: Padrão do “Colour Filter Array” em mosaico de Bayer do sensor da Nikon D300.</i>	176
<i>Figura 49: Esquema explicativo da montagem usada para caracterização dos sensores das D-SLRs.</i>	177
<i>Figura 50: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Nikon D70.</i>	181
<i>Figura 51: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Fujifilm IS Pro.</i>	184
<i>Figura 52: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Fujifilm IS Pro, c/ filtro B+W486 IR-UV cut aplicado à frente da lente.</i>	186
<i>Figura 53: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Sigma SD14.</i>	190

<i>Figura 54: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Nikon D300.....</i>	<i>193</i>
<i>Figura 55: Esquema explicativo da montagem usada para caracterização dos filtros</i>	<i>196</i>
<i>Figura 56: Esquema explicativo da Sensibilidade espectral obtida através da combinação de um filtro externo com o sensor da câmara.</i>	<i>198</i>
<i>Figura 57: Alvo branco de referência, da Labsphere, modelo de ref.^a SRT-99-020.</i>	<i>201</i>
<i>Figura 58: Reflectância relativa da superfície branca de referência I</i>	<i>201</i>
<i>Figura 59: Reflectância relativa da superfície branca de referência II.</i>	<i>202</i>
<i>Figura 60: Montagem com o alvo ColorChecker, da X-Rite, de 24 cores e com o branco de referência da Labsphere.</i>	<i>203</i>
<i>Figura 61: Espectrorradiômetro PR-650 SpectraScan, da Photo Research, Inc.....</i>	<i>205</i>
<i>Figura 62: Esquema explicativo da montagem usada para digitalização dos alvos e pinturas (Montagem I), com recurso a 2 focos iluminantes e geometria 45°/0°.</i>	<i>206</i>
<i>Figura 63: Montagem I: primeira montagem de geometria 45°/0° usada “in situ”.</i>	<i>207</i>
<i>Figura 64: Montagem II: segunda montagem de geometria 45°/0° usada “in situ”.</i>	<i>208</i>
<i>Figura 65: Pormenor da webcam, usada para inspecionar o correto alinhamento dos filtros com a objetiva da D-SLR.....</i>	<i>209</i>
<i>Figura 66: Exemplo da Montagem II em funcionamento.....</i>	<i>210</i>
<i>Figura 67: Exemplo da Montagem II elevada em altura (a cerca 1,8 m).....</i>	<i>212</i>
<i>Figura 68: Gráfico comparativo de reflectâncias relativas medidas na amostra de cor “15 RED” do alvo Colochecker.....</i>	<i>227</i>
<i>Figura 69: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Nikon D300 quando combinado com o filtro Cokin 80B.</i>	<i>228</i>
<i>Figura 70: Comparação de reflectâncias relativas em três bandas espectrais, medidas no alvo Colochecker, em sessões diferentes e com tempos de exposição distintos.....</i>	<i>231</i>
<i>Figura 71: Tríptico de Miragaia. Fotografia com luz visível, abas do tríptico abertas.</i>	<i>242</i>
<i>Figura 72: Tríptico de Miragaia. Fotografia com luz visível, abas do tríptico fechadas.</i>	<i>242</i>
<i>Figura 73: Tríptico de Miragaia. Fotografia de fluorescência UV, abas do tríptico abertas.</i>	<i>243</i>
<i>Figura 74: Tríptico de Miragaia. Fotografia de fluorescência UV, abas do tríptico fechadas.</i>	<i>243</i>
<i>Figura 75: O Cabouqueiro (1949). Pintura do mestre Júlio Pomar.....</i>	<i>249</i>
<i>Figura 76: Reflexos especulares em “O Cabouqueiro” e tentativas de os eliminar.</i>	<i>250</i>
<i>Figura 77: Montagem de recurso para luz difusa.</i>	<i>251</i>
<i>Figura 78: Simulação do aspeto da zona Z5 da obra “Tríptico de Miragaia” perante diferentes iluminantes e imagens monocromáticas de três bandas espectrais.....</i>	<i>262</i>

Figura 79: Dois pormenores em imagens monocromáticas de três bandas espectrais - zona Z5 do “Tríptico de Miragaia”.263

Figura 80: Simulação do aspeto da obra “O Cabouqueiro” perante diferentes iluminantes e imagens monocromáticas de três bandas espectrais.265

Figura 81: Dois pormenores em imagens monocromáticas de três bandas espectrais - “O cabouqueiro”.....267

1.- Introdução

Conteúdo:

1.1- Motivação e Objetivo do estudo	25
1.2- Estrutura e metodologia.....	29

1.1- Motivação e Objetivo do estudo

A escolha do tema desta tese surge como consequência natural da experiência prévia e trabalhos de investigação desenvolvidos pelo autor no Centro de Conservação e Restauro da Universidade Católica Portuguesa, principalmente a partir do ano 2004, ano em que se teve acesso às primeiras câmaras digitais D-SLR¹, e com estas se iniciaram a exploração do potencial de fotografia infravermelha (IV) e ultravioleta (UV) digital, fluorescência UV, fotografia de radiografia, entre outras, em alguns aspetos pioneira em Portugal e mesmo em outros países.

Desde aquela data e na sequência desses trabalhos foram publicados, em revistas da especialidade, em atas de congressos ou jornadas, diversos artigos e comunicações abordando estas mesmas temáticas (L. B. Pereira, 2005, 2006, 2008a, 2008b, 2010, 2011; Pires, Lima, & Pereira, 2009); pelo interesse prático e pioneirismo destas matérias, o autor do presente trabalho tem também ministrado cursos de fotografia IV e UV digital aplicadas a obras de arte, quer integrados nos programas regulares de formação e ensino na instituição de ensino à qual se encontra vinculado (UCP), mas também em *workshops* e formações de curta duração no país vizinho² e no Brasil³. Foi, aliás, num destes Congressos – o EITEC, em Coimbra, em 2006 – onde se apresentou uma comunicação oral sobre fotografia IV digital aplicada a obras de Arte (L. B. Pereira, 2006), que se conheceu um outro palestrante, Hugo Pires – atualmente coautor de alguns artigos científicos (Pires, et al., 2009) –, através do qual se tomou conhecimento, pela primeira vez, da possibilidade da análise multiespectral aplicada a obras de arte, daí resultando a ideia para o tema explorado na presente tese.

¹ D-SLR: do inglês *Digital Single Lens Reflex*, ou, em português, câmaras do tipo “Reflex Digital de Objetiva Única” (referentes ao modo como o visor ótico da câmara funciona, através de imagem refletida por um espelho, vinda através da objetiva da câmara).

² “*Taller de fotografía aplicada a la museística*”, Clorofila Digital/Masterclass, Madrid, Espanha, em 12-13 de Abril de 2010; e “*Fotografía de objetos culturales con radiación invisible*”, Escuela de Arte y Superior de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Ávila, Espanha, em 17-18 de Maio de 2011.

³ “*III Curso de Extensão Universitária Preservação do Patrimônio Cultural – Tecnologia e Conservação*”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, em 30 de Junho de 2012.

Assim, à capacidade de registo de informação no espectro eletromagnético (doravante “espectro EM”) não visível, temática de grande interesse para o autor, associou-se a fotografia de luz visível, técnica padrão no registo e documentação de obras de arte há mais de um século, e que agora se apresenta com um potencial acrescido devido ao aparecimento e ampla divulgação das câmaras fotográficas digitais: finalmente o fotógrafo tem nas suas mãos a possibilidade de gerir com rigor todas as fases do registo da imagem fotográfica, o que permite também expandir o seu uso científico e aumentar o número de bandas do espectro EM possíveis de registar, naquilo que se pode designar por digitalização multiespectral (se apresentar de 4 a 9 bandas do espectro EM) ou hiperespectral (se registar mais do que 9 bandas do espectro EM⁴). A este facto acresce que, antes mesmo de 2008, graças à existência na Internet de fóruns especializados de fotografia com radiação invisível, se tenha assistido a um novo uso para expressão “multiespectral”, associado à produção de imagens cujo registo é apresentado em modelo tricromático de cor (ou seja, o vulgar modelo RGB), mas que resulta da fusão ou reconfiguração de canais RGB com informação digitalizada multiespectral, quase sempre conjugando nessa imagem bandas de luz visível com bandas de radiação IV e UV (Rørslett, 2008).

Algumas das possibilidades trazidas por este tipo de registo multiespectral ou hiperespectral, têm sido exploradas por diferentes grupos de investigação, e certamente que ainda não se esgotaram todas as aplicações práticas possíveis para este tipo de registo. Mas para quem trabalha na área da Conservação de Obras de Arte (área onde se insere a presente tese), as potencialidades da digitalização multiespectral ou hiperespectral e consequentes aplicações práticas, são variadas e úteis, o que suscitou grande interesse desde que se tomou conhecimento da sua existência. Só para referir alguns exemplos de aplicações práticas da imagiologia multiespectral ou hiperespectral: identificação de pigmentos

⁴ Esta distinção entre “multiespectral” e “hiperespectral” está de acordo com o que foi transmitido como critério de classificação pelo coorientador desta tese, o Professor Doutor Paulo Fiadeiro, mas está longe de ser consensual, pois diferentes autores usam critérios diferentes. Para mais informação sobre este tema, ver introdução ao Capítulo “2.4 - Sistemas Multiespectrais e Hiperespectrais”.

(Berns & Imai, 2002; Berns, Kruger, & Swicklik, 2002; Delaney, Walmsley, Berrie, & Fletcher, 2005; Liang, 2012; Zhao, 2008; Zhao, Berns, Okumura, & Taplin, 2005; Zhao, Berns, Taplin, & Coddington, 2008), estudo de reintegrações e repintes (Berns, et al., 2002; Berns & Mohammadi, 2007), documentação de alterações das cores ao longo do tempo (Berns, 2005b; Berns, Taplin, Nezamabadi, Mohammadi, & Zhao, 2005; Berns, Taplin, Nezamabadi, Zhao, & Okumura, 2005; Liang, Saunders, Cupitt, & Lahanier, 2010; Lumiere Technology; Saunders, Cupitt, & Padfield, 2006), “rejuvenescimento” digital de pinturas (Berns, 2005b; Lumiere Technology), mapeamento de pigmentos em pinturas (Casini, Lotti, Picollo, Stefani, & Buzzegoli, 1999; Hardeberg, 1999; Zhao, 2008; Zhao, Berns, et al., 2005; Zhao, et al., 2008). Embora no âmbito da presente tese não caiba a exploração de todas estas aplicações práticas, procedemos essencialmente ao primeiro passo de desenvolver e validar um sistema acessível que permita o registo e documentação (ou, simplesmente, “digitalização”) da informação hiperespectral, passo este que precede e possibilita todas as aplicações supracitadas; como aplicações práticas no âmbito desta tese, a possibilidade de se identificar zonas alteradas (essencialmente devido a reintegrações resultantes de restauros antigos da obra estudada) e a simulação da aparência da obra perante diferentes tipos de fonte de luz ou iluminante, o que pode ajudar a prevenir potenciais casos de metamerismo e a escolher o tipo de fonte de luz que, do ponto de vista da fiabilidade colorimétrica, seja a mais adequada à observação da obra; em trabalhos futuros outras aplicações constituirão certamente objeto de exploração, o que só por si motiva e inspira na prossecução do tema desta tese.

Embora haja internacionalmente vários grupos de investigação a utilizar câmaras especiais adaptadas à digitalização multiespectral ou hiperespectral (normalmente protótipos ou exemplares únicos, de acesso restrito e difíceis de operar para um público vasto), assim como se encontram disponíveis alguns modelos comerciais de baixa resolução e uso muito específico, onde haverá originalidade no presente trabalho e, por isso mesmo, contributo para a ciência, é na abordagem

metodológica que incorpora uma câmara do tipo D-SLR. No entanto, tem-se conhecimento que, pelo menos desde 1998, um grupo de investigadores do *Rochester Institute* (Estados Unidos da América) estuda a possibilidade de uso de uma câmara comercialmente disponível, com sensor tricromático (Francisco H. Imai, 1998) desenvolvido para um uso fotográfico amplo, mas trata-se neste caso de uma câmara Sinar com um sensor de grande formato (comummente designado como “*back digital*”, neste caso específico um *Sinarback 54*), um tipo de equipamento menos frequente e acessível, logo por essa razão, de uso mais restritivo para a generalidade dos fotógrafos e investigadores da conservação. Na presente investigação a opção foi usar uma câmara D-SLR Nikon, baseada nos sistemas do formato de 35mm, amplamente difundido por entre os fotógrafos de todas as áreas. Apenas se conhecem dois grupos que desenvolveram equipamentos baseados neste tipo de câmaras, mas que as usam para algumas aplicações multiespetrais em topografia e cartografia (Lebourgeois et al., 2008) ou, em outro caso, um outro grupo que mais recentemente integrou uma D-SLR numa montagem que replica com precisão um espectrómetro comercial (Habel, Kudenov, & Wimmer, 2012), mas em que a perda de resolução espacial (imagens finais de 120 por 120 pixéis) reduz o potencial deste tipo de equipamento na produção de imagens multiespetrais, tornando assim a montagem, mais do que um concorrente para as câmaras multiespetrais ou hiperespetrais, num real competidor para espectrómetros comerciais.

Em suma, com a presente tese pretende-se abrir novas vias de utilização das tecnologias de digitalização com câmaras digitais D-SLR e torná-las acessíveis a um grupo amplo de potenciais utilizadores, interessados em usar imagens multiespetrais ou hiperespetrais. Pretende-se, assim, dar um contributo para o desenvolvimento das técnicas de documentação e análise não invasiva de obras de arte, essencialmente úteis aos cientistas que trabalhem com imagem digital nas áreas de Conservação e Restauro, História de arte e Museologia.

Com a conclusão do presente trabalho espera-se que surjam novas linhas de investigação que poderão ter continuidade em projetos no CITAR (Centro de Investigação nas Tecnologias da Artes) na Universidade Católica Portuguesa ou mesmo em parceria com outras instituições, caso o presente trabalho consiga despertar interesse suficiente entre os cientistas da área.

Posto isto, está justificado o interesse no desenvolvimento de sistemas de imagiografia espectral para aplicação na digitalização de obras de arte, nomeadamente de pinturas artísticas, para o qual esta tese pretende ser um módico - mas válido - contributo.

1.2- Estrutura e metodologia

Esta tese encontra-se organizada de acordo com um esquema (presente no Índice) idêntico a trabalhos similares, mas pelas suas especificidades e por se encontrar no cruzamento de diferentes áreas de conhecimento, torna-se útil explicar aqui a abordagem e opções metodológicas, principalmente na organização do seu conteúdo em algumas secções.

Nas páginas iniciais deste trabalho existe uma secção “Abreviaturas” onde é descrito o significado por extenso de abreviaturas ou iniciais utilizadas ao longo do texto da tese, necessários por vezes à sua compreensão - embora, à primeira vez que ocorra a abreviatura no texto, é dada uma explicação ou descrição do significado do termo, seja entre parêntesis ou em nota de rodapé.

As figuras ao longo dos diferentes capítulos podem ser rapidamente localizadas por um índice de figuras, presente no início da obra. Optou-se por classificar como “figuras”, todo o tipo de imagens, esquemas, fotografias, ilustrações e gráficos. Sempre que a figura provenha ou contenha elementos adaptados de outras obras, detentores dos seus direitos de autoria ou originalidade intelectual,

tal será referido na legenda da mesma (incluindo referência bibliográfica da fonte). Se as figuras forem concebidas pelo autor do presente trabalho, na legenda constarão apenas as iniciais do seu nome (LBP).

O primeiro capítulo é uma introdução ao presente trabalho, onde se inserem as presentes linhas.

No segundo capítulo, intitulado “2.- Enquadramento Teórico”, apresentam-se as bases científicas e técnicas que suportam esta tese. Começa-se por falar da própria luz (subcapítulo 2.1) e radiação EM e fenómeno de visualização da cor (subcapítulo 2.2), explicando-se de seguida alguns elementos importantes da colorimetria (subcapítulo 2.3), necessários ao enquadramento da base científica do registo espectral. No subcapítulo 2.4, é aprofundado os fundamentos da imagiografia espectral, com incluindo-se aqui a instrumentação necessária ao desenvolvimento de sistemas espectrais. Finalmente, no subcapítulo 2.5 é apresentado o uso de imagens espectrais aplicado ao estudo de obras de arte; após uma primeira parte introdutória (subcapítulo 2.5.1) descrevem-se as principais aplicações da imagiografia espectral ao estudo de obras de arte (subcapítulo 2.5.2), a que se segue um percurso pelos principais projetos de sistemas espectrais, aplicados ao estudo de pintura, numa resenha histórica pelos sistemas mais antigos até ao *state of the art* dos equipamentos mais recentes (subcapítulo 2.5.3).

Os critérios de separação de alguns conteúdos pelos capítulos seguintes, “3- Material e Métodos” e “4- Aplicações Experimentais e Resultados”, foram os seguintes: como a atividade experimental do corrente trabalho implicava o desenvolvimento de equipamento e o estabelecer de protocolos de trabalho para o operar, em que muitas vezes as próprias experiências de caracterização do equipamento são só por si um resultado prático, tornar-se-ia muito confuso se todo esse conteúdo fosse considerado e discutido no capítulo “4- Aplicações Experimentais e Resultados”. Por isso optou-se por incluir as diferentes tentativas

e passos experimentais da caracterização do material no capítulo “3- Material e métodos”, e deixando-se para o capítulo 4 os resultados finais de validação do sistema hiperespectral em teste e das aplicações práticas desenvolvidas com o este. Os resultados finais dividiram-se numa primeira parte onde se incluíram os testes em alvos de cor (subcapítulo 4.2.1.), de que se seguiu a digitalização com obras de arte (resultados em subcapítulo 4.2.2), mostrando os resultados obtidos com o sistema hiperespectral apurado na primeira parte experimental (descritos no capítulo 3) e as métricas e estatísticas comparativas com as medições do espectroradiómetro de referência utilizado. Estas métricas, no entanto, foram descritas e explicadas no subcapítulo 4.1.1 (assim como no subcapítulo 2.3.4); segue-se a importante apreciação da análise subjetiva de gráficos das curvas espectrais (subcapítulo 4.1.2).

É importante realçar aqui que a maior parte dos resultados obtidos e sua apresentação não estão contidos no capítulo 4, mas sim no final em “Apêndices”. Por isso, só será possível apreciar verdadeiramente a dimensão do trabalho prático desenvolvido observando atentamente esse capítulo final, onde se apresentam a maioria dos dados que, se constassem no corpo de texto principal, tornariam o capítulo 4 de leitura difícil pela frequência com que se apresentariam tabelas, gráficos e figuras. Antecedendo a secção “Apêndices”, onde se incluíram dados importantes de resultados obtidos experimentalmente, apresentam-se dados de fontes externas na secção “Anexos”.

No subcapítulo 4.3, apresentam-se e discutem-se as duas aplicações práticas, para o sistema de imagiografia espectral desenvolvido, sobre duas obras pictóricas, ilustrando-se com imagens os resultados práticos destas aplicações.

Nas conclusões (capítulo 5) é discutida a validade dos resultados principais, justificados nas métricas usadas e nos resultados práticos conseguidos. Também aqui se explanam potenciais ideias para trabalhos futuros, decorrentes da

investigação desenvolvida nesta tese, no sentido de melhorar o sistema existente mas também de explorar as aplicações possíveis com os dados registados.

Na secção “Referências Bibliográficas”, apresenta-se toda a bibliografia consultada e referenciada durante o texto. Segue-se uma secção onde se apresentam publicações do autor, nos últimos anos, que se relacionam de algum modo com o tema da presente tese.

As referências bibliográficas e citações nesta tese estão de acordo com a norma Harvard - APA 6.^a Ed. A opção por esta norma deveu-se ao facto de esta estar mais em concordância com os tipos de referência usados em artigos e teses nas áreas de Ciências Exatas e Naturais (A. Pereira & Poupa, 2012), a esfera do conhecimento humano onde na realidade esta tese se liga pelo seu conteúdo e será potencialmente mais lida por pessoas destes ramos do conhecimento. A Norma Portuguesa NP405 também nos é familiar (Sousa, 1998), frequentemente utilizada pelos investigadores e académicos de áreas do conhecimento de Humanidades, das Artes e das Letras.

O texto da presente tese foi escrito em conformidade com o novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa.

2.- Enquadramento Teórico

Conteúdo:

2.1- Radiação eletromagnética, luz e cor	35
2.1.1- Pioneirismo de Newton, Herschel e Ritter.....	37
2.2- Percepção da cor.....	40
2.2.1- Tricromatismo	40
2.2.2- Sistema Visual Humano	49
2.3- Colorimetria.....	57
2.3.1- Observadores-padrão e sistema colorimétrico da CIE.....	59
2.3.2- Iluminantes-padrão da CIE.....	65
2.3.3- Espaços de cor uniformes da CIE.....	69
2.3.4- Fórmulas de diferenças de cor	72
2.3.5- Reflectância espectral.....	81
2.4- Sistemas espectrais	84
2.4.1- Introdução e fundamentos	84
2.4.2- Instrumentação	88
2.4.2.1- Detetores.....	88
2.4.2.2- Fontes de luz.....	91
2.4.2.3- Sistemas de seleção de bandas espectrais.....	93
2.4.2.4- Sistemas de imagiografia espectral	94
2.5- Uso de imagens Multiespectrais e Hiperespectrais em Obras de Arte	96
2.5.1- Introdução.....	96
2.5.2- Aplicações práticas em pintura artística	99
2.5.2.1- Monitorização do estado de conservação das obras	99
2.5.2.2- Imagens para documentação, conservação e publicação	102
2.5.2.3- Identificação e mapeamento de constituintes da camada pictórica.....	107
2.5.2.4- Rejuvenescimento e restauro virtual de pinturas	114
2.5.2.5- Visualização de alterações e desenho subjacente	119
2.5.2.6- Simulação da aparência da obra perante diferentes iluminantes.....	121
2.5.3- Principais sistemas aplicados a pintura artística	125
2.5.3.1- Projetos VASARI e MARC.....	126
2.5.3.2- Istituto di Ricerca Sulle Onde Electromagnetiche	131
2.5.3.3- École Nationale Supérieure des Télécommunications.....	132
2.5.3.4- National Gallery of Art - Conservation Division.....	134
2.5.3.5- Art Innovation	136
2.5.3.6- Foundation for Research & Technology – Hellas.....	138
2.5.3.7- Munsell Color Science Laboratory - Rochester Institute of Technology	141
2.5.3.8- Projeto CRISATEL	146
2.5.3.9- Universidade do Minho	151
2.5.3.10- Universidade da Beira Interior.....	153
2.5.3.11- Projeto PRISMS	155

2.- Enquadramento Teórico

A visão das cores é um fenómeno complexo, pois envolve não apenas as propriedades físicas da luz, as propriedades de reflexão e absorção da luz pelos objetos, mas também as propriedades fisiológicas e psíquicas de um observador humano. Neste capítulo abordar-se-ão os princípios básicos da ciência da cor e da imagem digital. O objetivo é providenciar as bases para contextualizar as matérias cobertas ao longo desta tese e não constituir um tratado sobre temas que estão já extensamente explorados na literatura da especialidade, como nas obras de Bernardo (2010), Hunt (1998, 2004), Shevell (2003) ou Wyszecki & Stiles (2000).

2.1- Radiação eletromagnética, luz e cor

O estímulo físico que os nossos olhos detetam como cor não é mais do que radiação eletromagnética, na banda visível do espectro EM que é comumente designada por “luz”. A propriedade que permite distinguir os diferentes tipos de radiação EM é o comprimento de onda, pelo que, para além da luz, são exemplos de outros tipos de radiações eletromagnéticas os raios X, os raios gama, as ondas de rádio, as micro-ondas, as ondas de radar, etc. O comprimento de onda dos diferentes tipos de radiação EM é muito variável, podendo ser na ordem de grandeza de metros ou até de quilómetros, quando falamos em ondas de rádio, ou na ordem um milionésimo de milímetro ou menos, se nos referirmos aos raios X. No caso da luz os comprimentos de onda são normalmente medidos em nanómetros (abreviadamente *nm*) e um nanómetro é a milionésima parte de um milímetro ou, representando matematicamente, 10^{-9} do metro.

A banda visível do espectro é tipicamente definida por radiações com comprimentos de onda entre os 400 e os 700 nm, aproximadamente.

A divisão entre bandas do espectro que, enquanto humanos, classificamos como “cores”, é um artificialismo, já que na realidade seria mais correto falar em zonas

2.- Enquadramento Teórico

de transição entre as cores adjacentes (como se pode apreciar na Figura 1), pois os comprimentos de onda da radiação ao longo do espectro, transitam gradualmente e não de uma forma abrupta, ou discreta.

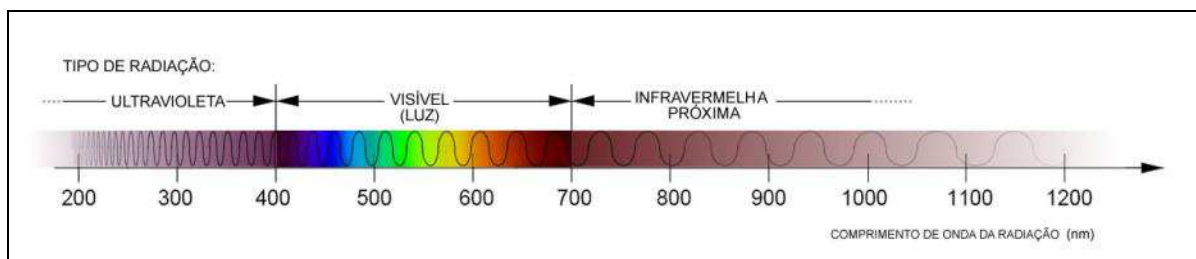


Figura 1: Espectro Eletromagnético.

Bandas de radiação visível (ao ser humano), radiação infravermelha e ultravioleta. Ilustração por LBP.

Pela mesma razão poderíamos dizer que os limites entre luz e radiação invisível são igualmente artificiais e diferentes fontes bibliográficas apresentam valores distintos para estes mesmos limites. Enquanto os valores de 400 e 700 nm são os mais frequentemente utilizados na literatura, outros autores apresentam 380 e 780 nm para esses mesmos limites⁵ (Hunt, 1998, p. 18; Shevell, 2003). Segundo Sharma (2003, p. 15), no ar e no vácuo a zona visível do espectro eletromagnético situar-se-á na região compreendida entre os comprimentos de onda de 360 nm e 830 nm. Outros valores podem ser ainda encontrados na literatura da especialidade, consoante os autores e critérios científicos adotados por estes. Para comprimentos de onda abaixo dos limites da banda visível do espectro, temos a região ultravioleta do espectro EM e, acima, temos a região infravermelha.

Mas estes conhecimentos sobre a luz surgiram de um percurso longo de muitos trabalhos de investigação, ao longo dos últimos séculos, de que se destacam em seguida alguns exemplos relevantes.

⁵ Embora normalmente não de uma forma explícita, pois são dados retirados de tabelas, diagramas ou gráficos, já que estes autores evitam referir-se de uma forma precisa a estes limites da região visível do espectro EM.

2.1.1- Pioneirismo de Newton, Herschel e Ritter

Os conhecimentos relativos à ciência da cor, tal como os conhecemos hoje, começaram a estabelecer-se no século XVII, graças às experiências de Isaac Newton publicadas no tratado “*New Theory of Colours*”, em 1641 (Shevell, 2003, p. 2). Antes desta publicação, tão marcante na história da ciência, acreditava-se que a luz branca seria a luz na sua forma mais pura e que as cores representavam modificações da luz branca.

Num espaço obscurecido, usando um prisma triangular Newton decompôs um feixe de luz solar branca nas suas componentes monocromáticas, devido à propriedade que um prisma triangular tem de dispersar a luz (Figura 2).

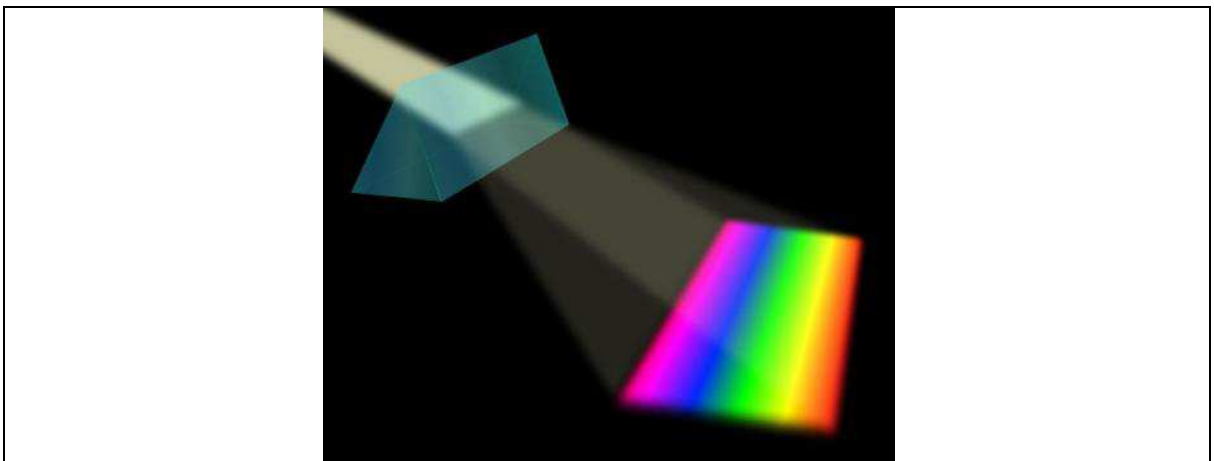


Figura 2: Experiência de Newton de separação do espectro luminoso.
Ilustração por LBP.

Newton refere-se pela primeira vez ao conjunto de feixes de luz monocromáticos usando a designação de *espectro*, onde identificou a presença de sete cores “puras”: violeta, índigo, azul, verde, amarela, laranja, vermelha (Hunt, 1998, p. 18). A conclusão lógica a que Newton chegou foi de que a luz branca, ao contrário de ser uma entidade simples e homogénea (como se pensava ser, até então) era composta por uma mistura de todas essas cores do espectro.

Newton argumenta ainda que a cor que um corpo natural apresenta é apenas “a disposição para refletir luzes de algumas refringências mais do que de outras”. Hoje em dia reconhecemos esta descrição como correspondendo à de “reflectância espectral” de uma superfície - a proporção de luz incidente que é refletida a cada comprimento de onda (Shevell, 2003, p. 3).

A genialidade de Newton ainda permitiu, nos primeiros passos de uma ciência que hoje chamamos de colorimetria, a criação - talvez pela primeira vez - de um modelo, baseado nas sete cores que identificou como “puras”, que representou sobre a forma de um diagrama de cromaticidades, diagrama que apresenta quantitativamente o resultado da mistura de diferentes cores (Shevell, 2003, p. 4).

As experiências pioneiras de Newton com os prismas foram de tal modo revolucionárias e tiveram um impacto tão grande na comunidade científica que, durante algumas gerações, houve cientistas que repetiram e alargaram o âmbito destas experiências, permitindo assim a descoberta das primeiras radiações não visíveis.

No ano de 1800, Herschel⁶ monta uma experiência que conduziu à descoberta dos raios infravermelhos (Shevell, 2003, p. 17; Williams & Williams, 2002). Herschel suspeitava que as diferentes cores que compunham a radiação solar não aqueceriam de igual modo os objetos na superfície da Terra. Então monta uma experiência, baseada na de Newton, e provoca igualmente a separação da luz branca pelo prisma nas suas componentes monocromáticas; munido de um conjunto de termómetros começa a medir a capacidade que cada um destes feixes de luz monocromática tem para aquecer os termómetros; constata que a temperatura vai subindo à medida que os termómetros se deslocam do violeta para o vermelho. No final deste trajeto com os termómetros, resolve colocá-los numa zona de sombra, imediatamente a seguir à cor vermelha, para usar como referencial da temperatura ambiente. Constata que nesta zona sem luz os

⁶ Sir William Herschel ficou, na História, mais conhecido talvez como astrónomo, por lhe ter sido atribuída a descoberta do planeta Úrano (Williams & Williams, 2002).

termómetros atingiam a temperatura máxima. Acabara de descobrir uma radiação que, como veio a verificar mais tarde com métodos indiretos, apresentava comportamentos similares aos da luz: os raios invisíveis que descobrira refletiam-se, refratavam-se, transmitiam-se e absorviam-se nos materiais. A esta radiação Herschel na altura apelidou de “raios caloríficos” ou “ultra-vermelhos”, expressão que só veio a ser corrigida mais tarde por Habney, em 1881, que a rebatizou como raios “infravermelhos” (Williams & Williams, 2002).

Contemporâneo de Herschel, Johann Ritter descobre que os sais de cloreto de prata se decompunham por ação da luz. Tal como na experiência de Herschel, usa uma montagem com um prisma equilátero para decompor a luz solar branca e começa a testar que feixes monocromáticos apresentavam maior capacidade de degradar estes sais. Constata que, à medida que colocava sais mais próximos da região violeta, maior é a capacidade que os raios de luz apresentavam de degradarem estes sais. Num paralelo com o episódio de Herschel, descobre que na zona de sombra imediatamente a seguir ao violeta, uma radiação invisível apresentava um poder, superior aos dos feixes monocromáticos de luz, de degradação dos sais de prata, radiação a que veio a apelidar de “ultravioleta” (Williams & Williams, 2002).

2.2- Perceção da cor

2.2.1- Tricromatismo

Embora Newton tivesse conseguido compreender que da mistura e combinação de diferentes feixes monocromáticos se produziam diferentes cores, nunca conseguiu resolver ou explicar este aparente enigma: feixes de luz que pareciam apresentar a mesma cor podiam ser “simples” ou “compostos” e a única maneira de os distinguir seria verificar se estes se decompunham ou não com o prisma. A compreensão do fenómeno da mistura de cores foi um processo de pequenas evoluções, ao longo de séculos, que passou pela compreensão não apenas da física da luz e da sua interação com os materiais, mas também por compreender o modo de funcionamento do sistema visual humano.

Mas mesmo antes da comunidade científica atingir a compreensão total do processo de visão das cores, a experiência empírica permitia já tirar partido da natureza tricromática do processo de visão humano. Neste âmbito, Le Blon, em 1719, regista a patente de um sistema para impressão de imagens a cores económico, pois baseava-se apenas em três cores de tinta, mas que (sem que Le Blon disso soubesse) era compatível com o sistema visual tricromático (Shevell, 2003, p. 6). Le Blon publica um livro - *Coloritto* - em que descreve os princípios da mistura de cores da sua tricromia, em que as cores a que apelida de “primitivas” (amarelo, vermelho e azul) permitiam reproduzir as outras tonalidades do espetro. Na sua publicação, Le Blon mostra ter já a perceção precoce da diferença entre misturar pigmentos e misturar feixes de luz (Shevell, 2003, p. 6), ou seja, naquilo que só bastante mais tarde (século XIX) se viria a designar como misturas de cor “aditivas” ou “subtrativas”.

Sucessor de Le Blon, Gautier D’Agoty (em 1752) afirma-se como um anti-Newtoniano e apropria-se da fama da descoberta da quadricromia (mas que se pensa, atualmente, já ter sido usada por Le Blon). Este defendia que os raios de luz não eram intrinsecamente “coloridos”, mas que da mistura das cores

primitivas as “ações antagonistas da luz, sombra e da transparência” produziam-se as cores secundárias e destas poderiam derivar as restantes cores (Shevell, 2003, p. 7).

Ao longo do século XVIII surgiram vários defensores do tricromatismo e, de uma forma explícita ou implícita, opunham-se às teorias de Newton, que no seu tratado afirmara que haveriam sete, ou mesmo um número infinito, de cores primárias. Alguns destes defensores do tricromatismo, publicaram sobre este tema (Shevell, 2003, p. 8): o Padre Jesuíta Bertrand Castel (França, 1740), na sua *Optique des couleurs* defende como cores primárias o azul, amarelo e vermelho e explica as resultantes das suas misturas e estabelece, através de experiências informais, um círculo de 12 cores; Tobias Mayer (astrónomo, Göttingen, 1758) apresenta um triângulo de cores, com primários RYB nos cantos; J.H. Lambert (astrónomo, França, 1770), refere que as cores primárias podem não ter o mesmo peso no seu poder de colorir (*la gravite spécifique des couleurs*); outros defensores do tricromatismo dessa época, menos relevantes, foram J.P. Marat (França, em 1780) e Wünsch (em 1792).

O que faltará a todos estes investigadores são alguns conceitos importantes da fisiologia do sistema de visão, pois desde Newton que acreditavam que a luz influenciava diretamente as terminações nervosas (que seriam as mesmas, para detetar qualquer cor) e que estas “vibrariam” de acordo com a cor do estímulo luminoso e transmitiriam essa informação diretamente ao cérebro, numa analogia com o que se supunha acontecer com o ouvido humano e a deteção de som (Shevell, 2003, p. 9).

No último quartel do século XVIII é que começam a surgir os elementos da moderna teoria tricromática. Na realidade, estes elementos estavam presentes nos trabalhos publicados dos dois próximos investigadores que irão ser referidos. Pensa-se que nunca se conheceram, mas cada um deles tinha já na sua posse uma das partes complementares da solução para o sistema de visão tricromático

(Shevell, 2003, p. 10). George Palmer⁷ publica em 1777 um panfleto - *Theory of Colours and Vision* - em que propõe que a retina apresentaria apenas três classes de fotorreceptores de luz. No entanto, Palmer nunca conseguiu fundamentar devidamente a sua teoria. Contemporâneo de Palmer, o médico John Elliot em 1780 descreve numa publicação - *Philosophical Observations on the Senses* - o resultado de algumas experiências por si efetuadas, em que pela primeira vez propõe que na retina existiam elementos “ressonantes” (hoje, chamam-se a estes “transdutores”, que no caso da retina são representados pelas células fotossensíveis descritas no subcapítulo seguinte), que vibrariam apenas quando estimulados por uma cor, ou seja, por luz de algumas frequências⁸, mas não pelas outras. Ele prevê também que para certas frequências de luz (cores) não haveria nenhum tipo de elemento ressonante. No entanto, Elliot faleceu novo, sem nunca conseguir propor quantos tipos diferentes de elementos ressonantes, sensíveis à luz, existiriam (Shevell, 2003, pp. 10-13).

É com Thomas Young que, em 1801, numa palestra na Royal Society, finalmente se apresenta a síntese da teoria de tricromatismo para o sistema visual humano. Adotando a teoria ondulatória da luz, Young propõe que a variável física responsável pelas cores seria o comprimento de onda, que varia de forma contínua no espectro, e que o tricromatismo seria uma consequência da fisiologia do nosso sistema visual. A retina deveria conter apenas três tipos de sensores ou “elementos ressonantes”. Cada elemento ressonante apresentaria o seu pico de sensibilidade numa zona distinta do espectro, mas apresentaria uma sensibilidade ampla a outros comprimentos de onda (Hunt, 1998, p. 140; Shevell, 2003, pp. 13-14).

⁷ Fabricante de vidro, Palmer ficou talvez mais conhecido na História por outra inovação: em sociedade com Quinquet, produziu a primeira fonte de luz artificial calibrada para “Luz de Dia”, o candeeiro a petróleo Quinquet-Palmer, que usava vidro azul que corrigia a temperatura de cor (normalmente alaranjada) dos candeeiros a petróleo de então.

⁸ Existe uma relação entre o comprimento de onda da luz e a sua frequência de oscilação. Essa relação é que $f \cdot \lambda = c$, onde “ f ” é a frequência de oscilação da onda, “ λ ” o comprimento de onda e “ c ” a velocidade de propagação da luz no vácuo. Por esta relação existir, tanto se pode exprimir uma cor pelo comprimento de onda da luz como pela sua frequência de oscilação.

Posteriormente, num artigo destinado à *Encyclopedia Britannica* (em 1817), Young descreve que os três estímulos ou “sensações” para os quais haveria elementos sensíveis na retina seriam o vermelho, o verde e o violeta (esta última cor, seria corrigida mais tarde por Maxwell). Os raios de luz que ocupavam os espaços intermédios no espectro Newtoniano estimulariam “sensações mistas”; por exemplo, o amarelo monocromático estimularia sensações vermelhas e verdes, o azul monocromático sensações violeta e verde, e assim sucessivamente (Shevell, 2003, p. 14).

Em suma, pela primeira vez na história Thomas Young explica o tricromatismo não pela natureza da luz, mas pela fisiologia do sistema visual humano.

Para se formalizar a moderna *teoria tricromática* ou *teoria triestímulos* (a base da atual ciência da cor), além dos trabalhos de Young, acrescentam-se os importantes contributos de Maxwell e Helmholtz.

Hermann Helmholtz publica em 1852 o seu primeiro artigo, grande contributo para a ciência da cor. Neste, Helmholtz clarifica a distinção entre a mistura subtrativa de pigmentos e a mistura aditiva de feixes de luz monocromática. No entanto, um dos erros iniciais de Helmholtz foi acreditar que apenas haveria um par de cores complementares (amarelo e índigo), por serem as únicas que produziam branco quando misturadas, numa experiência em que usava dois prismas a 90° a projetarem os espectros de forma a se cruzarem entre si (Shevell, 2003, pp. 26-27).

O insucesso de Helmholtz em encontrar mais do que um par de complementares, despertou o interesse do matemático Hermann Grassmann. Este, em 1853, assume que a experiência de visão das cores é tridimensional (Shevell, 2003, p. 27) e que para ser explicada convenientemente teria de se considerar, num estímulo de cor, os atributos tonalidade (*hue*), brilho (*brightness*) e saturação (*saturation*). Sugeriu ainda que estes atributos poderiam corresponder, respetivamente, às três variáveis físicas da luz: comprimento de onda (ou

frequência), intensidade (ou quantidade de luz) e “pureza” (proporção de luz branca misturada com a luz monocromática).

Com base neste novo modelo tridimensional, Helmholtz adota então um método melhor de misturar as cores do espectro e consegue descobrir outros pares de cores complementares. Descobre ainda que, para produzir o branco, precisa de proporções desiguais entre as duas cores de cada par de complementares. Com base nestes resultados, pela primeira vez Helmholtz consegue reproduzir um diagrama de cromaticidades de características modernas, que em vez de ser um simples círculo, apresenta uma linha curva por onde se distribuem as cores do espectro visível, cujos extremos unem o vermelho ao violeta numa linha reta. Nesse diagrama de cromaticidade, reflete também as proporções necessárias de diferentes cores complementares para produzirem luz branca.

Helmholtz propõe ainda e pela primeira vez um diagrama, de características modernas, em que representa as curvas de sensibilidade cromática ou espectral dos três tipos de fibras nervosas (Ferreira, 2010, p. 17; Pinto, 2010, p. 26; Shevell, 2003, pp. 27-28).

O tricromatismo do sistema visual humano veio a ser verificado experimentalmente por Maxwell, em 1855, em que realiza um conjunto de experiências com discos de papel coloridos justapostos parcialmente num sistema que permitia rotação e onde podia variar a proporção das três cores primárias (Ferreira, 2010, p. 17; Pinto, 2010, p. 25; Shevell, 2003, p. 28) pela deslocação dos discos; posteriormente realizou o ajuste da luz do dia, através da mistura de três luzes monocromáticas. Maxwell representa matematicamente, sobre a forma de uma equação, as proporções das três cores primárias necessárias a igualar dois discos mais pequenos na mesma roda, acromáticos. Apresenta nesta altura também as primeiras funções de ajuste espectral.

Com os inovadores trabalhos de cientistas como Maxwell, Helmholtz, Grassmann e Young afirmavam-se assim, durante o século XIX, as bases de uma nova

ciência, a ciência da cor. No entanto os trabalhos desenvolvidos por estes cientistas não asseguraram uma aceitação universal da teoria do tricromatismo. Um opositor proeminente foi o fisiologista E. Hering, que partiu da experiência fenomenológica que, enquanto seres humanos, presenciamos na observação das cores (Shevell, 2003, p. 35). Existem quatro tonalidades – vermelha, verde, amarela e azul – que parecem fenomenologicamente simples, enquanto que outras tonalidades, como o laranja ou púrpura, aparentam ter “uma qualidade mista”. Hering propõe então, em 1878, na sua *teoria oponente de cor* (Shevell, 2003, p. 35) a existência de dois pares antagonistas de tonalidades (em alemão, *Gegenfarben*): vermelho/verde e amarelo/azul. Hering propôs que cada par antagonista estaria associado à assimilação (ou supressão) de uma substância visual no sistema de visão. Desta forma, a transmissão da cor desde os fotorreceptores (cones) até ao cérebro era realizada através dos canais oponentes, que na presença de um determinado estímulo, apenas poderiam transmitir vermelho ou verde, e azul e amarelo. Para Hering o mesmo princípio de oponência era aplicado para a codificação do brilho através da existência de um terceiro canal acromático branco/preto.

No século XX várias alterações a estas primeiras teorias científicas do século XIX foram propostas pela comunidade científica, assim como teorias completamente novas. Foram várias as teorias que conseguiram ganhar adeptos entre físicos, fisiologistas e psicólogos (Bernardo, 2010, pp. 92-93): uma variante da teoria tricromática, por William McDougal em 1901, a própria teoria de Hering, a teoria policromática de Hartridge e a teoria bastonete-cone de E.N. Willmer, fisiologista em Cambridge, que pode ser considerada uma variante da teoria tricromática. As provas fisiológicas da existência de fotorreceptores ou de substâncias fotoquímicas necessárias para suportar a teoria de Hering tardaram a surgir, pelo que esta foi considerada durante décadas pura especulação, até que na década de 1940 R.W. Pickford, psicólogo em Glasgow, afirmou ter produzido evidências fisiológicas contra a teoria tricromática e a favor da teoria de Hering, algo modificada. Pickford conseguia explicar muito bem o contraste simultâneo, mas mostrava-se incapaz

de justificar o ajuste tricromático das cores (Bernardo, 2010, p. 105). A teoria policromática de Hartridge baseava-se na existência de sete fotorreceptores retiniais, que nunca foram identificados. Willmer afirmava que, além dos cones e bastonetes, deveria existir um terceiro tipo de fotorreceptores, bastonetes adaptados à luz do dia que poderiam facilmente ser confundidos com os cones – nunca se encontraram, mais uma vez, provas da existência desse tipo de fotorreceptores.

As experiências realizadas com animais pelo fisiologista sueco Ragnar Granit, que lhe permitiram medir a resposta elétrica dos nervos óticos, abriram uma área de estudo objetivo do efeito fisiológico das cores que foi posteriormente explorada durante todo o século XX (Bernardo, 2010, p. 105). Além das teorias cientificamente aceitáveis, surgiram outras formuladas em bases mais psicológicas do que fisiológicas ou físicas. Entre estas encontram-se as de Ladd-Franklin, Schenck, Donders, G.E. Muller, Edridge-Green e de Wundt (Bernardo, 2010, p. 106).

As várias interligações entre os fotorreceptores e as células ganglionares constituem campos recetivos, no qual um estímulo luminoso irá provocar algumas respostas fisiológicas. Uma das principais características na formação dos campos recetivos, sabemos hoje, tem como base a adição e/ou subtração dos sinais individuais de cada tipo de cone, o que permite formar diferentes canais oponentes de transmissão da informação desde a retina até ao cérebro. No entanto, só na década de 1960, através de trabalhos de pesquisa levados a cabo por cientistas, como por exemplo os desenvolvidos pela equipa de DeValois, conseguiram finalmente provar a existência de canais oponentes na retina, com estudos recorrendo a microelétrodos que permitiam gravar sinais do LGN (do inglês, *Lateral Geniculate Nucleus*) do sistema visual de primatas, e conseguiu registar sinais opostos vindos das diferentes classes de cones. Constatou ainda que as células fotorreceptoras dão uma resposta excitatória a uma parte do espetro e uma resposta inibitória a outra parte (Shevell, 2003, p. 35).

As duas teorias, atualmente, conciliam-se nos modelos mais recentes sobre a visão de cor: enquanto que a teoria tricromática permite explicar como apenas três tipos de fotorreceptores, os cones, permitem descrever um estímulo de cor, a teoria oponente de cor de Hering permite explicar como a informação é codificada ao nível pós-recetor. Exemplo disto são os modelos neuronais apresentados por Muller e Judd (Wyszecki & Stiles, 2000, pp. 462-463).

Embora atualmente muito se conheça sobre os mecanismos de visão a nível ocular, dos fotorreceptores e das suas ligações às fibras nervosas do nervo ótico, são ainda obscuros os mecanismos mais complexos que estão na origem das sensações criadas pelo cérebro. Identificaram-se já algumas regiões do cérebro associadas à perceção e manuseamento da informação das cores, assim como operações globais de processamento desta informação, mas desconhecem-se ainda os mecanismos fisiológicos subjacentes a estas operações (Bernardo, 2010).

Baseados nestas teorias, de uma forma geral as tecnologias de reprodução de imagens a cores modernas podem ser classificadas em dois grupos: as que recorrem à *síntese aditiva* ou as que usam a *síntese subtrativa* (Allen & Sophie Triantaphillidou, 2011; Hirsch & Erf, 2011; Jacobson, Ray, Attridge, & Axford, 2000; Langford & Bilissi, 2008; Nyström, 2006).

Nos sistemas de reprodução de cores baseados na síntese aditiva, as cores são reproduzidas através da mistura aditiva de feixes de luz de diferentes comprimentos de onda, conhecidos como cores primárias. Tipicamente, as primárias aditivas são o vermelho, verde e azul (RGB⁹). O princípio da mistura de cores aditiva está ilustrado na Figura 3 (à esquerda), onde podemos observar que da mistura de vermelho com verde resulta amarelo, verde com azul em ciano, azul com vermelho produz magenta e, por fim, a mistura das três primárias resulta no branco. A síntese aditiva é tipicamente utilizada nos sistemas de reprodução

⁹ Do inglês *Red, Green, Blue*, respetivamente.

de cores dos ecrãs de TV, monitores de computador (CRT¹⁰ ou TFT¹¹), projetores de vídeo ou *datashows*.

A síntese subtrativa, quando utilizada em sistemas de reprodução de cor baseados em suportes transparentes ou transmissivos, tipicamente produz cores através do bloqueio ou remoção espectral de componentes da luz branca, ou seja, através da absorção em certos comprimentos de onda. As cores primárias usuais nos sistemas subtrativos são ciano, magenta e amarelo (CMY¹²), utilizadas por exemplo sob a forma de corantes que absorvem (subtraem) luz nas bandas espectrais vermelha, verde e azul, respetivamente. A síntese subtrativa encontra-se ilustrada na Figura 3 (à direita), onde se pode constatar que da sobreposição de ciano e magenta resulta a cor azul, de ciano e amarelo produz-se a cor verde, o amarelo com o magenta a cor vermelha e a sobreposição das três cores primárias resulta na cor preta. É muito frequente nestes sistemas acrescentar-se um corante de cor preta (K¹³) para melhorar a gama de tonalidades, permitindo reproduzir cores mais escuras e tonalidades acromáticas.

¹⁰ Do inglês, *Cathodic Rays Tube*, referente neste caso aos monitores de computador mais antigos, com o ecrã do tipo “tubo de raios catódicos”.

¹¹ Do inglês, *Thin Film Transistor*, referente neste caso aos monitores de computador de tecnologia de cristais líquidos de matriz ativa.

¹² Do inglês *Cyan, Magenta, Yellow*, respetivamente.

¹³ Do inglês *Key*, cor chave, que fecha o processo de impressão em quadricromia.

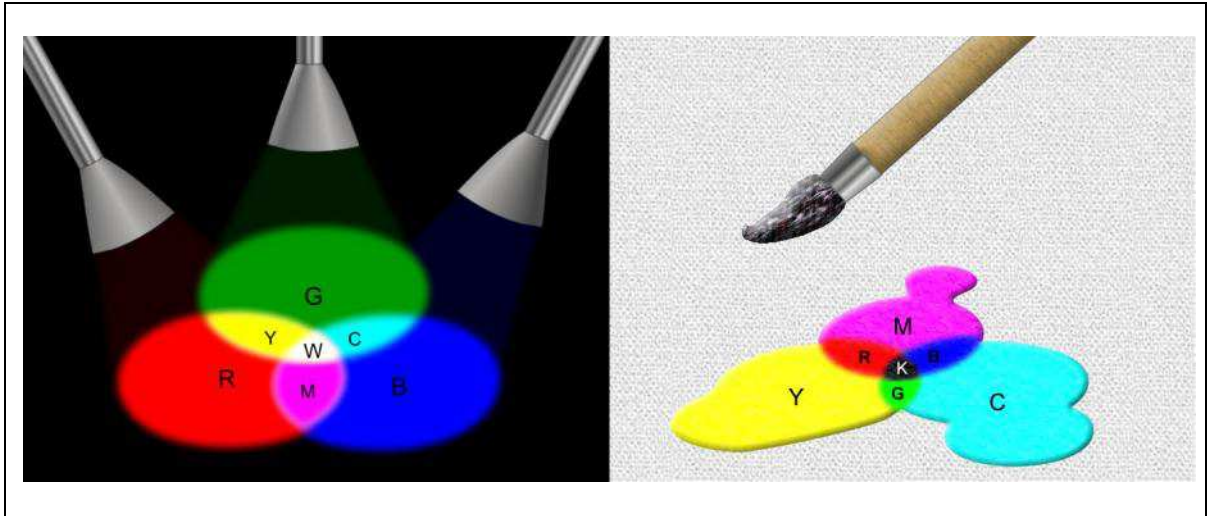


Figura 3: Sínteses Aditiva (esquerda) e Subtrativa (direita) na reprodução de cores.
Ilustração por LBP.

Na figura anterior, apresentam-se os princípios das modernas sínteses aditiva e subtrativa na representação de cores. As letras que figuram na ilustração representam a inicial do nome das cores, como normalmente convencionado em língua inglesa: “R” para “red” (vermelho); “G” para “green” (verde); “B” para “blue” (azul); “C” para “cyan” (ciano); “M” para “magenta” (magenta); “Y” para “yellow” (amarelo); “W” para “white” (branco); “K” para “black” ou “key” (preto ou “cor chave”, já que normalmente encerra a sequência de tintas nos processos de impressão em quadricromia).

2.2.2- Sistema Visual Humano

De uma forma resumida e para melhor se entender o processo visual humano (que influencia todos os sistemas de imagem espectrais), descreve-se de seguida a anatomia e fisiologia gerais do sistema visual humano.

A Figura 4 representa um corte transversal do olho humano, onde se representam as principais estruturas anatómicas que o constituem. O olho humano funciona

como uma *camara obscura*¹⁴, tal como nas câmaras estenopeicas¹⁵ fotográficas. As paredes são constituídas por três túnicas de tecidos celulares (túnica fibrosa externa, túnica vascular pigmentada e túnica sensorial interna) e por quatro meios transparentes (córnea, câmara anterior, câmara posterior e câmara vítrea) onde se inclui um orifício ótico ou estenopo que permite o efeito de *camara obscura*, designado por pupila¹⁶.

Nas paredes do globo ocular temos então a **túnica fibrosa externa** ou **esclerótica** - a camada mais externa e mais espessa - e que é constituída essencialmente de tecido conjuntivo fibroso (quando se observa o globo ocular, constitui a parte branca) e que serve de suporte e proteção ao globo ocular (Scanlon & Sanders, 2007, pp. 205-206). A esclerótica é opaca em toda a sua extensão com exceção da sua zona mais anterior, que é transparente e constitui a *córnea*; esta difere do resto da esclerótica não apenas pela sua transparência mas também por não apresentar vascularização sanguínea (Scanlon & Sanders, 2007, pp. 205-206). A córnea é o primeiro elemento dióptrico ocular e apresenta a maior parte da potência refrativa do olho (Hunt, 1998, p. 19).

¹⁴ Nome em Latim para um tipo de câmara escura em que, num espaço sem luz, um pequeno orifício (estenopo) numa das paredes permite que se projete uma imagem, ténue e invertida, na parede oposta da câmara; este tipo de estrutura é necessário ao funcionamento das câmaras fotográficas, mas também dos órgãos visuais da maioria dos seres vivos que apresentam esta capacidade sensorial.

¹⁵ Câmaras fotográficas sem objetiva, apenas com um pequeno furo ou “estenopo”, o que permite a produção do efeito de *camara obscura*. Comumente também apelidadas pelo anglicanismo de câmaras “*Pin hole*” (“furo de alfinete”, numa tradução literal).

¹⁶ Popularmente também apelidada de “menina do olho”.

2.- Enquadramento Teórico

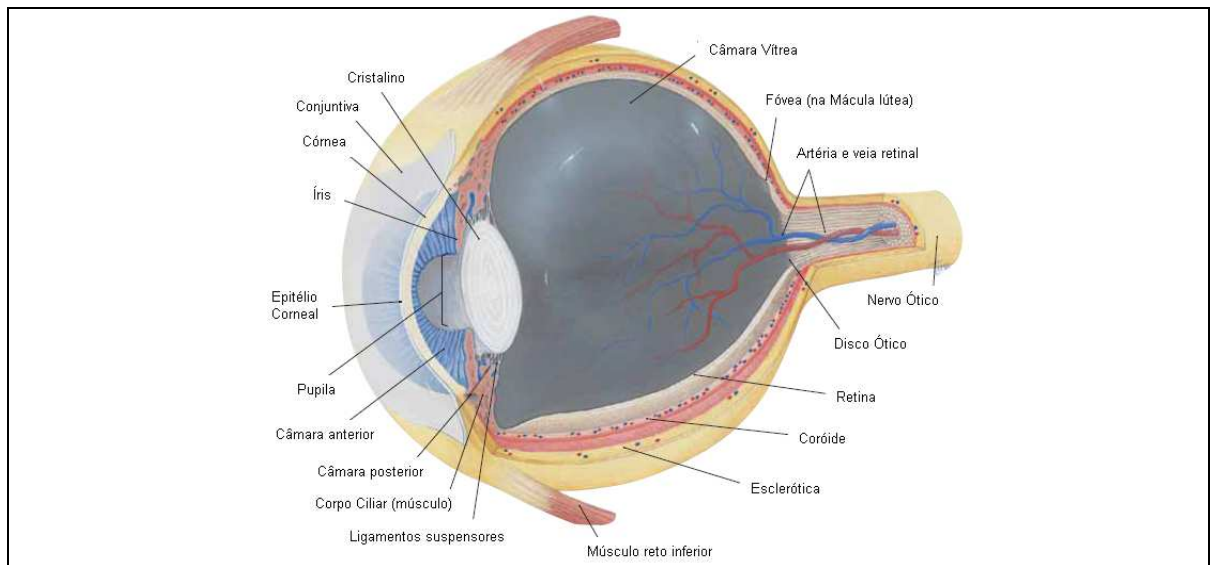


Figura 4: Principais estruturas anatómicas do olho humano.

Traduzido e adaptado de uma ilustração em “Essentials of Anatomy and Physiology” (Scanlon & Sanders, 2007, p. 205).

Segue-se a segunda camada mais interna das paredes do globo ocular, a **túnica vascular pigmentada** que, como o próprio nome sugere, é responsável pela vascularização sanguínea dos tecidos envolventes e divide-se em três estruturas: a *íris*, o *corpo ciliar* e a *coroide* (Scanlon & Sanders, 2007, p. 204).

A *coroide* apresenta-se muito irrigada com vasos sanguíneos que oxigenam os tecidos envolventes, nomeadamente as células da retina, e apresenta uma forte pigmentação azul-escuro (de um pigmento derivado da melanina) que tem por função absorver os raios de luz que conseguem atravessar a retina e evitar assim reflexos internos (tal e qual como numa câmara fotográfica, em que as paredes internas estão revestidas de cor preta, ou das camadas anti-halo das películas fotográficas, que absorvem o excesso de luz que conseguem atravessar a camada da emulsão). A zona anterior da coroide encontra-se modificada e apresenta duas estruturas: o *cristalino*, constituído por proteínas transparentes elásticas e que, tal como a córnea, não apresenta vasos capilares, constituindo o segundo elemento dióptrico do olho, responsável por aumentar ou diminuir a potência refrativa do olho através da alteração da sua forma, tornando-se menos espesso para focagem de objetos distantes e mais espesso para objetos próximos (mecanismo

que se designa por “acomodação”), objetos estes dos quais se projeta uma imagem invertida na superfície da retina (Hunt, 1998); o *corpo ciliar*, que é um músculo circular que rodeia o cristalino e está ligado a este pelos *ligamentos suspensores*; a forma do cristalino varia, por ação do corpo ciliar (Scanlon & Sanders, 2007, pp. 204-206).

Na zona anterior ao cristalino encontra-se uma membrana, formada a partir da coróide, a *íris*. Esta apresenta no seu centro uma abertura circular variável, a *pupila*, cujo grau de contração ou dilatação é controlado pelos *músculos esfíncter e dilatador* da íris. Tal como o diafragma de uma câmara fotográfica, a íris permite controlar os níveis de luminosidade ocular e participar também na formação da imagem, por ação da profundidade de campo (Hunt, 1998, p. 19). Por alteração da forma da íris, a pupila pode variar de diâmetro entre cerca de 2 mm, em condições de intensidade luminosa elevada, e 8 mm, para intensidades luminosas reduzidas (Hunt, 1998, p. 19). A íris, na sua face externa apresenta concentrações variáveis de melanina, responsável pela “cor dos olhos” em volta da pupila.

A ***túnica sensorial interna*** também é denominada simplesmente por ***retina*** e reveste a zona interior do globo ocular, cobrindo cerca de dois terços da sua superfície interna. É nesta estrutura que se projetam as imagens formadas pelos diferentes elementos dióptricos que a antecedem, sendo aqui também que se encontram as células recetoras visuais (Scanlon & Sanders, 2007, pp. 204-206). É constituída por uma complexa estrutura com várias camadas (Figura 5) composta por um epitélio pigmentar, três camadas de células nervosas e por duas camadas de ligações sinápticas onde se encontram os axónios e os corpos dendríticos das células nervosas. No entanto, esta estrutura não é uniforme em termos de sensibilidade à luz. A visão da cor limita-se a um ângulo de cerca de 40° do eixo visual e, fora desta zona, a retina praticamente só apresenta visão acromática e é usada essencialmente para a deteção de luz e movimento (Hunt, 1998, pp. 19-20).

2.- Enquadramento Teórico

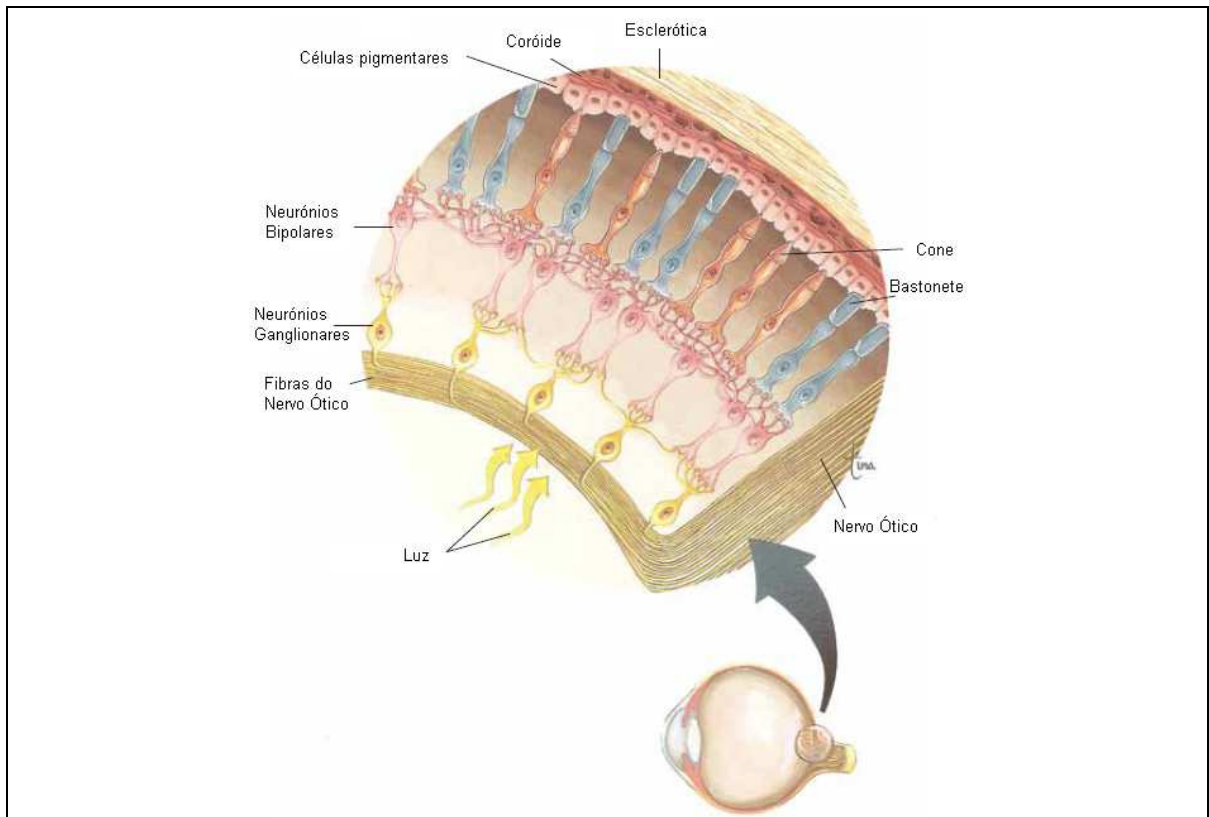


Figura 5: Esquema de secção transversal da retina do olho humano.

Traduzido e adaptado de uma ilustração em “Essentials of Anatomy and Physiology” (Scanlon & Sanders, 2007, p. 206).

Dentro da zona da retina coberta pelos 40° em redor do eixo visual a capacidade de reconhecer detalhe (resolução) e cor vai aumentando com a proximidade ao eixo visual e culmina numa zona especial, a *fóvea*, onde temos a maior resolução e percepção de cor e que preenche aproximadamente uma área coberta por um ângulo de 1½ ° do campo visual. Dentro da *fóvea* existe ainda uma zona mais pequena, a *foveola*, que corresponde a uma área coberta por um campo visual de cerca de 1°, onde só existem fotorreceptores visuais de cor (os cones, explicados mais adiante). A *fóvea* e a *foveola* não se encontram centradas no eixo visual, mas sim deslocadas cerca de 4° para um dos lados. No sentido oposto e a 10° do eixo ótico, existe uma zona, o *disco ótico*, por onde as fibras nervosas passam para fora do globo ocular e ligam a retina ao cérebro, constituindo o *nervo ótico*; esta zona não apresenta qualquer sensibilidade à luz, sendo um ponto cego. Há

ainda uma zona que cobre parte da fóvea, denominada *mácula lutea* que contém grandes concentrações de um pigmento amarelado presente nas células do epitélio pigmentar (Hunt, 1998, pp. 19-20), que absorvem, como já foi referido, a luz que consegue atravessar a retina, evitando o espalhamento da luz.

Na *camada de células nucleares externa* da retina existem as células que constituem os fotorreceptores visuais. Estas células contêm substâncias químicas fotossensíveis, os fotopigmentos, responsáveis pela absorção e conversão da radiação luminosa (nos comprimentos de onda a que forem sensíveis) em sinais elétricos que são depois conduzidos às terminações sinápticas dos fotorreceptores, num processo designado por *fototransdução*. Os fotorreceptores são de dois tipos, os *cones* e os *bastonetes* (nomes que resultam das suas formas características) e apresentam funcionalidades bem distintas no processo de visão (Hunt, 1998, pp. 20-21):

- os *bastonetes* possibilitam uma visão acromática, mas com baixos níveis de intensidade luminosa (luminâncias inferiores a $0,001 \text{ cd/m}^2$) e este tipo de visão chama-se de *escotópica*;
- os *cones* possibilitam a visão a cores em níveis de luminosidade normal (luminâncias superiores a 3 cd/m^2), na chamada *visão fotópica*, e são de três tipos consoante a sua sensibilidade espectral: os cones “L” (do inglês, *Long*) para comprimentos de onda da luz longos; cones “M” (do inglês, *Medium*) para comprimentos de onda médios; cones “S” (do inglês, *Short*) para comprimentos de onda curtos.

Com níveis de luminosidade entre $0,001$ e 3 cd/m^2 , quer os cones, quer os bastonetes estão ativos e participam no processo de visão, num processo que se apelida de *visão mesópica*.

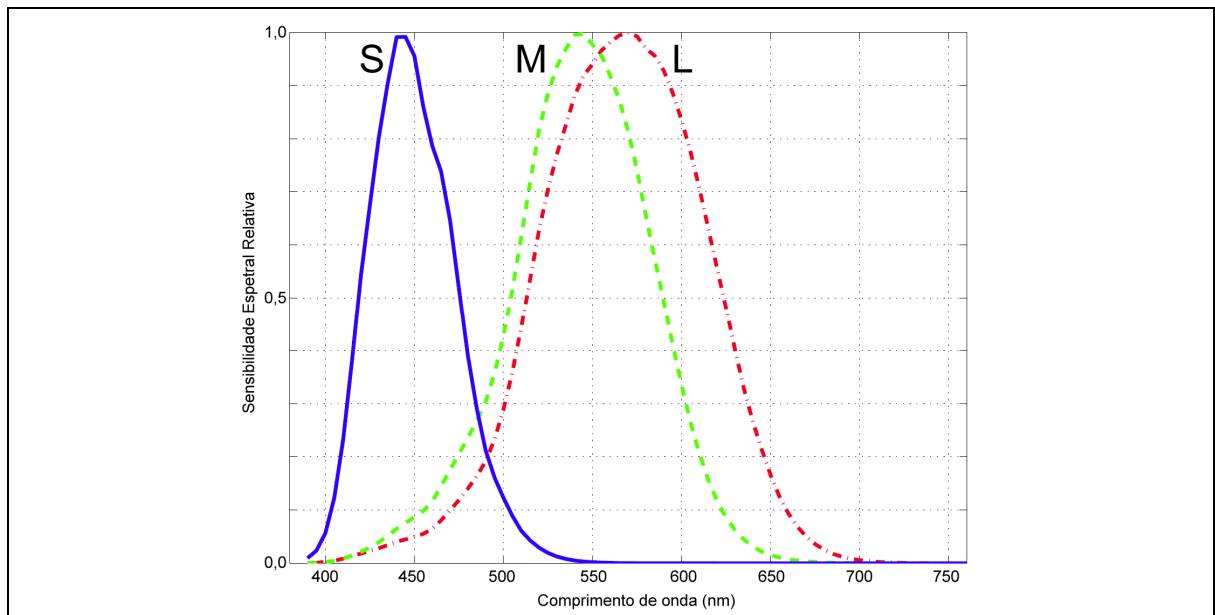


Figura 6: Gráfico representativo da sensibilidade espectral relativa dos cones.

Ilustração por LBP. Dados para o gráfico consultados em Hunt (1998, p.21).

Por vezes há quem designe os cones L, M e S por R, G e B (talvez numa analogia com as câmaras fotográficas), mas tal não é muito correto, pois como se pode observar no gráfico das curvas de sensibilidade espectral dos cones da Figura 6, estas são mais abrangentes do que cada uma destas três cores primárias, e apresentam grandes zonas de sobreposição e os picos espectrais não correspondem necessariamente às cores da tricromia.

Os cones S, M e L apresentam sobreposição na sensibilidade espectral que apresentam, em especial os cones M e L. Através da análise das curvas de sensibilidade espectral pode explicar-se claramente que a região amarelo-verde é aquela em que a visão humana apresenta maior sensibilidade espectral, em condições de visão fotópica.

Os cones e os bastonetes encontram-se posicionados paralelamente ao eixo visual, virados para a zona posterior do olho, o que permite que a luz vá sendo absorvida à medida que percorre o seu comprimento. Os fotorreceptores encontram-se ligados às fibras nervosas através de uma complexa malha de células e estas, por sua vez, dirigem-se para a *disco ótico* onde se juntam

2.- Enquadramento Teórico

formando o *nervo ótico*, que por sua vez conduz a informação visual ao cérebro. Em cada globo ocular existem cerca de 6,8 milhões de cones, 100 milhões de bastonetes e cerca de 1 milhão de fibras nervosas (Hunt, 1998, p. 21).

2.3- Colorimetria

A pequena resenha histórica contida no subcapítulo 2.1, mostrou-nos como muitos dos conceitos principais da moderna ciência da cor foram estabelecidos durante o século XIX. A Colorimetria emergiu como uma ciência quantitativa e a percepção de cor foi adquirindo o seu lugar nas discussões científicas e nos debates públicos (Shevell, 2003). As cores começaram também a assumir um papel cada vez mais relevante em áreas tão diversas como a indústria, moda, estética, publicidade e educação, beneficiando assim de um forte incentivo para um maior aprofundamento do seu estudo.

No início do século XX surgem os primeiros sistemas de classificação ou sistematização de cores, baseados em catálogos, em que estas estavam distribuídas por um plano lógico, de acordo com determinados atributos. O *Sistema de Cores de Munsell* foi o sistema pioneiro, apresentado em 1905 pelo pintor americano Albert Munsell (Bernardo, 2010, pp. 95-97). Este sistema foi publicado como um catálogo de amostras que teve bastante aceitação nos meios industriais e artísticos de então. Outros sistemas foram propostos durante o século XX, mas com menos aceitação.

Na década de 1960 surgiu na Suécia a *Swedish Color Centre Foundation*, que lançou as bases de um novo e mais moderno sistema de classificação de cores, o *Natural Color System* (NCS), e publicaram um atlas de cor com 40 mil tonalidades, de acordo com as normas da CIE¹⁷ (Bernardo, 2010, pp. 97-98).

Mas tanto o sistema de Munsell como NCS são de tipo qualitativo, baseado em catálogos de cores em que se tenta classificar uma amostra pelo método de comparação visual, sempre subjetivo (ou, pelo menos, menos cómodo e preciso), o que levou à investigação e desenvolvimento, nos anos seguintes, de

¹⁷CIE: do francês *Comission Internationale de l'Éclairage*, organismo internacional que reúne especialistas em iluminação. Publica normas e especificações para aplicação a sistemas de iluminação, visualização, caracterização e reprodução de cores.

colorímetros e espectrofotômetros, equipamentos capazes de medição mais rigorosa e reduzindo a subjetividade do processo, permitindo ainda introduzir métodos de quantificação científica.

Surgiram então os chamados sistemas de classificação de cores numéricos, elaborados de acordo com as *três leis de Grassman* (Bernardo, 2010, p. 98; Hardeberg, 1999, pp. 11-12; Wyszecki & Stiles, 2000, p. 118):

- i. a primeira estabelece que qualquer tonalidade pode ser obtida pela combinação apropriada de três cores fundamentais;
- ii. a segunda, que cores com distribuições espectrais diferentes podem causar a mesma sensação de tonalidade – as chamadas “cores metaméricas”;
- iii. e a terceira afirma a validade dos princípios da aditividade e da proporcionalidade na mistura das cores.

Tendo em conta as três Leis de Grassman, a luz refletida por uma superfície pode, em determinadas condições, ser reproduzida pela mistura aditiva de três cores primárias nas proporções adequadas, o que sugere haver uma correlação entre a sensibilidade espectral dos três tipos de cones e os valores obtidos na mistura dos primários. Sendo assim, esses espectros podiam ser obtidos empiricamente da combinação linear de funções obtidas experimentalmente. Foi assim que, em 1928, Wright construiu um colorímetro, no qual usou um prisma para separar dois canais de luz diferentes (Wyszecki & Stiles, 2000, pp. 475-476). Um observador, olhando por uma ocular, poderia ao mesmo tempo visualizar os dois canais. Num deles, colocava a luz monocromática de teste. No outro canal, uma mistura de luzes monocromáticas vermelha, verde e azul. Estas últimas eram controladas pelo observador usando um sistema de reflexão que fazia variar as suas intensidades, de forma a reproduzir a aparência do estímulo de teste projetado no outro canal. Através de testes realizados em vários observadores foi então possível obter a quantidade adequada de cada uma das cores primárias para reproduzir a cor monocromática de teste. As três quantidades das cores

primárias, vermelha, verde e azul, para todos os comprimentos de onda, correspondem às *funções de ajuste*¹⁸ de cores (em inglês *colour matching functions*) ou *funções colorimétricas* (Bernardo, 2010, pp. 98-99; Hardeberg, 1999, pp. 17-19).

Atendendo à diferente sensibilidade espectral de cada observador humano, cedo se reconheceu ser necessário definir um observador-padrão, cujas curvas de sensibilidade às várias cores pudessem servir de norma. Estudos estatísticos foram então realizados, primeiro com poucos observadores e, depois, com um número elevado, permitindo o estabelecimento dessas curvas de sensibilidade cromática padrão (Bernardo, 2010, p. 99). Em 1931, adotando os dados obtidos nesses estudos por Wright e Guild a *Comission Internationale de l'Éclairage* (CIE) estabelece as definições de um *observador-padrão* para colorimetria através das funções de múltiplos observadores com visão normal (Bernardo, 2010, p. 99; Hunt, 1998, p. 43; Wyszecki & Stiles, 2000, pp. 133-140).

2.3.1- Observadores-padrão e sistema colorimétrico da CIE

A CIE estabelece, em 1931, um grupo de funções de ajuste de cor denominadas de *Observador-padrão 1931* ou *Observador de 2º*, para serem aplicadas no ajuste de cor para um campo visual de entre 1º a 4º. As funções de ajuste de cor $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$ foram expressas com base nos estímulos de comprimentos de onda das três cores primárias R (700 nm), G (546,1 nm) e B (435,8 nm), e estão representadas na Figura 7.

A CIE definiu então o *Sistema Colorimétrico Padrão CIE RGB 1931*. Um determinado estímulo de cor com uma distribuição de potência espectral $R(\lambda)$, também designada por radiância espectral, pode ser representado como valores

¹⁸ Consoante os autores, em vez do termo “ajuste”, há quem opte por usar neste caso “reprodução” ou “equalização”.

2.- Enquadramento Teórico

de triestímulos RGB, através das seguintes fórmulas matemáticas (Hardeberg, 1999, pp. 17-19; Wyszecki & Stiles, 2000, pp. 133-140):

$$R = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda. \quad (2.1)$$

$$G = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda. \quad (2.2)$$

$$B = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda. \quad (2.3)$$

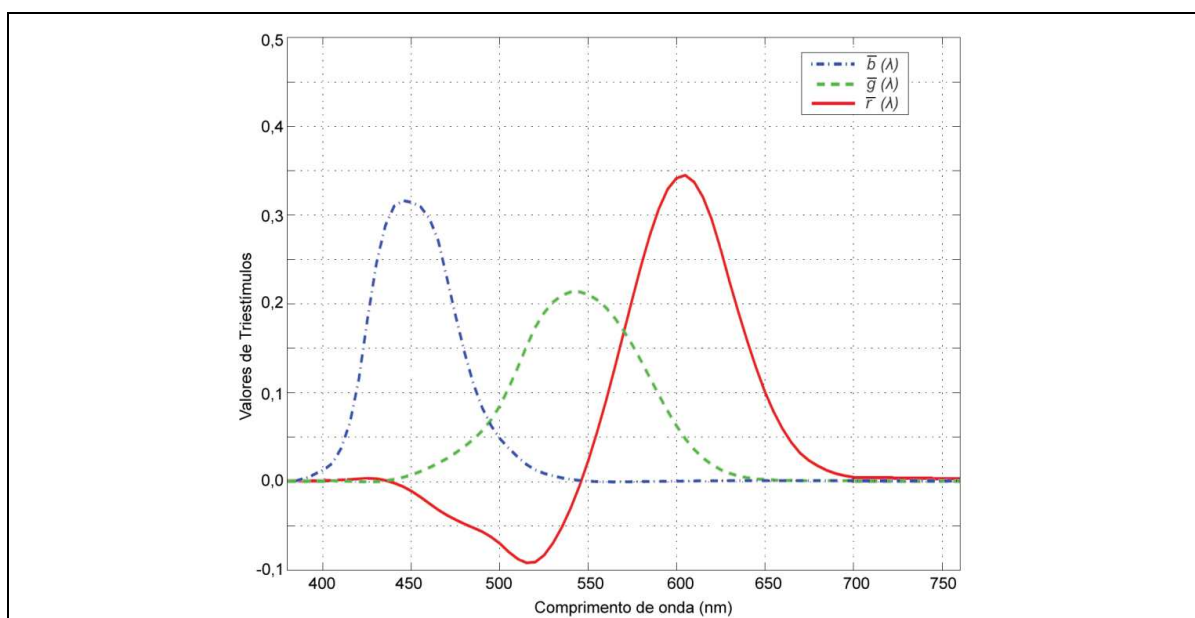


Figura 7: Funções de ajuste de cor $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$ para o observador-padrão CIE 1931. Funções de ajuste de cor para um observador-padrão de 2º do sistema colorimétrico CIE RGB com primárias monocromáticas iguais a 435,8, 546,1 e 700 nm. Ilustração por LBP, a partir de dados consultados em Hunt (1998, p. 43).

As funções de ajuste de cor representadas na Figura 7 apresentavam alguns inconvenientes de natureza prática, como o facto de haver necessidade de avaliar a luminosidade da amostra e as funções colorimétricas apresentarem valores negativos. Daí a decisão da CIE em introduzir uma transformação linear adequada, de que resultou um novo sistema colorimétrico e um novo conjunto de funções de ajuste de cor, em que as primárias das novas funções são

representadas por $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ (Bernardo, 2010, p. 99; Hardeberg, 1999, pp. 17-19; Hunt, 1998, p. 47; Wyszecki & Stiles, 2000, p. 137). O novo grupo de primárias, correspondente a estas novas funções, não representa estímulos físicos reais uma vez que estas funções não contêm valores negativos, ou seja, representam cores imaginárias, impossíveis de realizar. Apesar do modelo ser teórico, embora fundamentado em medições experimentais, não existe nenhuma limitação imposta pela introdução de cores imaginárias (Bernardo, 2010, p. 101). Estas novas funções de ajuste de cor encontram-se representadas na Figura 8. Definiu-se assim o *Sistema Colorimétrico Padrão CIE XYZ 1931*. Os valores de triestímulos X , Y e Z são definidos pelas fórmulas seguintes, em que o fator k é uma constante de normalização:

$$X = k \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda. \quad (2.4)$$

$$Y = k \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda. \quad (2.5)$$

$$Z = k \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda. \quad (2.6)$$

O conjunto de funções de ajuste de cor $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ é uma transformação linear do conjunto $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$, através da seguinte transformação linear (Wyszecki & Stiles, 2000):

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,49 & 0,31 & 0,2 \\ 0,17697 & 0,81240 & 0,01063 \\ 0,0 & 0,01 & 0,99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

2.- Enquadramento Teórico

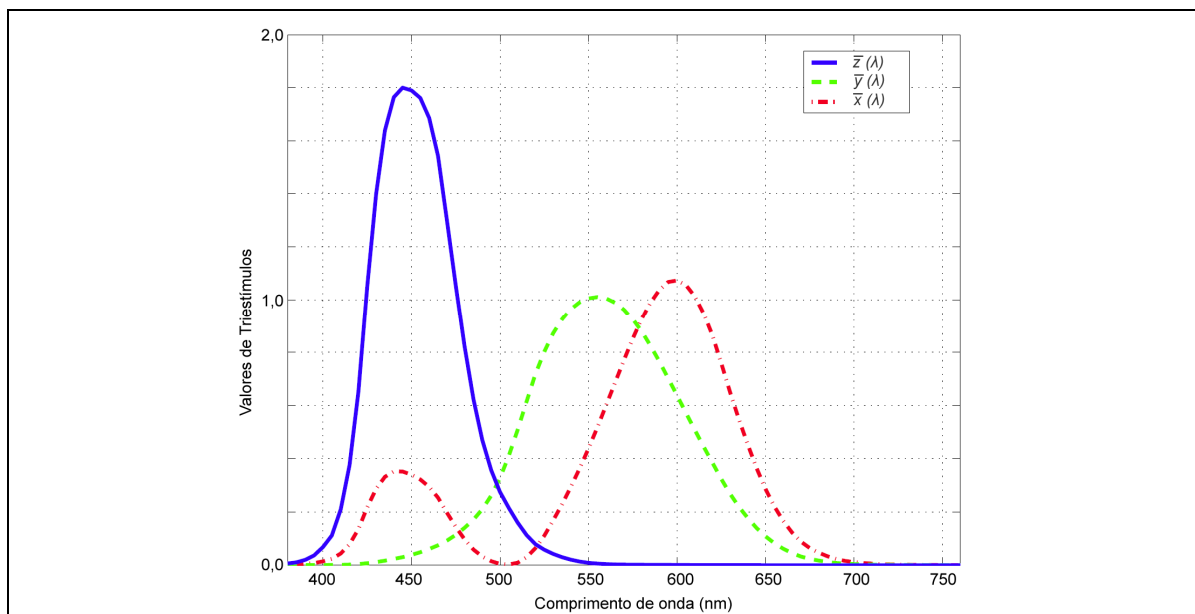


Figura 8: Funções de ajuste de cor $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ para o observador-padrão CIE 1931. Funções de ajuste de cor para um observador-padrão de 2º do sistema colorimétrico CIE XYZ 1931. Ilustração por LBP, a partir de dados consultados em Wyszecki & Stiles (2000, p. 137).

O sistema CIE XYZ 1931 baseia-se em observações visuais que ocupam a zona central da retina, com uma largura angular limitada a 2º. Além disso, os valores das funções colorimétricas deste sistema apresentam valores muito baixos nos comprimentos de onda entre 380 e 460 nm devido a uma eventual participação dos bastonetes nas operações de ajuste colorimétrico (Bernardo, 2010, p. 99). Para ultrapassar estas limitações e melhor simular as condições normais de observação, a CIE estabeleceu em 1964 um novo sistema para campos visuais superiores a 4º, com um novo *observador-padrão 1964*. Considerando um ângulo de visão de 10º, a CIE propõe um novo conjunto de funções, as *funções de ajuste de cor para um observador de 10º da CIE 1964*, ou CIE (X_{10} , Y_{10} , Z_{10}). Este sistema utiliza como cores primárias as de comprimentos de onda 645,2 nm (R), 526,3 nm (G) e 444,4 nm (B), que são corrigidas para as cores imaginárias (X_{10} , Y_{10} , Z_{10}) por transformações lineares semelhantes às do sistema CIE XYZ 1931. As funções de ajuste de cor que no sistema de 1931 são (\bar{x} , \bar{y} , \bar{z}) passam a ser no sistema de 1964, (\bar{x}_{10} , \bar{y}_{10} , \bar{z}_{10}) e podem ser obtidas através das funções de ajuste

de cor CIE RGB a partir da seguinte transformação linear (Wyszecki & Stiles, 2000, p. 141):

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_{10}(\lambda) \\ \bar{y}_{10}(\lambda) \\ \bar{z}_{10}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,341080 & 0,189145 & 0,387529 \\ 0,139058 & 0,837460 & 0,073160 \\ 0,0 & 0,039553 & 2,026200 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{r}_{10}(\lambda) \\ \bar{g}_{10}(\lambda) \\ \bar{b}_{10}(\lambda) \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Os respetivos valores de triestímulos para um observador-padrão da CIE 1964 são determinados através das mesmas equações 2.4, 2.5 e 2.6, mas em que se substitui as funções de ajuste de cor para um observador de 2º pelas funções de ajuste de cor de um observador de 10º.

Com estes dois últimos sistemas da CIE é possível construir espaços de representação de cor e diagramas de cores em função das coordenadas tricromáticas (x,y,z) ou (x_{10},y_{10},z_{10}) , que representam pesos positivos das cores imaginárias, necessários para a síntese aditiva das cores reais. Dado que, por normalização, existe uma relação entre as variáveis $(x+y+z=1)$, cada cor fica perfeitamente definida para a mesma luminância pelas variáveis x e y . Sendo assim, todas as cores da mesma luminância podem ser representadas num plano, por meio dos chamados diagramas de cromaticidade, de que é exemplo a Figura 9, que representa a projeção do espaço de cor CIE XYZ no diagrama de cromaticidades CIE (x,y) .

Um estímulo de cor com valores de triestímulo X , Y e Z pode ser especificado através das suas coordenadas cromáticas (x,y,z) definidas pelas seguintes equações:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}. \quad (2.9)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}. \quad (2.10)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}. \quad (2.11)$$

2.- Enquadramento Teórico

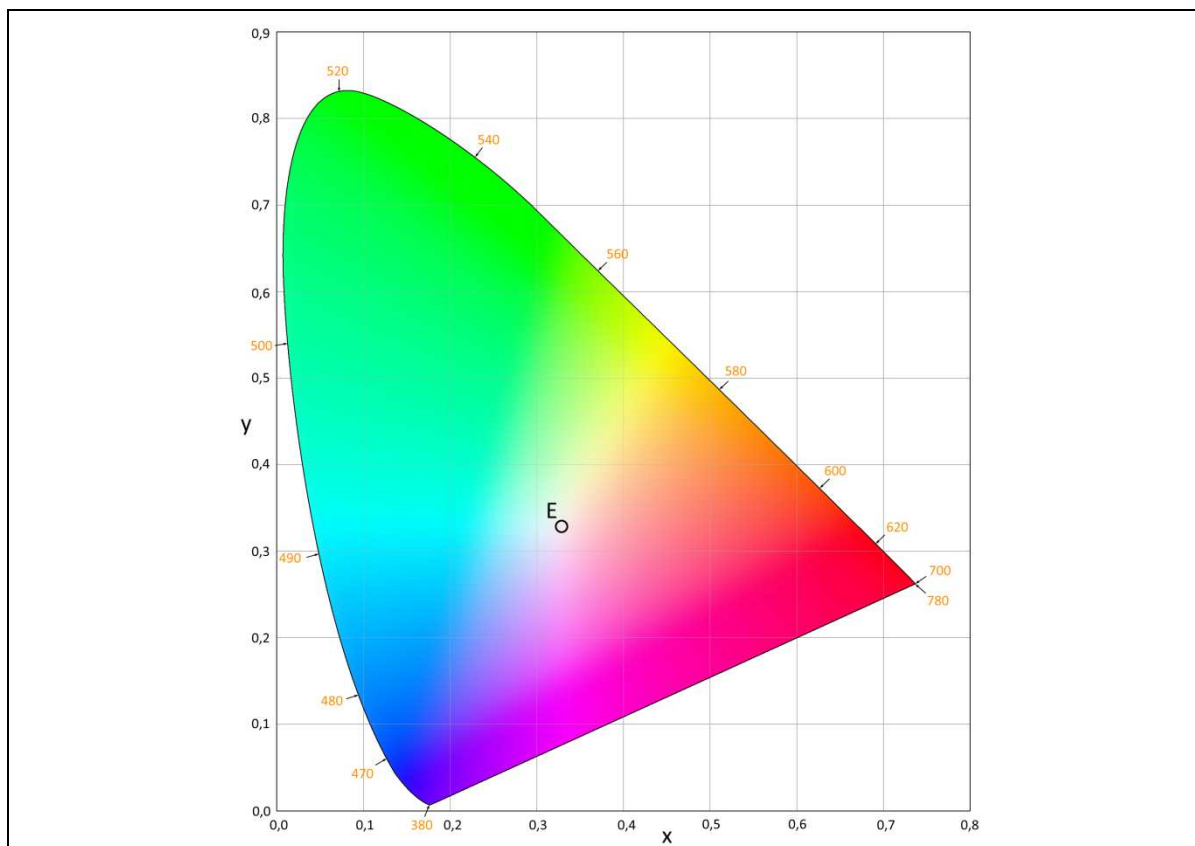


Figura 9: Diagrama de cromaticidade CIE 1931 (x,y).

A linha curva que delimita o diagrama apresenta as cores espectrais puras e os números a cor laranja representam a escala de comprimentos de onda (em nm) que lhes correspondem. “E”, representa a posição do estímulo equi-energético. A gama de cores representada é meramente indicativa. Ilustração por LBP, a partir de dados consultados em Hunt (1998, p.55).

Neste tipo de diagramas, o espaço contido pelos seus limites encerra o domínio de cores fisicamente realizáveis e as cores espectrais puras encontram-se na linha curva que o delimita (conhecida como *locus espectral*). O segmento de reta que une os extremos do locus espectral corresponde às cromaticidades de todas as misturas aditivas em diferentes proporções de uma luz espectral de comprimentos de onda entre 380 e 780 nm e é denominado por *linha das cores púrpuras puras* (Bernardo, 2010, p. 99) ou, simplesmente, *limite púrpura* (Hunt, 1998, p. 55). O Ponto E, representa a posição do estímulo equi-energético (cor branca de igual energia), com coordenadas $x = y = \frac{1}{3}$. A saturação de uma cor é tanto maior, quanto maior for a distância que separa o ponto equi-energético E do que representa o estímulo dessa cor.

Com este tipo de diagramas é possível obter-se, para além das coordenadas de uma dada cor, um conjunto de informações muito diretas referentes à síntese aditiva de cores (Bernardo, 2010, p. 100).

Estes diagramas de cromaticidade também são muito usados para representar os espaços de cor de diferentes dispositivos usados na digitalização e na reprodução de cores (se baseados em modelos RGB, sobre a forma de um triângulo, cujos vértices se situam sobre os pontos das respetivas cores primárias), como por exemplo, câmaras fotográficas digitais, monitores de computador, *scanners* e impressoras (ver exemplo da Figura 16).

2.3.2- Iluminantes-padrão da CIE

Além da importância de estabelecer e definir observadores-padrão, um passo igualmente importante é definir padrões para os iluminantes a usar em colorimetria. A CIE estabelece, em 1931, iluminantes como o *iluminante A* representativo da iluminação interior com lâmpadas de incandescência (com filamento de tungsténio, cuja distribuição de potência espectral corresponde a um radiador Planckiano¹⁹ à temperatura absoluta de 2856 K) e os iluminantes *B* e *C* (com temperaturas de cor correlacionadas²⁰ de 4874 K e 6774 K, respetivamente), que consistem no iluminante *A* mas com a adição de filtros especiais (filtros de cor líquidos, os filtros de Davis-Gibson), em que o iluminante *B* pretende ser representativo da luz do Sol direta e o *C* de um dia de céu encoberto (McDonald, 1997, pp. 11-15; Wyszecki & Stiles, 2000, pp. 143-146).

¹⁹ Radiador Planckiano ou corpo negro Planckiano é um modelo teórico, em que um determinado corpo seria constituído de um material ideal que só emitiria luz em função da temperatura (medida em graus Kelvin) a que se encontrasse esse corpo (Bernardo, 2010; McDonald, 1997).

²⁰ Temperatura de cor correlacionada (TCC) é definida como a temperatura de um radiador Planckiano cuja percepção de cor (cromaticidade) mais se aproxima à cor de um radiador seletivo (fonte de luz) para valores de brilho iguais e sob determinadas condições de observação (Ferreira, 2010; Wyszecki & Stiles, 2000).

2.- Enquadramento Teórico

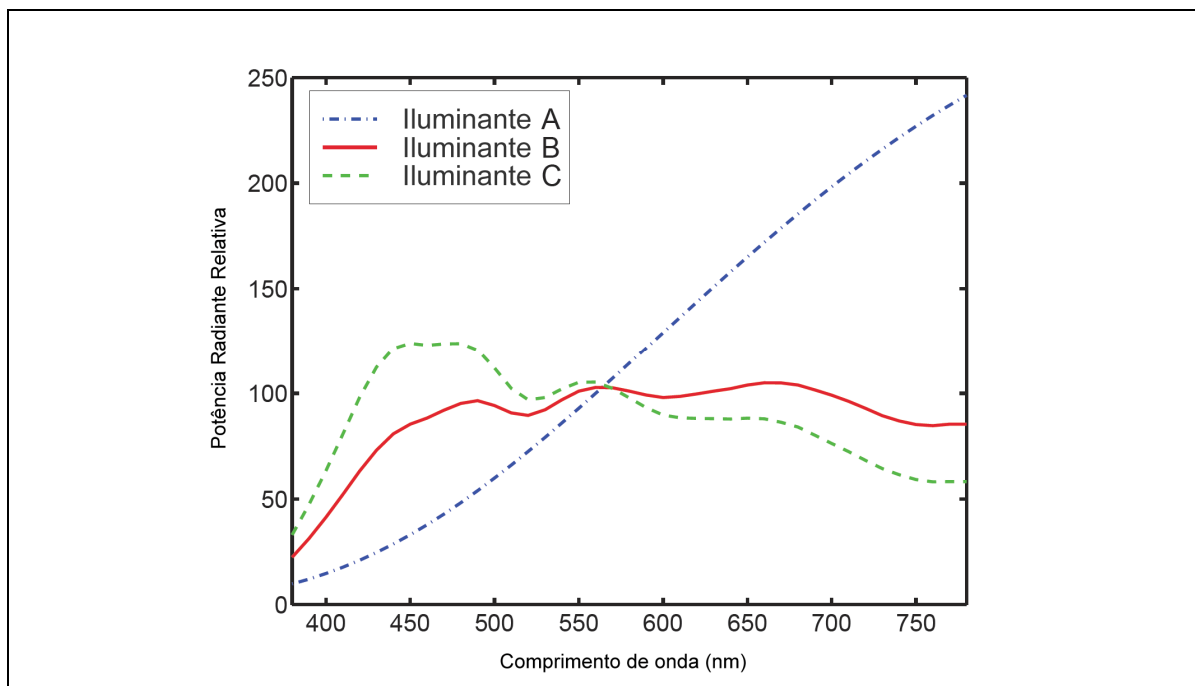


Figura 10: Iluminantes-padrão CIE A, B e C.

Distribuições das potências espectrais relativas dos iluminantes-padrão CIE A, B e C. Ilustração por LBP, a partir de dados consultados em Wyszecki & Stiles (2000, p.144) e adaptados de Hardeberg (1999, p.17).

No entanto, apesar dos iluminantes B e C representarem relativamente bem a distribuição espectral da luz do dia, apresentam grandes deficiências com comprimentos de onda abaixo dos 400 nm, característica indispensável para a análise de amostras fluorescentes. Devido ao uso cada vez mais frequente de corantes e pigmentos que apresentam propriedades de fluorescência, a CIE definiu mais tarde (em 1964) funções de distribuições espectrais que representam a luz do dia em comprimentos de onda entre os 300 e os 830 nm, criando os *iluminantes D*, recomendando ao mesmo tempo um método de calcular qualquer distribuição de potência espectral para qualquer iluminante D, com temperaturas de cor correlacionadas entre 4000 e 25000 K (Wyszecki & Stiles, 2000, pp. 143-146). O D_{65} (representante da luz média do dia, para uso geral) é o que a CIE recomenda a ser usado preferencialmente mas quando não for possível, recomenda então o uso do D_{55} (com uma temperatura de cor correlacionada mais baixa) e o D_{75} (temperatura de cor correlacionada mais elevada). Em várias

2.- Enquadramento Teórico

aplicações de colorimetria e de gestão de cor em fotografia, também se usa frequentemente o D_{50} .

Os valores em índice 50, 55, 65 ou 75 referem-se à temperatura de cor correlacionada dos respetivos iluminantes: o D_{65} apresenta uma temperatura de cor correlacionada aproximada de 6504 K, o D_{50} de aproximadamente 5000 K, o D_{55} de 5503 K e o D_{75} de 7504 K (Hardeberg, 1999, p. 17; Hunt, 1998, p. 95; Wyszecki & Stiles, 2000, p. 145). Juntamente com estes iluminantes, também foi definido o conceito do iluminante hipotético *iluminante equi-energético E*, que apresenta potência radiante igual por unidade de comprimento de onda através do espectro visível (Hardeberg, 1999, p. 17).

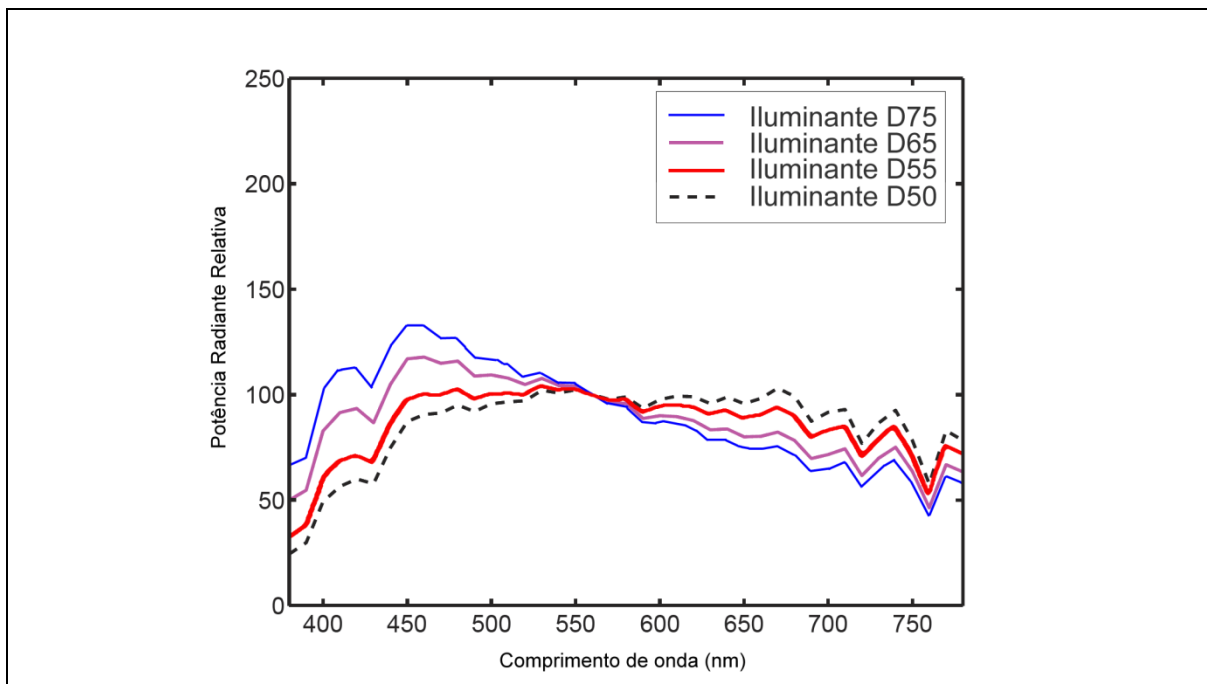


Figura 11: Iluminantes-padrão CIE D50, D55, D65 e D75.

Distribuições das potências espectrais relativas dos iluminantes-padrão CIE D_{75} , D_{65} , D_{55} e D_{50} . Ilustração por LBP, a partir de dados consultados em Green (2006, p. 299).

Estes iluminantes são atualmente muito usados nos modernos sistemas de reprodução de cores. O iluminante D_{65} , por exemplo, é usado como branco de referência para televisão do sistema PAL e para monitores de computador

2.- Enquadramento Teórico

(quando usados para gestão de cor), o iluminante C para televisão do sistema NTSC. O iluminante D_{50} , é amplamente usado na indústria gráfica e fotográfica, para apreciação de provas impressas, realizadas com gestão de cor.

Alguns iluminantes de lâmpadas fluorescentes também são recomendados pela CIE. O uso destas distribuições de potência espectral com diferentes temperaturas de cor são recomendadas apenas para efeitos de teste e não para especificação e caracterização de um dado estímulo de cor, uma vez que as suas distribuições de potência espectral são bastante distintas da potência espectral de luz de dia. Dentro dos iluminantes F, a CIE recomenda os F2 (fluorescente de luz branca “fria”), F7 (fluorescente com largura de banda larga) e F11 (fluorescente de banda estreita).

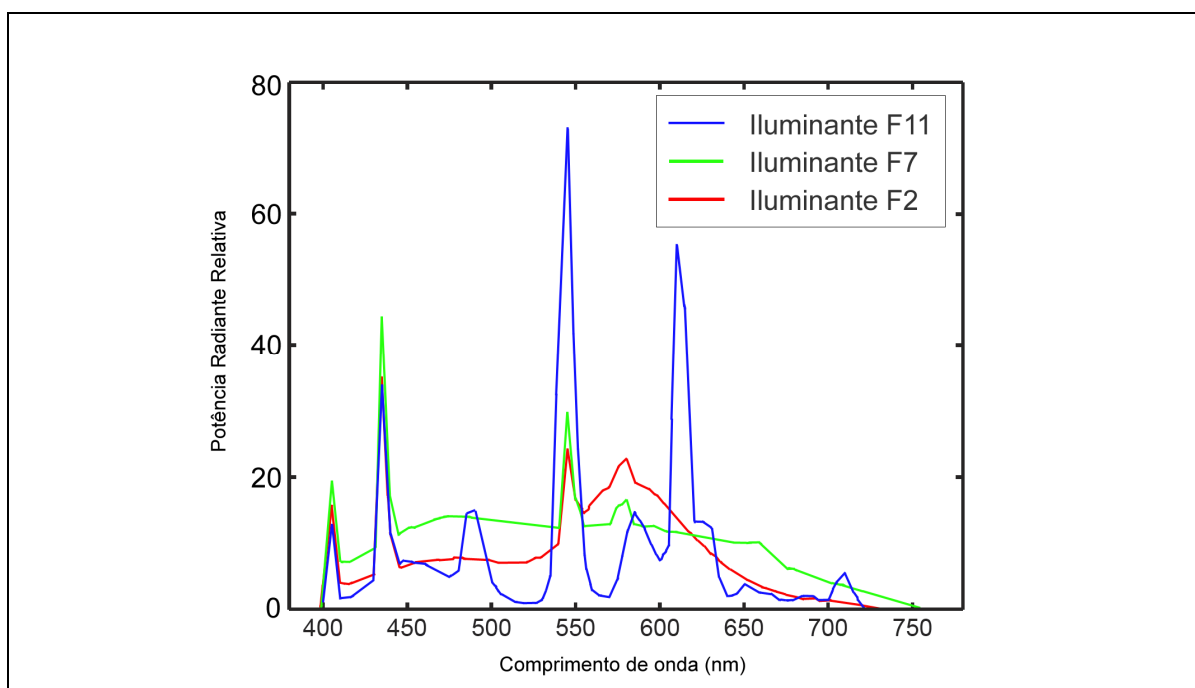


Figura 12: Iluminantes-padrão CIE F2, F7 e F11.

Distribuições das potências espectrais relativas dos iluminantes-padrão CIE. Ilustração por LBP, a partir de dados consultados e adaptados de Ferreira (2010, p.45).

2.3.3- Espaços de cor uniformes da CIE

Um dos problemas dos espaços CIE de 1931 e 1964 é o facto de apresentarem uma distribuição de cores no plano (x, y) muito pouco uniforme. Quando se alteram os valores triestímulos XYZ (ou RGB) de um determinado estímulo de cor, o observador só se aperceberá de uma mudança de cor após um valor mínimo para essa alteração, valor esse designado por *JND* (do inglês, *Just Noticeable Difference*). Em espaços de cor não uniformes como estes, se representarmos o *JND* como um segmento de reta, este varia muito de comprimento consoante a zona do diagrama de cromaticidades correspondente, chegando a apresentar diferenças numa proporção de 20:1 (Hunt, 1998, p. 60). Além do mais, nestes diagramas todas as cores têm a mesma Luminância L . Para ultrapassar estas limitações, a CIE estabeleceu em 1964 os denominados *Espaços Colorimétricos Uniformes*, sendo o primeiro deles o *CIE 1964* (u^*, v^*, w^*) , de que resultou em 1976 uma versão melhorada, o *CIE 1976* (L^*, u^*, v^*) , ou simplesmente *CIELUV*, e pouco tempo depois o *CIE 1976* (L^*, a^*, b^*) , também designado por *CIELAB*. Este último ainda teve duas versões melhoradas, o *CIELAB 92* e o *CIELAB 2000*.

Estes espaços, sendo transformações não lineares dos espaços anteriores mas que não apresentam diferenças tão grandes no *JND*, não são ainda completamente uniformes, pelo que na realidade são *pseudo-uniformes*. Mas aproximam-se o suficiente de um espaço uniforme para serem usados em colorimetria diferencial, pois se representarmos o *JND* como um segmento de reta num diagrama de cromaticidades, este varia muito menos de comprimento consoante a zona do diagrama de cromaticidades correspondente e as diferenças que antes eram numa proporção de 20:1 passam a ser agora de 4:1 (Hunt, 1998, p. 60).

O espaço de cor CIELUV foi durante algum tempo muito utilizado para a descrição de cores de um ecrã ou monitor de computador, enquanto que o CIELAB foi inicialmente concebido para uso com meios refletivos. Acontece que em termos práticos o CIELAB começou a ser mais utilizado para todas as

aplicações descritas e, atualmente, é o espaço de cor escolhido como espaço-padrão para muitas áreas de aplicação, como por exemplo, artes gráficas, multimédia, reprodução de cores em aplicações fotográficas (por exemplo, conversão de perfis de cor de ficheiros de imagem), entre outras (Hardeberg, 1999, p. 20).

Com os espaços de cor pseudo-uniformes, deu-se uma resposta satisfatória às questões de colorimetria diferencial, isto é, tornou-se mais fácil medir quantitativamente as diferenças de cor relativamente a um padrão, uma necessidade muito relevante nas aplicações industriais que o sistema de Munsell e outros só resolviam parcialmente e apenas de forma qualitativa (Bernardo, 2010, p. 100).

Pela importância atual do espaço de cor CIELAB, descreve-se, de seguida, mais pormenorizadamente este espaço de cor pseudo-uniforme.

Espaço de cor padrão CIELAB

O CIELAB é um sistema numérico, em que os eixos perpendiculares a^* e b^* unem na roda das tonalidades um par de cores – *verde-vermelho* para o eixo a^* e *azul-amarelo* para o eixo b^* . Com as variáveis a^* e b^* ficam definidas a *tonalidade* e a *saturação*. A variável L^* define o *brilho psicométrico CIE 1976* ou *luminosidade*. Por convenção, os intervalos de variação são [-60,+60] para a^* e b^* e [-100, +100] para L^* . Neste último caso, 0 representa o preto ideal e 100 o branco de referência. Estas variáveis podem ser definidas pelas seguintes fórmulas (Hardeberg, 1999, p. 20):

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16. \quad (2.12)$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]. \quad (2.13)$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]. \quad (2.14)$$

Onde

$$f(\alpha) = \begin{cases} \alpha^{\frac{1}{3}} & , \alpha \geq 0,008856 \\ 7,787 + \frac{16}{116} & , \text{nos outros casos} \end{cases}$$

Uma representação alternativa das cores no espaço CIELAB poderá ser através do uso de coordenadas cilíndricas, através da variável C^* que é designada de *cromaticidade* C^* (em inglês, também se designa *Chroma* C^* ou *CIE 1976 chroma*), que se define pela sua distância ao eixo L^* , através da equação (Bernardo, 2010, p. 101):

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}. \quad (2.15)$$

E o *ângulo de tonalidade* ou *matiz* (em inglês, *Hue angle*)

$$h_{ab} = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right). \quad (2.16)$$

O uso das variáveis luminosidade L^* , cromaticidade C^* e ângulo de tonalidade h_{ab} permite uma compreensão mais intuitiva do espaço de cor CIELAB, por utilizar atributos perceptuais das cores.

2.- Enquadramento Teórico

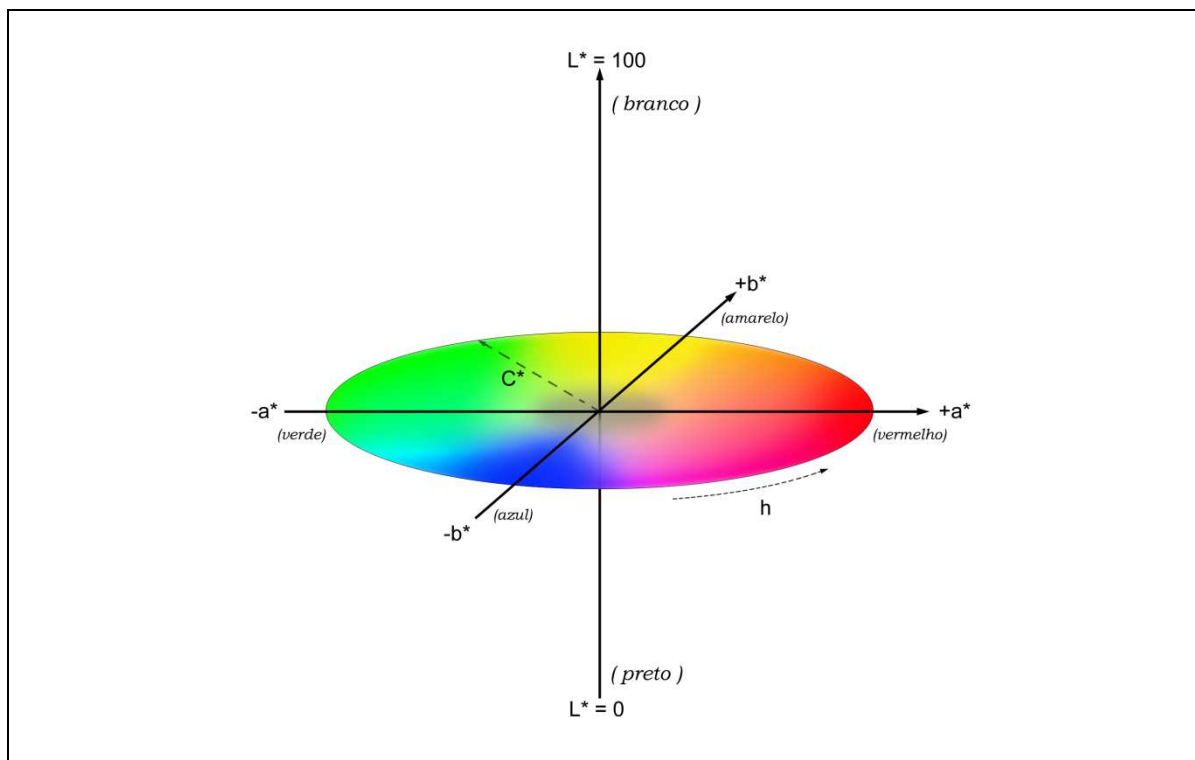


Figura 13: Diagrama representativo do espaço de cor CIE 1976 ($L^*a^*b^*$).

Para mais informação sobre este espaço de cor, ler o texto. A gama de cores representada é meramente indicativa. Ilustração por LBP.

2.3.4- Fórmulas de diferenças de cor

Com base nos espaços de cor CIELUV e CIELAB, por serem espaços com uniformidade suficiente para aplicação de métricas comparativas, é possível calcular diferenças entre dois estímulos, usando várias fórmulas que calculam diferenças de cor e que permitem, por exemplo, comparar dois estímulos provenientes de dois sistemas distintos de digitalização espectral, em que um serve de sistema de teste e outro de sistema de referência, como foi o caso nos trabalhos práticos da presente tese.

Segundo Imai, Rosen & Berns (2002, pp. 492-493), podemos dividir estas fórmulas de diferenças de cor em quatro grupos principais, que se descrevem a seguir.

2.3.4.1.- Equações de diferenças de cor da CIE.

A CIE tem publicado ao longo do tempo equações de diferenças de cor para os sistemas de cor CIELUV, CIELAB, CIE94 e, mais recentemente, CIE2000. Apesar do objetivo de usar equações de diferenças de cor não seja avaliar o ajuste espectral entre curvas, algumas destas métricas como as CIELUV, CIELAB e CIE94 têm sido usadas como funções de avaliação da precisão dos valores espectrais estimados. Uma vez que as equações de diferenças de cor consideram a resposta do sistema visual humano em condições controladas de iluminação e observação, podem fornecer boas indicações quanto à qualidade do ajuste espectral. No entanto, não produzem correlações tão boas para pares espectrais, principalmente pares metaméricos, tornando-se necessário recorrer também a outro tipo de métricas (Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, p. 492).

É possível calcular a diferença de cor entre dois estímulos, no espaço CIELAB, calculando a distância Euclidiana do espaço entre os dois pontos que os representam, através da equação seguinte (Westland & Ripamonti, 2004, p. 52):

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (2.17)$$

na qual ΔL^* representa a diferença entre os respetivos valores de L^* (correspondente à luminosidade²¹ do estímulo de cor, no modelo CIELAB) dos dois pontos, presentes neste espaço de cor, que representam os estímulos a comparar; a cromaticidade neste modelo é representada por

²¹ Também se pode designar por “fator de luminância”.

duas variáveis (a^* e b^*)²². Os valores de ΔL^* , Δa^* , e Δb^* para quaisquer estímulos de cor são assim dados por:

$$\Delta L^* = L_1^* - L_2^* , \quad (2.18)$$

$$\Delta a^* = a_1^* - a_2^* , \quad (2.19)$$

e

$$\Delta b^* = b_1^* - b_2^* . \quad (2.20)$$

Os valores em índice referem-se aos estímulos de cor que se pretende comparar - no caso do presente trabalho, um estímulo medido com o sistema de referência e o outro com o sistema em teste.

Outro modo possível de expressar ΔE_{ab}^* é através de coordenadas polares (Westland & Ripamonti, 2004, p. 53), o que permite escrever uma equação equivalente à 4.1, mas em termos de ΔL^* , ΔC_{ab}^* e ΔH_{ab}^* ,

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2]^{1/2} , \quad (2.21)$$

em que ΔL^* traduz, como acima, a diferença entre os valores de luminosidade, C_{ab}^* traduz a diferença de cromaticidade e ΔH_{ab}^* , a diferença de tonalidade, calculada a partir das diferenças entre as componentes ΔL^* , ΔC_{ab}^* e de ΔE_{ab}^* , de acordo com a seguinte expressão²³

$$\Delta H_{ab}^* = [(\Delta E_{ab}^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2]^{1/2} , \quad (2.22)$$

ou, simplesmente,

²²Que representam os pares de cores “vermelho-verde” e “azul-amarelo” no espaço de cor CIELAB, explicado detalhadamente no subcapítulo 2.3:3.

²³A tonalidade é representada como um ângulo, identificado pela letra h , no modelo tridimensional que representa este espaço, mas uma vez que Δh_{ab} representa uma diferença angular de tonalidade, esta não tem representação no espaço de cor CIELAB, daí o utilizar-se ΔH^* , passível de cálculo a partir das componentes citadas.

$$\Delta H_{ab}^* = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2]^{1/2} . \quad (2.23)$$

Com o intuito de melhorar a uniformidade das medidas de diferenças de cor, sobretudo quando se consideram pequenas diferenças de cor entre estímulos, várias propostas de modificações à equação ΔE_{ab}^* foram sendo apresentadas pela comunidade científica. Em 1994, a CIE define então um novo sistema de medição de diferenças de cor, denominado por *modelo de diferença de cor CIE 1994*, baseado no espaço CIELAB (Quijano Ruiz, 2010, p. 5; Westland & Ripamonti, 2004, p. 56). Designado abreviadamente por CIE94 ou ΔE_{94}^* , é determinado através da seguinte fórmula:

$$\Delta E_{94}^* = [(\Delta L^*/(k_L S_L))^2 + (\Delta C_{ab}^*/(k_C S_C))^2 + (\Delta H_{ab}^*/(k_H S_H))^2]^{1/2} , \quad (2.24)$$

em que as funções de ponderação S_L , S_C e S_H variam com a cromaticidade C_{ab}^* da amostra padrão e se definem por:

$$S_L = 1, S_C = 1 + 0.045C_{ab}^* \text{ e } S_H = 1 + 0.015C_{ab}^* . \quad (2.25)$$

As variáveis k_L , k_C e k_H representam os fatores paramétricos que, quando em condições de referência, são constantes e iguais a 1; foram incluídos na fórmula para permitir ajustes independentes nas funções de ponderação, a aplicar sempre que haja desvios das condições de observação relativamente a essas condições de referência estabelecidas, como por exemplo condições de observação com presença de texturas, fundos, separação entre amostras (Ferreira, 2010, p. 41; Quijano Ruiz, 2010, p. 5).

O modelo mais recente apresentado pela CIE, para medição da diferença de cor, é designado por *modelo de diferença de cor CIEDE2000* (abreviadamente ΔE_{00}^*). Tal como o ΔE_{94}^* , baseia-se no espaço CIELAB,

mas foi apresentado com o intuito de reduzir pequenos erros de diferenças de cor nos azuis e em cores neutras, presentes em algumas situações de aplicação do modelo de diferença de cor CIE94. Este novo modelo é determinado pela equação (Westland & Ripamonti, 2004, p. 57):

$$\Delta E_{00} = \left[\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right) \right]^{1/2}, \quad (2.26)$$

onde S_L , S_C e S_H correspondem aos fatores de ponderação das diferenças de luminosidade ($\Delta L'$), cromaticidade ($\Delta C'$) e tonalidade ($\Delta H'$). k_L , k_C e k_H representam os fatores paramétricos (idênticos aos descritos para o modelo de diferença de cor CIE94) e R_T o parâmetro que permite melhorar as diferenças de cor na região do azul no espectro EM (Ferreira, 2010, p. 42; Westland & Ripamonti, 2004, p. 57). Na equação 2.26, os fatores de ponderação são calculados por (Westland & Ripamonti, 2004, p. 57):

$$\begin{aligned} S_L &= 1 + [0.015(L' - 50)^2]/[20 + (L' - 50)^2]^{1/2}, \\ S_C &= 1 + 0.045C', \\ S_H &= 1 + 0.015C'T. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Os termos da equação $\Delta L'$ (luminosidade), $\Delta C'$ (cromaticidade) e $\Delta H'$ (tonalidade), são dados por:

$$\begin{aligned} \Delta L' &= L'_T - L'_S, \\ \Delta C' &= C'_T - C'_S, \\ \Delta H' &= 2(C'_T C'_S)^{1/2} \sin(\Delta h'/2), \end{aligned} \quad (2.28)$$

onde as letras em índice S e T se referem a *Standard* (padrão) e *Trial* (amostra), respetivamente, e onde:

$$\begin{aligned}
 \Delta h' &= h'_T - h'_S, \\
 L' &= L^*, \\
 a' &= (1 + G)a^*, \\
 b' &= b^*, \\
 C' &= (a'^2 + b'^2)^{1/2}, \\
 h' &= \tan^{-1}(b'/a').
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Os termos G e T são calculados usando as expressões:

$$G = 0.5 - 0.5(C_{ab}^{*7}/(C_{ab}^{*7} + 25^7))^{1/2} \tag{2.30}$$

e

$$T = 1 - 0.17\cos(h' - 30) + 0.24\cos(2h') + 0.32\cos(3h' + 6) - 0.20\cos(4h' - 63) \tag{2.31}$$

Finalmente, R_T é dado por:

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C, \tag{2.32}$$

em que

$$R_C = 2(C'^7/(C'^7 + 25^7))^{1/2}, \tag{2.33}$$

e onde:

$$\Delta\theta = 30 \exp\{-[(h' - 275)/25]^2\}. \tag{2.34}$$

Uma vez que as equações de diferenças de cor consideram a resposta do sistema visual humano em condições controladas de iluminação e observação, podem fornecer boas indicações quanto à qualidade do ajuste espectral. No entanto, não produzem correlações tão boas para pares espectrais, principalmente pares metaméricos, tornando-se necessário recorrer também a outro tipo de métricas (Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, p. 492).

2.3.4.2.- Diferenças entre curvas espectrais.

Outra abordagem, amplamente utilizada, para analisar a qualidade do ajuste espectral consiste no cálculo das diferenças entre as curvas espectrais dos dois estímulos a comparar. As duas métricas desta categoria, usadas no presente estudo, foram o Coeficiente de Ajuste (*GFC* ou *Goodness of Fit Coefficient*) e o Erro Quadrático Médio (*RMSE* ou *Root Mean Square Error*). O coeficiente de ajuste baseia-se na desigualdade de Schwartz e é definido pela seguinte equação (Ferreira, 2010, p. 164; Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, p. 492; Quijano Ruiz, 2010, p. 6):

$$GFC = \frac{|\sum_j r_m(\lambda_j)r_e(\lambda_j)|}{\sqrt{|\sum_j [r_m(\lambda_j)]^2|}\sqrt{|\sum_j [r_e(\lambda_j)]^2|}} , \quad (2.35)$$

onde $r_m(\lambda_j)$ corresponde ao valor de reflectância original, medido no comprimento de onda λ_j , e $r_e(\lambda_j)$ ao valor de reflectância estimado, para o mesmo comprimento de onda.

Uma das métricas mais simples de calcular é a segunda desta classe, o Erro Quadrático Médio, que pode ser descrito pela seguinte igualdade (Quijano Ruiz, 2010, p. 5):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{\lambda} (r_m(\lambda) - r_e(\lambda))^2} , \quad (2.36)$$

em que $r_m(\lambda)$ corresponde ao valor de reflectância medido no comprimento de onda λ , $r_e(\lambda)$ ao valor de reflectância estimado - para o mesmo comprimento de onda - e n corresponde ao número de comprimentos de onda testados.

2.3.4.3.- Índices de metamerismo.

O desempenho de um sistema espectral, em termos de qualidade de ajuste espectral e de precisão colorimétrica, pode ser também analisado através de índices de metamerismo (Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, pp. 492-493), que constituem uma métrica de comparação do registo de dois estímulos. Sendo iguais em determinada condição de observação e de iluminação (condição de referência), deixa de o ser quando muda pelo menos uma dessas variáveis, o observador ou o iluminante (condição de teste).

No presente trabalho foi utilizado um tipo de índice de metamerismo, proposto por Fairman, que usa uma decomposição paramétrica, a que a CIE em 1986 designa como “índice de metamerismo especial” (Ferreira, 2010, p. 163; Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, p. 493; Quijano Ruiz, 2010, p. 7). Este índice baseia-se em diferenças expressas em unidades de equações de diferenças de cor da CIE, neste caso foram usadas ΔE_{ab}^* e ΔE_{00} . As condições de referência são definidas para um iluminante padrão D65, as condições de teste para um iluminante padrão A e iluminante F2, considerando - em todas as condições - um observador padrão da CIE1964²⁴.

A decomposição paramétrica sugerida por Fairman consiste na combinação do estímulo fundamental do espectro de referência com o “preto metamérico” do espectro de teste, após a decomposição dos respetivos espectros nos seus estímulos fundamentais e “pretos metaméricos”, baseado no respetivo iluminante e observador de referência (Ferreira, 2010, pp. 163-164).

A correção do espectro de teste pode ser realizada com as seguintes relações matemáticas (Ferreira, 2010, pp. 163-164):

$$N_{teste,corr} = N_{ref}^* + B_{teste} , \quad (2.37)$$

²⁴ Informação sobre iluminantes e observadores padrão foi já disponibilizada nos subcapítulos 2.2 e 2.3.

$$N_{ref}^* = RN_{ref} ,$$

$$R = A(A^t A)^{-1} A^t ,$$

$$B_{teste} = (I - R)N_{teste} .$$

Aqui A corresponde à matriz de triestímulos para o iluminante e observador de referência, N à matriz de reflectâncias espectrais, N^* à matriz que define o estímulo fundamental, B à matriz do “preto metamérico” e, por fim, I à matriz de identidade.

Outro índice muito usado, que a CIE designa como “*índice de metamerismo geral*”, usa o método sugerido por Viggiano, que compara a proporção de radiância do estímulo pelo método de percepção-referência (Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, p. 493).

2.3.4.4.- Métricas ponderadas sobre o RMSE.

É possível aplicar um fator de ponderação sobre o erro quadrático médio (RMSE) entre as curvas espectrais de referência e de teste, de forma a ter em consideração algumas propriedades do sistema visual humano. Outros métodos de introduzir essa ponderação podem ser a inversão do espectro de referência ou o uso da diagonal da matriz R , método matemático desenvolvido por Cohen (Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, p. 493).

No presente trabalho, não se utiliza nenhuma métrica deste quarto grupo.

As fórmulas de diferenças de cor que foram utilizadas no presente trabalho, assim como a classificação dos resultados por elas obtidos, são explicados no subcapítulo “4.1.1- Métricas de avaliação da qualidade dos resultados”, onde servem de enquadramento à apresentação e discussão de resultados do Capítulo 4. Por esta razão seria redundante apresentar novamente aqui esta matéria,

servindo esta secção apenas como uma introdução teórica de enquadramento às métricas principais usadas em colorimetria diferencial.

2.3.5- Reflectância espectral

Quando os fótons de um raio de luz incidem numa superfície de um objeto, a energia destes pode ser absorvida, transmitida e/ou refletida por essa superfície, com um comprimento de onda dependente das propriedades do material. A razão entre a energia refletida (ou dispersa) pela superfície e a energia incidente no objeto é denominada de *reflectância* (Shevell, 2003, p. 3). A *reflectância espectral*²⁵ é a reflectância por cada unidade de comprimento de onda e transforma-se numa *curva de distribuição de reflectâncias espectrais*, quando é medida numa banda mais ampla do espectro EM (Fischer & Kakoulli, 2006, p. 3).

A cor de um objeto está então fortemente dependente da sua reflectância espectral. Se a função $S(\lambda)$ representar a radiância espectral de uma fonte de iluminação (iluminante) e se a reflectância espectral num determinado ponto da superfície de um objeto for expressa por $r_e(\lambda)$, então a distribuição da potência de radiação espectral, ou equivalentemente a radiância da luz refletida por esse ponto da superfície representa-se por $R_e(\lambda)$ e pode, pela definição de reflectância, ser expressa pela equação 2.38 (Fiadeiro, 2005, p. 1):

$$R_e(\lambda) = S(\lambda)r_e(\lambda) . \quad (2.38)$$

A representação matemática deste sinal de cor, e que está expresso pela equação acima, não tem em consideração os efeitos geométricos, por exemplo,

²⁵ O termo mais preciso a usar nesta situação deveria ser *factor de reflectância espectral* (Hunt, 1998, p. 328). Ao longo desta tese não será feita qualquer distinção entre a *reflectância espectral* e o *factor de reflectância espectral*.

que a reflectância espectral da superfície de um objeto pode depender dos ângulos de incidência da luz e de observação. Um exemplo importante deste efeito é a reflexão especular, isto é, para uma dada combinação do ângulo de incidência, orientação da superfície e ângulo de observação, a luz incidente é quase totalmente refletida, enquanto que para outros ângulos tal não se verifica. Para se entrar em consideração com este efeito na equação 2.38, em vez da função reflectância espectral, deveria ser usada uma função bidirecional de reflectância espectral (Wyszecki & Stiles, 2000).

Outras limitações adicionais são a sua impossibilidade de considerar efeitos tais como a fluorescência, a polarização, a profundidade de penetração da luz, etc. No entanto, tendo estas limitações em consideração, esta representação de interação entre a luz e a superfície dos objetos, tal como representado pela equação supracitada, mostra ser de bastante utilidade prática.

Uma vez que o olho humano e todos os dispositivos de deteção de imagem são apenas sensíveis à radiância espectral (sinal de cor), é de extrema importância, para quem trabalha com registo de imagens de cor, o desenvolvimento de técnicas e métodos para medição da reflectância espectral dos objetos, pois é esta que determina a cor dos objetos e é independente do iluminante. Existem vários métodos amplamente estudados, mas em particular o método usado nesta tese tem como base a medição da radiância espectral $R_w(\lambda)$ que um dado iluminante $S(\lambda)$ apresenta sobre um superfície branca de referência, cuja reflectância espectral $r_w(\lambda)$ é conhecida. Se posteriormente for medida a radiância espectral $R_e(\lambda)$ desse mesmo iluminante mas agora sobre uma dada superfície colorida, cuja reflectância espectral $r_e(\lambda)$ é desconhecida e a pretendemos estimar, podemos escrever uma relação matemática que nos fornece uma estimativa adequada dessa mesma reflectância espectral (Fiadeiro, 2005, pp. 3-4). Assim, teremos que:

$$R_w(\lambda) = S(\lambda)r_w(\lambda) \Rightarrow S(\lambda) = R_w(\lambda)/r_w(\lambda) , \quad (2.39)$$

$$R_e(\lambda) = S(\lambda)r_e(\lambda) \Rightarrow S(\lambda) = R_e(\lambda)/r_e(\lambda) . \quad (2.40)$$

Igualando ambas as equações 2.39 e 2.40, obtêm-se:

$$R_e(\lambda)/r_e(\lambda) = R_w(\lambda)/r_w(\lambda) \Rightarrow r_e(\lambda) = r_w(\lambda) \frac{R_e(\lambda)}{R_w(\lambda)} . \quad (2.41)$$

Se a reflectância espectral do branco de referência for $r_w(\lambda) \cong 1$, então a equação 2.41 simplifica-se e a estimativa da reflectância espectral desconhecida é dada pela seguinte expressão:

$$r_e(\lambda) = \frac{R_e(\lambda)}{R_w(\lambda)} , \quad (2.42)$$

onde apenas intervêm as radiâncias espectrais medidas (Fiadeiro, 2005, p. 4).

2.4- Sistemas espectrais

O presente subcapítulo divide-se em duas partes principais: na primeira (subcapítulo 2.4.1), introduz-se o tema e apresentam-se os fundamentos das tecnologias espectrais; na segunda (subcapítulo 2.4.2), definem-se os princípios e instrumentação necessários ao uso destas tecnologias.

2.4.1- Introdução e fundamentos

A tecnologia de imagem espectral foi desenvolvida há cerca de 40 anos e, até ao início da década de 1990, o seu uso restringiu-se principalmente à astrofísica, onde alguns satélites artificiais²⁶ e sondas espaciais usavam este tipo de tecnologia (para recolherem dados espectrais da superfície do planeta Terra ou de outros astros do nosso sistema Solar), mas também ao campo das geociências ou mesmo, no caso da imagiografia espectral remota, em aplicações militares.

Este tipo de tecnologias foram alvo de um rápido desenvolvimento durante as últimas duas décadas, em grande parte impulsionado pela evolução dos semicondutores e, conseqüentemente, dos sensores digitais. A maioria dos esforços de pesquisa e investigação neste tipo de tecnologias ainda estão muito orientados para aplicações de imagiografia remota, mas os avanços tecnológicos recentes levaram à emergência de aplicações em outras áreas, como por exemplo na medicina, na farmacologia, nas ciências do ambiente, na engenharia alimentar, na agricultura, na gestão dos recursos naturais, na arqueologia e no estudo de obras de arte (Fischer & Kakoulli, 2006, p. 3).

Inicialmente descrita como “imagiografia multiespectral”, o contínuo aumento do número de bandas espectrais suscetíveis de ser registadas - graças à contínua

²⁶ O primeiro terá sido o *Landsat I*, lançado em 1972, que levava a bordo um sistema de imagiografia multiespectral constituído por 4 filtros seletores de banda e quatro detetores, adquirindo assim em simultâneo 4 bandas espectrais da superfície da Terra (Pinto, 2010, p. 39).

evolução dos equipamentos associados -, levou ao aparecimento mais recente dos termos “multiespectral” e “hiperespectral”. A distinção entre os termos “multiespectral” e “hiperespectral” não é consensual, pois diferentes autores usam critérios diferentes e, com frequência, “multiespectral” serve para abranger todas as situações. O termo hiperespectral terá surgido para distinguir sistemas espectrais que apresentassem um elevado número de bandas registadas, mas nenhuma instituição de normalização estabeleceu até ao momento um critério que defina qual a fronteira numérica para distinguir as duas designações. Segundo alguns autores, o termo multiespectral corresponde ao resultado da digitalização espectral de imagens em 4 a 20 canais distintos (Ribés Cortés, 2003, p. 12). Em alguns casos, outros autores mantêm este termo com valores que podem ascender aos 30 canais, em função da aplicação e o grau de precisão e exatidão desejado para a recuperação das distribuições de reflectância espectral (Ferreira, 2010, p. 52). Já o termo hiperespectral é normalmente atribuído quando o número de canais registados é elevado, entre os 16 e os 40 (Westland & Ripamonti, 2004, p. 163), mais de 100 canais (Ribés Cortés, 2003, p. 12), ou, segundo classificação do coorientador da presente tese²⁷, com o número de 9 bandas a delimitar a separação entre as duas classificações, critério adotado para classificar o sistema desenvolvido no âmbito do presente trabalho.

Os fundamentos da imagiografia espectral encontram-se, principalmente, na interação da luz com a matéria. Para um objeto ou superfície particular, a distribuição de reflectâncias espectrais apresenta curvas características, induzidas por processos de absorção eletrónica e vibracional dos átomos constituintes dos materiais que compõem essa superfície. Por isso a distribuição de reflectâncias espectrais providencia informação essencial sobre as propriedades dos materiais, como por exemplo a sua cor e composição química (Fischer & Kakoulli, 2006, p. 3). É neste facto que se baseia a espectroscopia de reflectância, especialmente nas bandas do espectro EM de radiação visível (400 a 700 nm),

²⁷ Professor Doutor Paulo Torrão Fiadeiro

infravermelha-próxima (700 a 1000 nm) e infravermelha de onda curta (1000 a 2500 nm). Este tipo de espectroscopia foi inicialmente usado na identificação de minerais, por isso as aplicações à Geologia impulsionaram numa primeira fase a investigação deste tipo de técnicas, quase sempre – como já foi referido anteriormente – aplicadas na deteção remota, em aeronaves, em satélites artificiais ou sondas espaciais. Na última década, este tipo de técnicas passou a estar mais acessível, permitindo o seu uso em trabalhos de campo e em ambiente de laboratório. Mas sejam imagiografia espectral aplicadas em laboratório, no campo, a bordo dum avião, dum satélite ou sonda, o objetivo destas tecnologias é sempre o mesmo: possibilitar a realização de mapas de distribuição dos materiais, identificados através de assinaturas espectrais distintas (Fischer & Kakoulli, 2006, p. 6).

Atualmente, a maior parte da tecnologia utilizada na aquisição de imagens digitais para a caracterização e reprodução cromática baseia-se em sistemas compostos por três canais (tipicamente vermelho, verde e azul ou, pelas iniciais em inglês *R*, *G* e *B*) e que de alguma forma tentam simular o sistema visual humano. É o caso das câmaras fotográficas digitais, de que resultam imagens compostas por três canais, pois registam informação espectral de três bandas largas do espectro EM visível (ver Figura 14, esquema do lado esquerdo). No entanto, a reprodução de um estímulo cromático baseado em imagens compostas por três canais apresentam três grandes limitações (Ferreira, 2010, pp. 49-50):

- a reprodução de cor através de três canais não é exclusiva de um dado estímulo; a diferentes estímulos “físicos” pode corresponder a mesma reprodução de um tripleto colorimétrico, consoante o sistema de três canais em causa; ou seja, sistemas diferentes (ou, por vezes, o mesmo sistema) podem apresentar um mesmo tripleto colorimétrico, perante estímulos espectrais distintos (Fairchild, 2005, p. 77; Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, p. 492);

- as imagens digitais de três canais são metaméricas²⁸ por natureza (Hardeberg, 1999, pp. 14-15), já que este fenómeno (metamerismo) está precisamente associado ao princípio utilizado na construção dos sistemas de aquisição e reprodução de cor; por esta razão, quando reproduzidas em condições distintas das que foram usadas na fase de registo, as imagens tricromáticas podem revelar diferenças significativas quando comparadas com o seu original, o que resulta numa diminuição na qualidade da reprodução cromática (Hardeberg, 1999, pp. 14-16);
- teoricamente, para uma correta reprodução de cor, as sensibilidades espectrais dos sensores deveriam corresponder a uma transformação linear das respostas espectrais dos fotorreceptores do sistema visual humano²⁹ (Berns, 2001); na prática os sensores digitais tricromáticos apresentam sensibilidades espectrais distintas das respostas espectrais dos fotorreceptores, ou seja, não existem, na prática, câmaras fotográficas digitais que apresentem os seus resultados em espaços de cor independentes do dispositivo de aquisição (Hardeberg, 1999, pp. 14-16).

Pelo facto da reprodução de um estímulo cromático depender apenas de três canais, fica necessariamente na dependência das condições de registo e de observação. A única forma de ultrapassar as limitações supracitadas e assegurar uma correspondência de cor para todos os observadores, através de mudanças de iluminação, é conseguir uma correspondência espectral em detrimento de um “ajuste colorimétrico” entre a cor reproduzida e a original (F. H. Imai, Rosen, & Berns, 2000, pp. 280-281).

Explica-se assim o grande interesse pela “imagiografia espectral”³⁰: quantos mais canais apresentar um sistema de aquisição, potencialmente mais se aproximarão

²⁸ Quando se compara uma amostra de cor original com uma que a reproduz, lado a lado, e estas se apresentam iguais sobre um determinado iluminante e conjunto de observadores, se esta igualdade deixa de existir quando perante outro iluminante ou conjunto de observadores, estamos perante um caso de *metamerismo* (McDonald, 1997).

²⁹ Condição de Luther-Ives (Berns, 2001)

³⁰ Termo que utilizaremos para nos referimos, indistintamente, a sistemas multiespectrais ou hiperespectrais.

as funções de distribuição de reflectâncias espectrais, adquiridas com este sistema, das existentes no estímulo original (Burns & Berns, 1996; Francisco H. Imai, Berns, & Tzeng, 2000).

2.4.2- Instrumentação

De seguida descrevem-se os principais componentes utilizados na construção de sistemas multiespectrais ou hiperespectrais, dando especial importância aos mais utilizados em sistemas aplicados ao registo de obras artísticas.

2.4.2.1- Detetores

A maioria dos sistemas espectrais utiliza como detetores sensores de tipo CCD (do inglês, *Charge Coupled Device*) ou CMOS (do inglês, *Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Trata-se de circuitos integrados fabricados em silício, e consistem numa matriz densa de minúsculos fotodíodos, que levam a cabo a tarefa de converter os fótons em cargas elétricas. As cargas elétricas geradas por este processo fotoelétrico são depois transportadas, amplificadas e convertidas em informação digital, num circuito conversor analógico/digital. Mas não se encontra no âmbito deste trabalho aprofundar os detalhes da física eletrónica associada ao funcionamento de um sensor, mas um aspeto importante a ter em conta para projetar um sistema espectral é que os sensores têm uma resposta linear em relação à intensidade da luz e que varia consoante o comprimento de onda (McDonald, 1997; Ribés Cortés, 2003).

Este tipo de sensores, utilizados nas câmaras fotográficas e de uso científico, apresentam o inconveniente de terem menos sensibilidade³¹ em comprimentos de onda curtos, o que implica que as imagens registadas nessas bandas espectrais

³¹ Corretamente, em termos técnicos e científicos diz-se que apresentam menor “eficiência quântica”, ou seja, menor percentagem de fótons convertidos em eletrões.

apresentem quase sempre maiores tempos de exposição ou integração e apresentam como tal maiores níveis de ruído. No caso de se pretender maior sensibilidade espectral nas regiões ultravioleta (UV) e infravermelha (IV) do espectro EM, o silício, que é o principal elemento constituinte deste tipo de sensores, limita essa sensibilidade a aproximadamente 350 nm, na região UV, e 1000 nm, na região IV (Williams & Williams, 2002).

Os melhores sensores deste tipo, para uso científico e laboratorial, serão talvez os desenvolvidos para astronomia, quer pela sua maior eficiência quântica em comprimentos de onda mais curtos, mas também por apresentarem elevada resolução espacial e possuírem sistemas de refrigeração (quase sempre placas de Peltier) que permitem maiores tempos de exposição sem que a tal se associe ruído (Ribés Cortés, 2003, pp. 18-20).

Existem sensores especialmente desenvolvidos para comprimentos de onda do espectro EM na região UV, que apresentam elevada eficiência quântica nessa banda do espectro EM e que são fabricados em nitreto de gálio e alumínio, mas normalmente (por uma questão de custo) são utilizados em sensores matriciais de baixa resolução espacial de 320x256 píxeis (Fischer & Kakoulli, 2006, p. 4).

Para a região IV do espectro EM, como já foi referido anteriormente, alguns investigadores usam os equipamentos tradicionalmente usados em refletografia, as câmaras de Vidicon, cujos sensores são constituídos por óxido de chumbo e sulfureto de chumbo (PbO-PbS), não só devido ao seu baixo custo, mas também pela sua sensibilidade quer na região visível do espectro EM, quer na região IV até aos 2000 nm, isto apesar da sua baixa sensibilidade e resolução em comparação com os mais recentes FPA³² de estado sólido (Fischer & Kakoulli, 2006, p. 4).

Existem sensores do tipo FPAs especializados para a região infravermelha do espectro EM e, consoantes os modelos, são capazes de cobrir diferentes gamas espectrais entre 1 μm e 25 μm de comprimento de onda; são constituídos por

³² FPA: do inglês, *Focal Plane Arrays*, ou seja, sensores matriciais de plano focal.

materiais que possibilitam a sua sensibilidade espectral e propriedades, como por exemplo, o silicieto de platina (PtSi), o antimoneto de índio (InSb), o arsenieto de índio e gálio (InGaAs) e telureto de mercúrio e cádmio (HgCdTe ou MCT). Os detetores PtSi foram amplamente utilizados por apresentarem custos acessíveis e pela sua compatibilidade com a tecnologia de silício dos circuitos integrados. No entanto, a sua eficiência quântica é bastante baixa e tal como nos detetores InSb, sensíveis na gama espectral de 1 a 5 μm , devem ser refrigerados a cerca de 80 °K durante o seu funcionamento (Bertani & Consolandi, 2006; Fischer & Kakoulli, 2006, p. 4).

Os detetores de InGaAs e MCT foram originalmente desenvolvidos como tecnologias de ponta para aplicações militares. Mais tarde a sua classificação de tecnologia de aplicação exclusivamente militar foi alterada e a sua utilização para aplicações comerciais tem crescido de forma constante, apoiada principalmente pelo rápido progresso na optoelectrónica e ciências dos materiais. Os detetores padrão de InGaAs são sensíveis a uma banda espectral entre 0,85 e os 1,7 μm e atualmente encontram-se disponíveis em formatos até 640x512 pixéis (Bertani & Consolandi, 2006).

Os detetores MCT podem cobrir quase toda a região infravermelha (1 a 20 μm) e para aplicações que precisem de sensibilidades espectrais acima dos 3 μm , têm de ser arrefecidos à temperatura do azoto líquido; mas detetores a operar em bandas entre 1 e 2,5 μm podem funcionar a cerca de 200 K, temperatura mais fácil de atingir com recurso a um sistema de arrefecimento de tipo Peltier (Fischer & Kakoulli, 2006, p. 4). Devido aos materiais e tecnologias de fabrico, os detetores MCT são o tipo de sensor mais caro entre os disponíveis comercialmente e apresentam-se apenas em formatos até 320x256 pixéis.

Recentemente novos métodos de produção levaram ao desenvolvimento de detetores padrão de InGaAs e MCT sensíveis na banda de luz visível, permitindo cobrir uma gama espectral entre 0,4 e 1,7/2,5 μm . No entanto, a eficiência

quântica destes detetores na banda de luz visível é muito mais baixa do que a dos CCD (Fischer & Kakoulli, 2006, p. 4). Este tipo de detetores, InGaAs e MCT, são sem sombra de dúvida os mais promissores num futuro próximo, já que a gama de bandas espectrais que permitem cobrir na região IV abre a possibilidade de identificar pigmentos e outros constituintes das camadas pictóricas, que não são possíveis distinguir e identificar quando se usam detetores que apenas se limitem às regiões do visível e IV próximo do espectro EM, como acontece no caso dos sensores CCD e CMOS.

2.4.2.2- Fontes de luz

Se o sistema de digitalização espectral se destinar a operar apenas na região visível do espectro EM, normalmente não é desejável que a fonte de luz emita grandes quantidades de radiação na zona UV (Ribés Cortés, 2003, pp. 14-15), para evitar efeitos colaterais indesejáveis (como por exemplo, o aparecimento de alguns materiais a emitir luz de fluorescência, estimulada por radiação UV).

Existe uma grande variedade de fontes de luz, obtidas por fenómenos naturais ou por meios artificiais, com adequações variáveis à imagiografia espectral. Segundo Wyszeccki & Stiles (2000, pp. 1-27) as fontes de luz podem classificar-se em:

- Luz de dia
- Radiadores térmicos
- Lâmpadas de descarga elétrica
- Fontes eletroluminescentes
- Díodos Emissores de Luz (LED)
- Lasers

As imagens multiespectrais são normalmente registadas em ambiente laboratorial ou em lugares em que a luz é controlada e estável, podendo ser assim facilmente medida. São raras as aplicações que apresentem imagens espectrais em ambiente

externo, devido à falta da estabilidade da fonte de luz e de controlo sobre as suas características. Por isso a luz do dia (luz solar) não é muito usada como fonte de luz neste tipo de aplicações. As fontes eletroluminescentes e os LEDs também não são as mais adequadas, uma vez que apresentam picos muito acentuados na sua curva de distribuição espectral e, em alguns casos, apresentam também baixa energia radiante. A luz Laser, pela sua natureza monocromática, não é adequada a sistemas que recorram a filtros de seleção de banda (Ribés Cortés, 2003, pp. 14-15).

Finalmente, os dois tipos de fonte de luz que - pelo menos atualmente - se têm apresentado como sendo os mais adequados ao uso em imagiografia multi e hiperespectral são os radiadores térmicos e as lâmpadas de descarga elétrica, por apresentarem uma distribuição espectral ampla e uma boa intensidade de energia radiante, em bandas do espectro EM que podem ir do UV ao IV, passando pela zona visível. Como exemplos de radiadores térmicos, temos as lâmpadas incandescentes de Tungsténio e de Tungsténio-Halogénio. Exemplos de lâmpadas de descarga elétrica, temos as de vapor de Mercúrio, lâmpadas de Xénon, lâmpadas fluorescentes e os tubos de luz de relâmpago (ou *Flash*).

Um dos problemas associado à grande parte dos tipos de lâmpadas de descarga elétrica é que as suas funções de distribuição espectral não se apresentam contínuas ou regulares (ver exemplo da Figura 12, sobre iluminantes fluorescentes). Pela sua curva de emissão espectral mais contínua e regular (ver exemplo de iluminante A, na Figura 10), as lâmpadas de Tungsténio e de Tungsténio-Halogéneo são as mais utilizadas nos sistemas de digitalização espectral (Ribés Cortés, 2003, pp. 14-15).

2.4.2.3- Sistemas de seleção de bandas espectrais

Presentemente a seleção de bandas espectrais efetua-se através da aplicação de filtros óticos ou de sistemas de dispersão da luz (prismas ou grelhas de dispersão) que, consoante o caso, poderão ser colocados em frente da fonte de luz ou no percurso ótico da objetiva acoplada ao detetor.

Os filtros óticos podem, basicamente, ser de três tipos (Fischer & Kakoulli, 2006, pp. 4-5; Ribés Cortés, 2003, pp. 16-17; Williams & Williams, 2002):

- i. filtros de absorção, em que a seleção das bandas que estes permitem transmitir se faz pela absorção de determinados comprimentos de onda da luz, através de compostos que entram na sua composição (basicamente corantes, suspensos ou dissolvidos na sua composição);
- ii. filtros de interferência, constituídos por um conjunto sofisticado de camadas dielétricas, projetadas de modo a provocar desfasamento entre as ondas de luz de que resulta interferência destrutiva dos comprimentos de onda que se pretende anular;
- iii. filtros sintonizáveis eletronicamente ou ETFs (do inglês *Electronically Tuneable Filter*), constituídos por um sistema sintonizável eletronicamente, seja de cristais líquidos - com um funcionamento similar aos dos atuais monitores de computador do tipo TFT -, ou por um sistema ótico-acústico (AOTF, do inglês *Acousto-Optic Tunable Filter*³³), ou ainda interferómetros de transformada de Fourier (FTI, do inglês *Fourier transformed interferometers*) e que permitem uma seleção rápida e precisa das bandas pretendidas através do controlo por computador, sem a deslocação de elementos mecânicos; são neste momento a tecnologia mais cara, mas, sem sombra de dúvida, a mais promissora.

³³ Filtro passa banda sintonizável que tira partido a interação ótico-acustica dentro de meios anisotrópicos; normalmente fabricados em Dióxido de Telúrio, operam nas bandas visível e Infravermelha do espectro.

Os sistemas de seleção de banda por dispersão da luz podem ser do tipo PGP (do inglês *Prism-Grating-Prism*), ou redes de transmissão holográfica com difração de elevada eficiência, permitindo por vezes separar várias centenas de bandas espectrais, oferecendo assim capacidades hiperespectrais. No entanto, o principal inconveniente prático deste tipo de equipamento é que separa a luz apenas numa dimensão espacial, ou seja, em vez de cobrir uma área cobre praticamente apenas uma linha, o que trás a necessidade de incluir nestes sistemas algum tipo de dispositivo de varrimento para que possa ser usado em imagiografia espectral (Fischer & Kakoulli, 2006, pp. 4-5).

2.4.2.4- Sistemas de imagiografia espectral

Os sistemas multiespectrais ou hiperespectrais são constituídos pela combinação dos componentes referidos nos subcapítulos anteriores, colocados numa geometria adequada que, normalmente, é a geometria de iluminação da CIE 45°/0°, por ser um tipo de geometria que reduz na maior parte das situações os reflexos especulares na superfície da obra. Para evitar a contaminação de outras fontes de luz, o espaço onde se encontra a obra a digitalizar deverá encontrar-se em obscuridade.

O sistema de seleção de bandas espectrais pode ser colocado em frente da fonte de luz, apresentando neste caso a vantagem de não sujeitar a obra artística à iluminação com comprimentos de onda que não estão a ser necessários ao registo e, ao não ser necessária a presença de filtros óticos em frente da objetiva fotográfica, a qualidade das imagens registadas poderá ser melhor, em termos de definição. Por uma questão de custo, normalmente esta geometria utiliza apenas uma fonte de luz, de que resulta que a superfície a digitalizar poderá não apresentar uma iluminação homogénea, ao contrário do que acontece com sistemas com duas ou mais fontes de luz.

Se o sistema de seleção de bandas for colocado em frente da objetiva fotográfica, poderão ser usadas várias fontes de luz em simultâneo - desde que estas apresentem as mesmas propriedades - possibilitando uma distribuição mais homogênea da luz na superfície a digitalizar. Se os filtros óticos forem dos dois primeiros tipos descritos acima (subcapítulo 2.4.2.3, nas alíneas i ou ii) será necessário algum tipo de mecanismo para proceder à troca de filtros, o que envolve o risco de introduzir vibrações ou deslocações indesejadas no sistema, impeditivas de que mais tarde se possa conseguir a correta sobreposição das imagens captadas nas diferentes bandas espectrais. Neste caso, apresentam grande vantagem os filtros sintonizáveis eletronicamente, pois não introduzem qualquer tipo de vibração no sistema.

Um outro aspeto relevante num sistema espectral – e ainda não referido – é o processamento da informação registada, quer na recolha e transformação da informação digitalizada, quer no seu processamento posterior através de programas específicos que permitirão analisar e interpretar os dados. A descrição dos métodos analíticos e algoritmos possíveis, a implementar normalmente pelo uso de *software* apropriado e de acordo com os objetivos pretendidos para cada caso, não se encontra no âmbito desta tese.

2.5- Uso de imagens Multiespetrais e Hiperespetrais em Obras de Arte

O presente subcapítulo divide-se em três partes principais. Após uma breve introdução (subcapítulo 2.5.1), no subcapítulo 2.5.2 expõe-se em detalhe o grande interesse para o estudo de obras de arte pictóricas da tecnologia de imagens espectrais, fazendo-se uma descrição das principais aplicações; na terceira parte (2.5.3) serão descritos, por ordem cronológica e em função dos grupos de investigação, alguns sistemas de imagens espectrais projetados especificamente para aquisição e registo de imagens de pinturas artísticas - devido à elevada diversidade de sistemas espectrais descritos na literatura, apenas serão aqui considerados os mais relevantes para a área de estudo em que se enquadra o âmbito desta tese.

2.5.1- Introdução

O uso de imagens espectrais aplicadas ao registo de pinturas artísticas tem suscitado grande interesse entre a comunidade científica desde a década 1980. A imagiografia espectral (multiespectral ou hiperespectral) apresenta-se como uma tecnologia atrativa essencialmente por duas razões (Saunders, et al., 2006, p. 535): a primeira, porque permite um registo cromático de muito maior precisão que os sistemas tricromáticos (sistemas em que se baseia a fotografia convencional a cores, seja analógica ou digital); a segunda, porque torna possível o registo das reflectâncias da superfície da obra em estudo, ou seja, registar informação sobre a cor do objeto de forma independente das condições de iluminação e de observação.

Numa fase inicial estes sistemas baseavam-se essencialmente na ampliação das capacidades da reflectografia infravermelha (Casini, et al., 1999) - técnica mais antiga, já bem estabelecida desde a década de 1970 e aplicada principalmente ao estudo do desenho subjacente de pinturas artísticas. A imagiografia espectral

amplia as possibilidades da fotografia e da refletografia infravermelha, num primeiro momento com a utilização de filtros seletores de bandas largas do espectro e, posteriormente, com a introdução de filtros de banda estreita. Este método não invasivo de investigação, que permite a recolha simultânea de informação espectral e espacial, alarga assim as capacidades de imagiografia de diagnóstico.

No entanto, foi principalmente durante as duas últimas décadas que a tecnologia de imagiografia espectral adquiriu maior importância, associado à evolução e difusão crescente da fotografia digital e ao aumento da capacidade de processamento dos computadores - necessários ao manuseamento e processamento dos enormes ficheiros de informação, que estão normalmente associados a este tipo de tecnologia. Cria-se assim um ficheiro de informação do tipo “cubo espectral”, designação que é frequentemente usada para referir o conjunto de imagens registadas em canais espectrais diferentes, resultantes de uma digitalização multiespectral ou hiperespectral (Figura 14, esquema do lado direito). Podemos falar assim de um terceiro nível ou dimensão de informação registada, pois além da informação bidimensional da resolução espacial (Altura X Largura), acrescentamos a dimensão da distribuição espectral por “n” canais - cada canal correspondendo a uma banda espectral distinta, em número igual ou superior a quatro -, representando, a informação espacial e espectral, Altura (pixéis) X Largura (pixéis) X Comprimento de onda (nm).

Na imagem seguinte ilustra-se a diferença entre uma fotografia digital convencional, tricromática, e uma imagem hiperespectral: do lado esquerdo representa-se a imagem fotográfica digital (captada com uma câmara Nikon D300), com os usuais três canais de banda larga R, G e B que cobrem o espectro visível. Do lado direito, representação de 9 imagens resultantes de um hipotético sistema hiperespectral, com 1 imagem na região do ultravioleta (UV), 7 imagens em bandas estreitas na região visível do espectro e 1 imagem na região do infravermelho (IV).

2.- Enquadramento Teórico

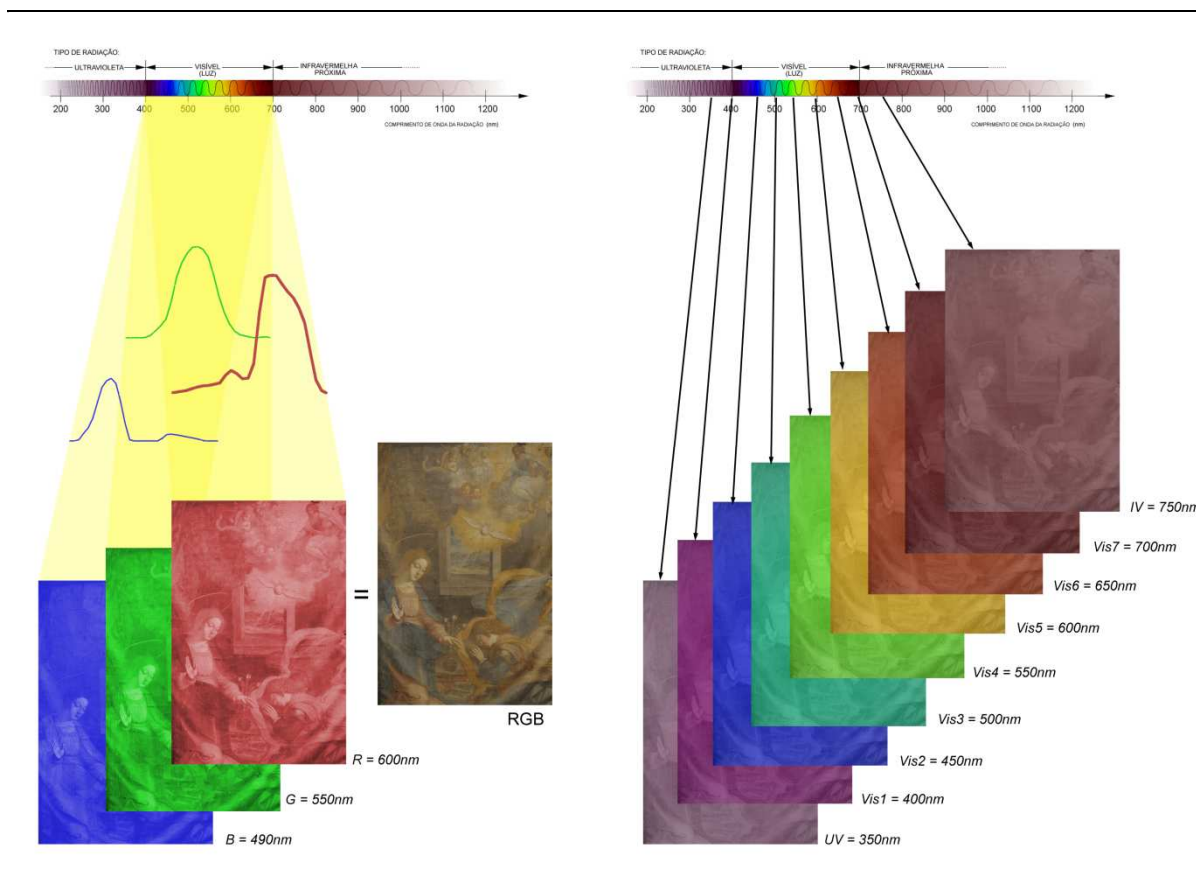


Figura 14: Representação esquemática de uma “imagem RGB” versus “cubo de imagens Multiespectral”.

Imagens simuladas meramente ilustrativas. Para mais informação ler o texto. Ilustração por LBP.

No campo da Arte, a imagiografia espectral apesar de ser principalmente usada na investigação científica de pinturas, também tem sido aplicada com sucesso no estudo de documentos, na avaliação dos tratamentos de conservação e na produção de imagem digital de elevada resolução espacial e espectral, ideais para o registo preciso e documentação de acervos históricos e artísticos.

2.5.2- Aplicações práticas em pintura artística

As principais aplicações práticas ao estudo e documentação de pinturas artísticas das novas tecnologias de imagem espectral - aplicações que se têm observado nas últimas décadas -, descrevem-se nas subsecções seguintes.

2.5.2.1- Monitorização do estado de conservação das obras

No final da década de 1970 e início da década de 1980, quando a tecnologia de imagem digital começou a ser usada em museus e galerias de arte, a sua aplicação tinha em particular o intuito de tirar partido de duas características permitidas pelas imagens digitais, quando comparadas com as que são obtidas por métodos fotográficos convencionais (ou “fotografia analógica”).

A primeira característica é a de que as imagens que eram produzidas pela conversão em informação digital de sinais obtidos com câmaras de televisão - nesta fase primordial ainda não existiam disponíveis câmaras digitais de sensores de estado sólido (Hunt, 2004, pp. 360-375) - ofereciam uma *precisão na informação registada e reprodutibilidade* sem perda de qualidade, muito superiores às da fotografia analógica (isto é, captada em película com emulsão fotográfica a cores) de então. Usavam-se neste período histórico câmaras monocromáticas de televisão a preto e branco com uma resposta espectral conhecida, a que se associavam conjuntos de filtros de separação de cores e um sistema de iluminação controlado, o que permitia produzir imagens a cores calibradas e que já possibilitavam acompanhar alterações das pinturas ao longo do tempo (Saunders, et al., 2006, p. 522). Esta técnica revelava-se mais eficaz do que o método fotográfico a cores convencional de então ou mesmo de uma técnica análoga baseada em imagens monocromáticas (fotografia a preto e branco) registadas através de filtros de separação de cores, mas que sofriam (tal como todos os processos fotográficos analógicos, baseados em emulsão

fotossensível de sais de prata) variações resultantes do lote de fabrico das películas e das químicas de revelação.

A segunda característica é a *disponibilidade imediata da informação registada*, ou seja, não só se torna possível visualizar de imediato a informação como, estando esta no formato digital, pode ser logo processada (ou manipulada), o que constitui uma grande vantagem face à fotografia convencional; apesar da fotografia analógica convencional também poder ser manipulada no laboratório (câmara escura), nunca o poderia ser de imediato e a repetibilidade de processos não é tão fácil ou rigorosa, ao contrário dos métodos digitais que oferecem desde os seus primórdios a possibilidade de aplicar alterações logo a seguir ao seu registo, de forma reproduzível e rápida (Saunders, et al., 2006, p. 522).

Para a implementação prática da possibilidade da monitorização do estado de conservação de obras ao longo do tempo, tornava-se assim necessário a criação de um sistema de digitalização espectral que apresentasse precisão e fidelidade cromática adequadas e que, ao mesmo tempo, permitisse a recolha dessa informação com resolução espacial suficiente para que permita também detetar alterações morfológicas. Foi neste âmbito que surgiu o projeto VASARI na década de 1980 (descrito pormenorizadamente no subcapítulo “2.5.3.1- Projetos VASARI e MARC”).

Com o sistema VASARI tornou-se possível assim produzir imagens com precisão colorimétrica e com resolução espacial elevada, o que permitiu já a produção de registos comparáveis ao longo do tempo. Na figura seguinte, mostra-se um exemplo que ilustra bem esta possibilidade, de um estudo de alterações, ao longo de um período de tempo extenso. Trata-se de duas digitalizações que se realizaram com o sistema VASARI, espaçadas entre si pelo período de 6 anos; a obra é uma pintura flamenga atribuída à oficina de Rogier van der Weyden e presente na National Gallery, em Londres³⁴. Com o tratamento digital posterior,

³⁴ Obra com referência de catalogação N.º 6265.

2.- Enquadramento Teórico

foi possível fazer um mapa monocromático que assinala as diferenças de tonalidade entre as duas imagens, observável ao centro da figura. Apesar de se ter efetuado a digitalização dentro da mesma instituição e com o mesmo equipamento, a perfeita sobreposição das duas imagens é difícil, mesmo após redimensionamento de um das imagens, pelo que se observa também um artefacto de imagem: o rebordo nas zonas de transição entre regiões claras e escuras da imagem não é real, mas sim resultante da impossibilidade da sobreposição ser perfeita. No mapa de diferença de cor, os valores entre as diferenças foram artificialmente exagerados, para que estas diferenças se tornassem mais notórias.

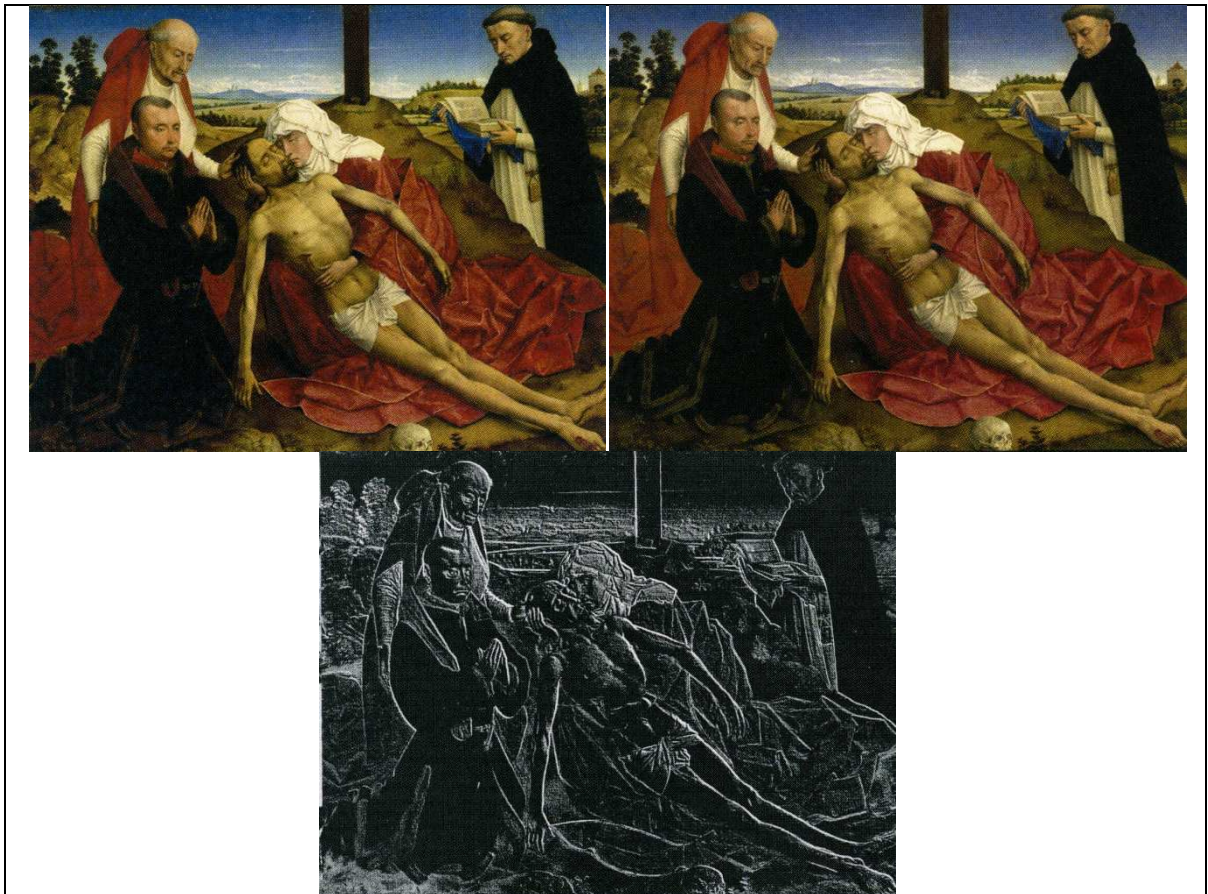


Figura 15: Monitorização do estado de conservação com o sistema VASARI, na National Gallery, Londres.

As duas imagens de cima foram digitalizadas com o sistema VASARI, com uma diferença de 6 anos entre as duas digitalizações; a imagem monocromática - ao centro e abaixo - é um mapa de diferenças de cor entre as duas imagens de cima. Fonte: Saunders, et al. (2006, p. 544).

Só com imagens digitais de elevada qualidade e rigor cromático e com procedimentos de calibração adequados e normalizados se torna possível fazer comparações deste tipo, que sejam realmente significativas. Como já foi referido acima, é muito difícil fazer a gestão de cor na fotografia analógica tradicional e, se as fotografias fossem registadas em locais diferentes, com anos de intervalo entre elas, com tipos de película fotográfica de lotes distintos, revelados em laboratórios diferentes, qualquer comparação que se tentasse efetuar entre essas duas imagens - com o sentido de avaliar alterações cromáticas da obra -, seria completamente irrelevante, já que qualquer um dos outros fatores mencionados afetariam muito mais as diferenças de cor na comparação entre imagens, do que propriamente as alterações que houvessem na obra original.

Com câmaras digitais de elevada qualidade e com todos os sistemas multiespetrais ou hiperespetrais, torna-se possível assim a documentação e monitorização de alterações das cores ao longo do tempo. Alguns desses sistemas têm sido mencionados com esta potencialidade especificamente (Berns, 2005b; Berns, Taplin, Nezamabadi, Mohammadi, et al., 2005; Berns, Taplin, Nezamabadi, Zhao, et al., 2005; Liang, et al., 2010; Lumiere Technology; Saunders, et al., 2006) embora, dado o facto de serem tecnologias ainda muito recentes, não se terem publicado ainda muitos casos práticos em que se tivesse feito esta monitorização, de um modo sistemático e ao longo de um período de tempo significativamente extenso.

2.5.2.2- Imagens para documentação, conservação e publicação

Como já foi referido anteriormente (subcapítulo “2.2.2- Sistema Visual Humano”), a fotografia digital convencional baseia-se no princípio da tricromia, baseado no sistema visual humano. Para uma determinada condição de iluminação e de visualização, o estímulo tricromático define a cor do objeto. Espaços de cor como o CIEXYZ e CIELAB, já aqui referidos (subcapítulos 2.3.1 e 2.3.3) são dois

sistemas tricromáticos padrão, usados frequentemente em imagiografia espectral e colorimetria. Através da gestão de cor, a informação RGB pode ser transformada, por aproximação, aos espaços CIE XYZ, CIELAB ou a outro sistema padrão. No entanto, todos os sistemas tricromáticos são limitados às condições de iluminação e visualização.

Ter dados espectrais, pelo contrário, permite a codificação de cores com precisão e independentemente de qualquer condição de iluminação ou visualização. O espaço de cor possível de representar com este tipo de sistema também é, potencialmente, bastante mais amplo. Um bom exemplo é comparar na prática a percentagem de cobertura que se poderia conseguir com uma câmara digital sobre um espaço de cor amplo - como o CIE XYZ ou CIELAB - e o que se consegue com um sistema hiperespectral: segundo o que anuncia a Lumiere Technology (2004), o *scanner JumboScan* (desenvolvido por esta empresa no âmbito do projeto CRISATEL, descrito no subcapítulo “2.5.3.8- Projeto CRISATEL”), cobre cerca de 95% do espaço CIELAB, enquanto que um *scanner* tricromático RGB, de uso comum, cobrirá apenas 55% desse mesmo espaço.

Efetuada uma comparação semelhante com fotografia digital (Pascale, 2006, p. 9), na figura seguinte temos uma representação da projeção do espaço de cor CIE XYZ no diagrama de cromaticidade CIE 1931 (x,y) e, sobre este, os três espaços de cor RGB mais usados para ficheiros de imagens em fotografia digital (representados como triângulos, cujos vértices representam as três cores primárias). Neste diagrama, a maioria das câmaras digitais do tipo D-SLR cobrem um espaço de cor que, consoante os equipamentos e sua qualidade, poderão variar entre aproximadamente o triângulo do espaço sRGB (<50% do CIELAB) e o do Adobe RGB (\approx 50% do CIELAB). Algumas câmaras digitais de melhor qualidade apresentarão espaços maiores que o Adobe RGB, mas sempre bastante inferiores ao do ProPhoto RGB. Um sistema de imagiografia espectral tenderá a apresentar uma cobertura mais próxima da totalidade (ou seja, valores próximos de 100%) do espaço de referência CIELAB e cobriria também uma área

2.- Enquadramento Teórico

bastante maior do diagrama de cromaticidade da figura abaixo - com um polígono, em vez de um triângulo, que apresentaria tantos vértices quanto o número de bandas espectrais na região visível permitidas pelo sistema.

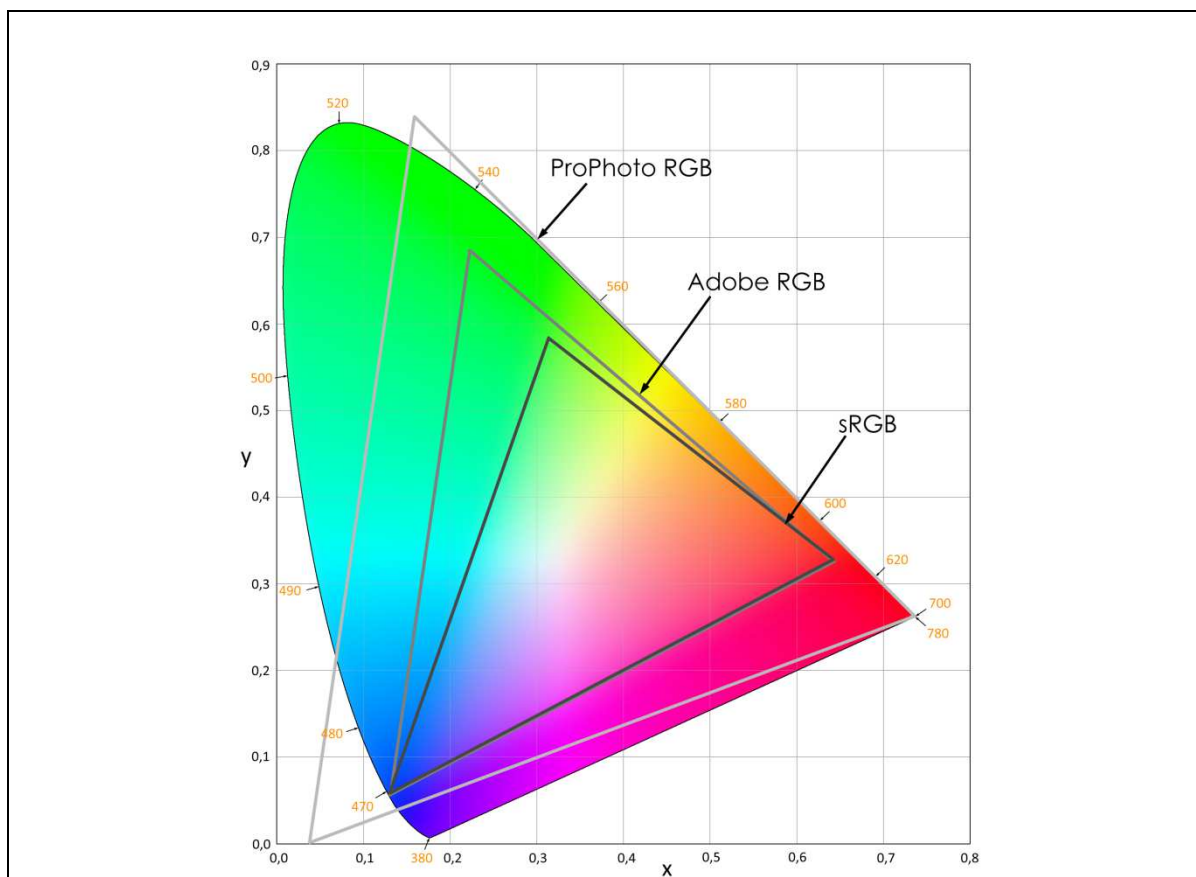


Figura 16: Espaços de cor mais usados em fotografia digital, projetados no diagrama de cromaticidade CIE 1931 (x,y).

A linha curva que delimita o diagrama apresenta as cores espectrais puras e os números a cor laranja representam a escala de comprimentos de onda (em nm) que lhes correspondem. Os triângulos representam os limites de cada um dos espaços. A gama de cores representada é meramente indicativa. Ilustração por LBP, a partir de dados consultados em Hunt (1998, 2004) e Pascale (2006, p. 9).

Sobre estes três espaços de cor, vale a pena referir, de forma resumida, algumas características principais, já que são os mais usuais em fotografia digital (Pascale, 2006).

O “sRGB” é um espaço de cor RGB padrão, criado numa cooperação entre a HP e a Microsoft em 1996. Foi pensado para ser usado em monitores, impressoras e

na Internet. Cobre uma gama de tonalidades muito próxima da permitida pelos monitores CRT, razão porque se tornou muito vulgarizado, mas é um pouco limitado para os padrões atuais e para uso em fotografia documental de qualidade. No entanto, para os utilizadores menos exigentes e que não praticam gestão de cor, é um espaço adequado, já que em qualquer monitor que não se encontre calibrado este espaço - por ser mais próximo do do monitor - mostra as tonalidades com uma aparência mais realista.

O “Adobe RGB” é um espaço de cor RGB desenvolvido pela Adobe Systems em 1998. Projetado para englobar a maioria das cores realizáveis com impressoras CMYK, mas usando cores primárias RGB - para que um dispositivo, como o computador, o possa exibir. Abrange aproximadamente 50% das cores visíveis especificadas pelo espaço CIELAB e melhora a gama do espaço de cor sRGB, principalmente nas tonalidades ciano-verdes.

O espaço de cor “ProPhoto RGB” (também conhecido como ROMM RGB), foi desenvolvido pela Kodak, especialmente pensado para uso em fotografia profissional: permite abranger a gama de tonalidades das mais recentes câmaras cujos sensores trabalham com 14 a 16 bit por canal, em vez de 12 bit, como é mais usual na maioria das câmaras. O ProPhoto RGB dispõe de uma gama de tonalidades grande, pois engloba mais de 90% das cores possíveis no CIELAB e, possivelmente, todas as tonalidades do mundo real. Cerca de 13% das cores representáveis por este espaço são cores teóricas, ou seja, que não existem no mundo real e, como tal, não são cores visíveis - correspondem às zonas do triângulo maior que ficam fora da linha limite do diagrama de cromaticidade, na figura acima.

Para que se consiga uma elevada precisão na reprodução de cor, fazendo uso de câmaras digitais baseadas em sensores tricromáticos RGB, seria necessário que os três filtros separadores de cor do sensor fossem uma recombinação linear das curvas CIEXYZ. Filtros com essa propriedade são muito difíceis de se fabricarem,

por isso uma aproximação mais simples é usar um sistema multiespectral e calcular as curvas CIEXYZ através de transformações matemáticas, em que entram nos cálculos a informação das bandas que faltavam ao sistema tricromático (Saunders, et al., 2006, p. 535).

Neste âmbito, quase todos os sistemas espectrais apresentam como uma das suas vantagens a possibilidade de reprodução de cor com elevada precisão. Um dos primeiros projetos de desenvolvimento de um sistema espectral aplicado a arte foi o projeto europeu VASARI (já referido acima e explicado detalhadamente no subcapítulo 2.5.3.1), mas, dada a dimensão do equipamento e morosidade na sua operação, tornava-se impraticável com este tipo de equipamento fazer o registo de grandes coleções. Nesse sentido, surgiu na década de 1990 o projeto MARC, explicado mais detalhadamente no subcapítulo 2.5.3.1, que se concretizou na produção de câmaras digitais colorimétricas que, mesmo sendo baseadas em sensores tricromáticos, são capazes de produzir imagens de elevada qualidade - superior à das câmaras digitais comerciais da sua geração. Com estas câmaras, instituições como a National Gallery (neste caso, entre 1999 e 2002) conseguiram realizar registos digitais colorimétricos diretos (sem passar por fotografia em película analógica) de elevada qualidade colorimétrica de todo o seu acervo e, como tinha sido contemplado pelo próprio projeto de desenvolvimento do sistema, disponibilizar as imagens através da Internet, uso na impressão de livros e catálogos e mesmo desenvolver um sistema de *printing on demand* disponível na livraria da instituição, para os visitantes que queiram levar cópias, impressas com rigorosa gestão de cor, das obras do museu (Saunders, et al., 2006, p. 540).

Um grupo de investigadores do Rochester Institute of Technology tem pesquisado numa câmara digital de grande formato tricromática *Sinar Back54* modificada (Berns, Taplin, Nezamabadi, & Zhao, 2004; D. C. Day, 2003b; Nezamabadi, 2005; Zhao, Taplin, Nezamabadi, & Berns, 2004), qual o número mínimo de filtros que são necessários para transformá-la num sistema multiespectral que permita a

melhor reprodução cromática; este sistema é também referido no subcapítulo “2.5.3.7- Munsell Color Science Laboratory - Rochester Institute of Technology”.

Duas vantagens operacionais do uso de imagens espectrais (que guardam informação de distribuição de reflectância espectral), comparativamente ao uso de fotografia convencional digital (que registam informação de radiância espectral), é que a imagiografia espectral substitui duas operações que se devem efetuar na câmara fotográfica e que são críticas na boa reprodução de cor: o balanço de brancos e a medição da exposição num alvo de tom médio. Isto acontece porque a informação de reflectância espectral é uma proporção relativa, ou seja e usando uma linguagem para fotógrafos, não contém informação da cor nem da intensidade da fonte de luz (iluminante), mas apenas descreve a capacidade de um objeto refletir as diferentes cores do espectro EM.

Por fim, outra vantagem em se optar pela imagiografia espectral *versus* fotografia digital, é o eliminar a necessidade da edição visual do trabalho em pós-tratamento da imagem no computador - o que introduziria sempre subjetividade na interpretação, pelo operador do sistema - melhorando-se assim consideravelmente a precisão e consistência na reprodução da cor.

2.5.2.3- Identificação e mapeamento de constituintes da camada pictórica

A identificação de pigmentos (Berns & Imai, 2002; Berns, et al., 2002; Delaney, et al., 2005; Liang, 2012; Zhao, 2008; Zhao, Berns, et al., 2005; Zhao, et al., 2008) e o seu mapeamento (Casini, et al., 1999; Hardeberg, 1999; Zhao, 2008; Zhao, Berns, et al., 2005; Zhao, et al., 2008) constituí algumas das primeiras aplicações pensadas para a imagiografia espectral, desde que se iniciaram as experiências com este tipo de tecnologia aplicada à pintura artística. Pretendia-se assim, com este tipo de exame não invasivo das obras de arte, auxiliar ou complementar algumas técnicas de diagnóstico.

2.- Enquadramento Teórico

Inicialmente designada por alguns autores como “imagiografia espectroscópica” (Attas et al., 2003; Casini, et al., 1999; Mansfield et al., 1999) por analogia com a espectroscopia, a diferença para este tipo de análise é que a espectroscopia analisa ponto a ponto, ou seja, áreas muito pequenas do objeto em estudo - recorrendo a equipamentos especializados, como p. ex. os espectrógrafos, espectrómetros, espectrofotómetros, espectralímetros - enquanto que a imagiografia espectral, por se basear em detetores ou sensores de tipo fotográfico, ao digitalizar abrange regiões grandes do objeto em análise, ou mesmo a totalidade da obra, que podem ser analisadas posteriormente, na fase de processamento por computador dos dados registados no cubo espectral, como se ilustra na figura seguinte.

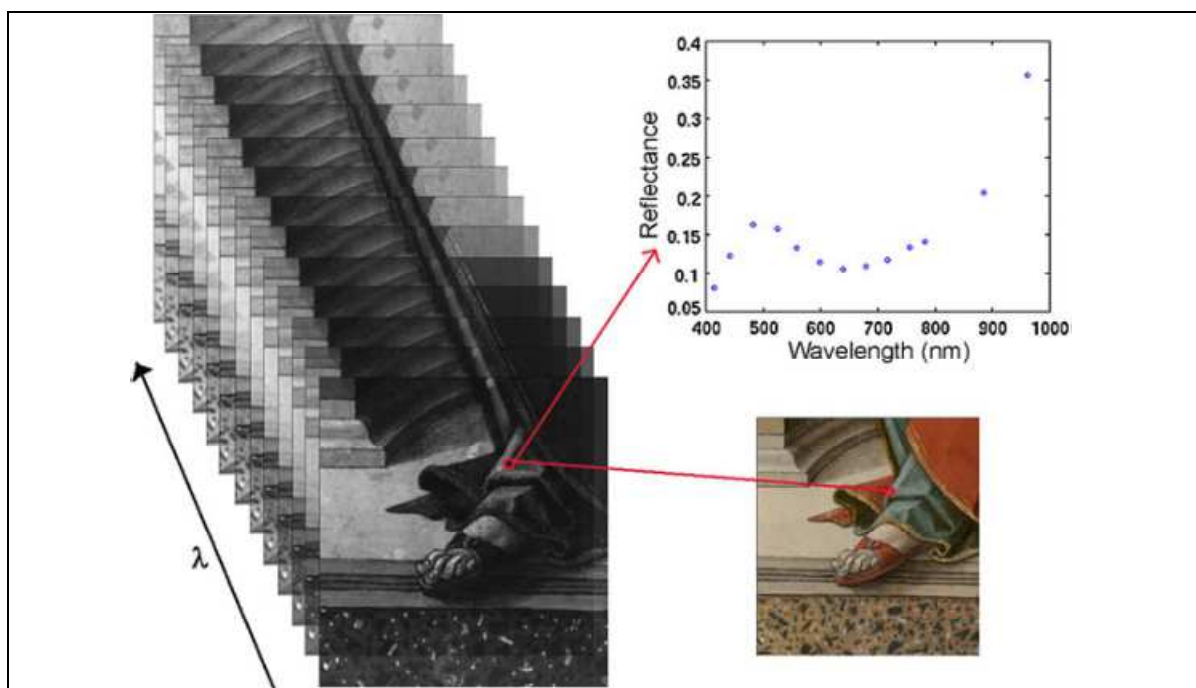


Figura 17: Representação esquemática de um cubo espectral - obtido por imagiografia multiespectral - e possível leitura do espectro num ponto na imagem.

É possível escolher um ponto na imagem e realizar um gráfico do espectro, a partir do cubo, que condiz com um pigmento identificado - neste caso como sendo Azurite. Imagens simuladas meramente ilustrativas. Fonte: Liang, H. (2012, p. 310).

Na próxima figura é apresentado exemplo de um exame multiespectral realizado numa pintura de Pontormo, “*La strage degli undicimila martiri*” (Galeria Palatina, Palácio Pitti, Florença), foi realizado por Andrea Casini, citado por Saunders, et al. (2006, p. 537), em que foi usado um sistema multiespectral com um detetor de PbO-PbS - do tipo câmara de *Vidicon*³⁵ - com um conjunto de 29 filtros seletores de banda estreita, com picos de transmissão entre 400 nm e 1550 nm. A informação multiespectral foi usada para ajudar a identificar e mapear a distribuição de dois pigmentos amarelos usados pelo pintor, o “amarelo ocre” e “amarelo de chumbo e estanho”. O autor desse estudo mediu a distribuição de reflectâncias espectrais dos pigmentos, de forma independente, e usou as diferenças das curvas espectrais nas bandas entre 440-600 nm e os 800-1000 nm para produzir imagens que apresentam a distribuição dos dois pigmentos nas vestimentas de um dos personagens da pintura (Bacci & Casini, 2005; Casini, et al., 1999; Casini, Lotti, & Stefani, 2003). Uma vez que a radiação na região dos 800-1000 nm penetra mais profundamente nas camadas pictóricas, os mapas de distribuição dos pigmentos nos dois comprimentos de onda diferem também. O mapa para os 440-600 nm mostra a distribuição mais superficial na pintura, enquanto que o mapa dos 800-1000 nm revela um uso mais frequente do amarelo de chumbo e estanho nas camadas mais interiores da pintura, um padrão comprovado com cortes de amostras da camada pictórica observados ao microscópio (Casini, et al., 1999; Saunders, et al., 2006, p. 537).

³⁵ Tipo de sensor muito usado em reflectografia Infravermelha, como é explicado no subcapítulo “2.4.2.1-Detetores”.

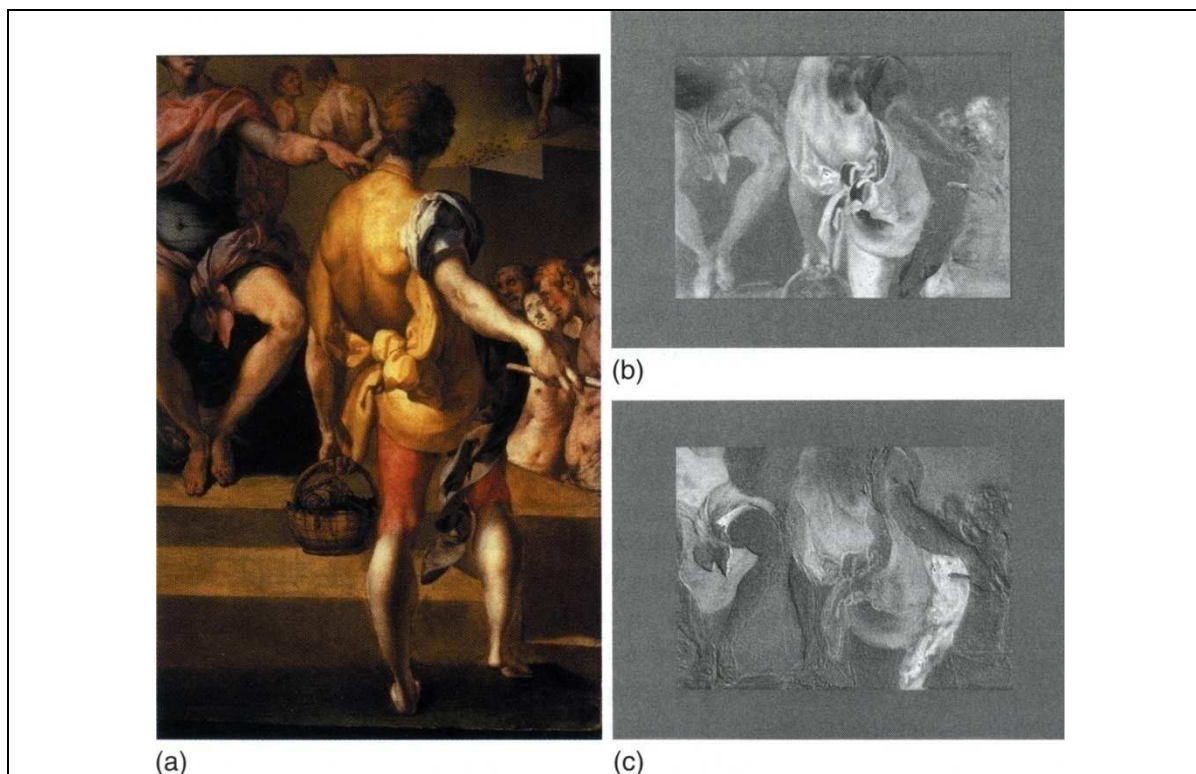


Figura 18: Diferenciação e mapeamento de pigmentos em pintura artística.

Pintura de Pontorno, “La strage degli undicimila martiri” (Galeria Palatina, Palácio Pitti, Florença). (a) imagem visível, onde se observa um pormenor do manto amarelo; (b) imagem da mesma área na região 440-600 nm do espectro EM; (c) imagem da mesma área, mas na região dos 800-1000nm. Imagens por Andrea Casini. Fonte: Saunders, et al. (2006, p. 537).

Num trabalho com algumas parecenças com este, um grupo de investigadores da National Gallery of Art, em Washington (Delaney, et al., 2005), desenvolveram um projeto de um sistema com uma câmara digital de sensor CCD e dois detetores do tipo PtSi, sensíveis à radiação infravermelha entre os 1000 e os 2000 nm, que usaram igualmente para o estudo de mapeamento de alguns pigmentos azuis, em duas pinturas famosas de Vincent van Gogh, “La mousmé” (de 1888) e um “Autorretrato” (de 1889). Tal como no projeto anterior, confirma-se o papel que parece ter a radiação infravermelha em permitir distinguir certos pigmentos, como neste caso os seis pigmentos azuis, que se sabia, por estudos anteriores ou usando exames físico-químicos complementares, existirem nestas pinturas.

Numa primeira fase de calibração, produziram-se curvas de distribuição de reflectância espectral a partir dos pigmentos identificados, num alvo especialmente

preparado como painel de teste, onde os pigmentos foram aplicados; registadas imagens em diferentes comprimentos de onda, que se apresentam no lado esquerdo da figura seguinte, é possível observarem-se as diferentes transparências dos pigmentos, que são crescentes consoante o comprimento de onda da radiação a que se registaram as respetivas imagens. Os gráficos correspondentes às curvas de distribuição das reflectâncias espectrais dos pigmentos em causa observam-se no lado direito da figura.

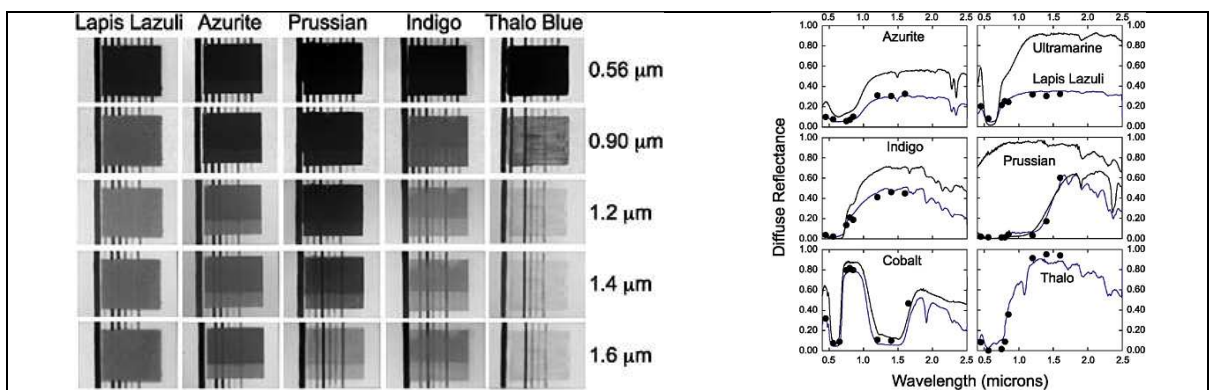


Figura 19: Imagens multiespectrais e gráficos de distribuições de reflectância de seis pigmentos azuis.

Do lado esquerdo, imagens multiespectrais do painel de teste onde foram aplicados seis pigmentos azuis: Lápis Lazúli, Azurite, Azul da Prússia, Índigo e Azul de Ftalocianina; o comprimento de onda (em μm) central dos filtros passa banda, ao centro.

No lado direito, as curvas das distribuições de reflectância espectrais, medidas nos referidos pigmentos em pó compactado (linhas pretas) ou em aglutinante de óleo (linhas azuis); os valores de reflectância medidos com o sistema de imagens multiespectrais (círculos), foram obtidos usando filtros passa banda especiais. Fonte: Delaney, et al. (2005).

Com este sistema, foi possível elaborar, por exemplo, um mapa de distribuição de dois pigmentos azuis, visualmente similares, usados por Vincent van Gogh na sua obra “*La mousmé*”, observável na figura seguinte. Este mapa foi obtido pelas diferenças de reflectância entre as duas imagens - obtidas através das imagens compostas por refletogramas em duas bandas de infravermelhos -, com valores centrais de bandas aos 1,6 μm e 1,2 μm . As regiões mais claras correspondem, neste mapa, a zonas onde as reflectâncias são maiores a 1,6 μm do que a 1,2 μm , indicando assim não só a presença de Azul da Prússia, como também as

2.- Enquadramento Teórico

zonas onde a sua concentração é provavelmente maior na pintura (Delaney, et al., 2005, p. 130).



Na linha de baixo da figura anterior, podemos observar um caso de identificação de dois pigmentos azuis, conseguida pela comparação da forma dos gráficos que representam as funções de distribuição das suas reflectâncias, comparando-se estas funções nos pigmentos padrão do painel de referência (assinalado com “A”) com as dos pontos medidos na obra (assinalado com “B”), onde se pode constatar que nas zonas azuis da roupa do personagem representado na pintura

(pontos 3 e 4) o pintor usou predominantemente o Azul Ultramarino, enquanto que no braço da cadeira, este deu preferência ao Azul da Prússia.

Exames deste tipo, em qualquer dos casos referidos neste subcapítulo, devem ser acompanhados de exames de diagnóstico complementares, através nomeadamente da identificação de pigmentos com métodos físico-químicos convencionais, pois uma vez que as cores artísticas resultam da mistura complexa e empírica de diferentes pigmentos, tornam-se difíceis de identificar por simples exame espectroscópico e a análise por imagiografia espectral pode ser insuficiente, se for usada como método único de identificação. Mas quando acompanhada de outros exames, mostra-se muito conveniente e útil na produção de mapas de distribuição dos pigmentos na obra.

Com um sistema de imagiografia hiperespectral resultante do projeto CRISATEL³⁶, a equipa de cientistas da empresa Lumiere Technology tem realizado estudos em pinturas famosas de Leonardo da Vinci, como a “*Mona Lisa*” (Museu do Louvre) ou “*A dama com um arminho*” (Museu Czartoryski, na Polónia), trabalhos amplamente divulgados na comunicação social e referidos recorrentemente na mesma, pelo interesse mediático existente quer por estas pinturas, quer pelo seu autor. Na figura seguinte, temos um exemplo tirado de uma *press release* sobre o último trabalho referido (Lumiere Technology, 2007) em que se mostra num interface informático a marcação de pontos que se pretendem estudar (imagem à esquerda) de forma não destrutiva ou invasiva da obra e, a partir da informação digitalizada com o sistema hiperespectral, os gráficos produzidos por esse interface, representativos das curvas de distribuição de reflectância espectral dos respetivos pontos (imagem à direita), que auxiliam na tarefa de identificação.

³⁶ Projeto descrito pormenorizadamente no subcapítulo “2.5.3.8- Projeto CRISATEL”.

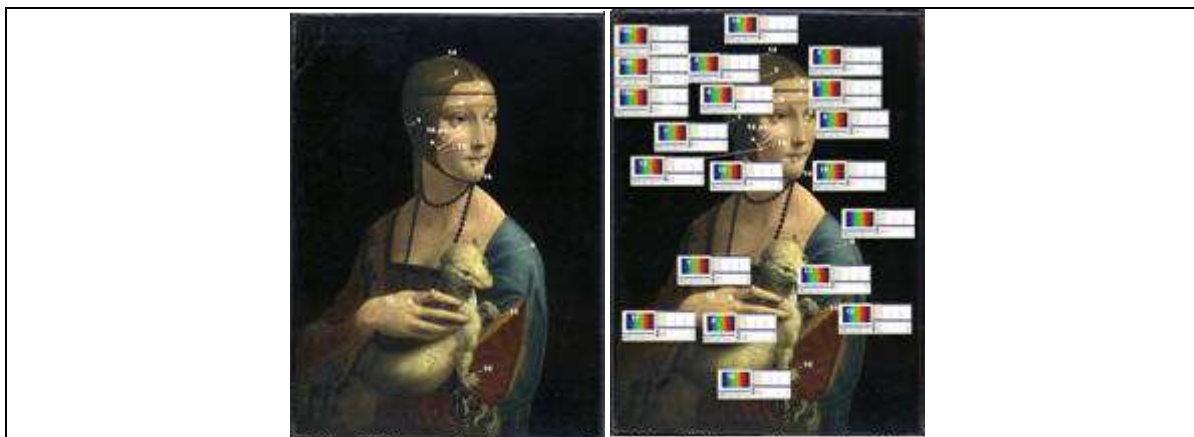


Figura 21: Identificação de pigmentos na pintura “A dama com um arminho” (Museu Czartoryski, em Cracóvia).

Pintura de Leonardo da Vinci. Na imagem à esquerda, mostra imagem visível, onde se assinalam pontos a estudar a composição de pigmentos, através de exame não destrutivo da integridade da obra. Na imagem à direita, gráficos representativos das curvas de distribuição de reflectância espectral dos respetivos pontos. Fonte: Lumiere Technology (2007).

2.5.2.4- Rejuvenescimento e restauro virtual de pinturas

O “rejuvenescimento” virtual de pinturas artísticas (Berns, 2005b; Lumiere Technology, 2007) torna-se possível quando existe informação obtida por digitalização hiperespectral da obra e sabendo calcular as alterações cromáticas sofridas pela obra ao longo do tempo, fruto do seu envelhecimento natural, e revertendo esse processo por tratamentos informáticos. No final, produz-se uma imagem que simula a aparência que a obra teria no tempo em que foi concluída pelo artista.

A empresa Lumiere Technology realizou este tipo de simulação virtual com um grande rigor científico em duas obras de Leonardo da Vinci, já referidas no subcapítulo anterior. Como estes explicam na sua página na Internet (2004), precisaram de saber a composição provável quer dos pigmentos principais usados pelo pintor, do aglutinante utilizado e do verniz usado no final. Fabricando um painel de teste, onde além de vários pigmentos - escolhidos por entre a paleta de tintas que se sabe terem sido usadas pelo artista - se aplicaram dois tipos de verniz, no final. O painel de teste é digitalizado com o sistema hiperespectral e de

seguida submetido a um processo de envelhecimento acelerado - submetendo, durante alguns meses, o mesmo a fontes de luz artificial intensas, que cientificamente se sabe equivalerem, numa pintura bem preservada a um determinado número de anos de exposição à luz ambiente - após o qual se digitaliza novamente. As diferenças ou alterações resultantes deste envelhecimento acelerado pode ser estimado matematicamente pela medição rigorosa das diferenças entre as duas medições e pode-se assim extrapolar esse envelhecimento no período de alguns séculos, que nos separa desde o dia em que a obra foi concluída pelo artista.

Enquanto que o envelhecimento do verniz (frequentemente um “amarelecimento”) pode ser revertido quase sempre aplicando uma operação matemática por igual a todos os pixéis da imagem, já o envelhecimento dos outros constituintes da pintura (como os pigmentos ou o aglutinante) precisam de uma abordagem diferente, que quase sempre passa pelo estudo e identificação dos pigmentos existentes na pintura - recorrendo a outros métodos de exame, complementares da imagiografia espectral, como EDXRF, estratigrafia, etc. -, assim como pelo estudo das suas concentrações relativas ou misturas com que foram usados e definir as regiões em que estes se distribuíam na pintura; aplica-se no final, a esses pixéis, as tonalidades que se pensam que teriam os constituintes originais nos primeiros tempos da obra. Obtém-se com esta metodologia uma imagem “cientificamente credível” de como seria o aspeto da obra, na época em que foi pintada (Lumiere Technology, 2004).

Na figura seguinte, um exemplo de rejuvenescimento virtual aplicado à obra de Leonardo da Vinci, já aqui referida, “*A dama com um arminho*” (Museu Czartoryski, em Cracóvia).

2.- Enquadramento Teórico



Figura 22: Rejuvenescimento virtual da pintura “A dama com um arminho” (Museu Czartoryski, em Cracóvia).

Pintura de Leonardo da Vinci. Na imagem à esquerda, mostra imagem visível do estado atual da obra. Na imagem à direita, simulação do aspeto da obra como no tempo em que foi pintada. Fonte: Lumiere Technology (2007).

Na próxima figura, além do rejuvenescimento virtual, temos o exemplo de um ensaio virtual, pelos mesmos autores, de alguns restauros possíveis (simulando uma técnica dos restauradores conhecida por “janelas de limpeza” do verniz).



Figura 23: Rejuvenescimento virtual da pintura “Mona Lisa” (Museu do Louvre, em Paris).

Pintura de Leonardo da Vinci. Na imagem à esquerda, mostra imagem visível do estado atual da obra. Ao centro, simulação de zonas de restauro. Na imagem à direita, simulação do aspeto da obra rejuvenescida, como no tempo em que foi pintada. Fonte: Lumiere Technology (2007).

Continuando com exemplos de restauro virtual, numa pintura de Pedro Campaña “A conversão de Madalena” (National Gallery, em Londres), obra que apresenta grande alteração cromática em alguns pigmentos de cores vivas, foi possível deduzir as cores originais pela análise de pigmentos aprofundada, já realizados na obra, através de cortes transversais da camada pictórica realizados em pequenas amostras (Saunders, et al., 2006, pp. 528-529). Com esta informação precisa sobre as cores escolhidas pelo artista, foi possível simular a aparência da obra após um restauro virtual da mesma, restituindo-se assim, neste modelo virtual, a aparência das cores perdidas, como se pode observar na figura seguinte.

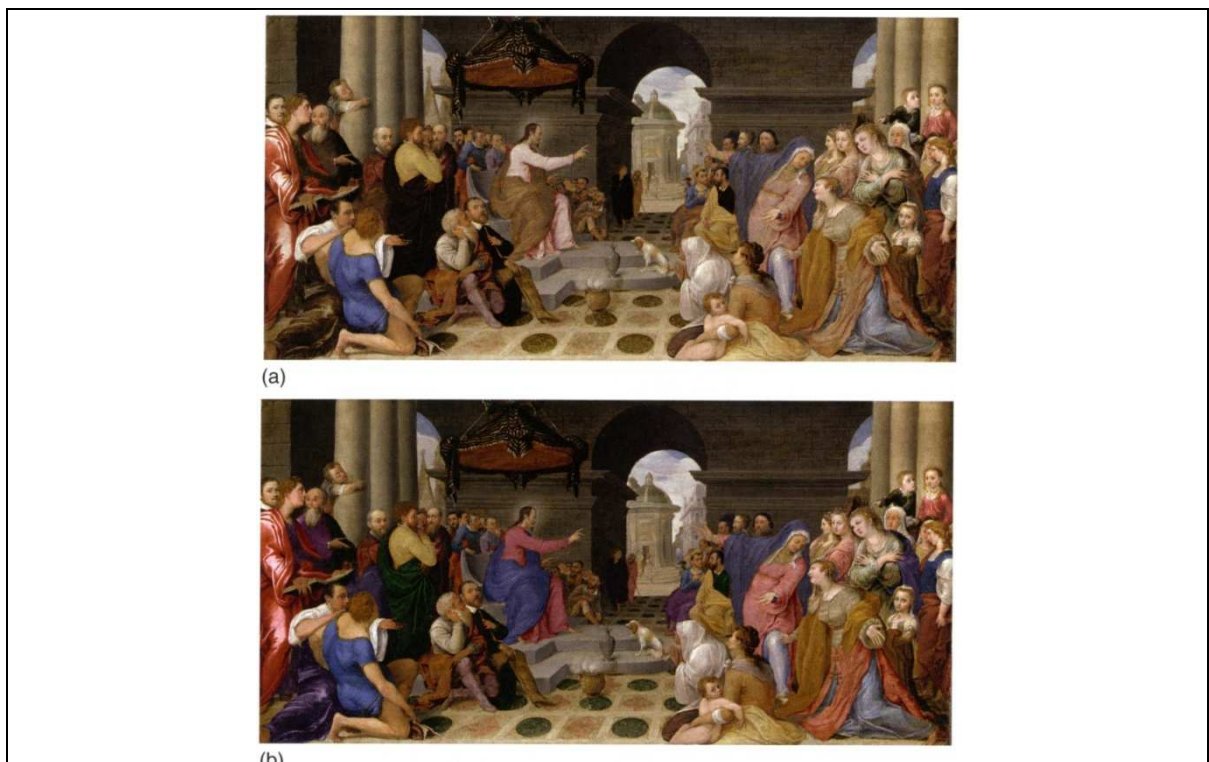


Figura 24: Restauro virtual de pigmentos na pintura “A conversão de Madalena” (National Gallery, Londres).

Pintura de Pedro Campaña, (a) imagem visível, aparência real atual; (b) imagem após restauro virtual das cores originais dos pigmentos. Fonte: Saunders, et al. (2006, p. 529).

Neste ultimo caso, as alterações são dramáticas nas vestes de algumas figuras - por exemplo, nas vestes da figura de Jesus Cristo, onde uma túnica rosa pálido e um manto castanho foram, na realidade uma túnica rosa quase vermelho e o robe

um azul intenso, devido neste caso à alteração do pigmento constituinte (azul cobalto).

A diferença deste restauro para os rejuvenescimentos virtuais anteriores é que neste caso não existem operações matemáticas que permitam reverter a degradação do envelhecimento da obra como um todo, já que as alterações se devem à ação da luz e que foi mais destrutiva em alguns pigmentos do que o foi em alguns outros, pelo que as alterações estão mais presentes apenas em certas regiões da obra. No entanto, a base de partida é sempre uma imagem fotográfica colorimetricamente correta.

Um outro exemplo, similar a este, de uma reconstrução virtual bem-sucedida aplicada numa imagem colorimetricamente correta, foi a realizada na pintura de Hendrick ter Brugghen “*Lucas o Evangelista*”, patente no museu De Waag, em Deventer (Holanda). Um pigmento Azul de Esmalte foi usado profusamente, principalmente no robe do personagem e que, tal como no caso anterior, se deteriorou até apresentar, na atualidade, uma cor acastanhada. Neste caso, não se realizaram exames destrutivos (como foi o caso no exemplo anterior, em que se efetuaram a recolha de amostras da camada pictórica), pois realizou-se uma técnica especial de radiografia ativada por neutrões, o que permitiu mapear a distribuição original do pigmento azul (Saunders, et al., 2006, p. 530). Neste tipo de radiografia, após a pintura ser submetida a uma fonte de neutrões intensa, chapas fotográficas são colocadas em contacto com a superfície da camada pictórica e registam-se assim os raios X emitidos pelos núcleos de diferentes elementos presentes nos pigmentos, que têm taxas de decaimento radioativo diferentes. O Arsénio, presente nas impurezas do esmalte na pintura original, permitiu localizar e mapear as zonas onde o pigmento deteriorado esteve presente, assim como a sua concentração relativa, possibilitando posteriormente a realização do restauro virtual pretendido.

Na figura seguinte, apresenta-se o exemplo citado do restauro virtual da pintura de Hendrick ter Brugghen.



Figura 25: Restauro virtual de pigmentos na pintura “Lucas o Evangelista” (museu De Waag, em Deventer).

Pintura de Hendrick ter Brugghen, com o lado esquerdo do robe do personagem já restaurado. Fonte: Saunders, et al. (2006, p. 530).

2.5.2.5- Visualização de alterações e desenho subjacente

Os sistemas de imagiografia espectral não têm que se restringir à região visível do espectro EM. Algumas das aplicações permitidas pela recolha da informação espectral com radiações não visíveis, como a radiação infravermelha ou ultravioleta, permitem a possibilidade de obter informação de alterações na obra ou de dados ocultos ao observador, como por exemplo, zonas de repinte, reintegrações resultantes de restauros antigos, arrependimentos do artista e desenho subjacente à camada pictórica (Berns, et al., 2002; Berns & Mohammadi, 2007; Saunders, et al., 2006). Temos um exemplo de algumas destas aplicações na figura seguinte, composta por imagens recolhidas nas regiões visível (fotografia a cores digital), infravermelha (onde se apreciam desenhos subjacentes), e de fluorescência UV (onde se encontram alguns repintes), trabalho realizado com uma das poucas câmaras comercialmente disponíveis

para este tipo de registo hiperespectral, a câmara “*The Artist*”³⁷ (Art Innovation, 2007).



Figura 26: Pormenor de uma pintura sobre madeira “A prisão de Cristo” (The Strauss Center for Conservation, em Cambridge).

Pintura de anónimo. À esquerda, imagem a cores de luz visível. Ao centro, imagem de infravermelho. À direita, fluorescência UV. Fonte: Art Innovation (2007).

Uma das vantagens de alguns sistemas hiperespetrais é que, em alguns casos, resultados parecidos com os expostos na ilustração anterior podem ser parcialmente obtidos apenas observando alguns canais da região visível do espetro, não tendo que sujeitar por isso a obra a outros tipos de radiação.

Os criadores da câmara “*The Artist*”, a empresa *Art Innovation* (na Holanda), dão grande destaque ao uso desta câmara no estudo de documentos escritos na sua página na Internet (Art Innovation, 2007), onde apresentam um estudo realizado com este sistema em modo de registo hiperespectral e que permitiu identificar tipos de tinta, separar e contrastar textos manuscritos, entre outros resultados (Scholten, Klein, Steemers, & Bruin, 2004).

Uma técnica interessante e útil é a combinação de imagens captadas em bandas espectrais distintas numa imagem única tricromática, pela atribuição de uma gama de cores específicas para as informações de radiação infravermelha e combinar isso com uma imagem de cor. O resultado é uma imagem de falsa cor - daí o nome da técnica ser “infravermelho de falsa cor”, já que as cores que se observam não se encontram na obra original -, mostrando um contraste cromático

³⁷ Mais informação sobre este modelo de câmara disponível no subcapítulo “2.5.3.5- Art Innovation”.

melhorado e que permite destacar regiões da obra com diferentes tipos de materiais, permitindo que o observador possa detetar rapidamente essas regiões.

Apresentam-se na figura seguinte dois exemplos de imagens de radiação IV de falsa cor, realçando-se com esta técnica restauros antigos e permitindo a discriminação de alguns pigmentos. Na primeira imagem presente na figura, mostra-se um mapa de distribuição de danos e restauros antigos, alterações realçadas através da informação recolhida em imagens de radiação não visível, onde se incluem os outros tipos de imagens apresentadas na ilustração.



Figura 27: Mapas de danos e restauros e de IV de falsa cor; pintura “A dama com um arminho” (Museu Czartoryski, em Cracóvia).
Pintura de Leonardo da Vinci. Na imagem à esquerda, mapa de distribuição de zonas com danos e restauros antigos (zonas a vermelho). Na imagem ao centro, infravermelho de falsa cor aos 900 nm. Na imagem à direita, infravermelho de falsa cor aos 1000 nm. Fonte: Lumiere Technology (2007).

2.5.2.6- Simulação da aparência da obra perante diferentes iluminantes

Todos os sistemas tricromáticos são limitados às condições de iluminação e visualização. Um exemplo de um tipo de problema que pode acontecer em alguns casos, por se fazer variar uma destas condições é quando dois estímulos de cor são percecionados, em sistemas tricromáticos - seja visão humana ou fotografia digital - como sendo a mesma cor perante um determinado iluminante (fonte de luz) e fazendo mudar o iluminante, esses dois estímulos deixam de corresponder

e passam a ser percebidos ou registados como tonalidades diferentes. Este problema pode ser especialmente relevante nas intervenções de conservação e restauro de pinturas artísticas, pois os pigmentos usados na reintegração de lacunas da camada pictórica não devem apresentar variações de tonalidade em relação aos restantes pigmentos originais, devido a problemas de metamerismo³⁸, no caso de se mudar a fonte de luz que ilumina a obra.

Com imagiografia espectral, pelo facto de ser baseada em informação de reflectâncias do objeto registado e não de radiâncias (como seria o caso da fotografia RGB digital), é independente do iluminante, ou seja, a fonte de luz que ilumina o objeto não interfere diretamente com a informação registada - desde que possua certas qualidades necessárias, como por exemplo, ter uma distribuição de energia espectral completa na região do espectro EM que queremos registar. Munidos da informação da função de distribuição de reflectâncias espectrais do objeto, assim como da função de distribuição de energia radiante da fonte de luz (iluminante), torna-se assim possível simular virtualmente a aparência da obra quando sujeita a uma determinada fonte de luz (Lumiere Technology, 2004; Pinto, Linhares, & Nascimento, 2008a). Podemos prever assim a luz mais adequada para iluminar a obra numa galeria ou museu e prevenir situações como as acima descritas, de falta de correspondência entre pares metaméricos; em alguns casos, é possível ajudar mesmo no processo de escolha dos pigmentos mais adequados a serem usados numa reintegração cromática durante um processo de restauro de uma obra.

³⁸ Em colorimetria, metamerismo é a correspondência aparente da cor de objetos com distribuições de radiação espectral diferente. Cores que combinam desta forma são chamados de pares metaméricos.

2.- Enquadramento Teórico

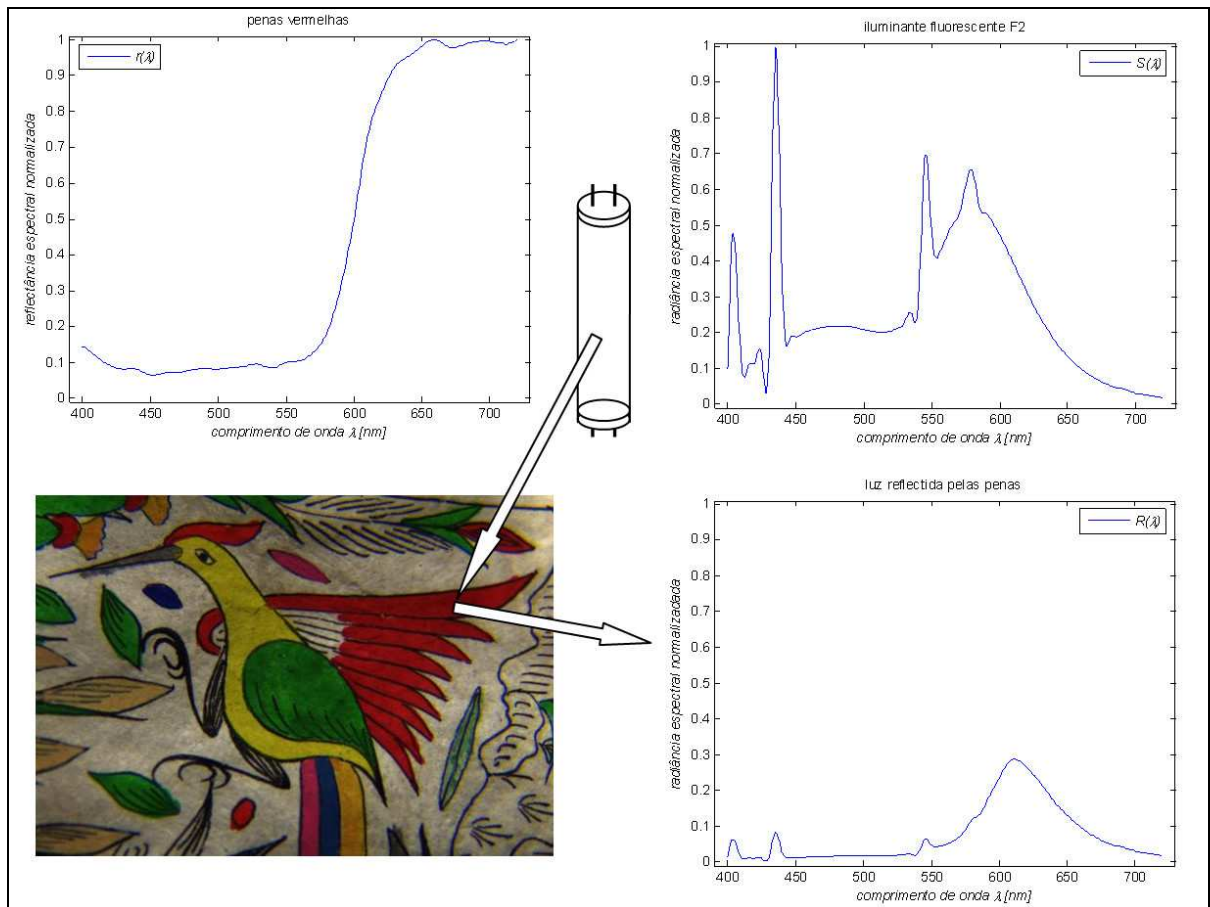


Figura 28: Representação esquemática da interação entre a luz e as superfícies.

A radiância espectral $R_e(\lambda)$ da luz refletida por uma superfície com uma reflectância espectral $r_e(\lambda)$, iluminada por um iluminante com radiância espectral $S(\lambda)$, é dada pela multiplicação espectral, termo a termo, $R_e(\lambda) = S(\lambda)r_e(\lambda)$. Imagens simuladas meramente ilustrativas. Fonte: Fiadeiro, P.T. (2005, p. 2).

A figura seguinte, meramente ilustrativa, apresenta um caso de uma aplicação de simulação virtual da aparência da pintura de Leonardo da Vinci “*Mona Lisa*” (Museu do Louvre, Paris) perante diferentes iluminantes, sem ter que se submeter a obra original a diferentes fontes de luz.

2.- Enquadramento Teórico

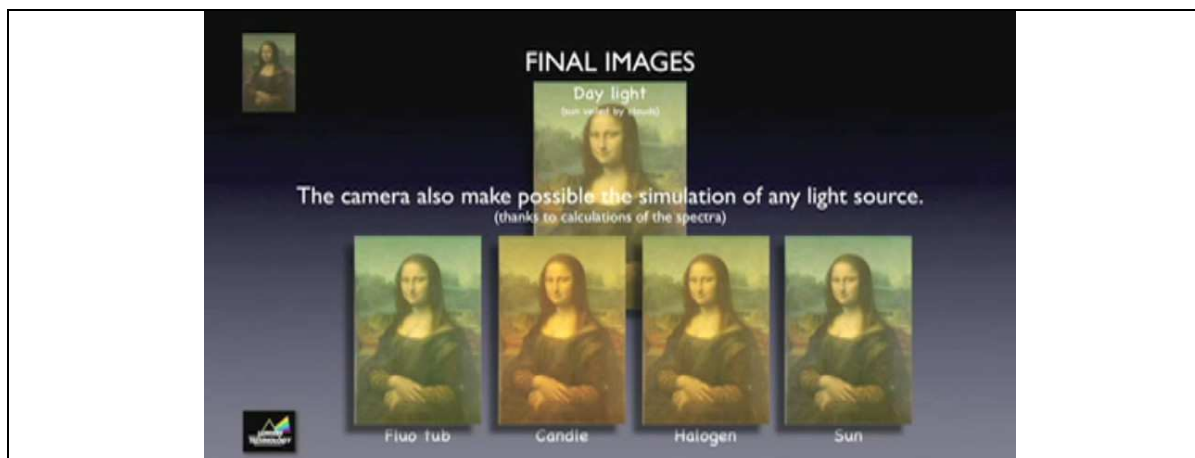


Figura 29: Simulação virtual da aparência perante diferentes iluminantes da pintura “Mona Lisa” (Museu do Louvre, em Paris).

Pintura de Leonardo da Vinci. Na fotografia em cima ao centro a aparência da pintura quando iluminada com iluminante padrão “luz de dia”. Na fila de baixo, da esquerda para a direita, simulação da aparência da obra quando iluminada com fontes de luz: lâmpada fluorescente, vela de cera, lâmpada halogénea, luz do Sol. Fonte: Lumiere Technology (2004).

Uma aplicação interessante para esta técnica da simulação virtual da aparência de pinturas artísticas sob o efeito de iluminantes com diferentes temperaturas de cor correlacionadas (TCC), foi levada a cabo por uma equipa da Universidade do Minho: num sistema que incluía um computador e um monitor CRT colorimetricamente calibrado, foi realizado um estudo estatístico da preferência de um grupo de observadores, amplo e diverso, em que se pretendeu determinar que TCC estes preferiam para observar as obras (Pinto, 2010; Pinto, et al., 2008a). Imagens hiperespetrais de 11 pinturas a óleo foram registadas e a aparência destas pinturas foi simulada sob iluminantes com TCC de 3600 K a 25000 K. Verificou-se que as preferências dos observadores pendiam para um iluminante de luz de dia de 5100 K e que esse valor não dependia se os observadores eram estudantes ou visitantes dum museu ou do grau de adaptação visual à cor da iluminação, parâmetros avaliados durante o estudo. Estes resultados sugerem que os observadores preferem uma luz com TCC mais alta (luz mais “azulada” ou “branca”) do que a que normalmente é usado na maioria dos museus (Pinto, et al., 2008a).

Curiosamente este estudo não é corroborado por um outro, realizado pelos criadores da lâmpada SoLux (fonte de luz usada na presente tese), em que estes usaram obras e fontes de luz reais, e não simulação virtual. Com TCC diferentes, o grupo de observadores escolhido - mais homogêneo que o grupo do estudo anterior, já que era composto inteiramente por críticos de Arte - mostrou preferência por observar as obras sob uma fonte de luz de TCC de 3400 K (Bradfield, 2007).

2.5.3- Principais sistemas aplicados a pintura artística

Devido ao grande interesse que este tipo de tecnologias suscita, com as potencialidades que representam para o registo documental e exame científico não invasivo de obras de arte, a diversidade de sistemas espectrais existentes é bastante grande e novos sistemas estão a surgir todos os anos. Por essa razão, de seguida descrevem-se apenas os principais sistemas desenvolvidos e publicados na literatura para digitalização e estudo de pintura artística até ao momento em que foi escrita a presente tese, quer organizados pelos grupos de investigação de onde estes partiram (no caso de projetos em que existam vários modelos ou protótipos em simultâneo), quer por uma ordem cronológica, salvaguardando que o desenvolvimento de alguns destes projetos decorreu (ou decorrem) em simultâneo.

2.5.3.1- Projetos VASARI e MARC

Iniciado no final da década de 1980, o projeto europeu VASARI (*Visual Arts Systems for Archiving and Retrieval Images*) foi planeado para possibilitar a digitalização de imagens de elevada resolução espacial e precisão colorimétrica e substituir a fotografia convencional (Ferreira, 2010; Fischer & Kakoulli, 2006; Saunders, et al., 2006). Numa fase inicial, dois sistemas similares foram produzidos simultaneamente, em Londres (na *National Gallery*) e em Munique (no *Doerner Institute*), a que se juntou posteriormente um outro em Florença (na *Galleria degli Uffizi*). Além de possibilitar a digitalização de acervos museológicos, permite também o registo definitivo do estado de conservação das obras de arte (pintura) a um dado momento, o que possibilita posteriormente a identificação de alterações no estado de conservação das obras, decorrentes da sua exposição no museu ou do transporte entre diferentes instituições.



Figura 30: Scanner VASARI na National Gallery, Londres.

Durante uma aquisição, com a fonte de luz na banda centrada nos 450nm. Fonte: Saunders, et al. (2006, p. 524).

O sistema mostrou-se capaz de produzir imagens com uma resolução de 18 píxeis por milímetro, cobrindo uma área de cerca de 1 metro quadrado sobre a superfície de uma pintura. Esta resolução é suficiente para permitir um exame detalhado da superfície de uma obra, permitindo identificar *craquelets*, pinceladas

2.- Enquadramento Teórico

ou alguma alteração que surja ao longo do tempo (Saunders, et al., 2006, pp. 522-524).

A calibração do sistema passava pelo uso de três alvos brancos mate de PTFE³⁹, destinados à correção de diferenças de homogeneidade na iluminação, um alvo para corrigir deformações óticas e um alvo de 24 cores Colorchecker, previamente medido espectralmente. Muitos destes procedimentos de calibração mantêm-se ainda hoje, em outros sistemas.

Descrevem-se de seguida as principais características desta primeira versão.

Resumo do sistema multiespectral VASARI (versão de 1989):

<i>Detetor:</i>	câmara digital <i>Kontron Progress 3000 monochrome</i> ; micro-posicionamento piezoelétrico; resolução espacial 3000x2320 pixéis; intervalo dinâmico de 8 bit/pixel;
<i>Fontes de Luz:</i>	lâmpada de Tungsténio-Halogéneo de 250 Watt;
<i>Seleção de bandas:</i>	7 filtros de interferência de banda larga, 70 nm de FWHM, entre os 400 e os 700 nm; colocação na fonte de luz;
<i>Outros:</i>	Objetiva Zeiss Z-Planar f/4-f/32;
<i>Resultados:</i>	1x1 m (1 m ²) digitalizado em cerca de 3h; 18 pixéis/mm; seleção de 7 bandas, com intervalos de 50 nm, entre os 400 e os 700 nm; ΔE_{ab}^* de 2,3 unidades.

Este sistema foi atualizado, de que resulta nova versão a partir do ano de 1993:

Resumo do sistema hiperespectral VASARI (atualizações na versão de 1993):

<i>Detetor:</i>	câmara digital com intervalo dinâmico de 12 bit/pixel;
<i>Seleção de bandas:</i>	12 filtros de interferência de banda larga, 70 nm de FWHM, entre os 400 e os 1000 nm;
<i>Resultados:</i>	seleção de 12 bandas, com intervalos de 50 nm, entre os 400 e os 1000 nm; ΔE_{ab}^* de 1,1 unidades.

³⁹ Politetrafluoroetileno.

Os principais inconvenientes do sistema VASARI eram a sua grande dimensão física e lentidão na sua operação (cerca de 3h para digitalizar uma área de 1 m²). Em termos práticos estas limitações não possibilitavam que o sistema fosse a solução ideal para digitalizar todo o acervo de uma grande instituição, não substituindo por isso o uso de fotografia convencional.

Na sequência deste projeto, surge então um outro, igualmente financiado pela União Europeia, que se desenvolveu entre os anos de 1992 e 1995, o projeto MARC (*Methodology for Art Reproduction in Color*). Pensado para possibilitar impressões de elevada qualidade na produção de catálogos de pintura, desenvolve também as metodologias necessárias na gestão de cor dos ficheiros digitais. Na sequência evolutiva do projeto VASARI, combina algumas das propriedades deste sistema, como a elevada resolução e rigorosa gestão de cor, com uma maior facilidade de utilização, melhor mobilidade e rapidez na digitalização direta⁴⁰ das obras (Saunders, et al., 2006, pp. 539-541).

Na ausência de câmaras fotográficas digitais comerciais que apresentassem uma resolução suficiente e fidelidade cromática, os sistemas MARC foram inovadores e úteis no seu tempo. O primeiro modelo usava o corpo de uma câmara Reflex analógica, de médio formato, onde se inseria um magazine (*back*) especialmente desenvolvida que englobava um sensor digital e toda a eletrónica associada.

Este sistema era bastante mais rápido a realizar a digitalização direta de uma obra, pois realizava uma imagem em cerca de 20 minutos (o sistema VASARI, como já referimos acima, embora com mais resolução e bandas espectrais, demorava cerca de 3h).

Na figura seguinte, uma fotografia do sistema MARC, na sua primeira versão.

⁴⁰ Na digitalização direta, regista-se diretamente a obra original, sem ser necessário passar primeiro pelo passo intermédio de se realizar uma fotografia convencional (analógica), que depois seria digitalizada com um *scanner* de película (técnica usada na maior parte dos museus, nos primeiros anos da era da fotografia digital).

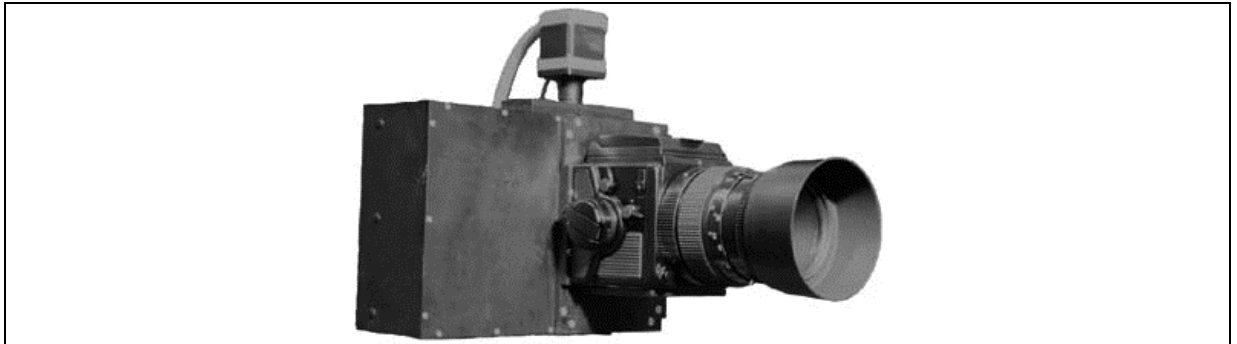


Figura 31: câmara digital MARC (versão I).

Fonte: Haworth (1999)

Resumo do sistema MARC, nesta primeira versão:

Resumo da câmara colorimétrica MARC (versão I, de 1992 a 1995):

<i>Detetor:</i>	sensor RGB; resolução espacial 500x290 pixéis; intervalo dinâmico de 12 bit/pixel; por micro-posicionamento e junção de <i>frames</i> em mosaico, produz uma resolução de 3000x2320 pixéis; por macro-posicionamento e junção de imagens em mosaico, produzia-se uma resolução de 20000x20000 pixéis;
<i>Fontes de Luz:</i>	lâmpadas de tipo HMI ⁴¹ (descarga elétrica); temperatura de cor de 5600 K;
<i>Seleção de bandas:</i>	-
<i>Outros:</i>	-
<i>Resultados:</i>	Digitalização em cerca de 20 minutos; ΔE_{ab}^* de 3 a 3,5 unidades.

Este primeiro sistema não se mostrou mecanicamente muito robusto para um uso intensivo. Assim, entre 1999 e 2002 desenvolveu-se uma nova versão, mais robusta e atualizada (também na sua eletrónica e sensor), com a qual a *National Gallery* de Londres digitalizou toda a sua coleção de pinturas artísticas, primeira instituição a realizar este feito, através de digitalização direta das obras com rigorosa gestão de cor, só permitida com fotografia digital colorimétrica. Esta

⁴¹ HMI: acrónimo do inglês para *Hydrargyrum* (Mercúrio) *Medium-arc Iodides* (Hunt, 2004), um tipo de fonte de luz amplamente usado nos estúdios de cinema e televisão, que funciona por descarga elétrica ou arco voltaico. Erradamente, encontra-se com frequência em publicações de fotografia a associação deste acrónimo a outras designações, como por ex. *Halogen Mercury Iodine* (Sydenham, 2013).

2.- Enquadramento Teórico

segunda versão reduzia o tempo de digitalização para 2,5 minutos, um ganho de tempo muito significativo, relativamente à versão anterior.

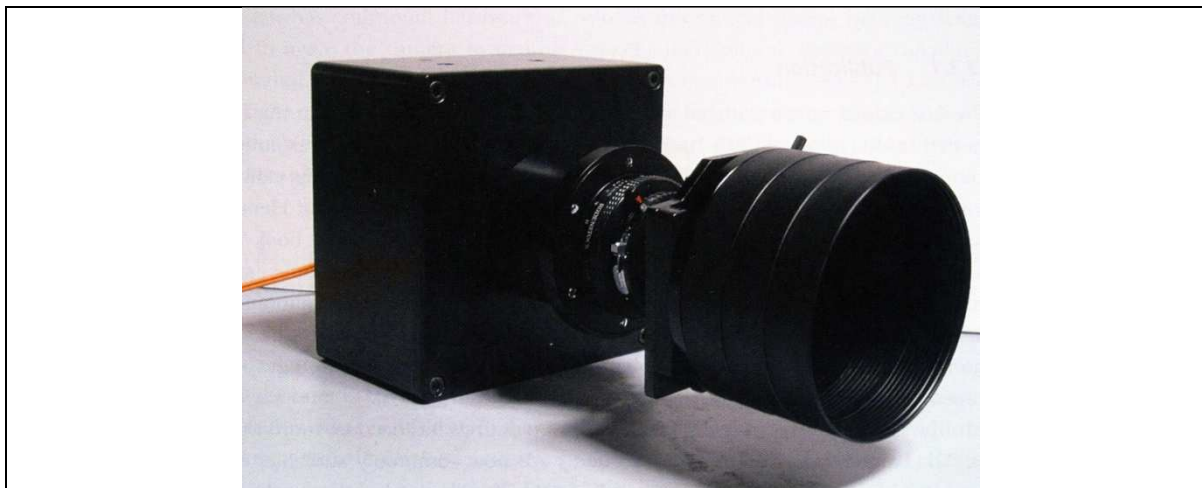


Figura 32: câmara digital de alta resolução MARC II .

Fonte: Saunders, et al. (2006, p. 540).

Resumidamente, algumas características desta nova versão:

Resumo da câmara colorimétrica MARC II (atualizações na versão II, de 1999 a 2005):

<i>Detetor:</i>	sensor RGB; resolução espacial 1300x1024 pixéis, refrigerado com um sistema de Peltier; por posicionamento e junção de imagens em mosaico, produz uma resolução de 10000x10000 pixéis;
<i>Fontes de Luz:</i>	-
<i>Seleção de bandas:</i>	-
<i>Outros:</i>	Objetiva Rodenstock de grande formato;
<i>Resultados:</i>	Digitalização em cerca de 1 minuto; ΔE_{ab}^* de 2 a 3 unidades.

2.5.3.2- Istituto de Ricerca Sulle Onde Electromagnetiche

O sistema desenvolvido por colaboradores deste instituto de Florença no final da década de 1990, apresenta a originalidade de se basear num sensor analógico do tipo tubo de Vidicon (Bacci & Casini, 2005; Baronti, Casini, Lotti, & Porcinai, 1997; Casini, et al., 1999; Casini, et al., 2003), tradicionalmente usado para refletografia IV, técnica padrão estabelecida desde a década de 1970 para exame com radiação infravermelha das obras de arte (Boer, 1970). Uma das primeiras preocupações dos criadores foi estabilizar termicamente o sensor, através da inclusão no sistema de ventoinhas, em torno da câmara, para arrefecer o mesmo.

Mas graças à sensibilidade espectral na região infravermelha do detetor usado, foi possível com este sistema distinguir e mapear, com sucesso, pigmentos em várias pinturas artísticas famosas, como no caso de algumas pinturas de Van Gogh, casos já referidos no subcapítulo anterior.

De seguida, apresenta-se a compilação de alguns dados técnicos deste sistema hiperespectral.

Resumo do sistema hiperespectral:

<i>Detetor:</i>	detetor <i>Hamamatsu C-2400</i> , do tipo tubo de vidicon de PbO-PbS; sensibilidade espectral dos 400 aos 2200 nm; intervalo dinâmico de 8 bit/píxel;
<i>Fontes de Luz:</i>	2 lâmpadas de Tungsténio-Halogéneo de 150 Watt; geometria 45° a 60° de ângulo;
<i>Seleção de bandas:</i>	29 filtros de interferência de banda estreita (de cerca de 10 nm), dos quais 15 filtros na região visível (em intervalos de 20 nm), 8 na do IV próximo (em interv. de 50 nm) e 6 na do IV de onda curta (em interv. de 100 nm); colocação do sistema de filtros na objetiva do detetor;
<i>Outros:</i>	-
<i>Resultados:</i>	Tempo de aquisição médio de 20 min.

2.5.3.3- *École Nationale Supérieure des Télécommunications*

No âmbito quase sempre de importantes teses de doutoramento, esta instituição de ensino superior de Paris desenvolveu vários modelos de sistemas hiperespetrais ao longo do final da década de 1990 (Ferreira, 2010; Hardeberg, 1999; Ribés Cortés, 2003).

Um dos principais méritos dos sistemas desenvolvidos por esta instituição foi o de, devido ao seu pioneirismo, ter estabelecido procedimentos de referência para os projetos de investigação que se seguiram, mesmo na atualidade.

Resumo do primeiro sistema e suas variantes:

<i>Detetor:</i>	Sensor linear <i>Kodak Eikonix 1412</i> , monocromático; intervalo dinâmico de 12 bit/pixel; sensor linear de 4096 pixéis, com sistema de varrimento por motor de passo, produz 4096x4096 pixéis de resolução espacial final;
<i>Fontes de Luz:</i>	lâmpadas de tipo HMI; temperatura de cor de 5500 K; geometria a 45° de ângulo;
<i>Seleção de bandas:</i>	<u>Variante 1:</u> 3 filtros (R,G e B); <u>Variante 2:</u> 5 filtros; <u>Variante 3:</u> 7 filtros; <u>Variante 4:</u> 12 filtros; colocação na objetiva do detetor;
<i>Outros:</i>	Objetiva Nikon 50mm f/2.8;
<i>Resultados:</i>	5 a 10 pixéis/mm; <u>Variante 1:</u> ΔE_{ab}^* de 1,5 unidades, erro médio de 3,6%, ΔE_{94}^* de 1,56 a 20,1; <u>Variante 2:</u> ΔE_{94}^* de 1,40 a 2,15; <u>Variante 3:</u> ΔE_{94}^* de 0,54 a 1,37; <u>Variante 4:</u> erro médio de 0,3%, ΔE_{94}^* de 0,14 a 1,01;

Devido ao elevado tempo de aquisição, processamento e ruído produzido pelo sensor, entre outros problemas do sistema anterior, foi construído um segundo modelo, mais atualizado em quase todos os aspetos, que se resume a seguir. Uma das inovações é que, este sistema, talvez tenha sido um dos primeiros a recorrer a um sistema de seleção de bandas espectrais fazendo uso de um filtro de interferência sintonizável de cristais líquidos (TFT).

2.- Enquadramento Teórico

Resumo do segundo sistema:

<i>Detetor:</i>	Sensor <i>PCO Sensicam</i> , monocromático; intervalo dinâmico de 12 bit/pixel; tempos de integração de 1ms a 1000 seg., refrigerado a -12 °C para evitar a presença de ruído; 1280x1024 pixéis de resolução espacial;
<i>Fontes de Luz:</i>	lâmpadas de tipo Tungsténio-Halogéneo;
<i>Seleção de bandas:</i>	Filtro de interferência sintonizável de cristais líquidos (<i>Cambridge Research & Instrumentation, Inc VariSpec</i>), dos 400 aos 700 nm, bandas de 5 a 30 nm de largura; colocação na objetiva do detetor;
<i>Outros:</i>	-
<i>Resultados:</i>	17 imagens, a intervalos de 20nm, entre os 400 e os 700nm; erro médio de 2,8%; ΔE_{ab}^* de 3,1 unidades;

De referir ainda que, no âmbito da sua tese de doutoramento nesta instituição, Ribés Cortès (2003) teve um papel importante no desenvolvimento do protótipo francês do novo *scanner* hiperespectral CRISATEL, um projeto europeu apoiado por fundos da União Europeia e descrito mais adiante.

2.5.3.4- *National Gallery of Art - Conservation Division*

O Departamento de Conservação da *National Gallery of Art* (em Washington D.C.) desenvolveu durante mais de uma década um projeto de investigação e desenvolvimento de um sistema para aplicação de várias técnicas que recorrem a imagiografia infravermelha e multiespectral (Delaney, et al., 2005; Saunders, et al., 2006). O sistema usa como detetores uma câmara de CCD e dois detetores PtSi de marcas diferentes, para registo da radiação infravermelha.

Aspetos importantes resultantes destes sistemas, foram já mencionados e referidos no subcapítulo anterior - e ilustrados nas Figuras 18 e 19, de estudos realizados em pinturas famosas de Vincent van Gogh - pois este projeto foi muito importante e pioneiro no uso de sistemas multiespectrais na identificação e mapeamento de pigmentos azuis (Delaney, et al., 2005).

Resumo do sistema multiespectral:

<i>Detetores:</i>	Uma câmara digital Sony XC-77, sensor CCD monocromático, para registo de imagens na região do visível e IV próximo; Dois detetores térmicos PtSi: um Mistubishi M600 ou um Kodak 310-21X, para registo de imagens na região IV dos 1000 aos 2000 nm.
<i>Fontes de Luz:</i>	Iluminação difusa, usando um par iluminadores Lowell Tota com lâmpadas de quartzo de 500 W, 3200 K e duas sombrinhas difusoras;
<i>Seleção de bandas:</i>	Câmara Sony XC-77: filtros passa banda da Corin Inc. de 400 nm de largura de banda, intervalados de 500 nm de comprimento de onda, na região do espectro EM dos 450 aos 1000 nm; Detetores PtSi: “La Mousmé”, digitalizada usando filtros de banda larga com centro de transmissão nos 1200 nm (largura de banda de 90 nm) e nos 1600 nm (largura de banda de 500 nm); pormenores das duas pinturas digitalizados com três filtros de banda larga: um dos 1100 nm aos 1400 nm (<i>Astronomy J</i> , da <i>Barr Associates</i>); um dos 1500 aos 1800 nm (<i>Astronomy H</i> , da <i>Barr Associates</i>) e um dos 2000 aos 2400 nm (<i>Astronomy K</i> , da <i>Barr Associates</i>).

2.- Enquadramento Teórico

<i>Outros:</i>	Objetiva de 25mm f/1.6 (na câmara Sony XC-77); Objetivas Nikon 55 mm f/1.2 (nos dois detetores PtSi.
<i>Resultados:</i>	Ver p.f. subcapítulo “2.5.2.3- Identificação e mapeamento de constituintes da camada pictórica”.

2.5.3.5- *Art Innovation*

Em meados da década de 2000, a empresa *Art Innovation* (sediada na Holanda) produziu e comercializou uma câmara multiespectral - com o nome comercial *The Artist* (Art Innovation, 2007; Saunders, et al., 2006; Scholten, et al., 2004) - que apresenta a capacidade de produzir sete imagens de banda espectral larga, cobrindo uma região do espectro que vai do ultravioleta ao infravermelho próximo, usando para tal um sensor de silício, do tipo CCD mas modificado com um intensificador de imagem capaz de aumentar o alcance da sensibilidade espectral do detetor até aos 1550 nm - a sensibilidade espectral máxima nos sensores de silício comuns fica normalmente pelos 1100 nm (Saunders, et al., 2006, p. 538).



Figura 33: Câmara multiespectral “The Artist”, da Art Innovation (Holanda).

À esquerda, a câmara “The Artist”, montada num suporte especial para pintura artística (inclui iluminadores). À direita, a câmara vista de frente, com objetiva zoom montada. Fonte: Art Innovation (2007)..

Esta câmara foi usada na identificação de pigmentos de tinta em documentos manuscritos com bastante sucesso (Scholten, et al., 2004). Devido à sua versatilidade, é também usada no estudo de pintura artística, como se pode observar no exemplo da figura acima ou da Figura 25, exemplos presentes na página de Internet que promove esta câmara (Art Innovation, 2007).

2.- Enquadramento Teórico

Por se tratar de uma câmara em distribuição comercial, está coberta pelo segredo industrial de patentes, razão porque alguns aspetos técnicos da mesma não são revelados pelo fabricante. Dentro do que foi possível recolher na literatura disponível, apresentam-se de forma sumária alguns aspetos técnicos desta câmara (Art Innovation, 2007; Saunders, et al., 2006, p. 538).

Resumo das principais características da câmara multiespectral “The Artist”:

<i>Detetor:</i>	Sensor CCD progressivo; resolução 1360x1036 pixéis;
<i>Fontes de Luz:</i>	-
<i>Seleção de bandas:</i>	O fabricante não revela o sistema de seleção de bandas espectrais; segundo Saunders et al. (2006, p.538), intensificador de imagem aplicado ao CCD, capaz de aumentar o alcance da sensibilidade espectral do detetor até aos 1550 nm;
<i>Outros:</i>	Objetiva de encaixe tipo C grande angular de distância focal de 23 mm f/1.4; Objetiva de encaixe tipo C zoom de distância focal 18-108 mm f/2.5;
<i>Resultados:</i>	Imagens de: visível, a cores (RGB); monocromática de luminância; ultravioleta refletido; fluorescência ultravioleta; infravermelho próximo (banda 1); infravermelho próximo (banda 2); infravermelho de falsa cor (banda 1); infravermelho de falsa cor (banda 2).

2.5.3.6- *Foundation for Research & Technology – Hellas*

A Fundação FORTH (*Foundation for Research & Technology – Hellas*) é um centro de pesquisa na Grécia, supervisionado pelo Ministério da Educação (Balas et al., 2008; Balas et al., 2003; Forth-Photonics, 2008; Saunders, et al., 2006)

Fundada em 1983, a FORTH é hoje internacionalmente conhecida e uma das maiores organizações de pesquisa na Grécia em áreas de interesse como: ciências da computação, biologia molecular, lasers, telecomunicações, microeletrónica, robótica, biotecnologia, materiais, engenharia médica, matemática aplicada e computacional, pesquisas biomédicas, estudos do Mediterrâneo e estudos históricos.

Uma empresa *spin-off* da FORTH, a *FORTH-Photonics*, com sede no Reino Unido e laboratório de desenvolvimento na Grécia, concebeu uma câmara multiespectral para uso no estudo de obras de arte, a câmara *MuSIS* (Forth-Photonics, 2008), presentes em diversos museus e centros de investigação da Europa. Tal como no projeto anterior, também estas câmaras estão protegidas por segredo industrial e o fabricante não revela todos os dados técnicos sobre as mesmas.

Embora a designem como sendo multiespectral, foi anunciada como tendo a capacidade de registar séries de imagens com 3 nm de intervalo entre si, na região do espectro EM que vai dos 380 nm até aos 1000 nm (Saunders, et al., 2006, p. 538). Num artigo de 2003, após compararem as desvantagens dos filtros seletores de banda de outros tipos, referem que o sistema de seleção de bandas usado na câmara é do tipo sintonizável, sem especificarem no entanto qual a tecnologia usada em concreto (Balas, et al., 2003, p. 332).

O sensor é de silício, do tipo CCD (Balas, et al., 2003), o que está de acordo com os limites de sensibilidade espectral citados.

Na figura seguinte, podemos observar a aparência dos dois modelos da câmara multiespectral MuSIS, presentemente em comercialização.



Figura 34: Câmaras multiespectrais MuSIS, da FORTH-Photonics (Grécia).
À esquerda, o modelo MuSIS HS; à direita, o modelo MuSIS MS. Fonte: Forth-Photonics (2008).

Atualmente, a FORTH-Photonics disponibiliza dois modelos de câmaras, a MuSIS HS, câmara hiperespectral capaz de produzir 30 bandas espectrais em menos de um minuto - uma velocidade realmente impressionante, se comparada com todos os outros sistemas citados até agora, normalmente levando minutos ou horas por cada banda espectral - e o modelo MuSIS MS, uma câmara multiespectral capaz de produzir imagens em 8 bandas espectrais discretas, da região UV do espectro EM, até ao IV próximo (Forth-Photonics, 2008). As câmaras MuSIS podem substituir algumas técnicas de fotografia (fotografia digital de luz visível, UV refletido, fluorescência UV e refletografia IV).

Nos dois quadros seguintes, resumem-se as principais características técnicas, disponibilizadas pelo fabricante, para os dois modelos atualmente em comercialização.

2.- Enquadramento Teórico

Resumo da câmara hiperespectral MuSIS HS:

<i>Detetor:</i>	Sensor CCD progressivo, de 1/2 polegada; resolução de 1600x1200 pixéis; 8 bit de gama dinâmica; vídeo a 15 frames por segundo;
<i>Fontes de Luz:</i>	Deve apresentar no mínimo uma intensidade de 0,001 Lux (f/1.2 2800 K);
<i>Seleção de bandas:</i>	Filtro sintonizável, entre 370-1000 nm, 34 bandas discretas seleccionáveis (10 a 20 nm de largura cada banda);
<i>Outros:</i>	Obturador: de 1/10000 s. a 2 s.; ligação firewire IEEE 1394; objetivas de encaixe tipo C;
<i>Resultados:</i>	34 bandas espectrais + 1 imagem a cores RGB, registados em menos de 1 minuto; 2 modos: modo de espectroscopia e modo de imagiografia espectral; Software de tratamento hiperespectral e de controlo da câmara incluído; possibilidade de fazer gráficos de espectros, pixel a pixel.

Resumo da câmara hiperespectral MuSIS MS:

<i>Detetor:</i>	Sensor CCD progressivo, de 1/3 de polegada; resolução de 1280x9600 pixéis; 8 bit de gama dinâmica; vídeo a 15 frames por segundo;
<i>Fontes de Luz:</i>	Deve apresentar no mínimo uma intensidade de 0,001 Lux (f/1.2 2800 K);
<i>Seleção de bandas:</i>	Filtro sintonizável, entre 370-1000 nm, 8 bandas discretas seleccionáveis;
<i>Outros:</i>	Obturador: de 1/10000 s. a 2 s.; ligação firewire IEEE 1394; objetivas de encaixe tipo C;
<i>Resultados:</i>	8 bandas espectrais + 1 imagem a cores RGB, registados em menos de 1 minuto; 2 modos: modo de espectroscopia e modo de imagiografia espectral; modo de imagiografia espectral, subdivide-se em modos de reflectância/transmitância ou de fluorescência; Software de tratamento multiespectral e de controlo da câmara incluído.

2.5.3.7- Munsell Color Science Laboratory - Rochester Institute of Technology

Este instituto norte-americano, com uma longa tradição na gestão de cor, é pioneiro da imagem digital. Um grande grupo de investigadores tem desenvolvido um importantíssimo trabalho nesta instituição nas últimas décadas, integrados na equipa liderada pelo Professor Roy Berns; têm realizado um trabalho pioneiro no desenvolvimento de sistemas de imagiografia multicanal, multiespetrais e hiperespetrais. Dentro do *Munsell Color Science Laboratory*, existe um grupo especialmente dedicado às aplicações de imagiologia no estudo pintura artística, num projeto que tem sido financiado pela “*The Andrew W. Mellon Foundation*” (fundação que tem o nome do benemérito criador da *National Gallery of Art*).

Descrevem-se de seguida aspetos técnicos de alguns dos sistemas espectralis, descritos pela vasta bibliografia que este grupo tem produzido, e que nos impossibilita citá-los todos de modo intensivo (Berns, 2001, 2002, 2005a, 2005b, 2006, 2009; Berns & Imai, 2002; Berns, et al., 2002; Berns & Mohammadi, 2007; Berns & Taplin, 2006; Berns, Taplin, Imai, Day, & Day, 2003; Berns, Taplin, Nezamabadi, Mohammadi, et al., 2005; Berns, et al., 2004; Berns, Taplin, Nezamabadi, Zhao, et al., 2005; Ying Chen, Berns, & Taplin, 2007; Yongda Chen, Berns, Taplin, & Imai, 2003; E. A. Day, Berns, Taplin, & Imai, 2003; Francisco H. Imai & Berns, 1998, 2001; Francisco H. Imai, et al., 2000; Francisco H. Imai, Quan, Rosen, & Berns, 2001; Francisco H. Imai, Rosen, Wyble, Berns, & Tzeng, 2001; F. H. Imai, et al., 2000; Francisco H. Imai, Rosen, & Berns, 2001; Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002; Francisco H. Imai, Taplin, Day, Day, & Berns, 2002; Li & Berns, 2007; Mohammadi & Berns, 2004, 2005, 2006; Mohammadi, Nezamabadi, Berns, & Taplin, 2005; Nezamabadi & Berns, 2005; Rao, Rosen, & Berns, 2005; Rosen, Zhao, O'Sullivan, & Berns, 2005; Taplin & Berns, 2005; Tzeng & Berns, 1998, 1999, 2000; Zhao & Berns, 2006, 2007; Zhao, Berns, et al.,

2.- Enquadramento Teórico

2005; Zhao, et al., 2008; Zhao, et al., 2004; Zhao, Taplin, Nezamabadi, & Berns, 2005).

Resumo do Sistema I (1996?):

<i>Detetor:</i>	câmara digital monocromática <i>Kodak Professional DCS 200m</i> ; resolução espacial 1000x1500 pixéis; intervalo dinâmico de 8 bit/pixel;
<i>Fontes de Luz:</i>	4 lâmpadas de Tungsténio-Halogéneo;
<i>Seleção de bandas:</i>	7 filtros de interferência Melles Griot de largura de banda de 50 nm, entre os 400 e os 700 nm; colocação na objetiva do detetor;
<i>Outros:</i>	Objetiva Nikon 28mm;
<i>Resultados:</i>	ΔE_{ab}^* de 2,2 a 9,4 unidades.



Figura 35: Sistema hiperespectral com câmara digital IBM Pro3000 scanning camera.
Sistema designado no texto como Sistema II. Fonte: Day (2003a).

Resumos dos Sistema II (1998):

<i>Detetor:</i>	Sensor digital <i>IBM PRO/3000</i> ; resolução espacial 3072x4920 pixéis;
<i>Fontes de Luz:</i>	-
<i>Seleção de bandas:</i>	colocação na objetiva do detetor; 5 filtros: 3 R,G e B ; 1 filtro Kodak Wratten n.º38 e 1 filtro n.º44; <u>Versão 2:</u> 3 R,G e B ; 1 filtro Kodak Wratten n.º38;

2.- Enquadramento Teórico

<i>Outros:</i>	-
<i>Resultados:</i>	9 imagens monocromáticas; erro espectral médio de 2,9%; ΔE_{ab}^* de 2,2; <u>Versão 2:</u> 6 imagens monocromáticas; erro médio de 2,9%;%; ΔE_{ab}^* de 2,9; %; ΔE_{94}^* de 1,9;



Figura 36: Sistema hiperespectral com câmara digital CCD Quantix, com filtro sintonizável e objetiva.
Sistema designado no texto como Sistema III. Fonte: Day (2003a).

Resumo do Sistema III:

<i>Detetor:</i>	sensor digital monocromático <i>Roper Scientific Photometrics Quantix 6303E</i> ; resolução espacial 3072x2048 pixéis; intervalo dinâmico de 8 bit/pixel; refrigerado a -28°C por sistema de Peltier;
<i>Fontes de Luz:</i>	2 lâmpadas de Tungsténio-Halogéneo (<i>Elichron Scanlite Digital 1000</i>), com difusores (aprox. 1550 lux);
<i>Seleção de bandas:</i>	6 filtros, usados 3 a 3, com picos de transmitância de 470 e 520 nm, 560 e 580 nm, 640 e 750 nm; <u>Versão 2:</u> Filtro de interferência sintonizável de cristais líquidos (<i>Cambridge Research & Instrumentation, Inc VariSpec</i>), dos 400 aos 700 nm, bandas de 10 nm de largura, 31 imagens monocromáticas (Figura 34);
<i>Outros:</i>	Objetiva Rodenstock 105mm;
<i>Resultados:</i>	Erros médios até 3,9%; ΔE_{00} de 1,5 a 1,8 unidades; <u>Versão 2:</u> erros médios de 1,4 a 3,5%; ΔE_{00} de 1,7 a 3,3 unidades;

2.- Enquadramento Teórico

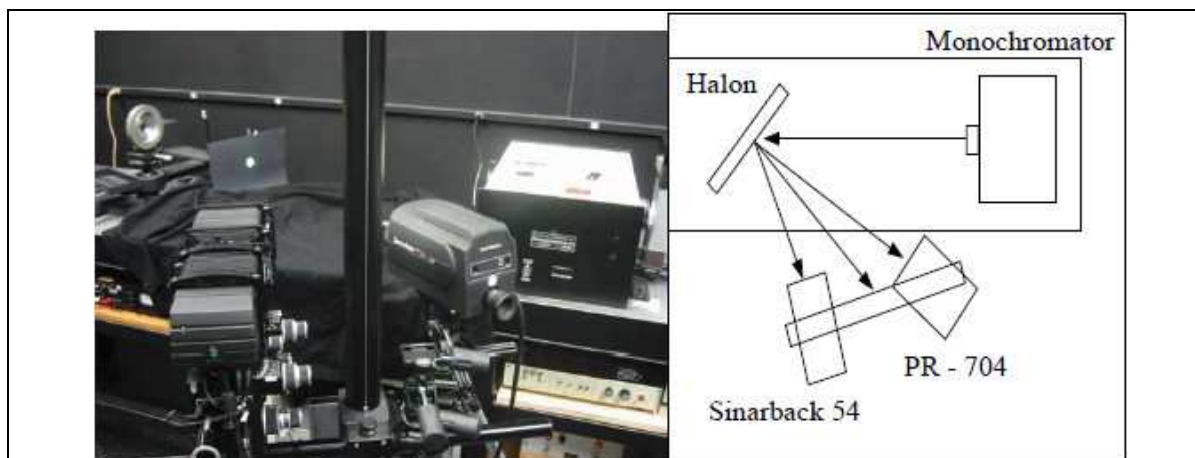


Figura 37: SinarBack54, espectroradiómetro PR-704 e fonte de luz do tipo Monocromador. Fotografia, da esquerda para a direita, câmara digital Sinar Back modificada, espectroradiómetro PR-704, monocromador; lado direito, esquema explicativo da disposição dos componentes do sistema. Fonte: Day (2003b, p. 3).

Resumo do Sistema IV:

<i>Detetor:</i>	câmara digital com um CFA RGB Sinar Back 54H;
<i>Fontes de Luz:</i>	2 lâmpadas HMI; Temp. cor de 4966 K; 9300 lux;
<i>Seleção de bandas:</i>	3 filtros R, G e B (com máx. aos 450, 550 e 600 nm respetivamente); 2 filtros externos: Kodak Wratten n.º38 e n.º44; colocação na objetiva do detetor;
<i>Outros:</i>	-
<i>Resultados:</i>	ΔE_{00} de 1,3 a 3,1 unidades; erro médio de 2%.

O último sistema aqui apresentado (designado no âmbito desta tese como Sistema IV) tem especial interesse para o presente trabalho, já que foi usada uma câmara digital comercial, com sensor RGB em mosaico de Bayer, tal como os sensores das câmaras D-SLR. O objetivo que presidiu a este último projeto foi estabelecer qual o número mínimo de filtros que seria necessário usar num sistema espectral para se poder obter os melhores resultados em termos de qualidade colorimétrica.

Com apenas dois filtros externos, este sistema apresentou melhores métricas colorimétricas que quase todos os outros do mesmo grupo de investigação aqui citados, baseados sempre num maior número de bandas espectrais captados (D. C. Day, 2003b).

2.5.3.8- Projeto CRISATEL

O projeto CRISATEL (*Conservation Restoration Innovation System for imaging capture and digital Archiving to enhance Training Education and lifelong Learning*) tratou-se de um projeto internacional financiado pela União Europeia - sucessor do projeto VASARI - com o objetivo de desenvolver sistemas multiespetrais destinados à produção de arquivos digitais de elevada qualidade, para o estudo e caracterização de pinturas artísticas (Liang, et al., 2010; Lumiere Technology, 2004, 2007; Ribés Cortés, 2003; Ribés Cortés & Schmitt, 2003; Saunders, et al., 2006). Iniciado no final da década de 1990, as câmaras continuaram o seu desenvolvimento na década de 2000.

Este projeto desenvolveu-se através de dois protótipos iniciais, idênticos nos principais objetivos mas diferentes em alguns componentes: o sistema de filtros é idêntico na sua essência, constituído por um conjunto de 13 filtros dicróicos seletores de bandas e diferem, de um modelo para o outro, no detetor e no sistema de iluminação (ver resumos das características dos modelos, mais à frente neste subcapítulo). Um dos protótipos encontra-se em Paris e realizou digitalizações importantes no Museu do Louvre; o outro protótipo, desenvolveu-se nos laboratórios da National Gallery, em Londres, onde digitalizou obras desta instituição.

Com elevada resolução espacial e espectral, os sistemas CRISATEL permitem digitalização de elevada qualidade e excelentes características colorimétricas. Com um filtro na região ultravioleta e cerca de três na região do infravermelho próximo do espectro EM, estes sistemas permitem ainda obter informações adicionais sobre desenho subjacente, alterações e repintes.



Figura 38: exemplar de uma câmara de alta resolução multiespectral CRISATEL.
Durante a aquisição de uma pintura, câmara em 1.º plano, conjuntamente com o sistema de iluminação Jumbolux. Fonte: Saunders, et al. (2006, p. 539).

O modelo de Paris teve como parceiro no seu desenvolvimento uma empresa, a *Lumière Technology*, que ficou a produzir e comercializar, por encomenda, câmaras similares ao protótipo CRISATEL - com a designação comercial de *JumboScan*. Esta empresa presta também serviços de digitalização hiperespectral e teve nesse âmbito a oportunidade de digitalizar algumas pinturas importantes como algumas da autoria de Leonardo Da Vinci, trabalhos amplamente divulgados na comunicação social (Lumiere Technology, 2004, 2007). Realizou também interessantes trabalhos de análise e processamento da informação digitalizada, de que resultou, por exemplo, interessantes casos de rejuvenescimento virtual de obras como a “*Mona Lisa*” ou “*A Dama com o arminho*”, por simulação da aparência das obras revertendo matematicamente a alteração provocada pelo envelhecimento no verniz e nos pigmentos da camada pictórica das obras (casos já referidos anteriormente).

2.- Enquadramento Teórico



Figura 39: sistema de filtros dicróicos usados na versão JumboScan do sistema CRISATEL. Os 13 filtros são lineares, uma vez que o detetor é um CCD monolinear. Fonte: Lumiere Technology (2004).

Uma das inovações deste modelo foi o desenvolvimento de uma fonte de luz própria e inovadora, constituída por dois iluminadores motorizados *Jumbolux*, com lâmpadas do tipo HQI⁴²; apresentam refletores especialmente desenhados que permitem concentrar a luz num feixe quase linear de cerca de 50 mm de largura que, quando devidamente sincronizado, faz um varrimento sobre a superfície da obra, acompanhando a zona de digitalização do sensor linear da câmara. Concentra assim a intensidade luminosa na zona a ser registada pelo sensor e permite ao mesmo tempo evitar expor o resto da superfície da obra a radiação desnecessária.

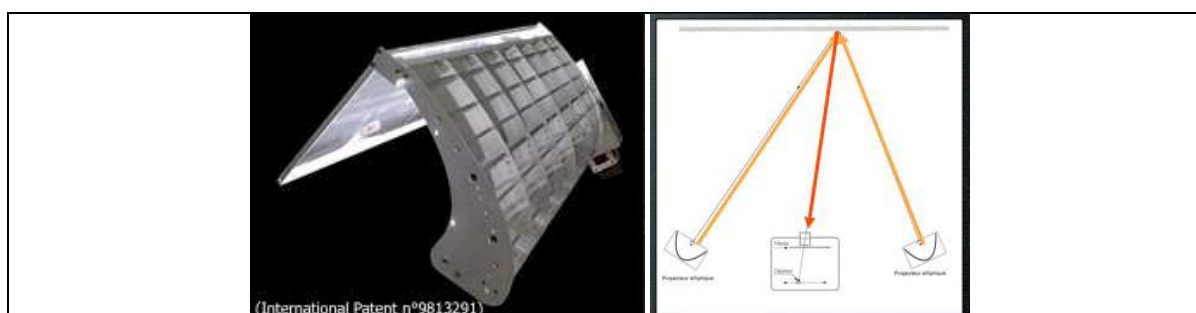


Figura 40: sistema de iluminação Jumbolux, do sistema CRISATEL de Paris. Este sistema de iluminação patenteado, apresenta refletores em forma de “asa” (à esquerda) que concentram a luz num feixe verticalmente homogéneo. Os dois refletores motorizados sincronizam a zona iluminada com a região em digitalização da câmara (esquema à direita). Fonte: Lumiere Technology (2004).

⁴² HQI: lâmpadas de descarga elétrica de alta intensidade de Mercúrio (Hg), Quartzo (no invólucro) e Iodeto; iniciais de Hydrargyrum (Mercúrio, em Latim) Quartz Iodide (do inglês).

2.- Enquadramento Teórico

Resumo do sistema CRISATEL - versão de Paris, JumboScan, Lumière Technology:

<i>Detetor:</i>	Detetor é um <i>array</i> monolinar do tipo CCD de 12000 pixéis; intervalo dinâmico de 12 bit/pixel; versão mais recente, intervalo dinâmico de 16 bit/pixel; o sensor linear é montado verticalmente e efetua um varrimento através de um motor de passos; resolução final da imagem digitalizada de 12000x20000 pixéis; resolução espacial final equivalente a 240 megapixéis;
<i>Fontes de Luz:</i>	Projetores <i>Jumbolux</i> com varrimento sincronizado de um feixe de luz com 50 mm de largura; lâmpadas do tipo HQI; este sistema evita expor a obra a radiação desnecessária, pois o feixe sincroniza com a zona de varrimento coberta pelo detetor;
<i>Seleção de bandas:</i>	13 filtros de interferência, lineares; largura de banda de 40 nm, entre os 380 e os 780 nm; largura de banda de 100 nm nos 3 filtros na região IV, centrados aos 800, 900 e 1000 nm; colocação dos filtros entre a objetiva e o detetor;
<i>Outros:</i>	As versões mais recentes e atualizadas do <i>Jumboscan</i> , permitem imagens de 240 Megabytes (imagens de 8 bit, em escala de cinzentos, por cada canal ou banda espectral) ou de 1,35 Gigabytes (imagens RGB a 48 bit, 16 bit por canal);
<i>Resultados:</i>	Erro espectral médio entre 1,5 e 3,4%; ΔE_{94}^* de 3,33 a 4,51 unidades; nas versões mais recentes, o erro quadrático médio anunciado reduz para valores entre 0,1 e 0,005%; cobre 95% do espaço de cor CIEXYZ ⁴³ .

A versão do sistema CRISATEL da National Gallery (Liang, 2012, p. 268) apresenta, por sua vez, um sensor constituído por uma câmara digital científica monocromática da Zeiss (AxioCam), do tipo CCD refrigerado (adequado a longas exposições), com um intervalo dinâmico de 14 bit e uma resolução espacial de 1300x1030 pixéis, que com um sistema de micro-varrimento se torna capaz de apresentar uma resolução final de 3900x3090 pixéis (cerca de 12 Megapixéis). O sistema de filtros apresenta-se num convencional disco rotativo motorizado e o sistema de iluminação é composto por 2 lâmpadas de Tungsténio, que iluminam a área a digitalizar através de 6 terminais de fibra ótica.

⁴³ Uma câmara digital RGB, normalmente apenas consegue cobrir cerca de 55% deste espaço de cor.

2.- Enquadramento Teórico

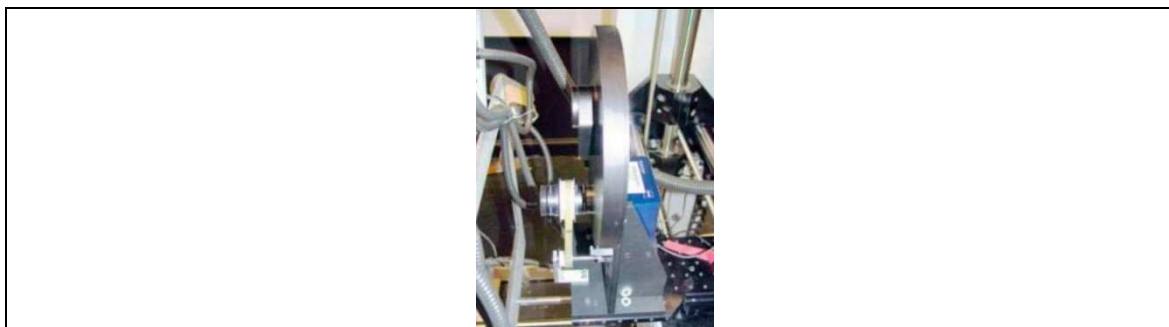


Figura 41: sistema rotativo de filtros, usados na versão CRISATEL da National Gallery. Os filtros são circulares e apresentam-se num suporte rotativo. Fonte: Liang et al. (2010, p. 268).

As principais características desta versão são as seguintes:

Resumo do sistema CRISATEL - versão da National Gallery, Londres:

<i>Detetor:</i>	Detetor monocromático Zeiss AxioCam (sensor Sony), de 1300x1030 pixéis; refrigerado a -30 °C com sistema de Peltier; com sistema de varrimento capaz de apresentar uma resolução final de 3900x3090 pixéis;
<i>Fontes de Luz:</i>	2 lâmpadas de tungsténio de 410 W ligadas por fibra ótica; objeto iluminado com ângulo de 45°, através de 6 terminais de fibra ótica;
<i>Seleção de bandas:</i>	13 filtros de interferência, de forma circular, em roda de filtros; largura de banda de 40 nm, entre os 380 e os 780 nm largura de banda; largura de banda de 100 nm nos 3 filtros na região IV, centrados aos 800, 900 e 1000 nm; colocação dos filtros entre a objetiva e o detetor;
<i>Outros:</i>	Objetiva Schneider Componon-S de 80mm de dist. Focal;
<i>Resultados:</i>	Aquisição de 1 m ² com resolução de 18 pixéis/mm; tempo de aquisição aprox. 20 min.; Erro espectral médio entre 1,4 e 1,7%; ΔE_{00} de 1,2 a 1,9 unidades.

2.5.3.9- Universidade do Minho

Desenvolvido num projeto cofinanciado pela FCT e pela União Europeia, inicialmente em parceria com a UBI, mas que resultou, numa fase posterior, em projetos independentes (Linhares, 2011; Nascimento & Ferreira, 2007; Pinto, 2010; Pinto, et al., 2008a; Pinto, Linhares, & Nascimento, 2008b).



Figura 42: sistema de digitalização hiperespectral da UM.

Sistema hiperespectral visto de frente, onde se observa o filtro anti-IV (1), o filtro sintonizável TFT(2) à frente da objetiva (3) da câmara digital refrigerada (4). Fonte: Pinto (2010, p. 46).

Estando este grupo sediado num departamento de física ótica e optometria, mostraram especial interesse pelo estudo, através deste sistema hiperespectral, da diversidade cromática de cenários complexos - de que resulta a tese de doutoramento de João Linhares (2011) - e na aplicação da digitalização hiperespectral ao registo documental de obras de arte - no âmbito da qual resulta a tese de doutoramento de Paulo Pinto (2010).

No caso da digitalização aplicada a obras de arte, uma das principais aplicações desenvolvidas por este grupo foi o estudo estatístico da temperatura de cor correlacionada preferida pelos observadores de obras de arte para iluminação de pinturas, usando para tal um sistema com um monitor calibrado que permitia simular, em tempo real, diferentes temperaturas de cor aplicadas a pinturas artísticas previamente digitalizadas hiperespectralmente (Pinto, et al., 2008a).

2.- Enquadramento Teórico

Este sistema foi utilizado pelo grupo de investigação da UM para oferecer serviços e digitalização hiperespectral à comunidade e a instituições como museus, através de uma empresa *spin-off* criada para esse efeito, a *Widecolour* (Nascimento & Ferreira, 2007).

Descrevem-se em seguida as principais características deste sistema:

Resumo do sistema hiperespectral da UM:

<i>Detetor:</i>	sensor digital monocromático <i>Hamamatsu ORCA-ER</i> ; resolução espacial 1344x1024 pixéis; intervalo dinâmico de 12 bit/pixel; refrigeração por sistema de Peltier a -12 °C;
<i>Fontes de Luz:</i>	3 lâmpadas <i>Solux MR16 Daylight</i> , de 50 Watt e temp. de cor de 4700 K, 2000 lux;
<i>Seleção de bandas:</i>	Filtro de interferência sintonizável de cristais líquidos (<i>Cambridge Research & Instrumentation, Inc VariSpec VIS2</i>); colocação na objetiva do detetor; transmissão dos 400 aos 720 nm
<i>Outros:</i>	Objetiva de 12.5-75mm de dist. focal, f/1.8;
<i>Resultados:</i>	Resolução de 5 pixéis/mm; seleção de 33 bandas; com intervalos de 10 nm entre os 400 e os 720 nm; erros espectrais de 1,5 a 2%; ΔE_{ab}^* de 2,09 a 3,35 unidades.

2.5.3.10- Universidade da Beira Interior

Como foi referido acima, este projeto foi desenvolvido inicialmente em parceria com a UM, num projeto cofinanciado pela FCT e pela União Europeia, e numa fase posterior subdividiram-se em dois projetos independentes. Com este sistema e em parceria com o IPCR⁴⁴, foram digitalizadas hiperespectralmente algumas obras pictóricas de relevo no panorama nacional, presente em alguns museus nacionais (Ferreira, 2010).

A principal diferença para o sistema anterior é que o filtro TFT sintonizável eletronicamente é colocado em frente da fonte de luz. Vantagens que derivam deste facto são (Ferreira, 2010, p. 203): evitar que a obra seja exposta a radiações desnecessárias, pois o filtro sintonizável só permite que passe a cada momento radiação no comprimento de onda da banda em digitalização; maior qualidade ótica da digitalização, uma vez que a objetiva fotográfica não apresenta filtros à frente, como comprova Ferreira no seu estudo.

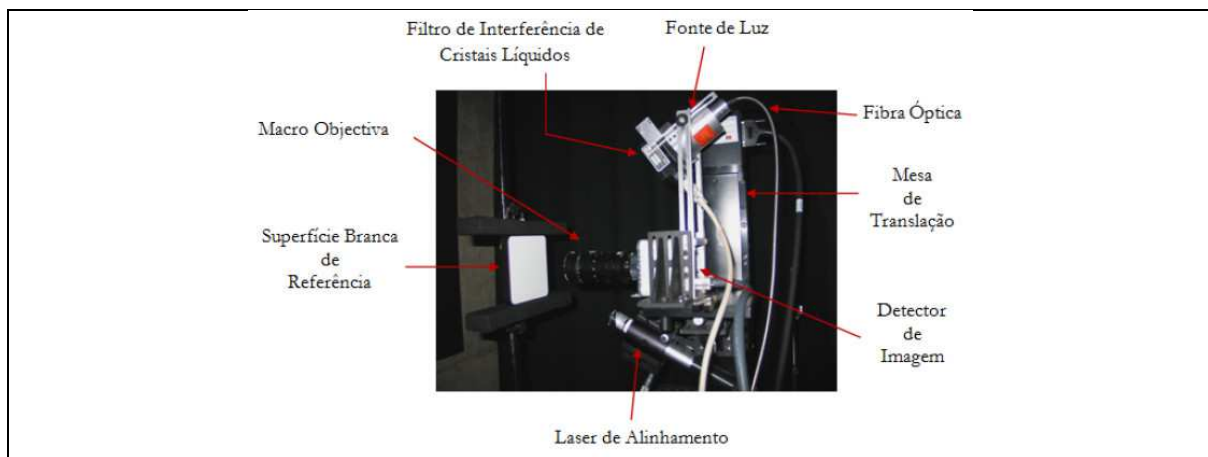


Figura 43: sistema de digitalização hiperespectral da UBI.

Sistema hiperespectral durante digitalização ou calibração na superfície branca de referência. Fonte: Ferreira (2010, p. 85).

⁴⁴ Antigo “Instituto Português de Conservação e Restauro” (IPCR) - que já havia tido anteriormente, por sua vez, a designação de “Instituto José Figueiredo” -, extinto em 2007 após a reorganização governamental de organismos do Estado Português, em que este foi integrado no IPM (Instituto Português de Museus).

2.- Enquadramento Teórico

Este sistema, descrito como sendo de grande rigor e precisão colorimétrica por Francisco Ferreira na sua tese de doutoramento, apresenta mesmo precisão superior à de outros sistemas descritos desenvolvidos nos últimos anos (Ferreira, 2010, pp. 200-204), entre os quais os principais já descritos atrás, neste capítulo (com exceção, talvez, para as versões atualizadas do CRISATEL *JumboScan*).

A justificar este facto, os dados técnicos descritos por Ferreira e que se compilam, de forma sintética, a seguir:

Resumo do sistema hiperespectral da UBI:

<i>Detetor:</i>	sensor digital monocromático <i>Hamamatsu C4742-80-12AG</i> ; resolução espacial 1344x1024 pixéis; intervalo dinâmico de 12 bit/pixel; refrigeração por sistema de Peltier a -30 °C; tempos de exposição 10 microsegundos a 4200 segundos; acoplado a sistema de translação (deslocação na vertical e horizontal), permite aumentar a resolução por montagem de frames em mosaico;
<i>Fontes de Luz:</i>	1 lâmpadas de Xénon estabilizada;
<i>Seleção de bandas:</i>	Filtro de interferência sintonizável de cristais líquidos (<i>Cambridge Research & Instrumentation, Inc VariSpec VIS10</i>); colocação na fonte de luz; transmissão dos 400 aos 720 nm, pasos mínimos 1 nm de intervalo;
<i>Outros:</i>	Objetiva de 12.5-75mm de dist. focal, f/1.8;
<i>Resultados:</i>	Resolução de 17 pixéis/mm; seleção de 33 bandas espectrais , com intervalos de 10 nm, entre os 400 e os 720 nm; erros espectrais de 1%; ΔE_{ab}^* de 1,237 unidades.

2.5.3.11- Projeto PRISMS

O projeto PRISMS (*Portable Remote Imaging System for Multispectral Scanning*) é um projeto recente de uma equipa de investigadores da *Nottingham Trent University* (Liang, 2012; Liang, et al., 2010), alguns dos quais anteriormente envolvidos na equipa de desenvolvimento do CRISATEL. Pensado para ser portátil e permitir uma digitalização de alta resolução de objetos grandes, como por exemplo pinturas murais ou de teto, o sistema é montado em volta de um pequeno telescópio astronómico de uso amador Meade ETX-90, o que permite a digitalização a grandes distâncias (distâncias superiores a 3,5 metros). Este tipo de telescópio vem equipado com uma cabeça e suporte munida de um sistema que permite fazer um varrimento robotizado de toda a área a digitalizar.

A este sistema ótico associa-se o sistema de digitalização que, por sua vez, subdivide-se em dois módulos. Um primeiro módulo é constituído por um sistema multiespectral que opera no espectro EM visível e no infravermelho próximo (400 nm a 880 nm), com uma roda com 10 filtros dicróicos para seleção de bandas espectrais, com larguras de banda de 40 nm - exceto para o filtro nos 880 nm que apresenta 70 nm de largura de banda. O conjunto completa-se com uma câmara digital científica para microscopia da Jenoptics, de sensor CCD refrigerado com placa de Peltier - o que permite, se necessário, exposições longas sem o aparecimento de grão na imagem. O segundo módulo é constituído por um sistema hiperespectral para radiação infravermelha de onda curta (a operar dos 900 nm aos 1700 nm), constituído por um filtro sintonizável do tipo AOTF da Gooch & Housego, a que se junta um sensor InGaAs da Xenics (Liang, 2012; Liang, et al., 2010).

O sistema, quando a operar a 10 metros de distância do tema, possibilita uma resolução espacial muito elevada, na ordem de algumas dezenas de μm por pixel. O sistema de movimentação robotizado do telescópio permite movimentos angulares precisos de 1' a 3' e também a focagem automática precisa, a cada

enquadramento, possibilitando assim realizar imagens compostas finais de elevada resolução e qualidade. Como permite uma elevada resolução e sobreposição entre enquadramentos, torna também possível a realização de modelos 3D da superfície da obra - os autores não explicam como, mas possivelmente será através do uso de *softwares* para fotogrametria⁴⁵. A distância de alcance máximo operacional deste sistema fica limitada apenas pelo sistema de iluminação que for usado (Liang, 2012; Liang, et al., 2010).

O sistema PRISMS é também suficientemente flexível para poder ser adaptado à digitalização de manuscritos, segundo Liang (2012, p. 320) substituindo-se neste caso o telescópio por uma objetiva fotográfica (“Figura 44: sistema de digitalização hiperespectral PRISMS.”, imagem à direita).

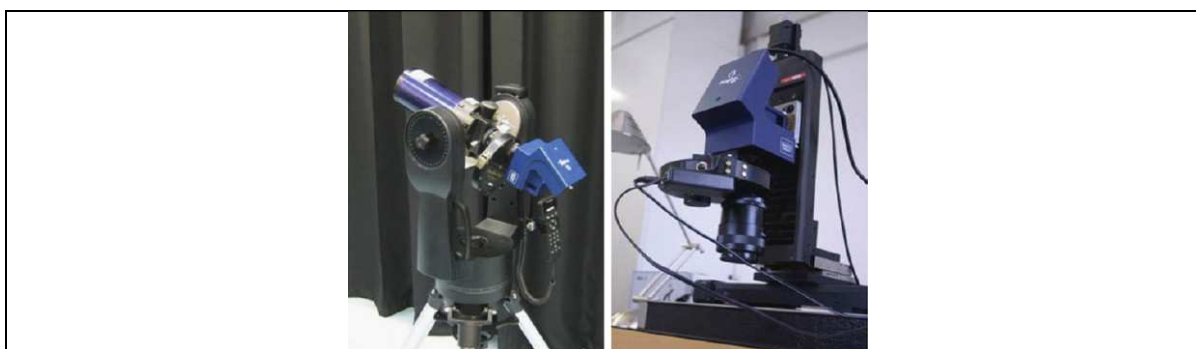


Figura 44: sistema de digitalização hiperespectral PRISMS.

À esquerda, sistema adaptado ao telescópio Meade ETX-90; à direita, sistema com objetiva fotográfica, adaptação para digitalizar documentos manuscritos. Fonte: Liang (2012, p. 320).

Dada a pouca literatura disponível publicada pelos autores, pelo menos até ao momento em que foram escritas estas linhas, alguns pormenores importantes sobre o sistema ficam por esclarecer. De igual modo, os seus criadores não apresentam ainda dados colorimétricos que comprovem a precisão colorimétrica do sistema. Mesmo assim, descrevem-se de seguida as principais características,

⁴⁵ Softwares baseados na tecnologia VSFM (do inglês *Visual Structure From Motion*), que produz modelos 3D fotogramétricos a partir da análise e processamento de fotografias ou de fotogramas de vídeo, desde que disponham de grande sobreposição entre fotografias.

2.- Enquadramento Teórico

que foram possíveis recolher até ao momento, para este sistema espectral (Liang, 2012; Liang, et al., 2010):

Resumo do sistema hiperespectral PRISMS:

<i>Detetores:</i>	<ul style="list-style-type: none">a) Sistema visível-infravermelho próximo: sensor digital CCD monocromático <i>Jenoptics</i>, refrigeração por sistema de Peltier (não foi especificado o modelo de câmara ou resolução espacial);b) Sistema infravermelho de onda curta: sensor InGaAs da <i>Xenics</i> (não foi especificado o modelo de câmara ou resolução espacial);
<i>Fontes de Luz:</i>	-
<i>Seleção de bandas:</i>	<ul style="list-style-type: none">a) Sistema visível- infravermelho próximo: roda seletora com 9 filtros óticos passa banda de 40 nm de largura de banda e um filtro de 70 nm de largura de banda; intervalo de cobertura do espetro EM (combinado com a sensibilidade do detetor) dos 400 nm aos 880 nm;b) Sistema infravermelho de onda curta: filtro sintonizável do tipo AOTF, da Gooch & Housego; largura de cada banda selecionável por controlo por computador, até 10nm de largura para cada banda; intervalo de cobertura do espetro EM (combinado com a sensibilidade do detetor) dos 900 nm aos 1700 nm;
<i>Outros:</i>	Objetiva fotográfica (para manuscritos) ou Telescópio Meade ETX-90 (para pintura mural), do tipo Maksutov-Cassegrain; inclui motores de corrente contínua de elevado torque, permitindo o comando eletrónico da posição a partir do controlador de mão (ou por computador); precisão dos movimentos angulares na ordem 1' a 3' de grau; abertura: 90 mm; distância focal:1250 mm; espelho primário e corretor Schmidt apresentam tratamentos com banhos antirreflexos;
<i>Resultados:</i>	Distância de trabalho: a partir dos 3,5 m; resolução espacial elevada a 10 m de distância do tema (na ordem de dezenas de μm por pixel); imagens finais de elevada resolução e possibilidade de obter informação 3D do relevo superficial da obra, através do uso de tecnologias fotogramétricas.

2.- Enquadramento Teórico

3.- Material e Métodos

Conteúdo do capítulo:

3.1- Introdução.....	161
3.2- Caracterização da fonte de luz.....	161
3.2.1- Sistema de iluminação e sua geometria:	162
3.2.2- Fonte de luz: a lâmpada SoLux	163
3.2.3- Propriedades espectrais da fonte de luz.....	165
3.2.4- Estabilidade e repetibilidade.....	167
3.3- Caracterização da objetiva.....	169
3.4- Câmaras digitais fotográficas D-SLR	172
3.4.1- Metodologia para caracterização dos sensores	176
3.4.2- Caracterização e seleção das câmaras	179
3.4.2.1- Nikon D70	179
3.4.2.2- Fujifilm Finepix IS Pro.....	182
3.4.2.3- Sigma SD-14	187
3.4.2.4- Nikon D300	191
3.5- Seleção dos filtros.....	195
3.5.1- Montagem e protocolo para caracterização dos filtros	196
3.5.2- Filtros caracterizados.....	197
3.5.3- Combinação dos filtros com o sensor	198
3.6- Alvo branco de referência.....	200
3.7- Alvo de cor	203
3.8- O espectroradiômetro de referência.....	204
3.9- O sistema Hiperespectral.....	205
3.9.1- Protocolo para digitalização Hiperespectral com o sistema final	212
3.9.2- Determinação da exposição em função do filtro e banda de espectro EM a selecionar	215

3.1- Introdução

A componente prática, com um peso muito importante nesta tese, implicou várias fases, quer na caracterização de equipamento, quer no desenvolvimento de montagens experimentais e metodologia para o seu uso. Neste capítulo, começa-se por descrever e caracterizar o equipamento utilizado, assim como os métodos experimentais para cumprir esse objetivo. No fim, apresentam-se as montagens utilizadas com o equipamento hiperespectral e descrição do seu uso.

3.2- Caracterização da fonte de luz

A iluminação desempenha um papel primordial nos sistemas de aquisição de imagem e necessita preencher os seguintes pré-requisitos (Hardeberg, 1999, p. 141):

- i. A **geometria**, segundo a qual se dispõe as fontes de luz, deve assegurar uma distribuição espacial homogênea do iluminante na zona a digitalizar. No caso de se pretender que a câmara seja usada para medições espectralfotométricas ou colorimétricas, deve ser utilizada a geometria recomendada pela CIE, tipicamente a geometria $45^{\circ}/0^{\circ}$, na qual o iluminante é posicionado formando um ângulo de 45° em relação à superfície do alvo, enquanto a observação ou registo da imagem (luz refletida) é realizada a 0° , relativamente ao mesmo plano (Wyszecki & Stiles, 2000, p. 155).
- ii. A **potência** da lâmpada deve ser suficiente para permitir a passagem de luz através dos filtros ópticamente mais densos. Tempos de exposição longos podem ser usados em alguns casos com a câmara fotográfica, para compensar a baixa intensidade luminosa, mas essa opção pode trazer problemas adicionais, tais como tempos de aquisição muito longos, tempos estes que se duplicam com a necessidade de

redução de ruído (ou grão) digital, realizado automaticamente pelo microprocessador da própria câmara, que recorre à extração de uma *dark frame*⁴⁶ de idêntica duração ao tempo de exposição à luz, utilizada na redução de ruído da imagem captada.

- iii. As **propriedades espectrais** da fonte de luz deverão assegurar uma boa cobertura de todo o espectro visível da radiação eletromagnética. Esta distribuição espectral do iluminante deverá ser suave, contínua ao longo de todo o espectro e sem picos acentuados.
- iv. A **estabilidade** e **repetibilidade** da irradiância⁴⁷ da fonte de luz é fundamental para se assegurarem medições e resultados fiáveis e precisos.

3.2.1- Sistema de iluminação e sua geometria:

Foram utilizados focos de iluminação montados em casquilhos do tipo PAR16, um tipo de suporte bastante comum para uso genérico e desenvolvido para lâmpadas de halogéneo de refletor tipo dicróico MR-16 de 12 Volt, de fixação com 2 pinos. Nestes suportes foram aplicadas palas modeladoras que evitam a reflexão de luz não utilizada nas zonas fora do alvo. A figura seguinte ilustra uma montagem com este tipo de casquilhos, onde foram aplicadas lâmpadas SoLux de 50 watt usadas no âmbito do presente trabalho e descritos nas secções 3.2.2 e 3.2.3.

⁴⁶ *Dark frame*: uma imagem capturada em idênticas condições às usadas no registo do objeto, mas em que não se expõe à luz o sensor, ficando assim registado um mapa do ruído resultante das longas exposições. Este mapa de ruído é usado para eliminar o grão da imagem de longa exposição. As câmaras digitais modernas podem realizar uma subtração de *dark-frame* automaticamente (Allen & Sophie Triantaphillidou, 2011).

⁴⁷ Irradiância, E_e : fluxo radiante incidente numa superfície, por unidade de área. Unidade: Watt por metro quadrado ou $W.m^{-2}$ (Hunt, 1998, p. 322). Não confundir com o conceito de :
Radiância, L_e : numa dada direção, num ponto no percurso de um feixe, é a intensidade radiante por unidade de área projetada (estando a área projetada em ângulo perpendicular ao da direção dada). Unidade: $E.sr^{-1}.m^{-2}$ (Hunt, 1998, p. 328).



Figura 45: Foco de iluminação PAR16 com lâmpada SoLux.
Fotografia por LBP.

Estes focos encontravam-se, consoante os casos, em número de 2 ou 4, a idênticas distâncias do alvo ou obra fotografados, posicionados a cerca de 45° e a uma distância variável do centro da mesma. A decisão sobre o número de focos a usar e a distância a que estes são colocados dependeu da área necessária a iluminar em cada caso; por exemplo, quando digitalizado o alvo de cor *X-Rite ColorChecker* em ambiente de estúdio, este apresenta dimensões de 21,59 cm x 27,94 cm, pelo que se usaram dois focos de luz posicionados a cerca de 1,6 m do alvo, um de cada lado, com um ângulo de 45° relativamente à superfície a zona a iluminar. Estes focos foram montados em tripés para iluminação de fotografia ou numa estrutura específica, com geometrias que se descrevem mais adiante na secção “3.9- O sistema Hiperespectral”, sub-capítulo onde se apresenta a conjugação de todos os elementos caracterizados.

3.2.2- Fonte de luz: a lâmpada SoLux

Para fonte de luz foram escolhidas lâmpadas SoLux de 50 watt e feixe de 35° de abertura, com temperatura de cor nominal de 4700 K (McGuire, 2008).

Este tipo de lâmpadas foi desenvolvido para uso em museus e para aplicações de colorimetria, pelo que apresenta características muito interessantes como iluminante de obras de arte, em especial se compararmos com outro tipo de fontes de luz, salvaguardando ao mesmo tempo a boa preservação das obras a digitalizar. Estes factos também poderão permitir que sejam bem aceites pelas instituições detentoras das obras de arte a digitalizar, instituições estas normalmente bastante cientes dos riscos do uso de sistemas mais invasivos ou que utilizem fontes de iluminação prejudiciais para a conservação das obras.

Patenteadas pelo seu inventor, Kevin McGuire, as SoLux consistem num melhoramento e evolução das vulgares lâmpadas de halogéneo⁴⁸ com o padrão MR-16 (de 12 V, fixação por dois pinos, muito usadas em iluminação de montras e tetos falsos) mas com um filamento e um refletor especiais (McGuire, 2008), em que o filamento é posicionado de uma forma diferente do das lâmpadas comuns, prologando-se verticalmente relativamente ao centro do refletor (em vez de horizontalmente), o que permite, segundo o fabricante, que 98% da luz emitida pelo filamento chegue ao refletor (nas lâmpadas com filamento na posição clássica, apenas 50% dessa luz atinge o refletor). O refletor, com revestimentos dicroicos especiais estudados para o efeito pretendido, vai selecionar os comprimentos de onda a serem refletidos conseguindo-se desta forma que a distribuição espectral seja corrigida tornando-se mais homogénea ao longo de todo o espetro emitido pelo filamento, de modo a aproximar-se o mais possível da luz Solar.

A ilustração do Anexo A, disponível no sítio na Internet do fabricante, é bastante explicativa das inovações técnicas trazidas por este tipo de lâmpada.

⁴⁸ Lâmpadas de filamento de tungsténio dentro de uma cápsula, de vidro ou quartzo, cheia de gás xénon a alta pressão - em vez de vácuo, como acontece nas lâmpadas de filamento vulgares.

3.2.3- Propriedades espectrais da fonte de luz

Embora as lâmpadas SoLux se apresentem disponíveis no mercado com diferentes potências, aberturas de feixe e temperaturas de cor, optou-se no presente trabalho pela versão de 4700 K, uma vez que segundo vários especialistas independentes (Bradfield, 2007), podemos obter com estas a melhor aproximação ao iluminante D50, entre a variedade de tipos de fonte de luz artificial produzidos pelo Homem até ao presente, com um CRI⁴⁹ de 99,35.

A curva do gráfico de distribuição de energia espectral, ou SPD⁵⁰, apresentada por este tipo de lâmpadas é suave, contínua e sem interrupções nem picos abruptos, como se pode observar na figura seguinte. Por isso mesmo o fabricante refere que o SPD destas lâmpadas se aproxima bastante às características espectrais da luz Solar (McGuire, 2008).

⁴⁹ CRI: do inglês *Color Rendering Index* Trata-se de uma medida quantitativa da capacidade de uma fonte de luz para reproduzir as cores de vários objetos fielmente, quando em comparação com uma fonte de luz natural, ou ideal.

⁵⁰ SPD: do inglês *Spectral Power Distribution*, e descreve a potência por unidade de superfície por unidade de comprimento de onda de uma fonte de luz. Em português podemos traduzir como “Distribuição de Energia Espectral”, referindo-se este parâmetro aos diferentes níveis de intensidade que uma fonte de luz apresenta, distribuídos ao longo do espetro eletromagnético.

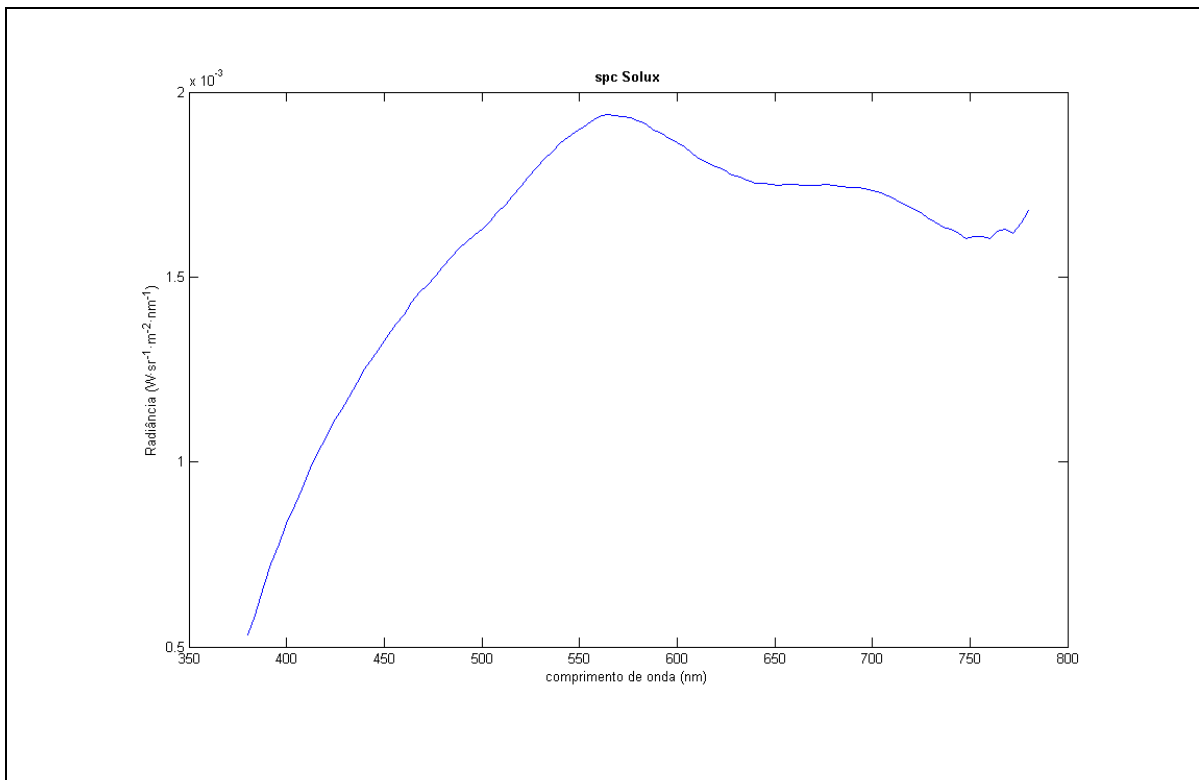


Figura 46: Gráfico da Distribuição de Energia Espectral de uma lâmpada Solux.

Medição realizada com um espectrorradiômetro PR650, luz refletida num alvo branco padrão da Labsphere. Ilustração por LBP.

Estas lâmpadas permitem ainda rejeitar grande parte da componente de radiação infravermelha a qual, em vez de ser refletida pelos revestimentos dicróicos do refletor, passa por estes e é expelida da zona a iluminar. A radiação ultravioleta é igualmente eliminada mas, neste caso, pela presença de um filtro adequado a este fim, colocado na zona frontal da lâmpada.

A radiação não-visível, emitida pelas Lâmpadas SoLux de 4700 K, resulta por isso muito baixa (McGuire, 2008):

- i- U.V.-A: cerca de 39,63 microwatts/lúmen;
- ii- U.V.-B: cerca de 2,36 microwatts/lúmen;
- iii- I.V. próximo: redução de cerca de 58% do espectro emitido pelo filamento da lâmpada.

3.2.4- Estabilidade e repetibilidade

O padrão de distribuição da intensidade luminosa do feixe de luz emitido pelas lâmpadas SoLux é bastante uniforme e não chega a exibir os efeitos de pontualidade central de outras lâmpadas incandescentes de tipo MR-16. Mesmo assim, ao se posicionar as lâmpadas nas geometrias referidas na secção 3.2.1, esteve sempre presente o cuidado de se verificar a homogeneidade da intensidade de luz incidente na zona a digitalizar, através do uso de um fotómetro (exposímetro, de tipo fotográfico), com medição de luz incidente Sekonic LS-308B, com cúpula plana de medição “Lumidisc” aplicada. Munido desta cúpula o sensor de leitura passa a ser do tipo cosseno e permite uma medição parcial da luz que incide no objeto a digitalizar; no caso da cúpula hemisférica, padrão neste fotómetro, o sensor de leitura funciona como sendo do tipo cardioide e recebe luz ambiente vinda de qualquer direção (num ângulo aproximadamente de 180°), tornando-se mais difícil verificar pequenas diferenças na distribuição da luz que alcança a zona a digitalizar

Para cobrir áreas maiores na zona a digitalizar, assim como para evitar as assimetrias quando se usa apenas um foco como fonte de luz, todas as geometrias recorreram sempre à combinação de várias lâmpadas em simultâneo, em números de 2 ou de 4, havendo o cuidado de as posicionar e orientar para que toda a zona recebesse luz de forma o mais homogénea possível. Conseguiram-se diferenças de iluminação inferiores a 1/10 de EV ⁵¹, quando a montagem de iluminação usava 2 focos (configuração 1) e até 3/10 de EV (aprox. igual a 1/3 de EV) em áreas maiores, como no exemplo da configuração 3, que usava 4 focos. Esta última diferença de cerca de 1/3 de EV já é significativa, razão pela qual foram ainda efetuadas algumas tentativas no sentido de se conseguir homogeneidade na distribuição de luz, através de uso de difusores em frente dos focos, mas constatou-se que estes provocavam um aumento dos brilhos especulares, o que inviabilizava o seu uso. Além do mais, os difusores

⁵¹ Do inglês “*Exposure Value*”. Trata-se de uma unidade de medição de exposição, usada em fotografia.

(folhas brancas, neutras, de poliéster) faziam com que se perdesse alguma intensidade luminosa, prologando os tempos de exposição (já de si longos, com os filtros mais densos).

Como o objetivo da presente tese era validar essencialmente um novo tipo de sensor, comparando-o com os dados fornecidos pelo espectrorradiómetro de referência, e como ambos os equipamentos (sensor da câmara reflex e espectrorradiómetro) iriam efetuar medições em idênticas condições de iluminação, não se considerou pertinente explorar outras alternativas para conseguir maior homogeneidade da distribuição da luz na zona iluminada, já que ambos os equipamentos estariam a registar exatamente nas mesmas condições de iluminação. Esta questão constitui, porém, um desafio para investigações futuras, como consta no capítulo 5.

Como foi referido acima, para a medição da luz foi usada a escala *EV* ou *Exposure Value*, escala esta que foi proposta pelo alemão Friedrich Deckel na década de 50 do séc. XX (Jacobson, et al., 2000, p. 318) com o intuito de simplificar a escolha de combinações de “velocidade de obturação / aberturas de diafragma” que permitam a mesma exposição. Uma unidade de EV corresponde a um “*stop*” ou “ponto” fotográfico, i.e., doses de luz que são potências de 2 (cada vez que aumentamos 1 EV, duplicamos a exposição; se reduzimos 1 EV à exposição, reduzimos esta para metade), em que para uma sensibilidade (do sensor ou emulsão fotográfica) de 100/24 °ISO, corresponde 2,5 Lux. Ou seja, a exposição “correta” de um sensor com sensibilidade 100/24 °ISO, a registar uma cena iluminada com 2,5 lux (ou 0 EV) de iluminância, seria de 1 segundo de tempo de exposição com uma abertura de diafragma de f/1,0 (ou qualquer outra combinação do binómio “abertura de diafragma / velocidade de obturação” que lhe seja equivalente). Sendo assim, sempre que necessário podemos converter

EV em Lux como medida de iluminância⁵² (Jacobson, et al., 2000), usando para tal a seguinte fórmula: $E=2,5 \times 2^{EV}$ (em que “E” = “iluminância”).

Para se obter estabilidade e repetibilidade nos níveis de iluminação da fonte de luz, houve o cuidado de só iniciar os trabalhos em cada sessão após um período de aquecimento de pelo menos meia hora, aquecimento esse que se obteve ligando as lâmpadas (assim como o restante equipamento) à energia elétrica durante este tempo. A boa estabilidade foi confirmada através do fotómetro fotográfico e foi possível constatar que, em condições normais e após esse tempo de aquecimento inicial, as lâmpadas mantinham o seu nível de intensidade, pelo menos com a precisão possível de detetar pelo fotómetro. A precisão do fotómetro utilizado é inclusivamente superior às diferenças de luz possíveis de medir pelo fotómetro interno das câmaras fotográficas, já que o fotómetro Sekonic utilizado deteta diferenças de luz na ordem de 1/10 de EV, enquanto o fotómetro interno, incorporado nas câmaras fotográficas, apenas assinala diferenças de 1/3 de EV.

3.3- Caracterização da objetiva

A objetiva utilizada no presente trabalho é especialmente concebida para o registo de imagens multiespectrais, no espectro visível, ultravioleta e infravermelho, e adequada a câmaras reflex digitais (D-SLR) com montagem de baioneta F (câmaras fotográficas Nikon e suas compatíveis).

Tratando-se de uma “*Coastal Optics UV-VIS-IR 60mm 1:4 Apo Macro*”, esta objetiva apresenta as seguintes especificações (CoastalOptics, 2006):

⁵² Iluminância, *E*: Fluxo luminoso por unidade de área incidente numa superfície. Unidade: lux, lx (Hunt, 1998, p. 322). Não confundir com o conceito de:

Luminância, *L*: numa dada direção, num ponto no percurso de um feixe, é a intensidade luminosa por unidade de área projetada (estando a área projetada em ângulo perpendicular ao da direção dada). Unidade: cd.m² (Hunt, 1998, p. 323).

- Distância Focal: 60 mm
- Gama de aberturas: f/4 -f/45
- N.º de Elementos/Grupos óticos: 10/9
- 5 elementos de fluoreto de cálcio
- Maior formato possível: 24 x 36 mm
- Banda de Transmissão: 290 – 1500 nm
- Banda de Transmissão Apocromática: 315 – 1100 nm
- Gama de distâncias de focagem: 264 mm – Infinito
- Razão de reprodução máxima: 1:1.5
- Tipo de baioneta: Nikon F
- Tipo de rosca para filtros: M 52 x 0.75
- Tipo de focagem: manual



Figura 47: Objetiva Coastal Optics 60mm f/4 UV-VIS-IR Apo Macro.
A objetiva encontra-se aplicada numa reflex digital Fuji ISPRO (com sensibilidade espectral UV e IV). À frente da lente aplicou-se uma roda de filtros óticos. Fotografia por LBP.

Estas especificações justificam a sua eleição para a realização dos presentes trabalhos: concebida para câmaras digitais reflex - caso das câmaras que foram alvo do estudo -, apresenta-se apocromática dos 350 aos 1100 nm, ou seja, não é preciso qualquer correção de focagem ao variarmos o comprimento de onda da fonte de luz ou da filtragem aplicada, dentro desta banda. Pode ser mesmo efetuada a focagem manual, usando luz visível, antes de se aplicar qualquer filtro e sabemos que as imagens encontrar-se-ão no final focadas e nítidas em qualquer banda espectral, sem necessidade de qualquer correção de foco, pelo facto de esta ser apocromática numa gama tão ampla - também em bandas invisíveis do UV e IV, se fosse caso disso -, ao contrário do que acontece com outro tipo de objetivas de uso mais generalista. Esta característica, muito importante e rara em lentes fotográficas, deve-se ao seu desenho ótico especial, dispondo de 5 elementos de fluoreto de cálcio. A presença deste material na composição de alguns elementos de lente permite que esta seja igualmente adequada ao registo de radiação ultravioleta, sem recurso a elementos de quartzo e o facto de ser apocromática torna possível que a qualidade ótica seja também muito elevada, com valores de MTF⁵³ altos, como consta nas próprias informações fornecidas pelo fabricante (Anexo B).

Embora seja possível, com esta objetiva, a transmissão de radiação numa banda ainda mais ampla (290 – 1500 nm), tal não acontece no intervalo em que é apocromática, ou seja, tornar-se-ia necessária a correção de focagem nos extremos desta banda. No entanto, sempre que se usem câmaras digitais do tipo D-SLR - o que é o caso no presente trabalho - não se justifica usar radiação fora do intervalo onde esta objetiva é apocromática, uma vez que os sensores deste tipo de câmaras, por serem feitos de silício, apresentam uma sensibilidade espectral dentro deste mesmo intervalo (CoastalOptics, 2006).

⁵³ MTF: do inglês *Modulation Transfer Function*. É uma medida da resolução permitida por um sistema ótico (Allen & Triantaphillidou, 2011, pp. 443-451; Langford & Bilissi, 2008, pp. 48-51).

Para evitar reflexos internos nos elementos da objetiva, estes apresentam banhos especiais antirreflexo, alguns dos quais concebidos para as regiões UV e IV do espectro EM, característica particularmente importante quando a objetiva é usada no registo deste tipo de radiação.

No âmbito desta tese foi utilizada apenas radiação visível (ou seja, luz), embora na fase inicial do projeto se tenha equacionado a utilização de radiação não visível. O uso deste último tipo de radiação mostrou-se inviável por limitações de equipamento: o espectralradiómetro de referência, assim como o sensor da câmara selecionada, só operam em boas condições na gama visível do espectro EM. No entanto, pela excelente qualidade permitida pela objetiva Coastal Optics e face às suas potencialidades no que se refere a possíveis trabalhos futuros noutras bandas do espectro, optou-se por manter a decisão de utilizar esta lente nos trabalhos desenvolvidos, embora qualquer outra lente fotográfica de boa qualidade (de preferência do tipo “macro”) fosse igualmente utilizável.

Para consultar outras informações e mais especificações para esta objetiva (como por exemplo, as curvas MTF, que mostram a elevada resolução e qualidade ótica da lente), consultar o Anexo B, onde se reproduz um panfleto informativo do fabricante.

3.4- Câmaras digitais fotográficas D-SLR

A câmara fotográfica digital do tipo D-SLR⁵⁴ usada no estudo em apreço selecionou-se de um conjunto de quatro câmaras disponíveis e cujo leque de diferenças quanto às suas características individuais poderiam justificar a sua utilização. Em todos os modelos fez-se o estudo da sensibilidade espectral do

⁵⁴ D-SLR: do inglês *Digital Single Lens Reflex*, ou, em português, câmaras do tipo “Reflex Digital de Lente Única” (referentes ao modo como o visor ótico da câmara funciona, através de imagem refletida por um espelho).

sensor e cruzou-se esta com a transmitância dos filtros disponíveis (ver secção “3.5- Seleção dos filtros”, sobre os filtros escolhidos e estudados).

O que determinou a escolha final do modelo de câmara foi, em primeiro lugar, alguns critérios técnicos como a qualidade da imagem, a ausência de grão, a seleção de bandas possíveis (número e qualidade das bandas), mas também se ponderou em seguir alguns critérios práticos quanto à sua utilização, como por exemplo, dois dos modelos, de características mais profissionais, permitem tempos de exposição de vários minutos ou horas, possibilitarem também a conexão a um computador - passando assim a ser possível comandá-las remotamente por *software* e, assim, permitir a regulação de parâmetros da câmara, da exposição, pré-visualização de enquadramentos no ecrã do computador, descarregar imediatamente ficheiros facilitando a sua organização e pós-tratamento -, entre outras possibilidades. As duas câmaras de características menos profissionais, pelo contrário, além de não apresentarem estas características, não permitem o uso de tempos de exposição superiores a 30 segundos, necessários no presente trabalho para se tirar partido de alguns dos filtros usados.

A utilização de câmaras do tipo D-SLR pode apresentar vantagens técnicas, mas também algumas desvantagens, quando as comparamos com câmaras científicas de laboratório. No que respeita às vantagens, pode-se referir principalmente o uso simplificado em muitas questões técnicas, pelo facto das D-SLR se configurarem como equipamentos destinados a um público amplo, de utilizadores com ou sem qualquer formação técnica/científica na área de sensores, mas mesmo assim captarem ficheiros de imagem com qualidade; estes ficheiros, mesmo quando no formato RAW (que se pressupõe conterem os dados registados “em bruto”, tal como virão do sensor) apresentam já algum tipo de tratamento do sinal, realizado pelo microprocessador integrado na câmara, tratamento este que resolve ou corrige alguns problemas relativamente a parâmetros ou limitações do sensor, como por exemplo a remoção do ruído devido a exposições muito longas,

mapeamento e interpolação de pixéis inativos⁵⁵ quando estes existem, etc. De outro modo, as imagens fornecidas pelas D-SLR de uso comercial são “limpas” deste tipo de defeitos ou artefactos dos sensores e os tratamentos/correções são realizados pelo processador da câmara de forma automática e de uso “transparente” para o utilizador, i.e. estas operações não são perceptíveis nem requerem a intervenção direta do utilizador, ao contrário do que acontece com sensores de câmaras de uso científico, o tipo mais utilizado na maioria dos trabalhos de referência para esta tese e em que os utilizadores têm que estabelecer procedimentos para resolver ou minimizar esse tipo de imperfeições (Ferreira, 2010; Hardeberg, 1999; Francisco H. Imai, 1998).

Relativamente às desvantagens para o uso científico das D-SLR, talvez a principal seja o facto da maioria dos modelos deste tipo de câmaras recorrer à presença permanente de um CFA (*Colour Filter Array*). Designa-se por CFA o conjunto de filtros de cor que se encontram à frente dos pixéis ou fotodíodos, conferindo ao sensor digital a possibilidade de distinguir a informação das três cores da tricromia (nos modelos mais habituais com as cores vermelho, verde e azul), necessário ao registo de imagens a cores. O tipo de CFA mais utilizado na maioria dos modelos de câmaras digitais e eletrónicas tricromáticas segue um esquema de organização conhecido como mosaico de Bayer ou filtro de Bayer, em homenagem ao cientista (dos laboratórios Kodak) Bryce Bayer, que inventou e patenteou este filtro em 1976 (Havlik, 2012), inspirado no modo de funcionamento do olho humano.

O CFA presente no sensor das câmaras digitais a cores deve ser tido em conta na imagiografia espectral quando se efetua a seleção das bandas do espectro a medir e no cruzamento dessa informação com a transmissão dos filtros que irão ser aplicados ao sistema. Este trabalho é ainda dificultado à partida pela ausência

⁵⁵ Pixéis inativos ou *Hot-pixels* são fotodíodos no sensor que, por alguma razão, não funcionam em boas condições; quase sempre devido a defeitos de fabrico, por razões de viabilidade económica são difíceis de prevenir ou evitar durante a sua produção. O nome em língua inglesa advém do facto de estes pixéis se visualizarem na imagem final produzida pelo sensor como pontos brancos ou claros. Nas câmaras para uso comercial, os fabricantes mapeam estes pixéis e, por interpolação, retiram-nos das imagens finais.

de informação disponibilizada ao público, por parte de quase todos os fabricantes, quanto a alguns dados técnicos importantes do sensor (principalmente quanto à sensibilidade espectral por canal de cor), possivelmente por considerarem esse tipo de informação segredo industrial ou de patente, ao contrário do que acontece com as câmaras científicas de laboratório, cujos fornecedores não se coíbem de publicar esse tipo de dados.

Mesmo a organização dos pixéis R (*Red* = Vermelho), G (*Green* = Verde) e B (*Blue* = Azul) no CFA pode apresentar-se com ordenação variável, aspeto que também não é publicado pelos fabricantes mas que pode ser identificado com alguma experimentação - e processamento por programação com o MatLab - ou com um *software* adequado à conversão dos ficheiros RAW como por exemplo o DCRaw, usado no âmbito desta tese, e que permite identificar esta mesma ordenação dos pixéis.

Na figura seguinte podemos observar um esquema representativo do padrão da grelha de filtros de cor do sensor da câmara do tipo D-SLR da Nikon, modelo D300 - eleita para o sistema hiperespectral usado no âmbito desta tese. O padrão de repetição mínimo é um quadrado de 2x2 pixéis (destacado na ilustração com linhas tracejadas, a amarelo), em que existe 2 pixéis verdes (G) para cada um dos azuis (B) e dos vermelhos (R). A ordem deste padrão pode, simplifcadamente, descrever-se da esquerda para a direita e de cima para baixo e que, neste caso, se apresenta como RGGB. É esta ordem que pode variar consoante o modelo de câmara, como se comprova no texto da próxima secção do presente capítulo.

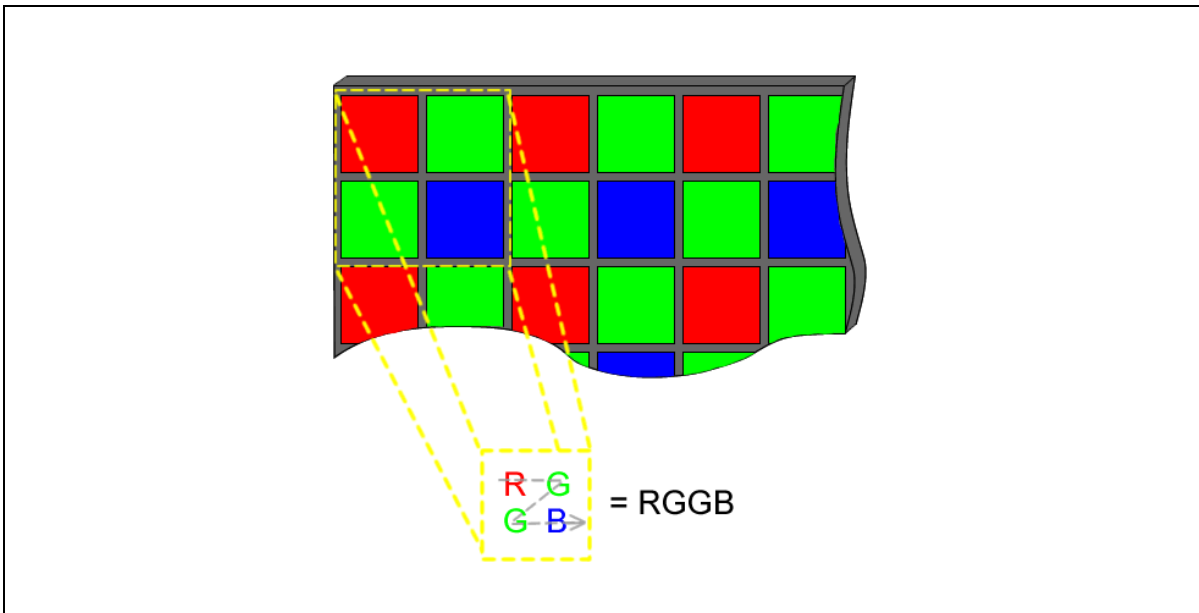


Figura 48: Padrão do “Colour Filter Array” em mosaico de Bayer do sensor da Nikon D300. Os elementos constituintes do esquema não se apresentam à escala nem são uma representação rigorosa, mas apenas esquemática. Ilustração por LBP.

Por isso, para ser viável no presente trabalho o uso deste tipo de câmaras, foi necessário em primeiro lugar caracterizar cada uma das D-SLR, principalmente no que diz respeito à sensibilidade espectral dos respetivos sensores.

3.4.1- Metodologia para caracterização dos sensores

Para caracterizar a sensibilidade espectral dos sensores, recorreu-se a um filtro de interferência sintonizável de cristais líquidos (doravante referido apenas como “filtro TFT”), modelo VariSpec VIS-10, da Cambridge Research & Instrumentation, Inc . Com uma abertura de 35 mm e um campo de visão de aproximadamente 7°, este filtro de interferência de elevada precisão, permite selecionar uma gama de comprimentos de onda entre os 400 e os 720 nm em intervalos de 1,5 ou 10 nm (Ferreira, 2010, p. 100). Este interessante filtro, com grande potencial e precisão na seleção de bandas do espectro EM, seria muito útil à digitalização hiperespectral, mas no presente estudo apenas foi usado na caracterização dos sensores (sem esta ferramenta, esta tarefa seria difícil de cumprir), uma vez que o seu uso não se enquadrava nos objetivos propostos. Depois de caracterizar o sensor, com o

presente sistema hiperespectral montado, o recurso a este filtro torna-se desnecessário.

Foi criada uma montagem, esquematizada na figura seguinte, que integra um alvo branco da Labsphere (ref.^a SRT-99-020), iluminado por duas lâmpadas Solux montadas em casquilhos PAR16. À frente da objetiva da câmara D-SLR, encontra-se o filtro TFT sintonizável.

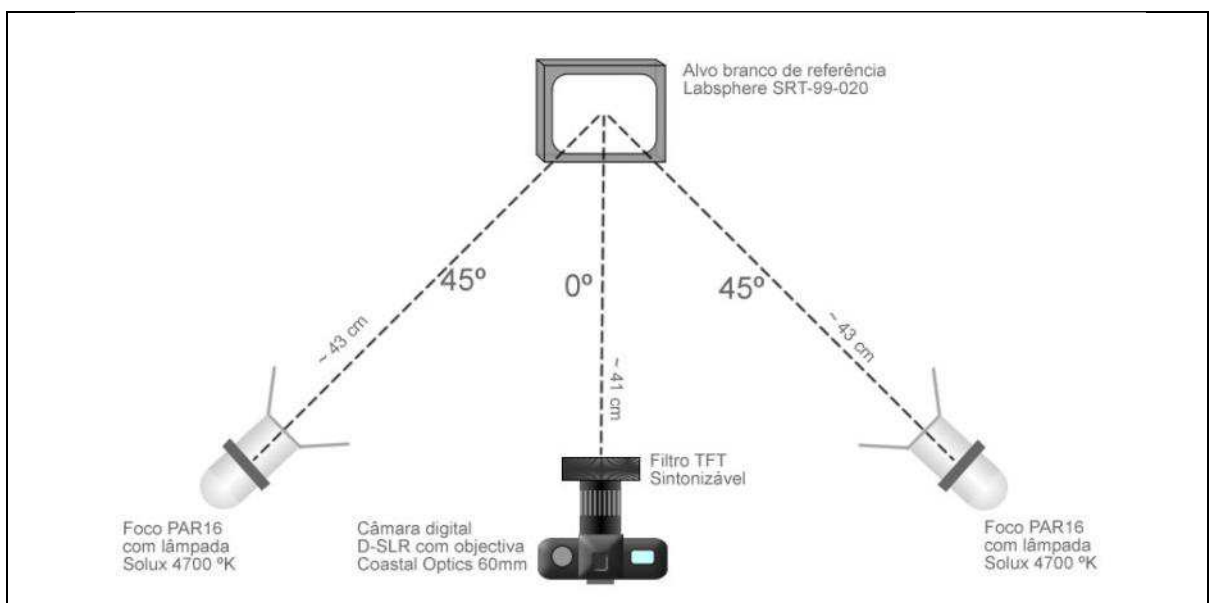


Figura 49: Esquema explicativo da montagem usada para caracterização dos sensores das D-SLRs.

Os elementos constituintes do esquema não se apresentam à escala nem são uma representação rigorosa, mas apenas esquemática. Ilustração por LBP.

Depois, seguiu-se o seguinte protocolo:

- i. A câmara D-SLR, cujo sensor se quer caracterizar, foi colocada na posição do observador segundo a geometria $45^{\circ}/0^{\circ}$ - geometria recomendada pelo CIE, explicada já anteriormente na secção 3.2 - bem como dois focos iluminantes PAR16 com lâmpadas Solux, tendo como alvo a superfície refletora difusa branca Labsphere, como se pode observar na figura anterior;

- ii. Com esta montagem, incluiu-se o filtro TFT sintonizável supracitado, em frente da lente da câmara; este foi programado para funcionar como filtro passa banda permitindo assim, com um passo de 10 nm, selecionar 33 bandas do espectro visível de cada vez, entre os 400 aos 720 nm;
- iii. Captou-se, com a D-SLR, 33 imagens monocromáticas entre os 400 e os 720 nm, em intervalos de 10 nm, através do filtro TFT; os tempos de exposição são fixos (na Nikon D300, 1/8 segundo); o tempo de exposição foi determinado, com o filtro TFT sintonizado aos 550 nm (a banda em que este apresenta maior transmitância, evitando assim atingir-se a saturação do sensor), medindo com o fotômetro interno TTL⁵⁶ o alvo branco de referência e compensando cerca de + 2 E.V. (o que dá uma leitura idêntica à medição, sem qualquer compensação, num cartão cinza a 18% da Novoflex), em modo pontual; outras regulações das D-SLR: abertura do diafragma f/4, sensibilidade 200 °ISO, balanço de brancos personalizado realizado diretamente no branco de referência, antes da colocação do filtro TFT;
- iv. Cada um dos 33 ficheiros de imagem captados, descritos no ponto anterior, foi gravado pela câmara em formato RAW; depois estes foram convertidos, com pós-produção no computador, em ficheiro de formato TIFF;
- v. Removeu-se o filtro TFT e a D-SLR e colocou-se no lugar destes o espectroradiómetro descrito no subcapítulo 3.8; com este foi medida a distribuição de potência espectral entre os 380 e os 780 nm em intervalos de 4 nm, sobre a superfície branca de referência para cada comprimento de onda;
- vi. Considerando valores médios das intensidades, numa área de cada imagem onde a distribuição da potência espectral do iluminante foi medida - através do espectroradiómetro – a sensibilidade espectral de cada um dos canais RGB da D-SLR foi calculada, usando a seguinte equação:

⁵⁶ TTL: do inglês *Trough The Lens*, refere-se ao fotômetro ou exposímetro interno de uma câmara D-SLR, que mede a luz através da objetiva da câmara.

$$S(\lambda) = \frac{\overline{I(\lambda)area}}{t(\lambda) \sum_{380}^{780} R(\lambda)\Delta(\lambda)} \quad (3.1)$$

Onde $S(\lambda)$ representa a sensibilidade espectral estimada, $\overline{I(\lambda)area}$ o valor médio das intensidades sobre a área medida, $t(\lambda)$ o tempo de exposição para cada comprimento de onda (no presente caso, foi sempre o mesmo tempo) e $R(\lambda)$ a distribuição de radiância espectral medida com o espectralradiómetro sobre a superfície branca de referência.

Os resultados obtidos para cada uma das D-SLR apresentam-se nos respetivos gráficos das figuras intituladas “Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara”, no subcapítulo seguinte.

3.4.2- Caracterização e seleção das câmaras

3.4.2.1- Nikon D70

A Nikon D70 foi um dos primeiros modelos de câmaras D-SLR que a Nikon disponibilizou a um preço economicamente acessível a um público vasto, apresentando no entanto uma elevada qualidade nas imagens que produz, comparáveis às que são obtidas por modelos de câmaras profissionais da mesma geração. Por estas razões, este modelo tornou-se bastante difundido e amplamente utilizado em centros de investigação e de documentação de obras de Arte (oficinas de Restauro, gabinetes técnicos de Museus, etc.). A Nikon D70 foi o primeiro modelo de D-SLR usado no Centro de Restauro da Escola das Artes da Universidade Católica Portuguesa, mas é do nosso conhecimento que também foi usado nos gabinetes técnicos de museus como Thyssen-Bornemisza e no Museu do Prado, em meados da década passada. Acredita-se que terá sido usado em muitas outras instituições pelo mundo todo, pelas mesmas razões já referidas acima.

A Nikon D70, ainda hoje em dia, apresenta algumas características interessantes, como por exemplo sensibilidade espectral à radiação UV e IV - mesmo sem se recorrer à modificação da câmara -, tipos de radiações não visíveis mas que são possíveis de se registrar fazendo uso deste modelo de câmara e das técnicas adequadas. Comparando com a geração anterior de D-SLRs, a Nikon D70 apresenta já uma excelente redução de ruído em fotografias de longa exposição.

Características técnicas da Nikon D70 (DxOMark, 2004):

Data de anúncio de lançamento:	2004-01-28
Tipo de Sensor:	CCD
Resolução:	3040 x 2014
Fotodetetores no Sensor (Mpix):	6,12
Tamanho do sensor (mm):	16,0 x 24,0
<i>Color Filter Array</i> :	RGB, mosaico de Bayer
Tamanho do pixel ou <i>Pixel pitch</i> (μm):	7,8
<i>Bits</i> por pixel:	12
Profundidade de cor (<i>Color Depth</i> , em <i>Bits</i>):	20,4
Gama dinâmica (<i>Dynamic Range</i> , em EVs):	10,3
Razão de proporção do formato:	3:2
Fator de multiplicação do formato ⁵⁷ :	1,5
Gama de sensibilidades ($^{\circ}$ ISO):	200 - 1600
Gama de veloc. de obturação (segundos):	1/8000 - 30
Visor eletrônico em tempo real (<i>Live view</i>):	Não
Montagem da lente:	Nikon F (DX)
Cabo disparador:	Não
Alimentação de corrente elétrica externa:	Sim
Possibilidade de controlar por software:	Não

Grelha de pixels do Sensor (informação lida com o *software* DCRaw, a partir de uma imagem captada pela câmara em formato RAW):

Tamanho da miniatura de previsualização: 3008 x 2000
Tamanho total de fotodíodos: 3040 x 2014
Tamanho da imagem: 3039 x 2014

⁵⁷ Fator de multiplicação que se usa para calcular qual seria a distância focal equivalente ao formato de 35mm (ou 135), em película analógica ou sensor digital *full frame* (com tamanho idêntico ao formato 135).

Tamanho à saída (*output*): 3039 x 2014

Cores no ficheiro Raw: 3

Padrão do CFA: BGGR

Multiplicadores para temperatura de cor “Luz de dia” (por canal R, G e B):

2.458272 0.928173 1.258317

No gráfico da Figura 50, representa-se a sensibilidade espectral do sensor deste modelo de câmara. O sensor apresenta sensibilidade no canal vermelho mesmo acima dos 700 nm, o que demonstra a existência de contaminação por radiação infravermelha, mesmo quando as imagens captadas forem na banda de luz visível - um facto que é típico das câmaras digitais comerciais desta geração.

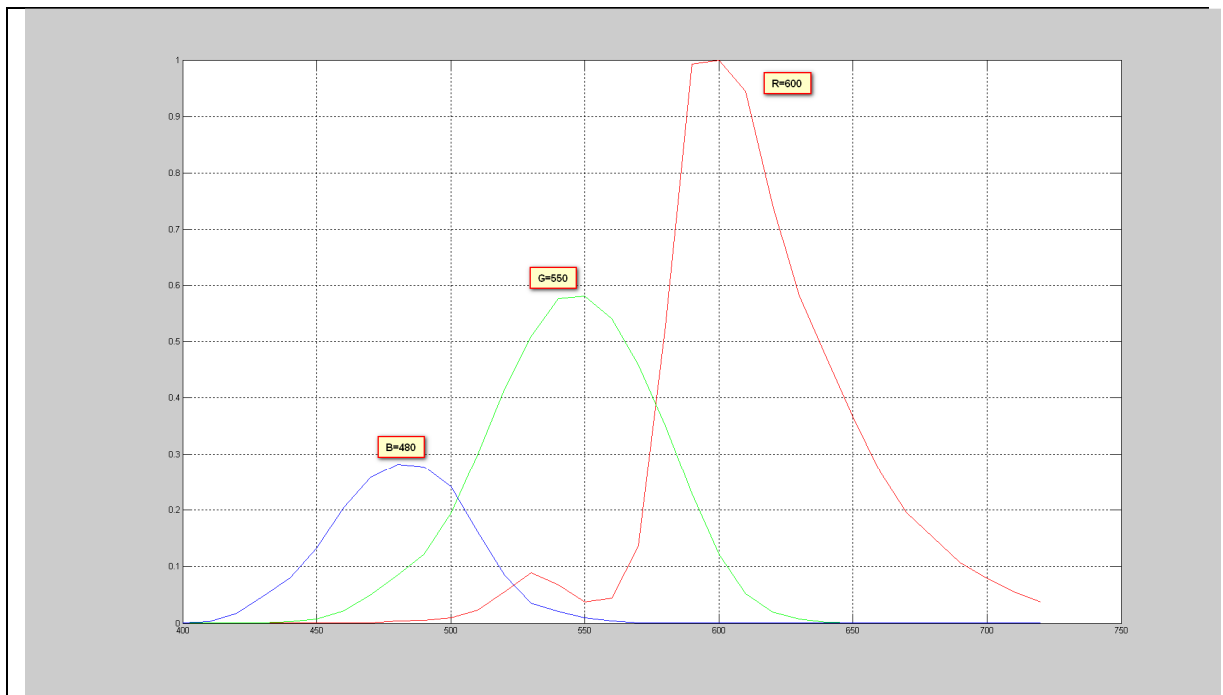


Figura 50: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Nikon D70. *Eixo dos X:* comprimento de onda da radiação eletromagnética (nm); *Eixo dos Y:* Sensibilidade Espectral Relativa do sensor; *Azul:* canal B; *Verde:* canal G; *Vermelho:* canal R. Picos de sensibilidades máximas: “B=480” (canal B, aos 480 nm); “G=550” (canal G, aos 550 nm); “R=600” (canal R, aos 600 nm). Ilustração por LBP.

Logo à partida, independentemente da informação sobre as bandas possíveis de obter com os filtros testados (secção “3.5- Seleção dos filtros”), não se optou por este modelo de câmara pelas seguintes razões:

- i. inexistência de ligação a cabo disparador (este modelo apenas permite comando remoto por infravermelhos, menos versátil e gastador de pilhas elétricas);
- ii. impossibilidade de ser controlado por computador/software (ligação USB possível, mas apenas para descarga de ficheiros);
- iii. dificuldade de obtenção de tempos de exposição superiores a 30 segundos (com ausência de cabo, a posição “Bulb” do obturador, destinada a tempos de exposição longos, torna-se difícil de acionar remotamente);
- iv. tempos de exposição superiores a 15 segundos apresentarem ruído (grão), visível nas imagens produzidas;
- v. inexistência de *Live Preview*, útil para confirmar enquadramento ou focagem, quando o visor ótico não for acessível;
- vi. suscetibilidade à contaminação por radiação infravermelha, que potencialmente reduzirá a precisão dos registos (embora esta questão pudesse ser atenuada com o uso de mais um filtro externo, mas que iria tornar o sistema ainda mais complexo).

3.4.2.2- Fujifilm Finepix IS Pro

A primeira D-SLR que se pensou usar no presente trabalho foi este modelo câmara (que se pode observar na “Figura 47: Objetiva Coastal Optics 60mm f/4 UV-VIS-IR Apo Macro.”), pelo facto de ser uma das raras câmaras que o próprio fabricante fornece já preparada para registo de radiação infravermelha e ultravioleta, bandas de radiação estas que inicialmente se considerou incluir no sistema de análise multiespectral em desenvolvimento. No entanto, verificou-se que na prática não seria a melhor opção, uma vez que o nosso espectroradiómetro de referência também só permite trabalhar na banda visível do espectro EM e, nesta banda, este modelo não foi o que demonstrou ter melhores características.

O aspeto que mais se destaca nas curvas de sensibilidade espectral do sensor (“Figura 51: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Fujifilm IS Pro.”) é a forte ascensão no canal vermelho, resultado da alta sensibilidade (ou contaminação) pela radiação infravermelha. Mesmo com a aplicação de um filtro B+W 486 (designado “UV-IR cut”), a mesma curva continua a não apresentar um pico no canal vermelho, mas sim uma curva com três picos neste canal (“Figura 52: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Fujifilm IS Pro, c/ filtro B+W486 IR-UV cut aplicado à frente da lente.”). Este comportamento do sensor, tão interessante para aplicações fotográficas, revelou-se menos interessante no que diz respeito à seleção dos filtros para separação de bandas, como se explica mais adiante na secção sobre a seleção de filtros (“3.5- Seleção dos filtros”). Não fossem estes factos, esta câmara teria ainda como mais valia o facto de apresentar uma fotometria moderna, assim como a gama dinâmica mais ampla do conjunto de câmaras testado (DPReview, 2007), a possibilidade de conectar a um computador e poder ser controlada por *software*, entre outros aspetos. Listam-se de seguida algumas características deste modelo (DPReview, 2007):

Data de anúncio de lançamento:	2007
Tipo de Sensor:	CCD, s/filtro anti-IV/AA
Resolução:	3024 x 2016
Fotodetetores no Sensor (Mpix):	6,10
Tamanho do sensor (mm):	16,0 x 23,0
<i>Color Filter Array</i> :	RGB, mosaico Super CCD
Tamanho do pixel ou <i>Pixel pitch</i> (µm):	7,61
<i>Bits</i> por pixel:	12
Profundidade de cor (<i>Color Depth</i> , em <i>Bits</i>):	21,6
Gama dinâmica (<i>Dynamic Range</i> , em EVs):	13,5
Razão de proporção do formato:	3:2
Fator de multiplicação do formato:	1,5
Gama de sensibilidades (° ISO):	100 - 3200
Gama de veloc. de obturação (segundos):	1/8000 - 30
Visor eletrónico em tempo real (<i>Live view</i>):	Sim
Montagem da lente:	Nikon F (DX)
Cabo disparador:	Sim
Alimentação de corrente elétrica externa:	Sim
Possibilidade de controlar por software:	Sim

3.- Material e Métodos

Grelha de pixéis do Sensor (informação lida com o *software* DCRaw, a partir de uma imagem captada pela câmara em formato RAW):

Tamanho da miniatura de previsualização: 1440 x 960

Tamanho total de fotodíodos: 4352 x 1444

Tamanho da imagem: 3584 x 3583

Tamanho à saída (*output*): 3030 x 2036

Cores no ficheiro Raw: 3

Padrão do CFA: GBRG

Multiplicadores para temperatura de cor “Luz de dia” (por canal R, G e B):

1.937656 0.938701 1.061980

Na figura seguinte apresenta-se a sensibilidade espectral deste modelo de câmara, sem aplicação de filtros externos.

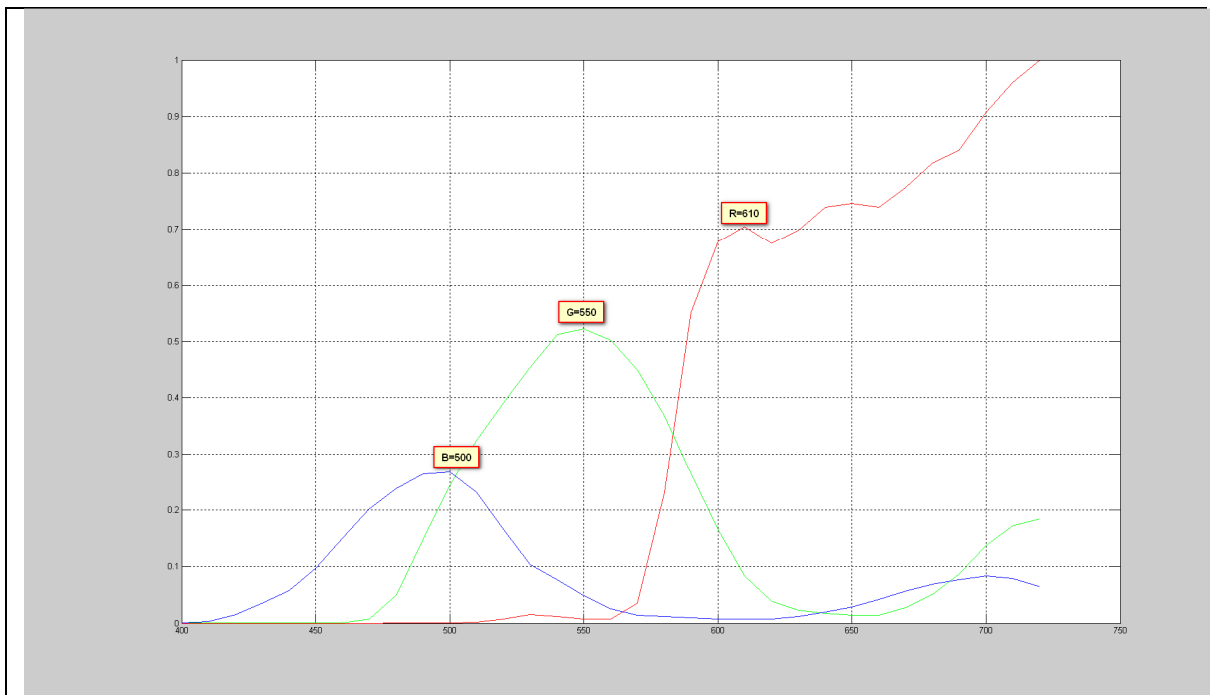


Figura 51: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Fujifilm IS Pro.

Eixo dos X: comprimento de onda da radiação eletromagnética (nm); *Eixo dos Y:* Sensibilidade Espectral Relativa do sensor; *Azul:* canal B; *Verde:* canal G; *Vermelho:* canal R. Picos de sensibilidades máximas: “B=500” (canal B, aos 500 nm); “G=550” (canal G, aos 550 nm); “R=610” (canal R, aos 610 nm), antes da curva continuar ascendente, para lá deste ponto. Ilustração por LBP.

Na figura seguinte, apresenta-se a sensibilidade espectral da mesma câmara Fujifilm Finepix IS Pro, mas agora com um filtro “UV-IR cut” (B+W 486) aplicada na objetiva. Teoricamente, com a aplicação deste filtro que elimina radiação não

visível, este modelo de câmara deveria comportar-se como qualquer outro tipo câmara digital dedicado á fotografia com luz; no entanto, pela observação do gráfico no canal vermelho (o mais sujeito a contaminação por radiação infravermelha), verifica-se que este modelo apresenta um comportamento inesperado e anómalo, com um pico de máxima sensibilidade no canal Vermelho, aos 670 nm, e dois picos secundários, aos 610 e 640 nm. A experiência com a aplicação de filtros no sentido de selecionar bandas, descrita mais adiante na secção “3.5- Seleção dos filtros”, mostra que este tipo de curva está normalmente associada a uma grande perda de precisão na obtenção de informação espectral em bandas mais estreitas, necessárias à análise multi ou hiperespectral, o que também está de acordo com a opinião de alguns autores, como é o caso de Hardeberg (1999, p. 140) que considera indesejável a presença de picos secundários.

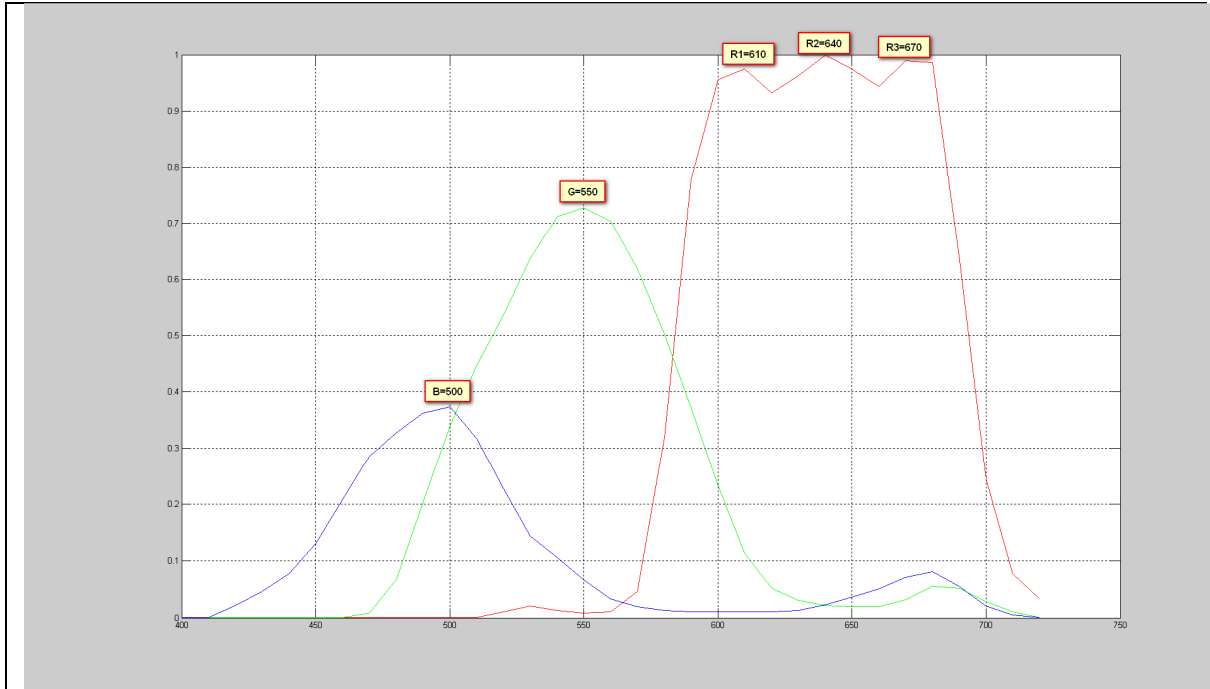


Figura 52: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Fujifilm IS Pro, c/ filtro B+W486 IR-UV cut aplicado à frente da lente.

Eixo dos X: comprimento de onda da radiação eletromagnética (nm); Eixo dos Y: Sensibilidade Espectral Relativa do sensor; Azul: canal B; Verde: canal G; Vermelho: canal R. Picos de sensibilidades máximas: “B=500” (canal B, aos 500 nm); “G=550” (canal G, aos 550 nm); “R=610”, “R=640”, “R=670” (canal R, picos múltiplos aos 610, 640 e 670 nm). Ilustração por LBP.

Resumindo, apesar das vantagens supracitadas, este modelo foi excluído do presente trabalho pelos motivos que se seguem:

- i. apesar de apresentar a possibilidade de ser controlado por computador, apenas se conhece o *software* Fuji Hyperutility, produzido pelo fabricante da câmara, mas que apresenta algumas limitações no que respeita à automatização de algumas configurações da câmara;
- ii. suscetibilidade à contaminação por radiação infravermelha, que potencialmente reduzirá a precisão dos registos (embora esta questão pudesse ser atenuada com o uso de mais um filtro externo, mas que poderia tornar o sistema ainda mais complexo); no entanto, como já foi referido acima, mesmo filtrando a radiação infravermelha a curva espectral

do canal vermelho apresenta um comportamento anômalo, potencialmente redutora da precisão do sistema;

- iii. Sendo o sensor CCD desta câmara do tipo “Super-CCD” (designação comercial do fabricante, a Fujifilm), com fotodíodos (ou “pixéis”) octogonais (em vez de quadrados, como em quase todas as câmaras) de distribuição diagonal (em vez de organizados por linhas e colunas, verticais ou horizontais), sendo estes pixéis ainda de duas tipologias diferentes (pixéis “S”, para baixas luminosidades, e “R”, para altas luminosidades), a sua interpolação cromática tornar-se-ia mais complexa de executar com rotinas de MatLab, do que no caso de sensores de tipo comum de CFA em mosaico de Bayer, presente em outros modelos de câmaras - em que os pixéis, além do mais, se organizam em linhas e colunas verticais.

3.4.2.3- Sigma SD-14

Esta D-SLR apresenta um sensor com um princípio de funcionamento distinto de quase todas as câmaras digitais do mercado (com exceção de outros modelos da Sigma, com sensor idêntico no modo de funcionamento), já que se trata de um sensor Foveon⁵⁸ cujos pixéis são verdadeiramente tricromáticos, isto é, registam efetivamente três cores, em vez do tradicional CFA em Mosaico de Bayer, em que cada pixel apenas regista uma das cores (R, G ou B) e as outras cores da tricromia, que estejam em falta, são interpoladas a partir dos pixéis vizinhos.

O filtro anti-infravermelho neste modelo, curiosamente, não se encontra acoplado ao sensor como acontece em quase todos os modelos de câmaras, mas sim à caixa do espelho do sistema do visor, sendo por isso muito acessível quando se remove a objetiva. Este filtro pode ser removido com facilidade pelo utilizador da câmara, já que tal operação é prevista pelo próprio fabricante para possibilitar a limpeza dos espelhos do sistema ótico do visor ou mesmo o sensor da câmara.

⁵⁸ Foveon: nome da empresa que patenteou e que produz este tipo de sensores, entretanto adquirida e integrada na própria Sigma, único fabricante utilizador deste tipo de sensores.

Por este modelo ler efetivamente as cores todas do espectro visível em cada pixel, numa fase inicial do presente trabalho houve a expectativa de que esta câmara pudesse ser mais precisa na medição multiespectral ou hiperespectral; no entanto, tal facto não se comprovou, pelo menos com o tipo de sistema e medições realizadas.

Apresentam-se a seguir algumas especificações da Sigma SD-14 (DPReview, 2006):

Data de anúncio de lançamento:	2006
Tipo de Sensor:	CMOS, Foveon X3
Resolução:	2652 x 1768 (X3 layers)
Fotodetores no Sensor (Mpix):	14,15 (3x4,64)
Tamanho do sensor (mm):	20,7 x 13,8
<i>Color Filter Array</i> :	RGB, pixel tricromo
Tamanho do pixel ou <i>Pixel pitch</i> (µm):	(desconhecido)
<i>Bits</i> por pixel:	12
Profundidade de cor (<i>Color Depth</i> , em <i>Bits</i>):	(desconhecida)
Gama dinâmica (<i>Dynamic Range</i> , em EVs):	(desconhecida)
Razão de proporção do formato:	3:2
Fator de multiplicação do formato ⁵⁹ :	1,7
Gama de sensibilidades (° ISO):	100 - 800
Gama de veloc. de obturação (segundos):	1/4000 - 30
Visor eletrónico em tempo real (<i>Live view</i>):	Não
Montagem da lente:	Sigma SA Mount ⁶⁰
Cabo disparador:	Sim
Alimentação de corrente elétrica externa:	Sim
Possibilidade de controlar por software:	Não

⁵⁹ Fator de multiplicação que se usa para calcular qual seria a distância focal equivalente ao formato de 35mm (ou 135), em película analógica ou sensor digital *full frame* (com tamanho idêntico ao formato 135)

⁶⁰ No presente caso, e como se explica no texto, o sistema de montagem foi substituído por um de baioneta F da Nikon (Guevara, 2008), para que nele se pudesse acoplar a lente Coastal Optics 60mm f/4 UV-VIS-IR.

Grelha de pixéis do Sensor (informação lida com o *software* DCRaw, a partir de uma imagem captada pela câmara em formato RAW):

Tamanho da miniatura de previsualização: 2688 x 1792

Tamanho total de fotodíodos: 2688 x 1792

Tamanho da imagem: 2688 x 1792

Tamanho à saída (*output*): 2688 x 1792

Cores no ficheiro Raw: 3

Padrão do CFA: não se aplica, pixéis são tricromos

Multiplicadores para temperatura de cor “Luz de dia” (por canal R, G e B):

1.000000 1.000000 1.000000

Este modelo também é o único que sofreu uma modificação na sua arquitetura original, com a aplicação de um kit de transformação do encaixe da objetiva para permitir acoplar objetivas do sistema de baioneta Nikon F (Guevara, 2008). Deste modo tornou-se possível recorrer à mesma lente da Coastal Optics utilizada nas outras câmaras e medições, já que esta era a única câmara no grupo que não vinha de origem munida com encaixe de baioneta compatível. Esta transformação não afeta em nada a qualidade ótica do sistema nem as características espectrais do sensor da câmara.

Numa primeira avaliação da figura seguinte, em que se apresentam as curvas de sensibilidade espectral do sensor da Sigma SD-14, poder-se-ia pressupor que este tipo de sensor seria possuidor de características interessantes para a captação de imagens multi ou hiperespectrais, já que as curvas de sensibilidade espectral cobrem melhor (i.e., com maior energia e com maior amplitude) os extremos do espectro da região visível. Por explicar ficou o que aparenta ser um nível basal acima do zero em todo o espectro, explicável talvez por ruído ou outro fator que não se conseguiu determinar.

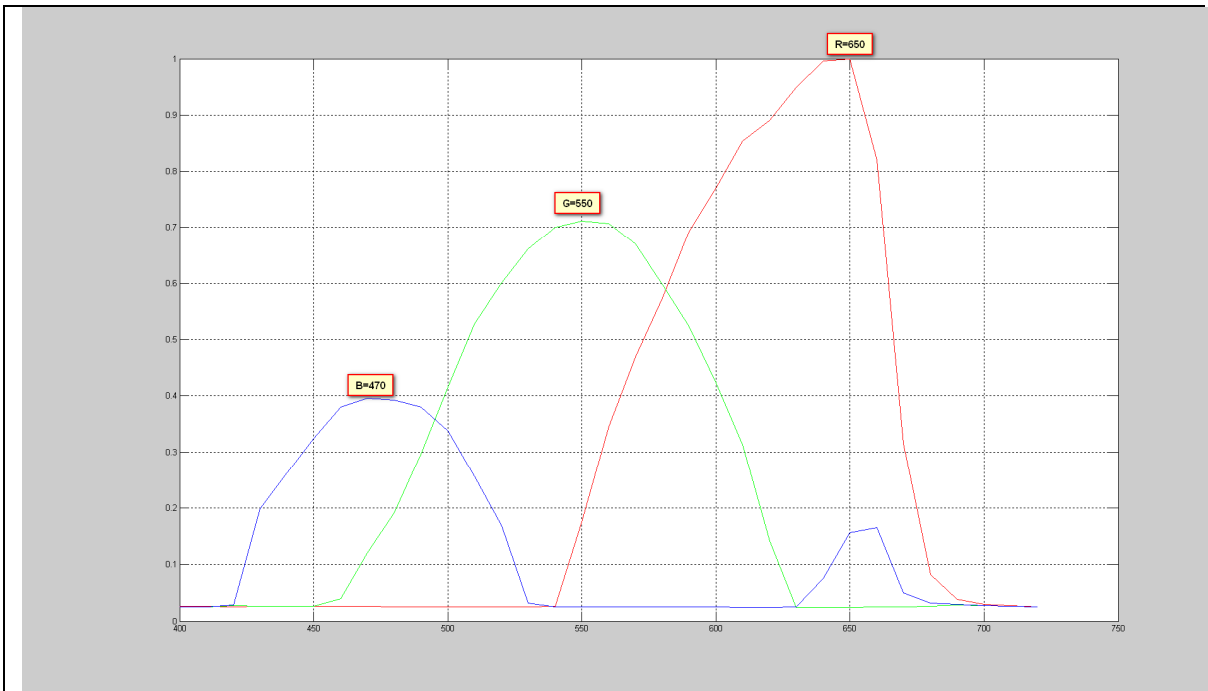


Figura 53: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Sigma SD14.

Eixo dos X: comprimento de onda da radiação eletromagnética (nm); Eixo dos Y: Sensibilidade Espectral Relativa do sensor; Azul: canal B; Verde: canal G; Vermelho: canal R. Picos de sensibilidades máximas: “B=470” (canal B, aos 470 nm); “G=550” (canal G, aos 550 nm); “R=650” (canal R, aos 650 nm), antes da curva continuar ascendente, para lá deste ponto. Ilustração por LBP.

Com a apreciação dos resultados obtidos após a seleção dos filtros para separação de bandas espectrais, a expectativa criada pela ampla sensibilidade espectral do sensor e que se poderia traduzir numa câmara potencialmente interessante saiu num primeiro momento reforçada, uma vez que resultava do sistema testado um grande número de bandas que cobriam, de forma mais eficaz, a zona visível do espectro. No entanto, veio-se a rejeitar esta câmara também por mostrar piores resultados e menor precisão, após terem sido aplicados os testes estatísticos e as métricas comparativas com o espectroradiómetro de referência (explicados mais aprofundadamente no subcapítulo respetivo). Outros fatores que também não favoreceram a decisão da escolha por este modelo de câmara foram a menor qualidade das imagens obtidas - em especial quando estas resultavam de tempos de exposição muito longos - assim como a maior dificuldade na sua

utilização, limitações resultantes de se tratar de uma câmara menos profissional que alguns dos outros modelos testados.

Resumidamente, não se optou por este modelo de câmara pelas seguintes razões:

- i. impossibilidade de ser controlado directamente por computador (ligação USB possível, mas apenas para descarga de ficheiros);
- ii. dificuldade de obtenção de tempos de exposição superiores a 30 segundos;
- iii. tempos de exposição superiores a 8 segundos apresentarem ruído (grão) visível nas imagens produzidas;
- iv. inexistência de *Live Preview*, útil para confirmar enquadramento ou focagem, quando o visor ótico não for acessível;
- v. alguma suscetibilidade à contaminação por radiação infravermelha, que potencialmente reduzirá a precisão dos registos;
- vi. resultados inferiores aos que se mostraram possíveis com o modelo de câmara seguinte, com métricas espectrais e índices de metamerismo inferiores a este.

3.4.2.4- Nikon D300

A Nikon D300 é uma câmara que entrou em comercialização em 2007, tratando-se de um modelo de características profissionais ou semiprofissionais. Algumas dessas características mais interessantes: elevada robustez do corpo (produzido em liga metálica, em vez das resinas plásticas de outros modelos testados), presença de junções “tropicalizadas” (através do uso de vedantes nas juntas entre peças, que protegem assim da entrada de humidade e pó), obturador preparado para 150 mil disparos (outras câmaras, destinadas a um mercado amador, normalmente só garantem entre 50 a 80 mil disparos), excelente

fotometria e excelente qualidade nas imagens obtidas, nomeadamente a possibilidade de registar imagens com 14 bit de informação por cada canal de cor (o mais frequente, em câmaras mais simples e básicas, é que só permitam gravar imagens a 12 bit/canal). Devido a todas estas características interessantes, a Nikon D300 tornou-se num *best seller* e foi amplamente adotada, quer por fotógrafos amadores avançados, quer por profissionais (Sepulchre, 2009, p. 7).

Descreve-se de seguida as características técnicas mais relevantes deste modelo de câmara (DxOMark, 2008):

Data de anúncio de lançamento:	2007-08-23
Tipo de Sensor:	CMOS
Resolução:	4352 x 2868
Fotodetectores no Sensor (Mpix):	12.48
Tamanho do sensor (mm):	15,8 x 23,6
<i>Color Filter Array</i> :	RGB, mosaico de Bayer
Tamanho do pixel ou <i>Pixel pitch</i> (µm):	5,42
<i>Bits</i> por pixel:	14 ou 12
Profundidade de cor (<i>Color Depth</i> , em <i>Bits</i>):	22,1
Gama dinâmica (<i>Dynamic Range</i> , em EVs):	12
Razão de proporção do formato:	3:2
Fator de multiplicação do formato:	1,5
Gama de sensibilidades (° ISO):	100 - 6400
Gama de veloc. de obturação (segundos):	1/8000 - 30
Visor eletrónico em tempo real (<i>Live view</i>):	Sim
Montagem da lente:	Nikon F (DX)
Cabo disparador:	Sim
Alimentação de corrente elétrica externa:	Sim
Possibilidade de controlar por software:	Sim

Grelha de pixéis do Sensor (informação lida com o *software* DCRaw, a partir de uma imagem captada pela câmara em formato RAW):

Tamanho da miniatura de previsualização: 4288 x 2848
Tamanho total de fotodíodos: 4352 x 2868
Tamanho da imagem: 4320 x 2868
Tamanho à saída (*output*): 4320 x 2868
Cores no ficheiro Raw: 3
Padrão do CFA: RGGB

Multiplicadores para temperatura de cor “Luz de dia” (por canal R, G e B):
1.720531 0.933573 1.058607

A sensibilidade espectral, por canal de cor, do sensor desta câmara foi medida e apresenta-se no gráfico seguinte:

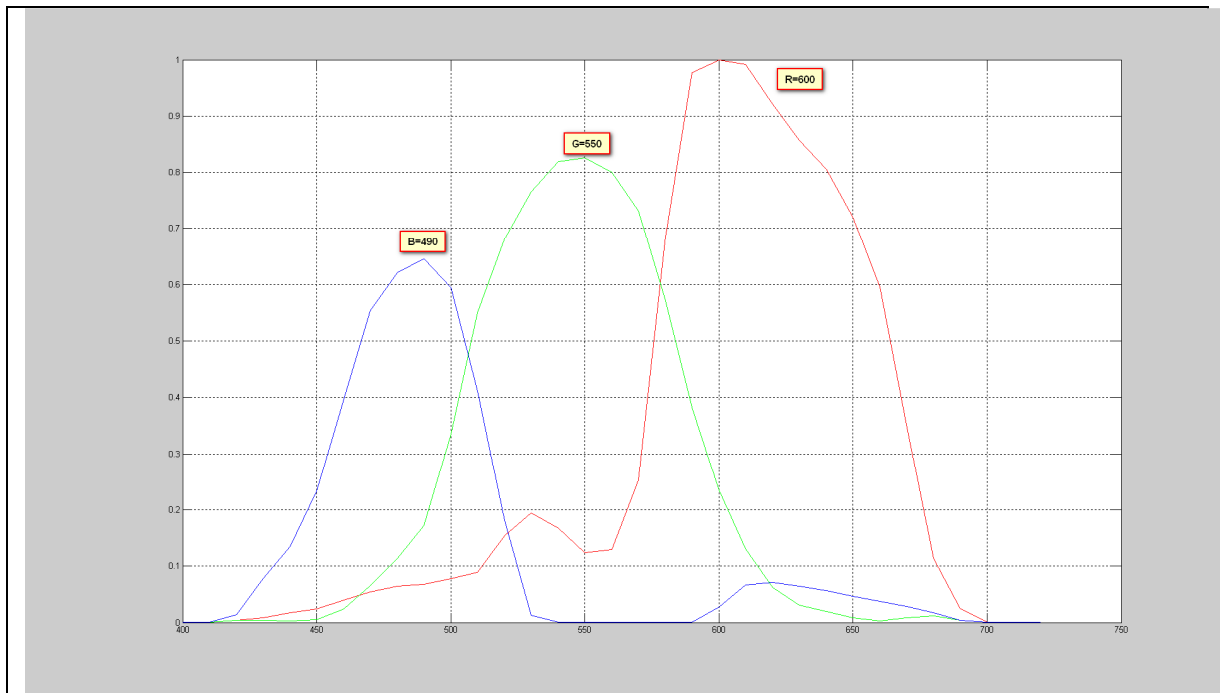


Figura 54: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Nikon D300.

Eixo dos X: comprimento de onda da radiação eletromagnética (nm); *Eixo dos Y:* Sensibilidade Espectral Relativa do sensor; *Azul:* canal B; *Verde:* canal G; *Vermelho:* canal R. Picos de sensibilidades máximas: “B=490” (canal B, aos 490 nm); “G=550” (canal G, aos 550 nm); “R=600” (canal R, aos 600 nm), antes da curva continuar ascendente, para lá deste ponto. Ilustração por LBP.

Finalmente, este foi o modelo de câmara D-SLR eleito para concretizar o presente trabalho, devido às seguintes razões:

- i. possibilidade de ser controlado por computador fazendo uso de *software* adequado, o que permite regular a câmara à distância (foi usado um cabo USB auto-alimentado, de 5 metros); torna-se possível também pré-visualizar o enquadramento das imagens no ecrã do computador, antes de estas serem captadas, graças à funcionalidade “*Live Preview*”; é possível ainda, graças à ligação USB direta, descarregar de imediato cada

- ficheiro de imagem, permitindo uma mais adequada gestão e organização dos ficheiros de dados, à medida que estes vão sendo capturados;
- ii. além do *software* do fabricante “*Nikon Camera Control Pro*”, fornecido para controlar a câmara através de computador, existem vários *softwares* de programadores independentes disponíveis para este modelo; no âmbito deste trabalho, optou-se por usar o “*Control My Nikon*”, pelas possibilidades que este oferece de fácil gravação e repetição dos parâmetros de ajuste da câmara, necessários mudar frequentemente para adequar a câmara a cada combinação de filtro/canal de cor;
 - iii. facilidade de obtenção de tempos de exposição longos, mesmo quando superiores a 30 segundos, pois esta câmara permite usar em modo “Bulb” um comando remoto externo, como foi o caso na montagem de captura, seja por cabo (opção escolhida) ou do tipo *wireless*, o que permite tempos de exposição de vários minutos ou mesmo de horas (inviável na maioria dos modelos descritos anteriormente);
 - iv. independentemente da duração da pose de uma fotografia (tempo de exposição), este modelo de câmara apresenta uma eficiente redução de ruído (por subtração de *dark frame* automática), o que permite imagens limpas de grão, mesmo em tempos de exposição de muitos minutos, como se constatou na presente prática;
 - v. possibilidade de uso de alimentação por corrente elétrica externa e não apenas através de bateria, útil em tempos de exposição morosos e frequentes como é o caso na captura hiperespectral, em que a câmara se encontra ativa durante longos períodos de tempo (dezenas de minutos ou mesmo horas);
 - vi. possibilidade de utilizar uma função de *Live Preview*, que permite usar o visor eletrónico (em vez do tradicional visor ótico), útil para confirmar o enquadramento ou focagem, quando o visor ótico não for acessível ou possível de utilizar;

- vii. pouca suscetibilidade à contaminação por radiação infravermelha, que potencialmente reduziria a precisão dos registos;
- viii. como se verifica adiante, este também foi o modelo que apresentou melhores métricas espectrais e índices de metamerismo, aquando do registo hiperespectral, nos dois modelos de câmara testados.

Em suma, esta foi a câmara escolhida por entre os quatro modelos disponíveis e testados, quer por ter revelado características superiores quanto à qualidade dos ficheiros de imagem registados (pertinente na conjugação com os filtros de seleção de bandas, referidos no capítulo seguinte), mas também por este modelo ser o que se apresentou mais fácil de operar na montagem para captura hiperespectral. Apresenta excelentes possibilidades de ligação a um computador, que pode funcionar como controlo remoto, com disponibilidade de *software* completo e adequado, inclusivamente sendo possível automatizar algumas das regulações e parâmetros de ajuste da câmara, que mudam consoante os filtros e bandas a registar. Evitam-se assim erros humanos, frequentes quando estes parâmetros são necessários de mudar manualmente.

3.5- Seleção dos filtros

Com o sentido de cumprir uma das missões a que se propõe esta tese, de comprovar a validade de um sistema multiespectral ou hiperespectral acessível a um público mais vasto (por exemplo, utilizadores com conhecimentos de técnica fotográfica), o conjunto de filtros medidos e testados para posterior seleção foram aqueles que se tinham disponíveis, tal como com as câmaras testadas na secção anterior, e efetuaram-se medições e testes num conjunto de filtros - não tendo havido a aquisição propositada de filtros, seguindo algum critério técnico - e muitos dos filtros medidos são de facto modelos frequentemente presentes entre o equipamento de muitos estúdios profissionais de fotografia. Numa outra fase,

para tentar alargar as bandas presentes aos extremos do espectro EM visível, é que se acrescentaram alguns filtros menos habituais nos estúdios fotográficos e adicionou-se ao sistema alguns filtros dicróicos de seleção de banda (nos comprimentos de onda mais curtos) ou filtros de passo alto para uso em fotografia no vermelho/infravermelho (nos comprimentos de onda mais altos).

3.5.1- Montagem e protocolo para caracterização dos filtros

Para medir e registar a curva de transmitância dos filtros a testar, usou-se uma montagem como esquema de trabalho, que se encontra representada na figura seguinte:

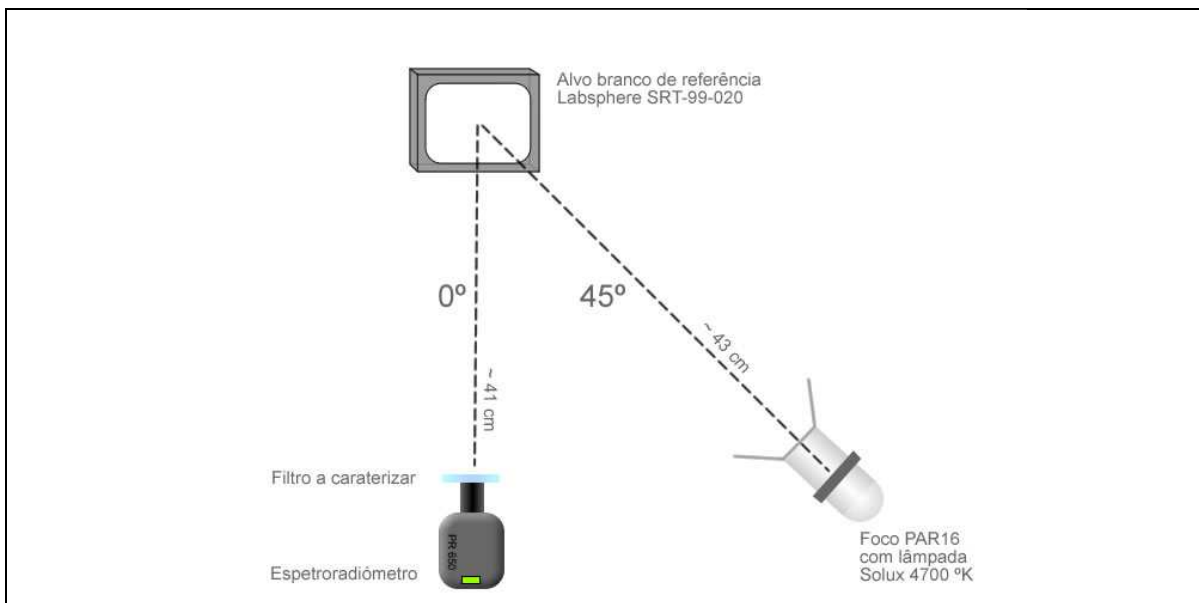


Figura 55: Esquema explicativo da montagem usada para caracterização dos filtros

Os elementos constituintes do esquema não se apresentam à escala nem são uma representação rigorosa, mas apenas esquemática. Ilustração por LBP.

Foi utilizado um alvo branco da Labsphere (ref.^a SRT-99-020), iluminado por uma lâmpada SoLux montada em casquilho PAR16 e o filtro a ser caracterizado encontra-se à frente da objetiva do espectroradiômetro (Photoresearch Spectrascan PR650, com objetiva de 75mm de distância focal e abertura máxima de f/2.7).

Seguiram-se os passos do seguinte protocolo:

- i. Colocou-se o espectroradiómetro PR650, com o filtro que se quer medir e caracterizar em frente da objetiva, na posição do observador segundo a geometria $45^{\circ}/0^{\circ}$ - geometria recomendada pelo CIE, explicada já anteriormente na secção 3.2 – e um foco iluminante PAR16 com lâmpada SoLux e como alvo a superfície refletora difusa branca Labsphere, como se pode observar na figura anterior;
- ii. Com o espectroradiómetro, descrito no subcapítulo 3.8; foi medida a distribuição de potência espectral entre os 380 e os 780 nm em intervalos de 4 nm, sobre a superfície branca de referência para cada comprimento de onda;
- iii. Considerando valores médios das intensidades, numa área de cada imagem onde a distribuição da potência espectral do iluminante foi medida - através do espectroradiómetro – a transmitância de cada filtro é dada pela seguinte equação:

$$F(\lambda) = E(\lambda)/I(\lambda) \quad (3.2)$$

Onde $F(\lambda)$ representa a transmitância espectral estimada, $E(\lambda)$ a irradiância espectral medida na superfície de referência branca (com o filtro a medir entreposto no caminho ótico, como representado na figura anterior) e $I(\lambda)$ a distribuição de radiância espectral medida com o espectroradiómetro sobre a superfície branca de referência (sem filtro, portanto).

3.5.2- Filtros caracterizados

Os filtros que se tinham disponíveis apresentam-se listados na tabela do Apêndice B, onde se inclui também os gráficos das curvas de transmissão relativa de cada filtro, feitos a partir dos dados obtidos com a montagem da figura anterior (e cujos os respetivos passos estão descritos no protocolo acima).

3.5.3- Combinação dos filtros com o sensor

Com os dados obtidos com a montagem acima pode-se então calcular a sensibilidade espectral para cada canal R, G e B do sensor, quando agora combinados com cada um dos filtros, pois a seleção das bandas espectrais será feita pela determinação do pico de transmitância espectral (Ferreira, 2010; Hardeberg, 1999) resultante em cada canal, segundo a equação:

$$C(\lambda) = S(\lambda) \times F(\lambda) \quad (3.3)$$

Onde $C(\lambda)$ corresponde à sensibilidade espectral resultante, $S(\lambda)$ a Sensibilidade espectral do canal do sensor (obtido com a equação 3.1), $F(\lambda)$ a transmitância espectral estimada (obtido com a equação 3.2).

Este processo de selecionar bandas, representado na equação 3.3, é mais facilmente compreendido através dos gráficos da figura seguinte.

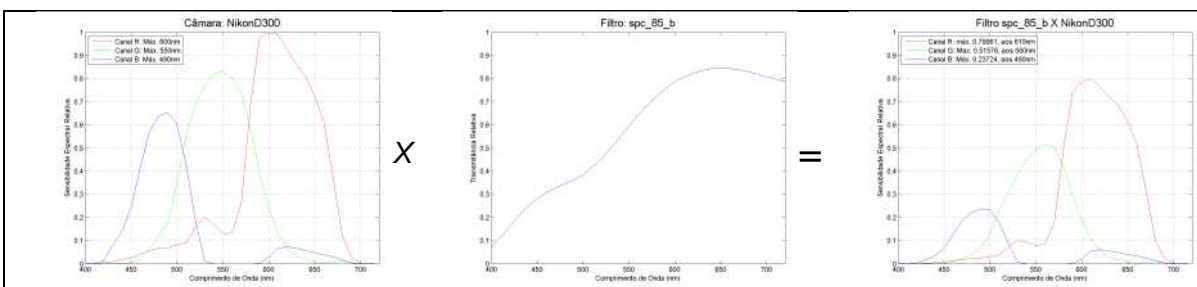


Figura 56: Esquema explicativo da Sensibilidade espectral obtida através da combinação de um filtro externo com o sensor da câmara.

Ilustração por LBP.

No gráfico da esquerda desta figura temos representada a sensibilidade espectral do sensor da câmara D-SLR Nikon D300, no gráfico central a transmitância espectral do filtro Rowi 85B e no gráfico da direita, a sensibilidade espectral resultante combinando a câmara com este filtro (equivalente a multiplicar as duas funções anteriores). Observe-se que os picos de sensibilidade espectral sem filtro são 600, 550 e 490 nm (respetivamente por cada um dos canais R, G e B) e, após serem combinados com o filtro Rowi 85B, passam a ser 610, 560 e 490 nm.

No exemplo da figura anterior conseguiu-se, recorrendo aos picos de máxima transmitância espectral e apenas com duas exposições da câmara D-SLR Nikon D300 (a 1.^a sem filtro e a 2.^a com o filtro Rowi 85B), selecionar informação de reflectância para 5 bandas espectrais: 490 (repetida, nas duas exposições), 550, 560, 600 e 610 nm.

Este método foi usado, de forma exaustiva, com cada um dos modelos de câmaras (caraterizadas no subcapítulo “3.4- Câmaras digitais fotográficas”) e no Apêndice C podemos observar os gráficos representativos dos picos de sensibilidade espectral estimada através deste método, sensibilidade espectral para cada sensor e da resultante da sua combinação com cada um dos 63 filtros caraterizados. Este passo tornou-se fundamental para permitir a melhor seleção dos filtros a usar e mesmo na identificação do sensor que permitiria uma seleção de bandas mais ampla, de forma a cobrir melhor todo o espectro EM visível.

Com base nestes dados ainda foi considerado o potencial de dois sensores para o presente estudo: o eleito, o da câmara Nikon D300, e um outro que numa primeira avaliação permitiria uma cobertura mais ampla do espectro EM, o da câmara Sigma SD14, mas que veio a constatar-se apresentar sempre menor precisão, talvez devido à presença de maior ruído ou por outra causa que não se conseguiu apurar. Esta conclusão resultou da apreciação das métricas obtidas, que revelaram sempre piores valores do que os obtidos com a câmara eleita - resultados apresentados no capítulo “4.2.1- Alvos (em ambiente de estúdio)” -, além dos outros inconvenientes de ordem prática descritos no subcapítulo “3.4- Câmaras digitais fotográficas”, que tornariam esta câmara mais difícil de operar.

Após experimentação com diferentes combinações de filtros, selecionaram-se para a Nikon D300 dois conjuntos de filtros: num primeiro momento, em que se tentava ainda compreender a viabilidade do conceito, apenas com 5 filtros externos (com os números 1, 12, 15, 18 e 35, na coluna direita do “Apêndice B: Tabela descritiva dos filtros fotográficos analisados”), o que permitiu a

digitalização de 12 bandas de 10 em 10 nm (17 bandas no total, considerando interpolação nas zonas em que o passo fosse maior do que 10 nm), cobrindo o espectro EM visível dos 480 nm até aos 640 nm.

Numa segunda fase, já com as montagens finais deste projeto e pretendendo cobrir uma maior amplitude do espectro EM visível, usaram-se 13 filtros (com os números 1, 4, 9, 12, 15, 18, 22, 23, 24, 53, 59, 60 e 61, na coluna direita do “Apêndice B: Tabela descritiva dos filtros fotográficos analisados”), o que permitiu a separação de 27 bandas de 10 em 10 nm (22 bandas medidas e 5 interpoladas), cobrindo agora o espectro EM visível dos 430 nm até aos 690 nm.

3.6- Alvo branco de referência

Para os cálculos de reflectância e para a medição com fotómetro-exposímetro do tempo de exposição, usou-se um alvo fabricado pela *Labsphere* que apresenta uma superfície branca de referência composta por um material com a designação comercial de *Spectralon*. O composto químico utilizado neste material, amplamente utilizado na produção de superfícies brancas de referência para espectroscopia e colorimetria, é uma resina termoplástica prensada de politetrafluoroetileno, que apresenta uma estabilidade térmica superior a 300 °C e um elevado coeficiente de hidrofobia (Ferreira, 2010, p. 92).

Esta superfície branca é fornecida pelo fabricante aplicada a um caixilho de alumínio, anodizado a preto, que facilita a sua utilização e manuseio não só por lhe fornecer proteção e rigidez, mas também por nesta existir uma pequena base munida de uma rosca que permite a fixação deste alvo em qualquer tripé fotográfico ou de iluminação, como se pode apreciar na figura seguinte.



Figura 57: Alvo branco de referência, da Labsphere, modelo de ref.^a SRT-99-020. Fotografia por LBP.

A característica mais importante que este alvo branco de referência apresenta - naquilo que interessa de aplicação ao presente estudo - é a capacidade de reflexão da luz (fator de reflectância espectral), em todos os comprimentos de onda do espectro EM visível, acima de 99% (Figura 58).

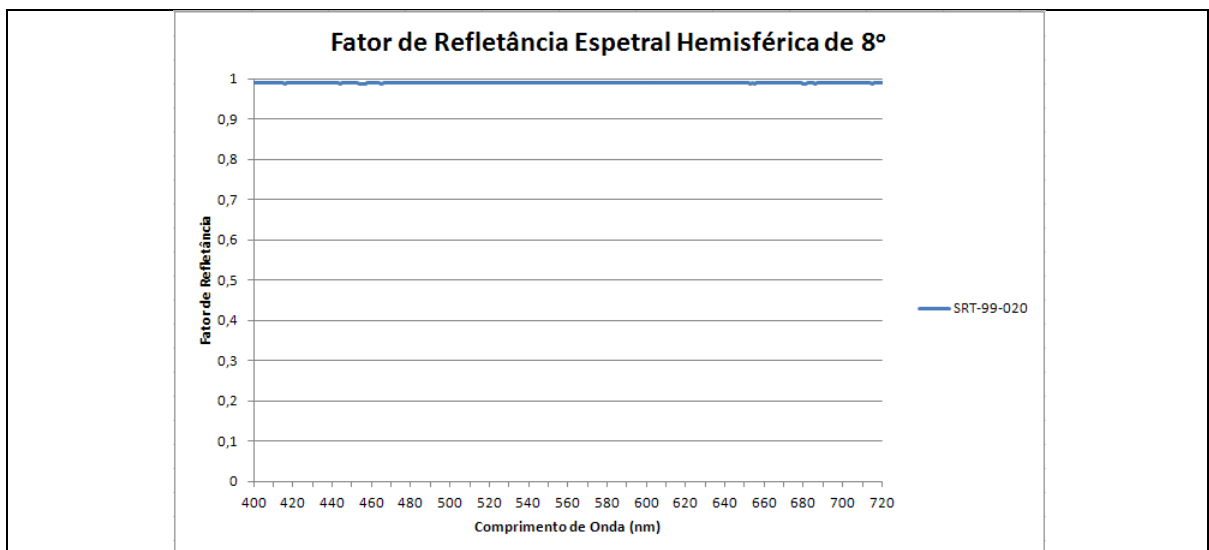


Figura 58: Reflectância relativa da superfície branca de referência I. Gráfico elaborado por LBP a partir dos dados completos fornecidos pelo fabricante, Labsphere, para o alvo com ref.^a SRT-99-020.

O gráfico acima foi elaborado a partir dos dados fornecidos pelo fabricante, *Labsphere*, para o alvo com ref.^a SRT-99-020; resumiu-se neste gráfico os dados à banda de radiação visível (dos 400 aos 720 nm, banda de referência usada no nosso estudo).

Mesmo com radiação não visível do espectro (radiação ultravioleta e infravermelha), este alvo branco de referência continua a apresentar uma reflectância elevada (superior a 92%, como se pode apreciar no gráfico da figura seguinte). Como se pode constatar, dos 250 aos 2500 nm de comprimentos de onda (dentro da gama de valores medidos pelo próprio fabricante) este alvo apresenta reflectância acima de 92%, cobrindo regiões do ultravioleta ao infravermelho do espectro.

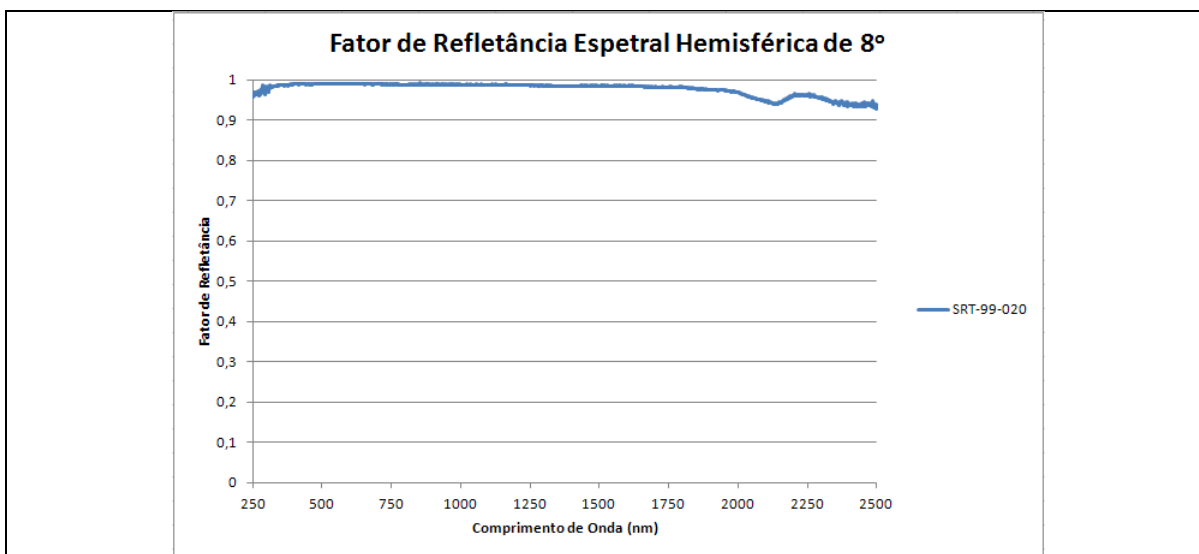


Figura 59: Reflectância relativa da superfície branca de referência II.

Gráfico elaborado por LBP a partir dos dados completos fornecidos pelo fabricante, *Labsphere*, para o alvo com ref.^a SRT-99-020.

3.7- Alvo de cor

O alvo de cores utilizado para o processo de calibração foi o *X-Rite Standard ColorChecker*⁶¹ (outrora designado por *GretagMacbeth ColorChecker Color Rendition Chart*), composto por um conjunto de 24 amostras de cores verdadeiras de objetos naturais (azul do céu, pele humana, folhagem de árvores, etc.), mas também cores dos modelos de cor RGB e CMY e por uma escala de cinzentos.

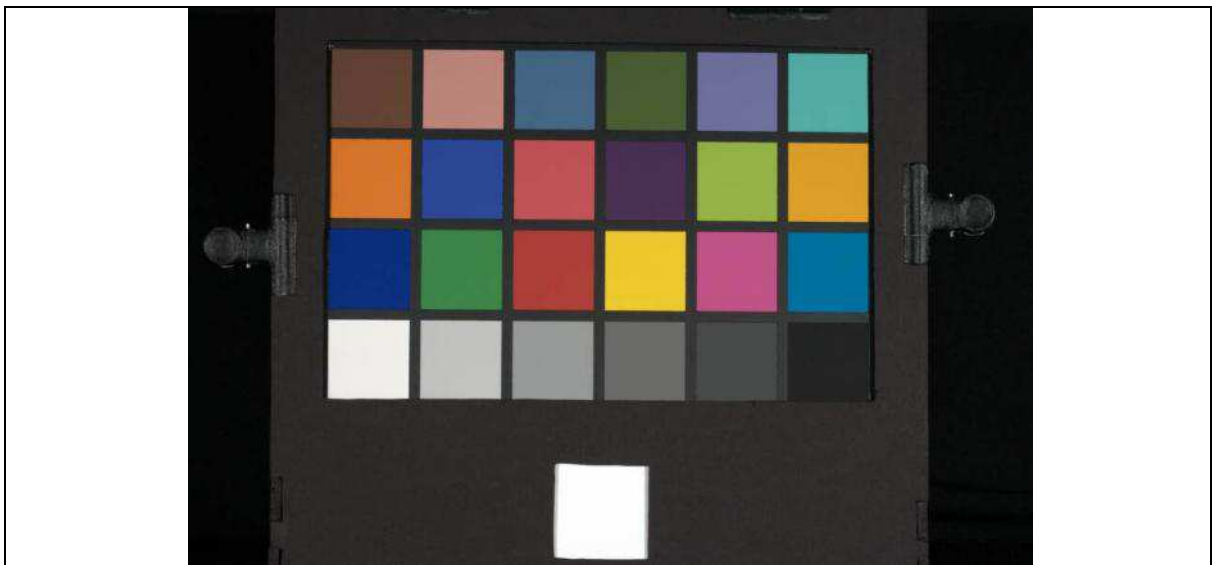


Figura 60: Montagem com o alvo ColorChecker, da X-Rite, de 24 cores e com o branco de referência da Labsphere.
Fotografia por LBP.

Este alvo encontra-se amplamente divulgado por entre os fotógrafos e o próprio fabricante publica valores de medição RGB, para cada um dos quadrados. O seu fabrico criterioso e constância na produção, faz com que ainda hoje seja um equipamento de referência amplamente utilizado em colorimetria.

O alvo de 24 cores foi montado num suporte especialmente desenvolvido para o efeito, que não só facilita o seu posicionamento na vertical, garantindo que este fica plano (de outro modo, apresenta grande tendência a encurvar), mas também

⁶¹ Doravante designado apenas como *ColorChecker*

mantém a sua superfície no mesmo plano do alvo branco de referência da Labsphere (quadrado branco mais abaixo, na imagem), também montado na mesma estrutura.

As reflectâncias medidas com o espectroradiómetro PR650, de cada uma das cores deste alvo, encontram-se na tabela do Apêndice A.

3.8- O espectroradiómetro de referência

Como espectroradiómetro de referência, quer na medição dos filtros, quer como referencial de comparação para o nosso sistema desenvolvido no âmbito desta tese, usou-se o modelo PR-650 SpectraScan, da *Photo Research, Inc.*

Este espectroradiómetro possibilita a medição de grandezas fotométricas, radiométricas e colorimétricas. Constituído por uma rede de difração holográfica côncava, a radiação incidente é decomposta nas suas partes constituintes entre os 380 nm e os 780 nm, em intervalos de 4 nm. Apresenta ainda um campo de visão e de medida de 7° e 1°, respetivamente, e apresenta uma largura de banda a meia altura de 8 nm e uma exatidão de aprox. 4% para as medidas de luminância. Relativamente às medidas colorimétricas, a exatidão é de $\pm 0,0015$ e $\pm 0,001$ para as coordenadas de cromaticidade (x y), respetivamente (Ferreira, 2010, p. 92).

Na imagem seguinte, podemos observar o espectroradiómetro de referência montado “in situ”, frente a uma obra em ambiente de museu (Tríptico de Pentecostes da Igreja de S. Pedro de Miragaia, Porto, Portugal, séc. XVI).



Figura 61: Espetroradiómetro PR-650 SpectraScan, da Photo Research, Inc.
Fotografia por LBP.

O espectroradiómetro encontra-se ligado a um computador e é comandado através de *software* próprio. Com este é possível gravar os dados das medições diretamente para ficheiros informáticos que podem ser processados depois através de programação (usando, por exemplo, *software* como o MatLab).

3.9- O sistema Hiperespectral

O sistema usado para digitalização hiperespectral pode ser representado, de um modo simplificado, de acordo com a montagem esquematizada na próxima figura, em conformidade com a geometria $45^{\circ}/0^{\circ}$ (Wyszecki & Stiles, 2000, p. 155), já mencionada anteriormente no subcapítulo 3.2.1. Nesta montagem o alvo (ColorChecker de 24 cores e branco de referência), está iluminado por duas lâmpadas SoLux montadas em casquilhos PAR16. Câmara D-SLR com objetiva Coastal Optics. Os filtros seletores de banda podem ser montados individualmente ou, como representado na figura, numa roda que permite a troca rápida dos filtros (o esquema encontra-se simplificado mostrando os elementos principais).

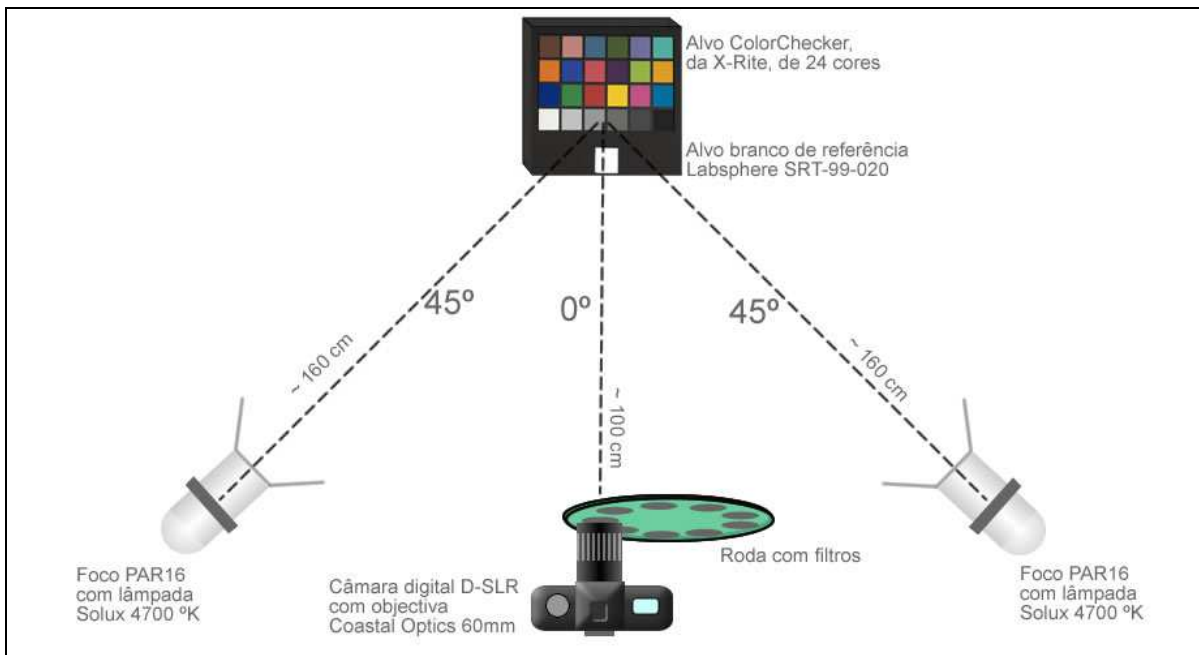


Figura 62: Esquema explicativo da montagem usada para digitalização dos alvos e pinturas (Montagem I), com recurso a 2 focos iluminantes e geometria 45°/0°.

Os elementos constituintes do esquema não se apresentam à escala nem são uma representação rigorosa, mas apenas esquemática. Ilustração por LBP.

O sistema de fixação dos filtros que foi inicialmente usado consistiu na montagem manual simples, um a um, de cada filtro na frente da objetiva da câmara. Numa fase de pesquisa e uso rápido, como é o ambiente experimental de laboratório, é o processo mais prático, mas para mudar um número maior de filtros ou para trabalho de campo torna-se um processo demasiado moroso para o operador do equipamento, tendo em conta que se torna com frequência necessário repetir digitalizações com os mesmos filtros, várias vezes, durante a mesma sessão (exemplo: uma vez para a obra, outra vez para o branco de referência). Esse tipo de ocupação intensiva do operador torna também maior a probabilidade de ocorrência de erros devido a enganos do mesmo, além de haver um risco maior de ocorrerem deslocações indesejadas do sistema entre diferentes exposições, sempre que se troca de filtro, anulando a possibilidade de sobrepor digitalizações a diferentes comprimentos de onda do espectro EM.



Figura 63: Montagem I: primeira montagem de geometria 45°/0° usada “in situ”.
Fotografia por LBP.

A montagem, apresentada na figura acima, é similar à explicada no esquema da Figura 62 mas apresentada agora durante a digitalização de uma pintura artística (Tríptico de Pentecostes da Igreja de S. Pedro de Miragaia, Porto, Portugal, séc. XVI; abas do Tríptico fechadas). O alvo branco de referência, a câmara e os focos com as fontes de luz encontram-se aplicados em tripés individuais, morosos de montar ou reajustar sempre que é necessário mover a montagem mantendo a mesma geometria. Nesta primeira montagem os filtros foram aplicados manualmente, um a um, na lente da câmara. A câmara, era controlada manualmente e os ficheiros de imagem gravados no cartão de memória da câmara.

Devido às dificuldades expostas sentiu-se a necessidade de desenvolver um método mais prático e rápido de efetuar as digitalizações, principalmente quando se monta o sistema hiperespectral para digitalizar obras artísticas *in situ* (em museus ou espaços similares). Foi desenvolvido então um sistema mecanizado para efetuar a troca de filtros e de regulação e disparo da câmara, tornando toda

a operação de digitalização bastante mais rápida e sem necessidade do contacto direto do operador. Este novo sistema foi montado em volta de uma estrutura (apresentada na figura seguinte), onde se aplicou a câmara D-SLR e onde se inseriu uma roda de suporte para filtros (14 posições, para 13 filtros mais uma posição vazia, para registo e visualização sem filtros), acionada por motor elétrico, cujo correto posicionamento podia ser verificado à distância, pelo operador, através de uma *webcam*.

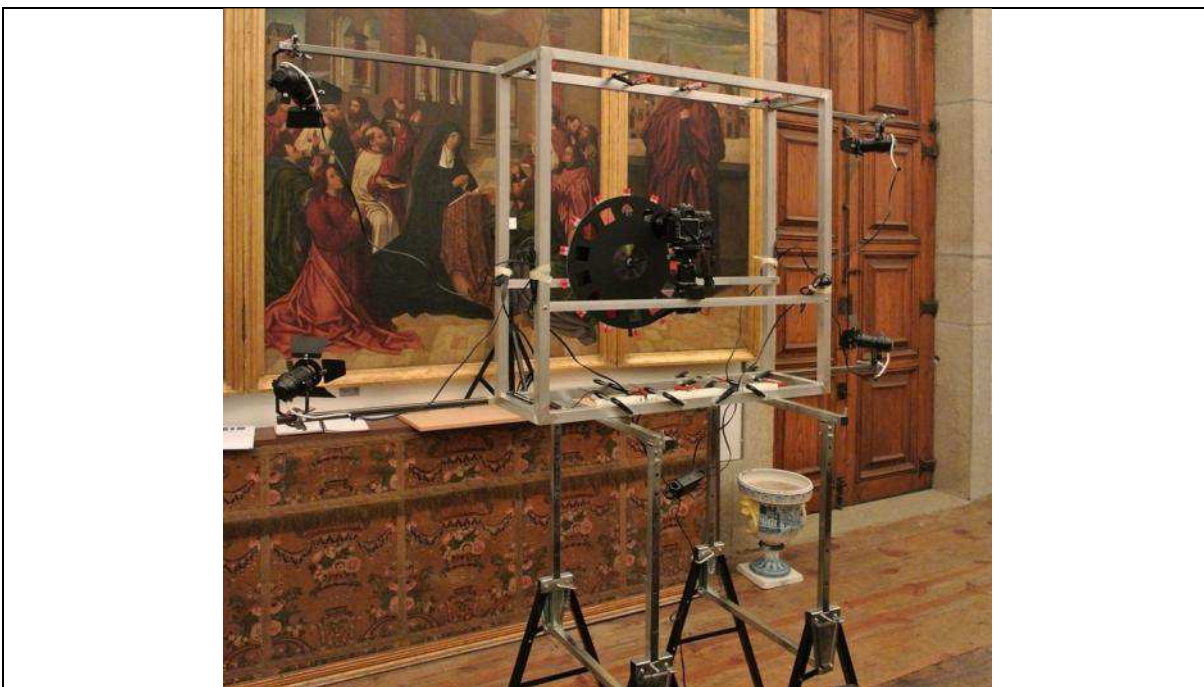


Figura 64: Montagem II: segunda montagem de geometria 45°/0° usada “in situ”.
Fotografia por LBP.

Esta nova montagem pode ser observada na figura acima, é apresentada em frente a uma obra (Tríptico de Pentecostes da Igreja de S. Pedro de Miragaia, Porto, Portugal, séc. XVI; abas do Tríptico abertas). A câmara, filtros e focos de luz (que agora se apresentam em número de 4, para permitir uma cobertura mais homogénea da zona a digitalizar) estão aplicados numa mesma estrutura metálica de alumínio, apoiada neste exemplo em cavaletes, e que pode ser deslocada nos eixos horizontal e vertical (paralelamente ao plano da obra) ou para trás e para a frente (mudando a distância ao tema para, por exemplo, se poder digitalizar o

alvo branco de referência) mantendo-se sempre unidos os elementos constituintes (câmara/filtros/focos), sem que se altere a sua geometria.

Aplicada sobre a câmara D-SLR, foi usada uma webcam (canto superior esquerdo da fotografia na figura abaixo) que permitiu inspecionar remotamente o correto alinhamento dos filtros na roda. Esta última movimenta-se por ação de um motor elétrico, controlado remotamente pelo operador e os marcadores coloridos - visíveis na figura - servem para orientar o alinhamento dos filtros com a objetiva.



Figura 65: Pormenor da webcam, usada para inspecionar o correto alinhamento dos filtros com a objetiva da D-SLR.

Fotografia por LBP.

Para controlar os disparos e também configurações da câmara D-SLR (que mudam consoante o filtro e adaptação às bandas do espectro EM a registar), a câmara foi controlada remotamente por software. Fizeram-se algumas experiências com o software oficial do fabricante da câmara (Nikon Camera Control Pro – Version 2) mas decidiu-se no final por um software independente, o “Control My Nikon - version 4”, que não só permite o controlo remoto da Nikon D300, mas também a gravação das inúmeras configurações para os parâmetros da câmara, que podem assim ser ajustados de forma rápida e com menor probabilidade de erros por parte do operador. Este software passa também a, automaticamente, descarregar, renomear e organizar os ficheiros de imagem captados.

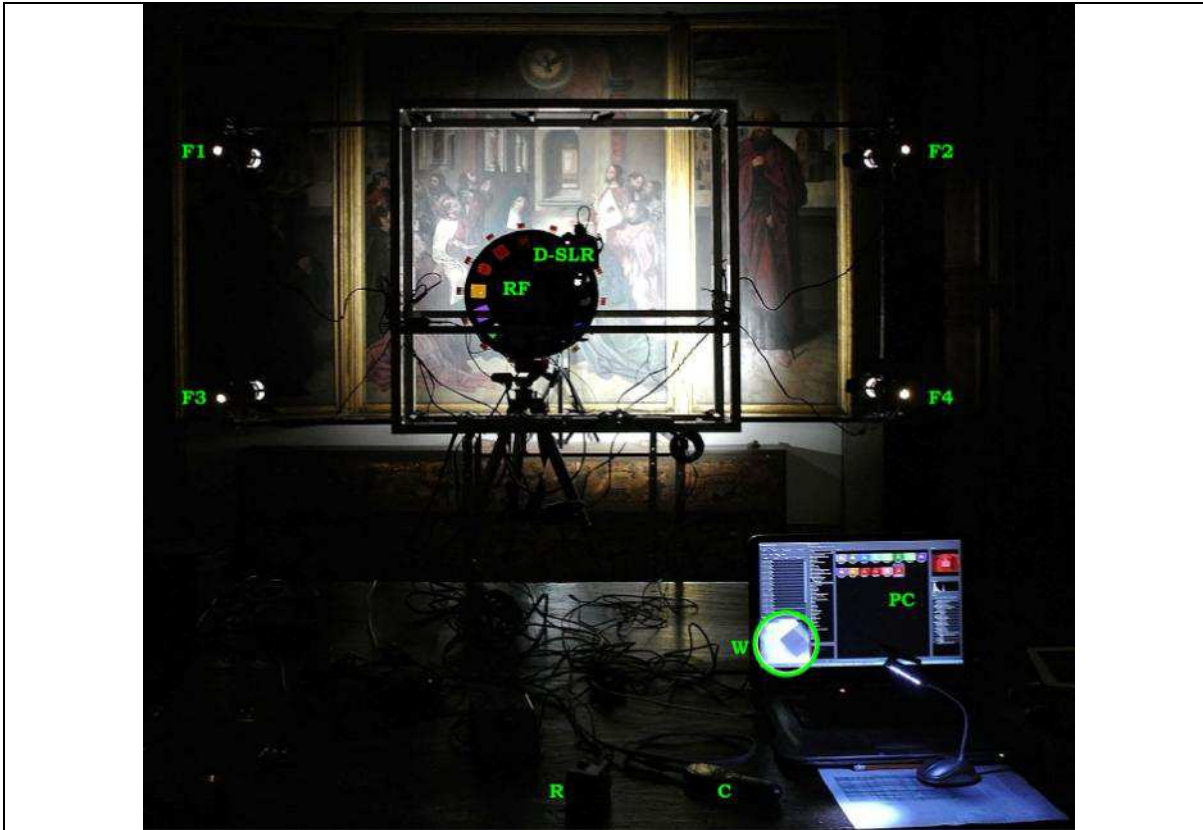


Figura 66: Exemplo da Montagem II em funcionamento.
Para saber o significado das letras, ler o texto. Fotografia por LBP.

Na figura acima a montagem é apresentada em frente a uma obra (o “Tríptico de Pentecostes” da Igreja de S. Pedro de Miragaia, Porto, Portugal, séc. XVI). A sala encontra-se em obscuridade e apenas os 4 focos com lâmpadas SoLux (letras *F1*, *F2*, *F3* e *F4*) iluminam a obra. Em primeiro plano podemos observar o posto do operador do equipamento, onde se identifica:

- do lado direito, o computador (letras *PC*) que remotamente controla a câmara e recolhe os ficheiros (observa-se no ecrã o interface do software de controlo remoto “Control My Nikon” e uma imagem vinda da webcam (zona marcada com letra *W*), mostrando os marcadores de alinhamento dos filtros);
- ao centro, dois comandos remotos: o de controlo do motor elétrico (letra *R*) da roda dos filtros (*RF*) e o controlo remoto do disparador (letra *C*) da câmara Nikon D300 (letras *D-SLR*); este último comando é necessário

apenas para tempos de exposição superiores a 30 segundos, em modo “Bulb” (neste modo o tempo de exposição não é possível de ser controlado pelo *software*)

Toda esta estrutura permite ainda suportar os próprios focos de iluminação que - tal como a câmara - já não precisam de ser montados em tripés. A estrutura permite manter a geometria de iluminação, paralelismo entre a câmara e a obra, distâncias da câmara à pintura a digitalizar, principalmente quando a obra é de grandes dimensões e implica, para se cobrir diferentes regiões da mesma, a deslocação coerente de todo o sistema. Esta possibilidade do sistema ser deslocado num só conjunto facilita também a digitalização do alvo branco de referência, necessária ao cálculo de reflectâncias. O alvo branco pode ser colocado num tripé, a cerca de 10 cm da obra (ver “Figura 57”), sendo possível afastar em seguida todo o sistema da montagem a mesma distância de 10 cm, preservando rigorosamente a mesma geometria. Torna-se possível, assim, efetuar o registo do alvo branco de referência em condições o mais similares possíveis às do registo da obra.

Um bom exemplo de translação de todo o sistema observa-se na figura seguinte, em que a montagem se elevou a cerca de 1,8 m de altura, em posição de digitalizar uma zona mais elevada do quadro (“Tríptico de Pentecostes” da Igreja de S. Pedro de Miragaia, Porto, Portugal, séc. XVI). Além dos dois cavaletes das figuras anteriores, acrescentou-se um segundo nível de cavaletes, apoiado em pranchas de madeira. Também se observa na figura o espetroradiómetro montado em tripé, no momento em que se usou para as medições de comparação.



*Figura 67: Exemplo da Montagem II elevada em altura (a cerca 1,8 m).
Fotografia de LBP.*

3.9.1- Protocolo para digitalização Hiperespectral com o sistema final

A digitalização hiperespectral, com qualquer das montagens, cumpriu os passos do seguinte protocolo:

- i. Com qualquer uma das montagens explicadas acima, procurou-se ter a obra a digitalizar em total obscuridade, apenas recebendo luz dos focos da montagem;
- ii. Com a câmara Nikon D300 ajustada em modo manual, as seguintes configurações foram reguladas:
 - a. modo de exposição manual;
 - b. ficheiros RAW a 12 bit/canal e perfil AdobeRGB1998;
 - c. sensibilidade a 200 °ISO;

- d. abertura do diafragma a $f/5,6$ (ou $f/4$ em alguns filtros mais densos; ver tabelas de exposições, Apêndice D);
 - e. balanço de brancos personalizado efetuado diretamente no alvo branco de referência, sem filtros, e que se mantém constante ao longo de todo o registo;
 - f. velocidade de obturação variável consoante a densidade do filtro em causa; para mais informação sobre a exposição utilizada em cada filtro, ver subcapítulo seguinte;
- iii. com cada um dos filtros, efetuou-se a captura de imagem (ou capturas, quando canais diferentes são usados com necessidades de tempos exposição diferentes); para mais informação sobre a exposição utilizada em cada filtro, ver subcapítulo seguinte;
 - iv. repetiram-se todos os passos anteriores, mantendo todas as condições, mas em que a obra é trocada pelo alvo branco de referência.
 - v. Substituiu-se posteriormente a câmara pelo espectrorradiómetro PR650, na posição do observador segundo a geometria $45^\circ/0^\circ$ - geometria recomendada pelo CIE, explicada já anteriormente na secção 3.2 – e mediram-se os mesmos pontos da imagem que posteriormente foram usados nas métricas de comparação; repetiu-se o mesmo passo usando agora como alvo a superfície refletora difusa branca Labsphere.

Os ficheiros de imagem registados com a câmara (Nikon D300) e com o espectrorradiómetro de referência (Photo Research PR650) foram transferidos para o computador, onde foi efetuado o tratamento dos dados digitalizados, seguindo-se os seguintes passos:

- vi. Converteu-se os ficheiros RAW em ficheiros TIFF com o software DCRAW ajustado para efetuar interpolação de cor bilinear, sem associar qualquer perfil de cor, sem aplicar multiplicadores de balanço de brancos ou de sensibilidade ISO e com curva *gamma* de tipo linear; basicamente, os

parâmetros do DCRAW em modo de comando são os seguintes (alguns não afetam a imagem no nosso caso, mas surgem sempre por defeito):
-v -r 1 1 1 1 -o 0 -q 0 -W -T -g 1 1 -t 0 -H 0;

- vii. de cada ficheiro foi aproveitado o canal ou os canais que serão utilizados para obter informação das bandas do espectro EM;
- viii. Considerando valores médios das intensidades, numa área de cada imagem/canal onde a distribuição da potência espectral do iluminante foi calculada, a reflectância de cada área analisada é dada pela seguinte equação:

$$r_e(\lambda) = R_e(\lambda)/R_w(\lambda) \quad (3.4)$$

Onde $r_e(\lambda)$ representa a reflectância estimada, $R_e(\lambda)$ a irradiância espectral medida na superfície do ponto da obra e $R_w(\lambda)$ a distribuição de radiância espectral medida na superfície branca de referência.

No tratamento dos ficheiros de imagem capturados, numa primeira abordagem em vez de se efetuar interpolação de cor com o DCRAW gravaram-se ficheiros TIFF em escala de cinzentos, sem qualquer interpolação de cor dos pixéis da imagem e criou-se um algoritmo em MatLab que, reduzindo a resolução da imagem a $\frac{1}{4}$ da sua resolução total, permitia tratar como sendo um ponto de imagem final cada conjunto de 4 pixéis do padrão mínimo do mosaico de Bayer, ou seja, as cores eram efetivamente lidas, sem interpolação (apenas para os dois pixéis verdes do conjunto de 4 pixéis se fazia uma média dos seus valores). Verificou-se mais tarde que este passo extra, além de fazer perder enorme resolução na imagem resultante, não apresentava uma diferença muito significativa na qualidade e rigor das medições finais, quando se comparava com ficheiros obtidos através da conversão direta realizada no DCRAW - método adotado no protocolo final, recorrendo a interpolação de cor bilinear. Este último método apresenta vantagens na rapidez (pela redução do n.º de passos) e no preservar da resolução original da imagem.

3.9.2- Determinação da exposição em função do filtro e banda de espectro EM a selecionar

Numa fase inicial foi realizada com o fotômetro TTL da câmara, em modo pontual, lendo-se diretamente num cartão cinza 18% da Novoflex ou no alvo branco de referência e compensando com +2,33 EV de exposição. Na prática constatou-se que, com alguns filtros, para ser possível extrair informação de certos canais a exposição concordante com esta medição do fotômetro da câmara era insuficiente, dando imagens subexpostas - e sujeitas a mais ruído. Pelo método de tentativa e erro, foram determinados novos valores para a obtenção da melhor exposição com um mínimo de ruído (usando imagens do alvo branco de referência nesta tentativa).

O critério usado foi o de eleger o valor mais alto possível de obter antes de se atingir a saturação do canal da câmara pretendido. Se cada canal R, G e B guarda valores até um máximo de 255 níveis de cinzento, o ideal será os valores não superarem 95 a 98% do valores de saturação, ou seja, os níveis de cinza apresentarem valores abaixo de 242 (para 95% de saturação) ou 250 (para 98% de saturação). Valores inferiores são possíveis de serem aproveitados com sucesso, mas se forem demasiado baixos implicam menos precisão devido à maior probabilidade de surgir ruído. Por razões que se desconhece, usando o DCRaw na conversão dos ficheiros e com os parâmetros explicados no texto, constatou-se ainda que, na presente prática, o canal G (verde) nunca apresentou valores acima de 239 (teoricamente, a 93,7% de saturação), o que significa na prática que a saturação deste canal se verifica com este valor. Sendo assim, nas digitalizações realizadas, sempre que se utilizou o canal G do sensor, houve o cuidado de evitar registos próximos de 239.

Com este método chegou-se aos resultados presentes na tabela do Apêndice D, que permitem estimar de um modo prático os tempos de exposição a usar para cada filtro e canal da câmara, com base numa intensidade de luz incidente,

medida em E.V. com um fotômetro manual - em vez das medições através do fotômetro TTL incorporado na câmara.

Consoante o caso, uma de duas aberturas para o diafragma da objetiva foram usadas durante a digitalização, f/4 ou f/5.6 (escolhidos em função da necessidade prática de reduzir alguns tempos, pois em alguns casos temos exposições de dezenas de minutos ou horas, pouco práticas).

Calcula-se a exposição em função da intensidade da luz que chega à zona do alvo ou da obra a digitalizar. O fotômetro manual usado para estas medições foi um Sekonic Flashmate L-308B (com cúpula pontual Lumidisc), em modo "EV" (o que nos dá medições de iluminação em E.V.); usaram-se depois os valores apresentados na tabela do Apêndice D. Por exemplo: se com o fotômetro referido se medir uma intensidade da luz de 7,0 E.V., com o diafragma da lente a f/4 e o filtro 06 (Red 25) digitaliza-se com a câmara uma imagem com velocidade de obturação de 1 segundo; se, pelo contrário, se optar por uma abertura de diafragma de f/5.6, no mesmo exemplo a exposição necessária seria de 2 segundos (consultar tabela do Apêndice D para melhor entender este exemplo).

Quando os tempos de exposição se apresentam em valores superiores a 30 segundos, é necessário regular a câmara para modo "Bulb" e usar um disparador remoto. Este tipo de disparador usa notação de tempo em "horas:minutos:segundos", razão pela qual na tabela de anexos referida os tempos superiores a um minuto se apresentam nessa notação.

Ao todo, com o sistema de 13 filtros mais uma posição sem filtro nenhum, sistema este descrito na Montagem II ("Figura 64: Montagem II: segunda montagem de geometria 45°/0° usada "in situ."), efetuou-se a captura de 20 ficheiros de imagem, de que se aproveitam a informação obtida em 22 bandas espectrais, dos 420 aos 690 nm, com passos de 10 nm, mas que deixa lacunas aos 440, 450,

460, 520, 530 e 660 nm. Estas lacunas são preenchidas em pós-tratamento informático, usando um algoritmo de interpolação cubica⁶².

As combinações de filtros e canais da câmara (R, G ou B) de que resultam as bandas espectrais medidas apresentam-se na tabela da página seguinte.

⁶² *Piecewise Cubic Hermite Interpolation.*

3.- Material e Métodos

Ficheiro N.º:	Filtro:	Nome do Filtro:	Canal RGB usado:	Banda espectral medida:
1	00	Câmara sem filtros externos	Red	600 nm
1	00	Idem	Blue	490 nm
2	00	Idem	Green	550 nm
3	01	Edmund Optics Dichroic Blue	Green	500 nm
4	02	Edmund Optics Dichroic Cyan	Red	590 nm
5	03	Edmund Optics Dichroic Green	Blue	510 nm
6	03	Idem	Green	540 nm
7	03	Idem	Red	580 nm
8	04	Edmund Optics Dichroic Magenta	Blue	480 nm
9	04	Idem	Red	630 nm
10	05	Edmund Optics Dichroic Yellow	Green	570 nm
11	06	Celestron Red 25	Red	640 nm
12	07	Schott RG630	Red	650 nm
13	08	Schott RG665	Green	680 nm
14	08	Idem	Red	670 nm
15	09	Schott RG695	Red	690 nm
16	10	Rowi 85B	Green	560 nm
16	10	Idem	Red	610 nm
17	11	Sinar CC30M	Red	620 nm
18	12	Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=400\text{nm}$	Blue	430 nm
19	12	Idem	Red	420 nm
20	13	Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=450\text{nm}$	Blue	470 nm

Tabela 3.1: tabela explicativa da combinação entre canais (R, G ou B) da câmara e filtros externos.

Nota: por vezes, com o mesmo filtro é necessário captar vários ficheiros, com tempos de exposição diferentes, consoante o canal a ser usado. Para mais informação, ler o texto.

4.- Aplicações experimentais e Resultados

Conteúdo do capítulo:

4.1- Introdução.....	221
4.1.1- Métricas de avaliação da qualidade dos resultados.....	222
4.1.1.1- Interpretação dos resultados das métricas.....	224
4.1.2- Análise subjetiva dos gráficos das curvas espectrais.....	226
4.2- Resultados experimentais	230
4.2.1- Alvos (em ambiente de estúdio)	230
4.2.1.1- Testes de consistência.....	230
4.2.1.2- Alvo ColorChecker, montagem intermédia de 5 filtros.....	235
4.2.1.3- Alvo ColorChecker, montagem final com 13 filtros	236
4.2.2- Obras de Arte (pinturas artísticas)	241
4.2.2.1- Pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc. XVI).....	241
4.2.2.2- Pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX).....	248
4.3- Simulações de visualização a partir do cubo hiperespectral.....	257
4.3.1- Pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc. XVI).....	260
4.3.2- Pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX).....	264

4.1- Introdução

A análise e interpretação dos resultados obtidos com o sistema hiperespectral apoia-se em algumas métricas (descritas e explicadas no subcapítulo 4.1.1), mas também na própria observação e interpretação subjetiva dos gráficos representativos das curvas de reflectância (subcapítulo 4.1.2), obtidas com as diferentes montagens bem como com o sistema de referência.

Numa primeira fase, a calibração do sistema realizou-se com um alvo de cor *X-Rite Standard ColorChecker*, de 24 amostras de cor, cujos resultados são descritos e discutidos no subcapítulo 4.2.1. Por meio deste alvo testaram-se duas montagens do sistema hiperespectral: uma intermédia (com 5 filtros, subcapítulo 4.2.1.2), outra definitiva (de 13 filtros, subcapítulo 4.2.1.3). Neste subcapítulo, realizou-se ainda um teste de consistência de registo de dados entre sessões diferentes, bastante espaçadas no tempo (subcapítulo 4.2.1.1).

O uso de alvos de cores uniformes em ambiente laboratorial não obsta a necessidade de comparar *in situ* as capacidades do sistema definitivo em face de reais obras de arte, normalmente presentes em contextos complexos, por vezes com fontes de iluminação de natureza diversa e em alguns casos difíceis de controlar, o que poderá até em casos extremos inviabilizar o uso de um sistema hiperespectral por razões de ordem prática.

Na escolha das obras a utilizar no presente trabalho e perante a possibilidade de haver diferenças significativas nos materiais artísticos de épocas distintas e bastante afastadas, optou-se por uma pintura do séc. XVI (uma pintura de origem flamenga de artista anónimo, o *Tríptico de Pentecostes*⁶³ da Igreja de S. Pedro de Miragaia, no Porto) e outra do séc. XX, do mestre Júlio Pomar, *O Cabouqueiro*.

Os requisitos usados na escolha foram:

⁶³ Também conhecido apenas por “*Tríptico de Miragaia*”, título que usaremos doravante neste trabalho.

- que se tratassem de obras conhecidas no âmbito nacional;
- que fossem obras representativas de materiais e técnicas utilizadas na sua época;
- que as obras tivessem sido cientificamente estudadas e caracterizadas, principalmente na sua composição pictórica⁶⁴.

Os resultados obtidos para estas obras apresentam-se e discutem-se no subcapítulo 4.2.2.

Também se chegou a realizar a digitalização de uma coleção de 25 amostras de pigmentos da Marca *Kremer*, pigmentos estes em pó compactado (sem aglutinante, misturas ou diluições), mas as tentativas de digitalização apresentaram problemas de que resultaram medições com valores erróneos e inconstantes, que não se conseguiram ultrapassar nem perceber o que os causava (mesmo após uma segunda tentativa), pelo que no âmbito da tese se decidiu não incluir esses resultados, por não serem fiáveis.

4.1.1- Métricas de avaliação da qualidade dos resultados

Para avaliar a qualidade dos dados registados e apresentados nos subcapítulos seguintes, é necessário recorrer a métricas matemáticas e comparar a proximidade entre os resultados obtidos com os diferentes sistemas em teste e o sistema de referência. Estas métricas foram já descritas detalhadamente no subcapítulo “2.3.4- Fórmulas de diferenças de cor”.

Não existe um consenso generalizado entre os investigadores sobre quais as melhores métricas a utilizar. Alguns autores trabalham com o intuito de encontrar métricas combinadas, que conjuguem diversas métricas numa só, facilitando deste modo a avaliação de um sistema de digitalização espectral, como é o caso da CSCM ou *Colorimetric and Spectral Combined Metric* (Quijano Ruiz, 2010, pp.

⁶⁴ Para que os dados de digitalização hiperespectral, registados no presente trabalho, possam ser utilizados em estudos futuros mais aprofundados da obra.

7-10). Embora sem esse consenso, sustentados na literatura consultada podemos concluir que as métricas mais utilizadas tendem a agrupar-se em quatro categorias (Ferreira, 2010; Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002; Quijano Ruiz, 2010), das quais se descrevem resumidamente⁶⁵ as três usadas no presente trabalho:

i. Diferenças de cor baseadas nas equações da CIE:

Desde 1931 que a CIE disponibiliza sistemas de caracterização de cor, amplamente utilizados pela indústria e grupos de investigação nas áreas de luz e cor, melhorados ao longo do tempo com a publicação regular de novas especificações. Um dos principais espaços de cor, criado em 1931, o XYZ⁶⁶, embora na sua conceção inspirado no sistema visual humano, apresenta paradoxalmente como principal problema o facto de, em termos de percepção visual, ser um espaço não uniforme, ou seja, perante variações iguais nas coordenadas X, Y ou Z não correspondem diferenças visualmente perceptíveis na mesma magnitude⁶⁷ (Westland & Ripamonti, 2004). Tal facto explica-se pelo modo como se comporta o sistema visual humano, cuja sensibilidade à luz não é linear (Quijano Ruiz, 2010). Para ultrapassar esta limitação, a partir de 1976, a CIE passou a recomendar o uso preferencial de dois novos espaços de cor (Westland & Ripamonti, 2004, p. 52): o espaço CIE $L^*a^*b^*$ ⁶⁸ e o espaço CIE $L^*u^*v^*$, igualmente conhecidos pelas siglas CIELAB e CIELUV. O CIELUV destina-se essencialmente a ser usado na caracterização das cores da luz ou de fontes emissoras da sua própria luz, enquanto que o CIELAB será mais indicado para a caracterização de cores de superfícies. No presente trabalho, usaram-se métricas de diferenças de cor baseadas equações da CIE:

$$\Delta E_{ab}^*, \Delta E_{94}^*, \Delta E_{00}$$

ii. Diferenças entre curvas espectrais:

⁶⁵ A descrição detalhada destas métricas, suas fórmulas, etc., apresentam-se no capítulo 2.3.4.

⁶⁶ Para mais informação sobre este modelo, consultar o subcapítulo 2.3.1.

⁶⁷ O mesmo se passa com o modelo RGB de representação de cor, usado em câmaras fotográficas digitais.

⁶⁸ Para mais informação sobre este modelo, consultar o subcapítulo 2.3.3.

Outra abordagem, amplamente utilizada, para analisar a qualidade do ajuste espectral consiste no cálculo das diferenças entre as curvas espectrais dos dois estímulos a comparar. As duas métricas desta categoria, usadas no presente estudo, foram o Coeficiente de Ajuste (*GFC* ou *Goodness of Fit Coefficient*) e o Erro Quadrático Médio (*RMSE* ou *Root Mean Square Error*).

iii. Índices de Metamerismo:

O desempenho de um sistema espectral, em termos de qualidade de ajuste espectral e de precisão colorimétrica, pode ser também analisado através de índices de metamerismo (Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002), que constituem uma métrica de comparação do registo de dois estímulos. Sendo iguais em determinada condição de observação e de iluminação (condição de referência), deixa de o ser quando muda pelo menos uma dessas variáveis, o observador ou o iluminante (condição de teste).

No presente trabalho foi utilizado um tipo de índice de metamerismo, proposto por Fairman, que usa uma decomposição paramétrica, a que a CIE em 1986 designa como “índice de metamerismo especial” (Ferreira, 2010; Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002; Quijano Ruiz, 2010). Este índice baseia-se em diferenças expressas em unidades de equações de diferenças de cor da CIE, neste caso foram usadas ΔE_{ab}^* e ΔE_{00} . As condições de referência são definidas para um iluminante padrão D65, as condições de teste para um iluminante padrão A e iluminante F2, considerando - em todas as condições - um observador padrão da CIE1964⁶⁹.

4.1.1.1- Interpretação dos resultados das métricas

Como já referimos anteriormente, não existem padrões definidos para estes três grupos de métricas. Por conseguinte, também não existem consensos na

⁶⁹ Informação sobre iluminantes e observadores padrão foi já disponibilizada nos subcapítulos 2.2 e 2.3.

interpretação dos resultados por elas obtidos. Podemos comparar sistemas diferentes (p. ex, sistema de referência e sistema de teste) com recurso a estas e, se a fiabilidade do sistema de referência for amplamente reconhecida, saber até que ponto os sistemas diferem um do outro e apreciar assim a qualidade do sistema em teste.

No primeiro grupo de métricas supracitado, das diferenças de cor baseadas nas equações da CIE (ΔE_{ab}^* , ΔE_{94}^* , ΔE_{00}), a diferença de cor unitária (por exemplo, $\Delta E_{ab}^* = 1$) representa a diferença mínima mensurável (Hunt, 2004, p. 66). Não obstante, segundo alguns autores (Ferreira, 2010, p. 173; Hardeberg, 1999, p. 22; Quijano Ruiz, 2010, p. 5) ao avaliar diferenças de cor entre dois estímulos com este tipo de índices, valores inferiores a 3 unidades serão dificilmente perceptíveis pelo observador, valores entre 3 e 6 poderão ser considerados “aceitáveis” e valores superiores a 6 consideram-se “inaceitáveis”. Mas, para esta mesma métrica ΔE_{ab}^* , alguns autores na avaliação do desempenho de um *scanner* de superfícies refletivas consideraram que, nas diferenças de cor entre dois estímulos, se o resultado se situar entre 0 e 1 unidade esse valor encontra-se nos limites da perceção de diferença pelo observador, resultados entre 1 e 3 unidades significam que a qualidade é “muito boa”, entre 3 e 6 a qualidade é classificada como “boa”, entre 6 e 10 como “suficiente” e, por fim, só com valores superiores a 10 unidades é que consideram que a qualidade é “insuficiente” (Hardeberg, 1999, p. 22). Na comparação de duas imagens de cor observadas lado a lado, com erros sistemáticos que resultam numa diferença de cor média menor ou igual a 2,2 unidades de ΔE_{ab}^* , um valor máximo de 5 unidades entre elas será impercetível e um sistema de aquisição de imagens bem planeado apresentará diferenças de cor médias menores ou iguais a 2 unidades de ΔE_{ab}^* (Berns, 2001, p. 314).

Para o segundo grupo de métricas mencionado, baseado na medição de diferenças entre curvas espectrais, a interpretação dos resultados é mais simples: no *RMSE*, quanto mais baixo for o valor, tanto melhor será a qualidade do sistema

testado, sendo considerado “excelente” para valores próximos de zero (Ferreira, 2010; Quijano Ruiz, 2010, p. 5); segundo o índice *GFC* a qualidade do ajuste espectral será tanto melhor quanto mais próximos estiver da unidade, considerando-se que o ajuste espectral é “excelente” para valores iguais ou superiores a 0,9999 e classificando-se de “bom” para valores entre 0,9990 e 0,9999 (Ferreira, 2010, p. 164; Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, p. 492; Quijano Ruiz, 2010, p. 6).

Para o terceiro e último grupo, os *índices de metamerismo*, os resultados serão considerados tanto melhores, quanto mais baixos forem os valores obtidos. No caso do “Índice de metamerismo geral” (assim designado pela CIE) um valor de 3 unidades é considerado um excelente ajuste (Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, p. 493) - embora, no presente trabalho, se tenha utilizado um outro índice que não este, como já foi referido acima.

4.1.2- Análise subjetiva dos gráficos das curvas espectrais

A simples utilização das métricas, só por si, não nos permite por vezes compreender e interpretar de forma completa o significado dos dados obtidos. O uso de gráficos para interpretar informação é uma ferramenta útil que se deve conjugar com as métricas descritas no capítulo anterior. Por exemplo, durante os trabalhos de desenvolvimento da montagem com 13 filtros do sistema em teste, numa das fases intermédias foi excluído o filtro Cokin 80B (que daria informação nas bandas espectrais dos 530nm e dos 660nm), decisão tomada com base na informação dada pelos gráficos de que a figura seguinte representa um exemplo.

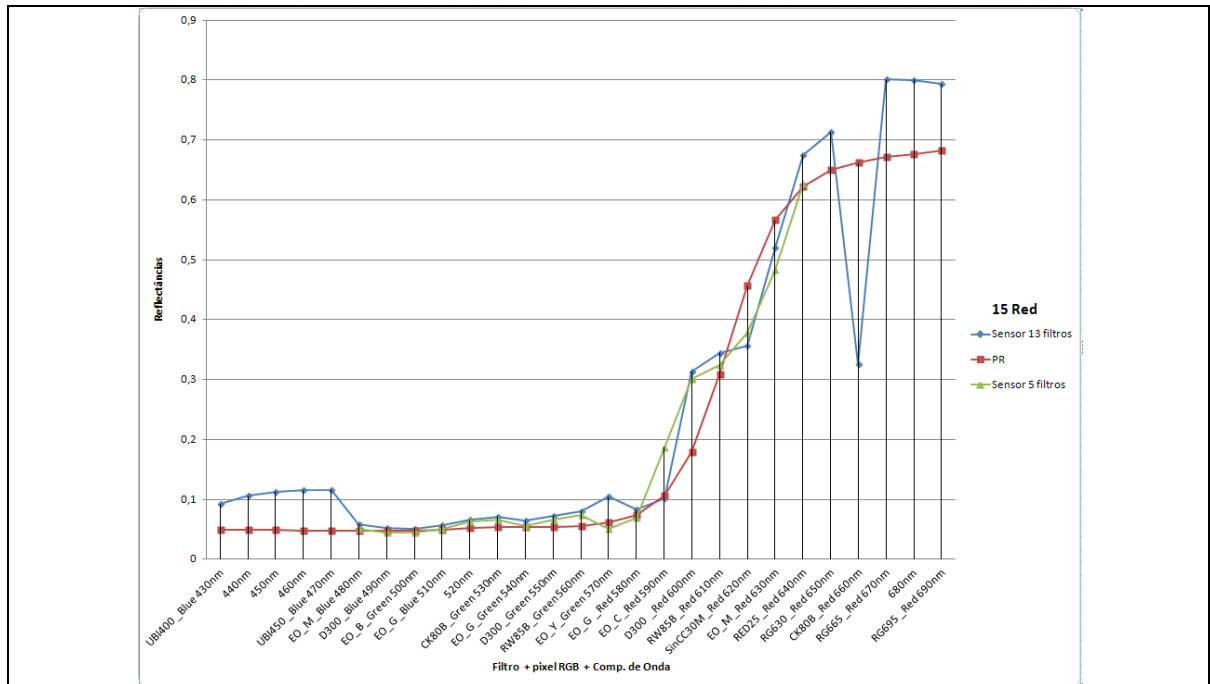


Figura 68: Gráfico comparativo de reflectâncias relativas medidas na amostra de cor “15 RED” do alvo Colochecker.

Ilustração por LBP

Na figura acima, é apresentado um gráfico comparativo entre as curvas de reflectâncias espectrais registadas com o espectroradiómetro de referência PR650 (“PR”), com a montagem intermédia da D-SLR Nikon D300 + 5 filtros (designado no gráfico como “sensor 5 filtros”) e com a montagem intermédia (não confundir com a montagem final do subcapítulo 3.9) da Nikon D300 + 13 filtros (designado no gráfico como “sensor 13 filtros”). No eixo dos Y, apresentam-se os valores de reflectância relativa; no eixo dos X, o comprimento de onda (assim como a combinação de filtro + canal R, G ou B da câmara D-SLR, que dá informação nesse comprimento de onda).

Nesta montagem intermédia os filtros ainda não eram os definitivos e o já referido filtro Cokin 80B seria o responsável, aparentemente, pelo erro de leitura como se observável no desvio claro da curva azul aos 660nm, onde não acompanha a curva do espectroradiómetro de referência (linha vermelha). Observa-se também um grande desvio da curva representativa das reflectâncias do sistema intermédio em teste, aos 660 nm. Este problema surgiu em outras cores do *ColorChecker*,

nos dados registados usando este mesmo filtro, o que é claramente indicativo de ser um filtro problemático para uso na digitalização multi ou hiperespectral com o sistema em teste.

Não havendo erros nas fases de registo e tratamento dos dados, é possível encontrar uma causa muito provável para explicar este desvio, através da observação e interpretação atenta de outro gráfico:

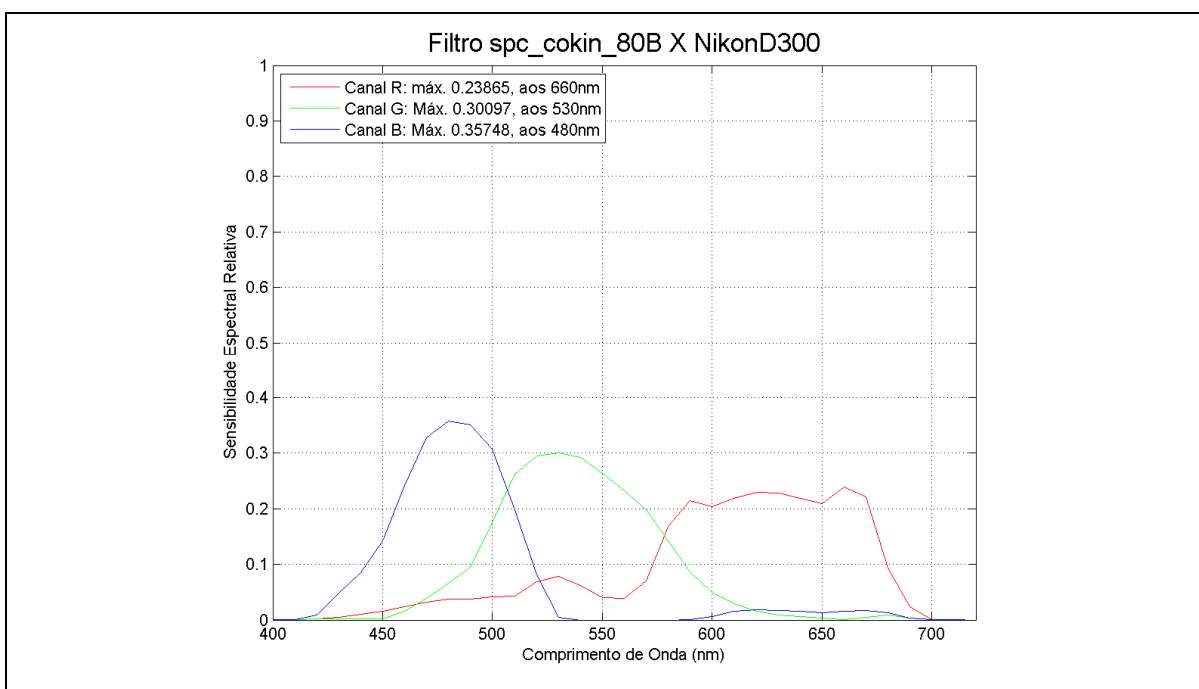


Figura 69: Gráfico representativo da Sensibilidade espectral do sensor da câmara Nikon D300 quando combinado com o filtro Cokin 80B.
Ilustração por LBP.

Da figura anterior é possível constatar que o canal Vermelho do sensor da câmara Nikon D300 foi o usado no registo da informação da banda correspondente aos 660nm, banda onde se tinha verificado o grande desvio observado e referido anteriormente. Esta curva de sensibilidade espectral do canal Vermelho não apresenta um pico de sensibilidade máxima bem definido (apesar de, matematicamente, ter também um valor de pico máximo, aos 660nm), bem pelo contrário, mostra vários picos secundários de sensibilidade próxima do pico principal, o que certamente dificulta a separação da banda espectral pretendida e

que é uma situação considerada, por isso mesmo, indesejável (Hardeberg, 1999, p. 140) e que pode explicar só por si tão grande desvio na curva do gráfico anterior. Embora isto pudesse, em teoria, permitir o registo de duas bandas espectrais, optou-se, no sistema final, por rejeitar este filtro devido à má qualidade de separação espectral observada e aqui descrita.

Concluindo, este exemplo é eloquente quanto à importância de se analisar e interpretar gráficos de curvas espectrais, para melhor se compreender a informação registada, mesmo que as métricas matemáticas apresentem bons resultados aparentemente.

Os gráficos representativos das sensibilidades espectrais resultantes da combinação dos canais R, G ou B do sensor da câmara Nikon D300 com os 13 filtros usados no sistema hiperespectral testado, podem ser observados na coluna direita da tabela do Apêndice J.

4.2- Resultados experimentais

4.2.1- Alvos (em ambiente de estúdio)

Os resultados relativos aos alvos de cor *ColorChecker* de 24 cores apresentam-se de seguida organizados em três subcapítulos: no primeiro (4.1.1.1.) expõem-se dois testes de consistência a dois parâmetros para determinar a fiabilidade e repetibilidade dos dados a registar; no segundo (4.1.1.2.), mostram-se os resultados respeitantes ao sistema de digitalização hiperespectral intermédio com 5 filtros; por fim, daremos conta dos resultados do sistema definitivo no âmbito desta tese, que utiliza 13 filtros, com a mesma câmara e geometria de montagem do sistema anterior.

4.2.1.1- Testes de consistência

Para melhor avaliar a consistência dos dados registados sobre o alvo de referência de 24 cores *ColorChecker*, realizaram-se dois testes no que diz respeito a dois parâmetros. Sendo testes de realização simples, forneceram informação qualitativa relevante para determinar a fiabilidade e repetibilidade dos dados a registar durante os trabalhos dos subcapítulos seguintes.

Com a câmara seleccionada para este trabalho, a Nikon D300, e usando a Montagem I (com o alvo *ColorChecker*, geometria descrita na Figura 62) realizaram-se duas comparações de dados das medições de reflectâncias obtidas com a câmara e desta com o espectroradiómetro de referência para cada uma das 24 cores do alvo. Por uma questão de simplicidade foi usada a câmara sem qualquer filtro, ou seja, obtendo informação apenas nas três bandas que são dadas pelo sensor com o seu próprio CFA interno, que com este sistema permite calcular as reflectâncias a 600, 550 e 490 nm (correspondendo aos canais R, G e B da câmara, respetivamente), como já foi mencionado no capítulo anterior.

4.- Aplicações experimentais e Resultados

Os resultados das medições, obtidos nas duas comparações (alíneas “a” e “b” descritas abaixo), apresentam-se em conjunto nos gráficos da figura seguinte:

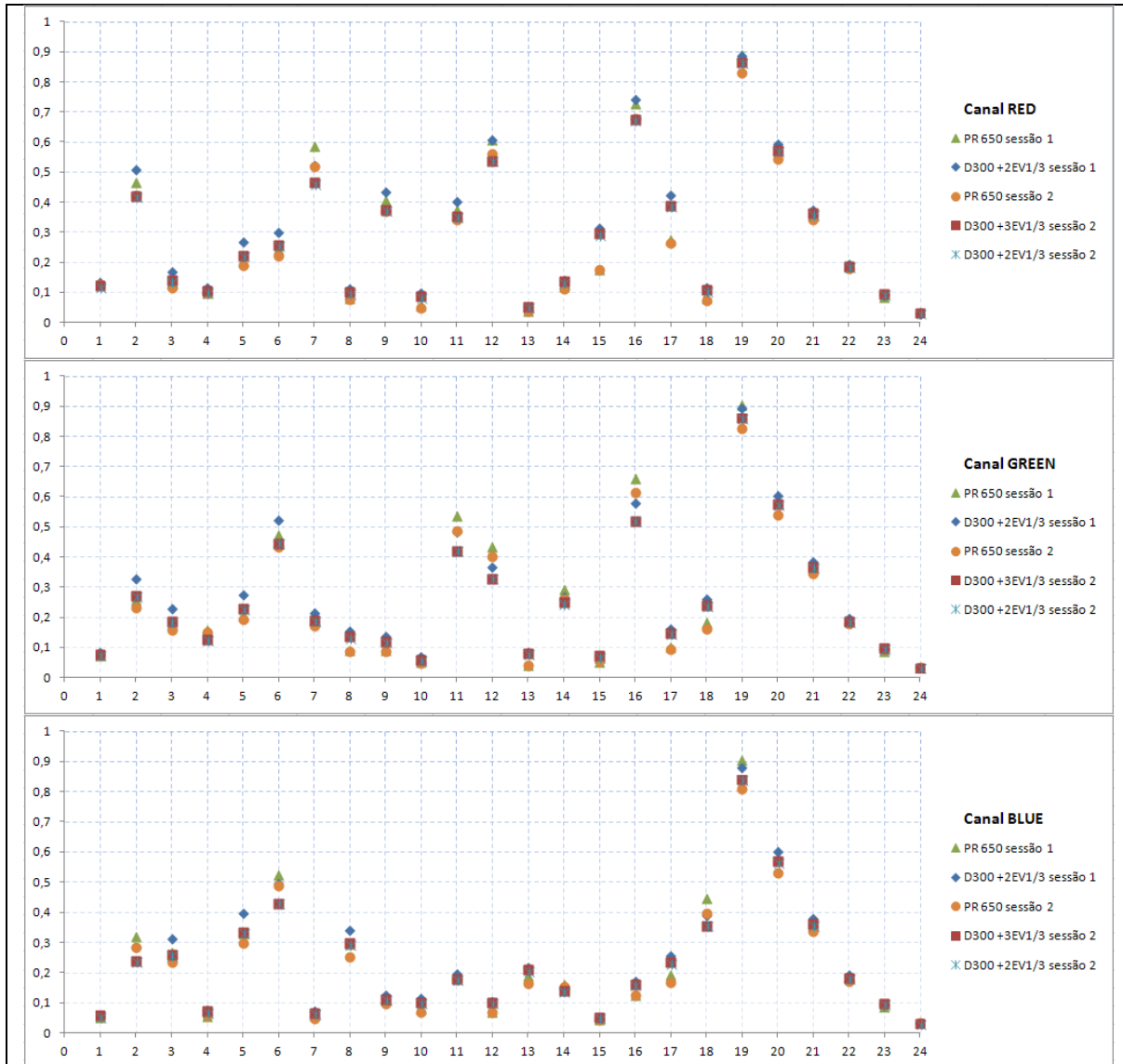


Figura 70: Comparação de reflectâncias relativas em três bandas espectrais, medidas no alvo Colochecker, em sessões diferentes e com tempos de exposição distintos.

Eixo X: ref.^a numérica das cores do ColorChecker; Eixo Y: reflectância relativa.

Ilustração por LBP.

Cada um dos três gráficos acima representa um dos canais de cor R, G ou B da câmara, correspondendo respetivamente às bandas com pico aos 600, 550 e 490 nm de comprimentos de onda. Nos eixos dos Y, apresentam-se os valores de

reflectância relativa; nos eixos dos X, cada uma das 24 cores do alvo ColorChecker, pelo seu número de ordem no alvo. “PR650”, designa o espectroradiómetro de referência. “D300” refere-se ao modelo de D-SLR da Nikon utilizado.

Para melhor clareza da descrição da metodologia específica utilizada, interpretação e discussão dos resultados apresentados na figura anterior, os dois parâmetros que se pretendia avaliar são analisados, de seguida, separadamente:

a) Consistência entre sessões diferentes

Realizaram-se digitalizações, do mesmo alvo, em alturas diferentes e em locais distintos. Procurou-se, porém, manter e reproduzir as mesmas condições de captura. Foram duas as sessões, separadas no tempo por pouco mais de ano e meio (concretamente, 19 meses):

Sessão 1: realizada em Janeiro de 2011, no Centro de Ótica da UBI (Covilhã);

Sessão 2: realizada em Agosto de 2012, no estúdio fotográfico do autor (Vila Nova de Gaia).

Interpretando os gráficos da figura anterior, quer nas reflectâncias medidas com o espectroradiómetro de referência (PR650), quer nas medidas com a câmara (Nikon D300), apuram-se algumas diferenças entre sessões. Estas diferenças poderão ser atribuídas a alguma variação no estado dos próprios equipamentos das montagens, pois estas sessões estão espaçadas por um longo período de tempo e, com este espaço de tempo e algum uso, é possível que tenha ocorrido desgaste ou envelhecimento e conseqüente variação no estado de conservação dos alvos, fontes de luz, mas também da própria câmara fotográfica e do espectroradiómetro de referência, que nesse período de tempo chegou mesmo a ser enviado para o fabricante para recalibração. Também não será de excluir

erros por parte do operador do equipamento, dada a dificuldade que representa, em momentos e localizações diferentes, reproduzir com exatidão todo o contexto e geometria das montagens.

Daqui podemos concluir que, para aumentar a fiabilidade dos dados que se irão comparar, deveremos preferencialmente efetuar as digitalizações com os dois equipamentos (o sistema hiperespectral em teste e o espectroradiómetro de referência) durante a mesma sessão.

b) Consistência entre diferenças de exposição

Na segunda sessão descrita no ponto anterior (sessão 2), realizou-se ainda uma comparação entre reflectâncias calculadas a partir de registos obtidos com tempos de exposições diferentes, estimados por meio dos seguintes processos:

- i. Medição com o fotómetro incorporado na câmara sobre um cartão cinza⁷⁰, sendo este um dos processos mais usuais em fotografia para cálculo da exposição correta - o que equivaleu à medição sobre o branco de referência e compensando em mais $2\frac{1}{3}$ EV a exposição; os valores para os canais R, G e B obtidos na imagem do branco de referência (que acompanha o alvo Colorchecker nesta montagem) ficam neste caso bastante abaixo dos seus valores máximos de saturação;
- ii. Estimativa da exposição usando o critério definido no subcapítulo “3.9- O sistema Hiperespectral”, em que se escolheu a exposição que por cada canal daria um valor mais alto, antes de se atingir a saturação de cada um dos canais; a exposição é de $+3\frac{1}{3}$ EV sobre a medição no branco de referência, pois foi este o limite que, por tentativa e erro, se constatou ser o que dava valores mais elevados antes de cada canal entrar em saturação; os valores máximos obtidos antes da saturação, por cada canal, foram de: R=210 , G=211 e B=216; com exposições superiores

⁷⁰ Cartão cinza a 18%, da Novoflex

(exemplo: exposições de $+3\frac{2}{3}$ ou $+5$ EV, medidos sobre o branco de referência), estabilizam estes valores em $R=255$, $G=239$ e $B=255$, que serão os valores com que estes canais ficam saturados no sensor da câmara.

Na sessão 2, os marcadores que nos gráficos representam as duas capturas da câmara fotográfica encontram-se sobrepostos. Ou seja, é possível afirmar que não há diferenças significativas entre medições de reflectância efetuadas com a mesma câmara e tempos de exposição diferentes (estimados pelos métodos descritos nas alíneas “i” e “ii”, no presente caso com uma diferença de 1 EV no tempo de exposição), desde que nenhum dos canais (R, G ou B) utilizados fique saturado e as capturas sejam realizadas na mesma sessão.

Tal constatação pode ser explicada pelo método utilizado no cálculo da reflectância (descrito no capítulo anterior), que implica a divisão entre os valores medidos no alvo e os da distribuição de radiância espectral (medidos diretamente na superfície branca de referência), como se expressa na equação 3.4. Ou seja, apresentando-se os resultados como valores de reflectância relativa, estamos a anular a influência do iluminante (e interferências do sistema ótico, processamento dos dados, etc.). Por isso mesmo é indiferente ligeiras diferenças no tempo de exposição - desde que estes tempos sejam os mesmos que os usados no registo da superfície branca de referência.

Tendo por base a referida montagem, é possível concluir que, para o apuramento da qualidade do registo dos dados, é mais relevante usar um valor elevado para o tempo de exposição (mas sem que se atinja a saturação dos canais R, G ou B do sensor da câmara) do que determinar a exposição correta pelo método fotográfico tradicional (de medição no tom médio, cinza a 18% de reflectância), isto porque quanto maior for o tempo de exposição, melhor será a relação de sinal/ruído (Allen & Sophie Triantaphillidou, 2011) e, conseqüentemente, os dados potencialmente registados apresentarão maior precisão. No entanto, se as

imagens captadas no processo de digitalização ficarem ligeiramente sub-expostas, a informação de reflectância não deixará de ser válida, pelo menos pela influência deste parâmetro do tempo de exposição.

4.2.1.2- Alvo *ColorChecker*, montagem intermédia de 5 filtros

Com o primeiro conjunto de filtros descrito no subcapítulo “3.5- Seleção dos filtros”, foi possível numa primeira fase testar no alvo *ColorChecker* a validade da montagem, quando se tentava ainda compreender a viabilidade do conceito. Para simplificar o processo foram usados apenas 5 filtros externos (com os números 1, 12, 15, 18 e 35, na coluna direita do Apêndice B), permitindo assim a digitalização de 12 bandas com picos de 10 em 10 nm (17 bandas no total, considerando interpolação nas zonas em que o passo seja maior do que 10 nm).

Nas duas tabelas do Apêndice E são descritos os resultados das reflectâncias medidas, com este sistema, no alvo *ColorChecker* de 24 cores (Montagem I, subcapítulo 3.9), bem como os obtidos com o espectroradiómetro de referência.

Numa primeira fase, tratando-se de uma montagem intermédia, foram usadas apenas duas métricas espectrais para avaliar a qualidade dos dados obtidos:

GFC⁷¹ (*Goodness of Fit Coefficient*, ou Coeficiente de Ajuste): 0,9927;

RMSE⁷² (*Root Mean Square Error*, ou Erro Quadrático Médio): 0,0361.

Segundo alguns autores (Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002; Quijano Ruiz, 2010), estes valores são considerados bons e indicadores de boa fiabilidade do sistema, embora não devam ser as únicas métricas a ser consideradas num sistema hiperespectral, uma vez que se torna também importante comparar métricas colorimétricas e índices de metamerismo. No entanto, como esta primeira montagem se sabia não ser a definitiva mas sim intermédia, apresentamos os dados das restantes métricas nos Apêndices G-1 e H-1, mas

⁷¹ As equações destas métricas foram apresentadas e explicadas no início do presente capítulo.

⁷² Idem.

vamos efetuar a discussão das restantes métricas na montagem definitiva de 13 filtros - no subcapítulo seguinte -, a que foi efetivamente usada nas aplicações de imagiografia espectral finais.

Apesar do elevado número de bandas medidas, a limitação principal desta primeira montagem é que cobria apenas um intervalo estreito do espectro EM visível, concretamente dos 480 nm até aos 640 nm. Para comparação, o nosso sistema de referência apresenta medições do espectro EM dos 380 nm aos 780 nm e, na caracterização dos sensores das câmaras testadas, o filtro TFT usado na seleção de bandas apresentava valores entre 400 nm e 720 nm.

Ou seja, esta primeira montagem deixava duas largas bandas, nos limites superior e inferior do espectro EM visível, por cobrir. No entanto, os bons resultados obtidos nas métricas supracitadas permitiram constatar a viabilidade do sistema (ou mesmo do conceito principal inerente, de incluir na montagem uma câmara D-SLR e filtros fotográficos) e prosseguir com o melhoramento do mesmo, que levou à criação de um segundo sistema com mais filtros (13 filtros) que, embora mais trabalhoso de operar, permitiria cobrir uma banda mais larga do espectro EM e do qual se descrevem e discutem, nos subcapítulos seguintes, os resultados com ele obtidos.

4.2.1.3- Alvo ColorChecker, montagem final com 13 filtros

Para uso nas montagens finais do sistema hiperespectral e pretendendo cobrir uma maior amplitude do espectro EM visível, foi utilizado uma montagem com 13 filtros (descritos no subcapítulo 3.5, filtros apresentados com os números 1, 4, 9, 12, 15, 18, 22, 23, 24, 53, 59, 60 e 61, na coluna direita do Apêndice B), o que permitiu a separação de 28 bandas de 10 em 10 nm (22 bandas medidas diretamente com o sistema e 6 interpoladas), cobrindo agora o espectro EM visível dos 420 nm até aos 690 nm.

As medições das reflectâncias obtidas com este sistema no alvo *ColorChecker* de 24 amostras de cor (Montagem I, subcapítulo 3.9), assim como as obtidas com o espectroradiômetro de referência, estão descritas nas duas tabelas do Apêndice F.

Na tabela 4.1, apresentam-se os valores da média, desvio padrão, valor máximo e valor mínimo da diferença entre as distribuições de reflectância espectral estimadas e medidas para o conjunto das 24 amostras de cor, por aplicação de três métricas de diferenças de cor baseadas nas equações CIE e duas métricas de diferenças entre curvas espectrais. Os valores apresentados na tabela 4.2 correspondem a valores do mesmo tipo mas para os índices de metamerismo. Nos Apêndices G-2 e H-2 encontram-se os valores individuais para cada amostra de cor do alvo *ColorChecker*. No Apêndice I, os gráficos das curvas de reflectância espectrais para estas mesmas amostras de cor.

4.- Aplicações experimentais e Resultados

	ΔE_{ab}^*	ΔE_{94}^*	ΔE_{00}	GFC	$RMSE$
Média:	6,0968	3,8228	3,6794	0,9931	0,0336
Desvio padrão (\pm):	3,5933	1,7708	1,5943	0,0073	0,0151
Máximo:	14,7815	7,8770	7,2678	0,9997	0,0622
Mínimo:	1,2414	0,6639	0,6868	0,9660	0,0043

Tabela 4.1: Diferenças de cor e espectrais medidas no ColorChecker.

Diferenças de cor e espectrais entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectroradiômetro de referência, para o conjunto das 24 amostras de cor do alvo ColorChecker.

	ΔE_{ab}^*		ΔE_{00}	
	(D65, A)	(D65, F2)	(D65, A)	(D65, F2)
Média:	1,1457	1,2410	0,8078	0,7777
Desvio padrão (\pm):	0,9168	0,8137	0,5293	0,4453
Máximo:	3,8557	3,0991	2,2181	1,8027
Mínimo:	0,1615	0,3997	0,0839	0,2835

Tabela 4.2: Índices de metamerismo medidos no ColorChecker.

Índices de metamerismo entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectroradiômetro de referência, para o conjunto das 24 amostras de cor do alvo ColorChecker.

Nos subcapítulos 2.3.4 e 4.1.1 descreveram-se aprofundadamente as métricas de avaliação da qualidade dos resultados. Como foi referido então, não existem padrões definidos nem consensos na interpretação dos resultados das métricas. No entanto, para as diferenças de cor baseadas nas equações da CIE (ΔE_{ab}^* , ΔE_{94}^* , ΔE_{00}), segundo alguns autores ao avaliar diferenças de cor entre dois estímulos com este tipo de índices, em especial na equação ΔE_{ab}^* valores entre 3

e 6 poderão ser considerados aceitáveis e valores superiores a 6, consideram-se inaceitáveis. Analisando a tabela 4.1, para a métrica em causa apresenta-se um valor médio de 6,0968, ou seja, valores que estarão particamente no limite que alguns autores consideram como “aceitável” (Ferreira, 2010, p. 173; Hardeberg, 1999, p. 22; Quijano Ruiz, 2010, p. 5).

Apreciando os resultados para outras métricas, na medição de diferenças entre curvas espectrais, para o *RMSE* (tabela 4.1), os valores são baixos e quanto mais baixo for o valor desta métrica, tanto melhor será a qualidade do sistema testado, sendo mesmo considerado “excelente” para valores próximos de zero (Ferreira, 2010; Quijano Ruiz, 2010, p. 5); para o índice *GFC* a qualidade do ajuste espectral será tanto melhor quanto mais próximos de 1 estiver, considerando-se que o ajuste espectral é “excelente” para valores iguais ou superiores a 0,9999 e classificando-se de “bom” para valores entre 0,9990 e 0,9999 (Ferreira, 2010, p. 164; Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, p. 492; Quijano Ruiz, 2010, p. 6). Nos resultados apresentados, os valores médios são de 0,9931, mas com valores máximos de 0,9997 - o que corresponde a “bom”, pela classificação supracitada - e mínimo de 0,9660. Perante alguns valores um pouco mais baixos nos valores mínimos, não se deverá inferir de imediato que o sistema hiperespectral em teste não apresenta precisão, uma vez que - como referem alguns autores (Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002) -, não havendo normas que estabeleçam critérios precisos, a validade ou não de um sistema espectral dependerá do tipo de aplicação prática dos dados digitalizados, assim como da importância a dar às métricas utilizadas.

Para o terceiro e último grupo, os *índices de metamerismo*, recorde-se que os resultados serão considerados tanto melhores, quanto mais baixos forem os valores obtidos. Na tabela 4.2 apresenta-se um valor médio para este índice de 1,1457, o que será um bom resultado - inferior a 3 unidades, excelente ajuste segundo alguns autores (Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, p. 493) embora o valor máximo alcançado para este índice durante as medições seja 3,8557. Dos

dados dos índices de metamerismo, parece ser seguro afirmar que o sistema em teste não apresentará metamerismo significativo, mantendo-se as condições utilizadas durante o teste.

Quanto aos gráficos representativos das reflectâncias espectrais⁷³, pode-se constatar que as curvas correspondentes ao sistema em teste acompanham as do espectroradiómetro de referência, mas com desfasamento relativamente a estas, sendo curvas mais irregulares do que do sistema de referência⁷⁴. Se se comparar os resultados apresentados nestes gráficos com os de outros sistemas hiperespectrais, como o caso do sistema apresentado por Ferreira (2010) - que usou o mesmo espectroradiómetro como sistema de referência -, podemos constatar que as curvas dos gráficos de reflectâncias espectrais das amostras de cor do *ColorChecker*, mesmo numa apreciação visual (sempre subjetiva) apresentam muito maior sobreposição, indicativa de maior precisão do sistema em teste nesse trabalho.

Se este desfasamento entre as curvas espectrais do sistema testado aqui e as do sistema de referência é ou não significativo, não se pode concluir só pela apreciação subjetiva das referidas curvas, mas as métricas discutidas acima também podem servir para essa finalidade e foram já aqui discutidas.

Uma apreciação global destes resultados, juntamente com os registados nos subcapítulos seguintes em que se testou o sistema hiperespectral com obras de arte reais, será feita no capítulo “5- Conclusões”.

⁷³ Vd. Apêndice I

⁷⁴ Idem

4.2.2- Obras de Arte (pinturas artísticas)

4.2.2.1- Pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc. XVI)

O *Tríptico de Miragaia*, pertença da Confraria do Santíssimo Sacramento de S. Pedro de Miragaia, é uma obra de grande valor histórico existente na cidade do Porto, que investigadores da Universidade Católica Portuguesa têm estudado aprofundadamente. Trata-se de um típico exemplo de pintura a óleo sobre madeira que foi executada, muito possivelmente, por pintor flamengo de oficina brabantina, mas que deverá ter sido criada e importada da Flandres no primeiro quartel do século XVI (L. B. Pereira, 2005; Roldán et al., 2011). Tem representado no painel central o *Pentecostes* ou *Descida do Espírito Santo*, no lateral esquerdo o doador com o seu santo patrono, *São João Baptista*, e no lateral direito *São Paulo*. No reverso das abas vê-se, em grisalha de fundo vermelho, uma *Anunciação*⁷⁵.

Esta obra foi alvo de profundas intervenções de restauro, de que é exemplo a que foi documentada por José de Figueiredo, levada a cabo por Luciano Freire no início do século XX. Com base no artigo de Roldán *et al.* (2011), procurou-se escolher áreas de comparação para o presente estudo que coincidissem, dentro do possível, com pontos que tivessem sido analisados, quanto à sua composição química e identificação de pigmentos, no âmbito do referido artigo científico. Para melhor se localizar na pintura as zonas referidas (quase sempre pares de “pintura original/repinte”) também se recorreu ao apoio de imagem fotográfica de fluorescência UV⁷⁶.

Dimensões da obra:

- Largura e Altura (com as abas abertas e com moldura): ± 302 cm x 187 cm

⁷⁵ Vd. Figura 71 e Figura 72.

⁷⁶ Vd. Figura 73 e Figura 74.



Figura 71: Tríptico de Miragaia. Fotografia com luz visível, abas do tríptico abertas.
Fotografia por LBP.



Figura 72: Tríptico de Miragaia. Fotografia com luz visível, abas do tríptico fechadas.
Fotografia por LBP.



Figura 73: Tríptico de Miragaia. Fotografia de fluorescência UV, abas do tríptico abertas. Regiões de fluorescência amarelada, representam zonas de pintura original. Manchas azuladas representam repintes, possivelmente de intervenções de restauro. Fotografia por LBP.



Figura 74: Tríptico de Miragaia. Fotografia de fluorescência UV, abas do tríptico fechadas. Regiões de fluorescência amarelada, representam zonas de pintura original. Manchas azuladas representam repintes, possivelmente de intervenções de restauro. Fotografia por LBP.

A digitalização com o sistema hiperespectral em teste realizou-se sobre 5 zonas da obra, designadas de Z1 a Z5, que se encontram representadas no Apêndice K. Nas figuras deste Apêndice assinalaram-se com círculos ou elipses pretas (numeradas) as áreas que foram comparadas com as medições do sistema de referência (espetroradiómetro *Photoresearch PR650*). Esses círculos resultam da sobreposição de fotografias tiradas pela ocular do espetroradiómetro e correspondem, com precisão suficiente para a comparação, às áreas medidas pelo equipamento. A partir destas imagens é possível medir reflectâncias nas áreas correspondentes dos ficheiros de digitalização hiperespectral, registados com o sistema em teste, sendo assim possível comparar as diferenças entre medições do sistema testado e do de referência.

Procurou-se escolher áreas de comparação para o presente estudo que coincidissem, dentro do possível, com alguns dos pontos que tivessem sido analisados, quanto à sua composição química e identificação de pigmentos, no estudo por Roldán *et al.* (2011) e que representassem alguma diversidade de cores, nomeadamente incluindo tonalidades vermelhas, verdes e azuis, com o intuito de cobrir uma gama tão ampla quanto possível do espectro EM visível.

As medições das reflectâncias, efetuadas nesta pintura com o sistema hiperespectral em teste (Nikon D300+13 filtros), assim como as obtidas com o espetroradiómetro de referência, estão descritas nas duas tabelas do Apêndice L.

As digitalizações com o sistema hiperespectral em teste obedeceram à geometria II descrita no subcapítulo 3.9, apresentando ainda as seguintes características⁷⁷:

- Distância câmara-quadro: ± 180 cm
- Dimensões de cada uma das zonas digitalizadas na obra: $\pm 69,4$ cm x $46,1$ cm
- 1 mm da superfície da obra: $\pm 6,2$ pontos de imagem (pixéis)

⁷⁷ Obtidas por estimativas realizadas na imagem digitalizada, em pós-produção - com exceção da primeira alínea, fruto de medição direta durante a sessão de registo *in situ*.

- 1 ponto de imagem (pixel): $\pm 0,162$ mm da superfície da obra

Na tabela 4.3 apresentam-se os valores da *média*, *desvio padrão*, valor *máximo* e valor *mínimo* da diferença entre as distribuições de reflectância espectral estimadas e medidas para o conjunto das 14 áreas (ou “pontos”) analisadas, por aplicação de três métricas de *diferenças de cor baseadas nas equações CIE* e duas métricas de *diferenças entre curvas espectrais*. Os valores apresentados na tabela 4.4 correspondem a valores para os *índices de metamerismo*. Nos Apêndices K e L encontram-se os valores individuais destas métricas para cada ponto ou área medida na superfície da pintura. No Apêndice O, os gráficos das curvas de reflectância espectrais para estas mesmas áreas analisadas.

	ΔE_{ab}^*	ΔE_{94}^*	ΔE_{00}	<i>GFC</i>	<i>RMSE</i>
Média:	5,0039	3,7144	3,9080	0,9887	0,0253
Desvio padrão (\pm):	3,3125	2,1654	2,3888	0,0062	0,0208
Máximo:	11,2613	7,5089	8,7681	0,9968	0,0706
Mínimo:	1,1105	1,0531	1,0180	0,9756	0,0028

Tabela 4.3: Diferenças de cor e espectrais medidas no Tríptico de Miragaia.

Diferenças de cor e espectrais entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectroradiômetro de referência, para o conjunto de 14 amostras de cor selecionadas na pintura.

	ΔE_{ab}^*		ΔE_{00}	
	(D65, A)	(D65, F2)	(D65, A)	(D65, F2)
Média:	0,9197	0,9016	0,8051	0,7639
Desvio padrão (\pm):	1,2070	0,8901	0,7851	0,6864
Máximo:	3,9437	2,7371	2,6477	2,1032
Mínimo:	0,1183	0,0910	0,0571	0,0696

Tabela 4.4: Índices de metamerismo medidos no Tríptico de Miragaia.

Índices de metamerismo entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectrorradiômetro de referência, para o conjunto de 14 amostras de cor selecionadas na pintura.

Ao avaliarem-se diferenças de cor entre dois estímulos com este tipo de índices, em especial na equação ΔE_{ab}^* valores entre 3 e 6 poderão ser considerados aceitáveis e valores superiores a 6, consideram-se inaceitáveis (Ferreira, 2010, p. 173; Hardeberg, 1999, p. 22; Quijano Ruiz, 2010, p. 5) e, como se pode apreciar para a Média dos valores medidos apresentada na tabela 4.3, obteve-se um valor de 5,0039 para esta métrica, valor considerado “aceitável”, sendo mesmo melhor que os resultados medidos no alvo de cor *ColorChecker*, apresentados no subcapítulo anterior, embora o alvo de cor apresente obviamente uma maior diversidade de amostras, que influenciará certamente as estatísticas dos valores obtidos.

Na medição de diferenças entre curvas espectrais, para o *RMSE* (tabela 4.3), os valores são próximos de zero (valor médio de 0,0253), sendo mesmo considerado “excelente” para valores próximos de zero (Ferreira, 2010; Quijano Ruiz, 2010, p. 5); para o índice *GFC*, observa-se um valor médio de 0,9887, o que será um valor aparentemente alto (como já foi referido anteriormente, a qualidade do ajuste espectral será tanto melhor quanto mais próxima de 1 estiver esta métrica), considerando-se que o ajuste espectral é “bom” para valores entre 0,9990 e 0,9999 (Ferreira, 2010, p. 164; Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, p. 492; Quijano

Ruiz, 2010, p. 6); ou seja, neste caso a métrica será um pouco menos favorável, inferior aos valores que foram obtidos com cores homogêneas do alvo de cor padrão *ColorChecker*. Reforça-se assim a observação que já se fez nos resultados do subcapítulo anterior, de que estes dados poderão significar que, pelo menos para algumas das aplicações de digitalização multiespectral, o sistema em teste poderá apresentar menor precisão, o que não significa que estes dados não sejam válidos já que, como referem alguns autores (Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002), não havendo normas que estabeleçam critérios precisos a validade ou não de um sistema espectral dependerá do tipo de aplicação prática dos dados digitalizados, assim como a importância a dar às métricas utilizadas.

Para o terceiro e último grupo, os *índices de metamerismo*, usando o índice de metamerismo especial, na tabela 4.2, apresenta-se um valor médio para este índice de 0,9197 o que será um resultado bom (inferior a 1 unidades), embora o valor máximo para este índice seja 3,9437.

Tal como no caso dos alvos de cor, na apreciação dos gráficos representativos das reflectâncias espectrais⁷⁸ pode-se constatar que as curvas correspondentes ao sistema em teste acompanham as do espectroradiómetro de referência, mas com desfasamento relativamente a estas, sendo curvas mais irregulares do que do sistema de referência. Parece mesmo haver algum tipo de problema nas áreas medidas na zona 5 (azul do céu), pelo grande desvio da curva no ponto dos 690 nm de comprimento de onda.

O desfasamento entre as curvas espectrais do sistema testado aqui e as do sistema de referência está em linha, de uma forma geral, com os resultados medidos no alvo padrão de cores uniformes, já apresentados e discutidos no subcapítulo anterior.

⁷⁸ Vd. Apêndice O

4.2.2.2- Pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX)

O *Cabouqueiro* é uma pintura a óleo sobre tela do início da carreira artística de Júlio Pomar⁷⁹, pintada em 1949 e é um bom exemplo da arte Neo-realista portuguesa, movimento onde Júlio Pomar teve um lugar de vanguarda (Cudell, 2010).

Pertence atualmente a uma coleção particular⁸⁰ e foi amplamente estudada por investigadores da Universidade Católica Portuguesa, nomeadamente quanto à composição química e técnicas pictóricas utilizadas pelo artista.

Com base na informação presente no Apêndice P e no artigo de Cudell (2010), procurou-se, para o presente estudo, escolher áreas de comparação que coincidissem, dentro do possível, com pontos que tivessem sido analisados, quanto à sua composição química e identificação de pigmentos.

Dimensões da obra:

- Largura e Altura (sem moldura): ± 69 cm x 39 cm

⁷⁹ Vd. Figura 75.

⁸⁰ Pertença do Sr. Arq. José Bernardo Távora.



Figura 75: O Cabouqueiro (1949). Pintura do mestre Júlio Pomar.
Fotografia com luz visível. Coleção particular. Fotografia por LBP.

As digitalizações com o sistema hiperespectral em teste obedeceram às seguintes características particulares⁸¹:

- Distância câmara-quadro: ± 180 cm
- 1 mm da superfície da obra: $\pm 5,4$ pontos de imagem (pixéis)
- 1 ponto de imagem (pixel): $\pm 0,184$ mm da superfície da obra

Inicialmente pretendia-se proceder à digitalização de acordo com a geometria descrita no subcapítulo 3.9 (montagem II) e com os procedimentos usados na pintura do *Tríptico de Miragaia*, só que se verificou a existência de uma forte presença de reflexos especulares sobre a camada pictórica da obra, que não foram possíveis de eliminar com a geometria $45^{\circ}/0^{\circ}$ padrão e que iram contaminar os dados a digitalizar, se não se minimizasse este problema. Tornou-se por isso necessário efetuar algum tipo de procedimento, na tentativa de eliminar os

⁸¹ Obtidas por estimativas realizadas na imagem digitalizada, em pós-produção - com exceção da primeira alínea, fruto de medição direta durante a sessão de registo *in situ*.

reflexos especulares ou pelo menos, reduzir substancialmente a sua contaminação. Recorreu-se para tal a alterações na geometria dos focos iluminantes.

Na figura seguinte, num mesmo pormenor da superfície da obra ilustram-se os efeitos dos reflexos especulares e os resultados de algumas tentativas de os eliminar através das mudanças da geometria de iluminação: na imagem da esquerda, captada com a iluminação de acordo com a geometria II (subcapítulo 3.9: 4 focos, geometria $45^{\circ}/0^{\circ}$), é notória a forte presença de reflexos especulares; na imagem ao centro, com luz indireta, difusa, observa-se uma grande redução dos reflexos; na imagem da direita, o mesmo pormenor com luz direta mas em que o ângulo dos focos iluminantes, em vez de ser de 45° (geometria padrão), passa a ser cerca de 20 a 30° , observando-se uma redução dos reflexos igualmente efetiva, mas com níveis de luminosidade bastante superiores.



Figura 76: Reflexos especulares em “O Cabouqueiro” e tentativas de os eliminar.
Fotografias por LBP.

Na figura seguinte apresenta-se a primeira montagem com recurso à modificação e adaptação das geometrias de iluminação, em que os focos foram dirigidos para uma superfície branca difusora, o que permitiu a produção de luz indireta difusa.



Figura 77: Montagem de recurso para luz difusa.

Para reduzir reflexos da superfície da obra, usou-se a geometria ilustrada, com 6 focos com lâmpadas SoLux dirigidas à superfície branca difusora presente no teto do estúdio. Fotografia por LBP.

Embora o uso de luz indireta, difusa, se tenha mostrado eficiente na redução dos reflexos especulares⁸², tal só acontece à custa de uma forte diminuição dos níveis de luminosidade (luminosidade na superfície da obra na ordem de 3,7 EV, quando com luz direta na geometria padrão seria cerca de 7 EV). Este facto não se revelou um problema para o sistema de teste, baseado numa câmara fotográfica D-SLR que pode prolongar indefinidamente (pelo menos em teoria) o tempo de exposição ou integração com níveis de luminosidade mais baixos ou com filtros mais densos (por exemplo, com o Schott RG695, o tempo de exposição a f/4 foi de 53min. e 20 seg.). Mas, infelizmente, o mesmo já não acontece com o sistema de referência e o espectralradiómetro utilizado, dado que com baixos níveis de luminosidade mostrou-se incapaz de efetuar medições em zonas com pigmentos de cor mais escura, impossibilitando desta maneira a comparação com o sistema em teste nestas regiões; por isso mesmo, só foi possível com esta montagem

⁸² Vd. Figura 76, imagem ao centro.

apresentar resultados para 5 áreas (ou pontos) de medição o que levou à procura de outra alternativa na redução dos reflexos. Encontrou-se uma outra geometria, também efetiva na redução dos reflexos⁸³, em que se usaram focos diretos a iluminar a obra mas em que o ângulo utilizado, em vez do padrão de 45°, aproxima-se de um ângulo rasante, com cerca de 10 a 20° relativamente à superfície da obra. Os resultados para estas duas montagens alternativas, apresentam-se nas duas subsecções seguintes.

Medição com fonte de luz indireta (luz difusa)

As medições das reflectâncias das 5 áreas (ou “pontos”) que foi possível medir com a geometria para luz indireta difusa (ver mapa do Apêndice P.1), efetuadas nesta pintura com o sistema hiperespectral em teste (Nikon D300 + 13 filtros), assim como as obtidas com o espetroradiómetro de referência nas mesmas condições, estão descritas nas duas tabelas do Apêndice Q.1.

Na tabela 4.5 apresentam-se os valores da *média*, *desvio padrão*, *valor máximo* e *valor mínimo* da diferença entre as distribuições de reflectância espectral estimadas e medidas para o conjunto das 5 áreas (ou “pontos”) analisadas, por aplicação de três métricas de *diferenças de cor baseadas nas equações CIE* e duas métricas de *diferenças entre curvas espectrais*. Os valores apresentados na tabela 4.6 correspondem a valores para os *índices de metamerismo*. Nos Apêndices P.1 e Q.1 encontram-se os valores individuais destas métricas para cada ponto ou área medida na superfície da pintura. No Apêndice T.1, os gráficos das curvas de reflectância espectrais para estas mesmas áreas analisadas.

⁸³ Vd. Figura 76, imagem à direita.

4.- Aplicações experimentais e Resultados

	ΔE_{ab}^*	ΔE_{94}^*	ΔE_{00}	<i>GFC</i>	<i>RMSE</i>
Média:	14,6518	9,6660	9,1514	0,9772	0,0426
Desvio padrão (\pm):	5,9177	4,8160	4,3734	0,0210	0,0150
Máximo:	23,1853	17,1240	15,8607	0,9925	0,0624
Mínimo:	8,4822	5,4413	5,3743	0,9406	0,0258

Tabela 4.5: Diferenças de cor e espectrais medidas na pintura “O Cabouqueiro”.

Diferenças de cor e espectrais entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectroradiômetro de referência, para o conjunto de 5 amostras (áreas) de cor selecionadas na pintura, e em que foi possível obter medição com luz indireta (difusa).

	ΔE_{ab}^*		ΔE_{00}	
	(D65, A)	(D65, F2)	(D65, A)	(D65, F2)
Média:	0,9650	3,1448	0,6105	1,9224
Desvio padrão (\pm):	0,5315	1,2108	0,3865	0,8997
Máximo:	1,6781	4,9319	1,0590	2,9397
Mínimo:	0,4665	1,9409	0,2013	0,6853

Tabela 4.6: Índices de metamerismo medidos na pintura “O Cabouqueiro”.

Índices de metamerismo entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectroradiômetro de referência, para o conjunto de 5 amostras (áreas) de cor selecionadas na pintura, e em que foi possível obter medição com luz indireta (difusa).

A discussão destes resultados faz-se conjuntamente com os da montagem com luz direta, que se apresentam a seguir.

Medição com fonte de luz direta

As medições das reflectâncias das 11 áreas (ou “pontos”) que foram possíveis medir com a geometria para luz indireta difusa (ver mapa do Apêndice P.2), efetuadas nesta pintura, estão descritas nas duas tabelas do Apêndice Q.2.

4.- Aplicações experimentais e Resultados

Na tabela 4.7 apresentam-se os valores da *média*, *desvio padrão*, valor *máximo* e valor *mínimo* da diferença entre as distribuições de reflectância espectral estimadas e medidas para o conjunto das 11 áreas (ou “pontos”) analisadas, por aplicação de três métricas de *diferenças de cor baseadas nas equações CIE* e duas métricas de *diferenças entre curvas espectrais*. Os valores apresentados na tabela 4.8 correspondem a valores para os *índices de metamerismo*. Nos Apêndices P.2 e Q.2 encontram-se os valores individuais destas métricas para cada ponto ou área medida na superfície da pintura. No Apêndice T.2, os gráficos das curvas de reflectância espectrais para estas mesmas áreas analisadas.

	ΔE_{ab}^*	ΔE_{94}^*	ΔE_{00}	<i>GFC</i>	<i>RMSE</i>
Média:	6,9944	5,0367	4,7429	0,9930	0,0321
Desvio padrão (\pm):	5,3823	3,8584	3,5038	0,0070	0,0202
Máximo:	21,0552	15,4912	14,1796	0,9984	0,0592
Mínimo:	1,1599	0,9855	0,9708	0,9737	0,0056

Tabela 4.7: Diferenças de cor e espectrais medidas na pintura “O Cabouqueiro”.

Diferenças de cor e espectrais entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectroradiômetro de referência, para o conjunto de 11 amostras (áreas) de cor selecionadas na pintura, e em que foi possível obter medição com luz direta (quase rasante).

	ΔE_{ab}^*		ΔE_{00}	
	(D65, A)	(D65, F2)	(D65, A)	(D65, F2)
Média:	1,1972	1,0532	0,8899	0,7730
Desvio padrão (\pm):	0,9554	0,6538	0,6360	0,4112
Máximo:	3,1508	2,4858	1,7552	1,6295
Mínimo:	0,0891	0,2323	0,0677	0,1312

Tabela 4.8: Índices de metamerismo medidos na pintura “O Cabouqueiro”.

Diferenças de cor e espectrais entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectroradiômetro de referência, para o conjunto de 11 amostras (áreas) de cor selecionadas na pintura, e em que foi possível obter medição com luz direta (quase rasante).

Apreciando agora os valores obtidos com as métricas apresentadas, tanto para a montagem com luz direta como com a de difusa, parece ser claro que algum fator afeta negativamente as métricas, apresentando-se por exemplo os valores médios das *equações das diferenças de cor da CIE*, como no caso da equação ΔE_{ab}^* , com valores claramente superiores a 6 (14,6518 no primeiro caso e 6,9944 no segundo), valores estes que se consideram inaceitáveis (Ferreira, 2010, p. 173; Hardeberg, 1999, p. 22; Quijano Ruiz, 2010, p. 5). Os brilhos especulares na superfície da camada pictórica podem explicar estes resultados nas duas montagens, já que nunca se conseguiu eliminar totalmente este problema e também se pode constatar que na segunda montagem os resultados são um pouco melhores, talvez devido a uma melhor eficiência na redução dos brilhos ou, numa outra explicação possível, por apresentar tempos de exposição menores e como tal apresentar menos ruído - já que numa digitalização com longas exposições o ruído pode estar presente, mesmo nos dados registados pelo espectroradiómetro de referência.

Para outras métricas, na medição de diferenças entre curvas espectrais, para o para o índice *GFC*, observa-se um valor médio de 0,9772 (montagem com fonte de luz difusa) e 0,9930 (montagem com luz direta), ou seja, novamente métricas do ajuste espectral abaixo dos valores que foram conseguidos com as digitalizações do *Tríptico de Miragaia* ou do alvo de amostras de cor homogêneas *ColorChecker*, ou seja, também estas métricas parecem refletir o que já foi constatado acima nas equações de diferenças de cor, em que a montagem com fonte de luz difusa parece apresentar piores valores do que os com fontes de luz direta e, mesmo neste último caso, sem se encontrar dentro do intervalo que permitira classificar o ajuste espectral de “bom”, ou seja, valores entre 0,9990 e 0,9999 (Ferreira, 2010, p. 164; Francisco H. Imai, Rosen, et al., 2002, p. 492; Quijano Ruiz, 2010, p. 6).

Para os *índices de metamerismo*, nas tabelas 4.6 e 4.8, apresentam-se valores médios para o índice especial de 0,9650 (na montagem com fonte de luz difusa) e

1,1972 (montagem com luz direta) o que será um resultado bom (inferior a 2 unidades).

Tal como no caso dos alvos de amostras de cor homogêneas e no *Tríptico de Miragaia*, na apreciação dos gráficos representativos das reflectâncias espectrais⁸⁴ pode-se constatar que as curvas correspondentes ao sistema em teste acompanham as do espectroradiómetro de referência, mas com desfasamento relativamente a estas, sendo curvas mais irregulares do que do sistema de referência, tal como nos casos anteriores.

O desfasamento entre as curvas espectrais do sistema testado aqui e as do sistema de referência está em linha, de uma forma geral, com os resultados medidos no alvo padrão de cores uniformes *ColorChecker* e no *Tríptico de Miragaia*, já apresentados e discutidos nos subcapítulos anteriores.

⁸⁴ Vd. Apêndice T

4.3- Simulações de visualização a partir do cubo hiperespectral

A informação hiperespectral digitalizada das duas pinturas artísticas foi guardada em ficheiros do tipo “cubo espectral” que, como já referimos anteriormente no subcapítulo “2.5.2- Aplicações práticas em pintura artística”, contêm as funções de distribuição de reflectâncias espectrais na região visível do espectro EM, para todos os píxels da imagem. Em termos práticos realizaram-se dois cubos espectrais por cada região de uma obra digitalizada: um com as reflectâncias recolhidas nas 22 bandas registadas (pelo sistema hiperespectral desenvolvido no âmbito desta tese) ou em 28 bandas (após interpolação das 6 bandas intermédias em falta, como foi explicado nos subcapítulos anteriores).

Com imagiografia espectral, pelo facto de esta ser baseada em informação de reflectâncias do objeto registado e não de radiâncias (como seria o caso da fotografia RGB digital), é independente do iluminante, ou seja, a fonte de luz que ilumina o objeto não interfere diretamente com a informação registada. Munidos da informação da função de distribuição de reflectâncias espectrais do objeto, assim como da função de distribuição de energia radiante da fonte de luz (iluminante), torna-se assim possível simular virtualmente a aparência da obra quando sujeita a uma determinada fonte de luz. Se o objetivo neste caso fosse gerar ficheiros num espaço RGB para registo colorimétrico de qualidade, seria necessário nesta conversão transformar a informação contida no cubo espectral de 28 bandas num ficheiro no espaço CIEXYZ, tendo em conta nesta transformação com as funções de ajuste de cor do observador considerado e da radiância espectral do iluminante; deste ficheiro XYZ, por sua vez, seria então possível a conversão, por exemplo, para um ficheiro de imagem fotográfica RGB (usualmente, sRGB, Adobe RGB ou ProPhoto RGB, como já foi explicado no subcapítulo “2.5.2.2- Imagens para documentação, conservação e publicação”), num espaço de cor padrão e, se assim pretendido, aplicando também as curvas *gamma* de acordo com o sistema informático e monitor de visualização.

No nosso caso, apenas se pretendia prever a luz mais adequada para iluminar a obra numa galeria ou museu ou prevenir situações como a falta de correspondência entre pares metaméricos. Basicamente, o procedimento já foi explicado no subcapítulo “2.5.2.6- Simulação da aparência da obra perante diferentes iluminantes” e que passa pela multiplicação, termo a termo, da reflectância espectral $r_e(\lambda)$ registada no cubo referido acima, pela radiância espectral $S(\lambda)$ que se registou com o espectroradiómetro de referência - e que caracteriza assim a fonte de luz que se pretende simular - de que resulta a simulação da radiância espectral $R_e(\lambda)$ da luz que seria refletida pela superfície da obra: $R_e(\lambda) = S(\lambda)r_e(\lambda)$.

Em termos práticos, foram assim geradas imagens virtuais representativas da aparência que a obra teria se iluminada perante determinada fonte de luz, a partir da informação de distribuição de reflectâncias espectrais contidas no cubo espectral da obra digitalizada e das funções de distribuição de radiância dos iluminantes registados com o espectroradiómetro de referência PR650.

Também se realizou outra aplicação prática, a partir da informação hiperespectral, que foi a criação de imagens monocromáticas representativas da informação colhida em cada canal ou banda espectral recolhida. Essa informação, como foi aclarada no subcapítulo “2.5.2.5- Visualização de alterações e desenho subjacente”, permite em algumas bandas a identificação de alterações na obra ou a revelação de desenho subjacente, normalmente recorrendo às duas bandas no extremo do conjunto recolhido, ou seja, a 420 nm (azul) e a 690 nm (vermelho), as que se decidiu apresentar nesta tese. Juntamente com estas, mostramos sempre a banda central, nos 550 nm (verde), correspondendo a uma das zonas onde a visão humana apresenta maior sensibilidade espectral, para comparação com as outras bandas e que mais se aproxima do tipo de informação que uma imagem fotográfica convencional revelaria.

Os resultados registados apresentam-se a seguir, nos dois casos mais relevantes e ilustrativos desta aplicação técnica da imagiografia espectral ao estudo das duas obras de arte que serviram, nos subcapítulos anteriores, para validação do sistema desenvolvido.

4.3.1- Pintura artística “*Tríptico de Miragaia*” (séc. XVI)

Em relação às cinco zonas digitalizadas espectralmente, durante o estudo desta obra, os resultados mais relevantes e ilustrativos da potencialidade da aplicação das técnicas descritas acima são os representativos da zona Z5, resultados estes que se mostram nas duas figuras seguintes.

Em relação à simulação da aparência da obra perante diferentes tipos de iluminante, sem dúvida alguma que as imagens que apresentam um aspeto mais “realista” são as dos iluminantes (fontes de luz) com temperatura de cor correlacionada equivalente à luz de dia, em especial na imagem em que o iluminante simulado é o da próprio lâmpada usada como fonte de luz durante a digitalização, a lâmpada SoLux; esta apresenta ao mesmo tempo um resultado muito parecido visualmente com o obtido com o iluminante D50 da CIE, o que confirma a alegação dos fabricantes da SoLux que a sugerem como muito próxima deste padrão D50 em termos cromáticos (Bradfield, 2007). Os iluminantes que logo a seguir fornecem imagens de aspeto natural são o iluminante D65 e o de uma lâmpada de Xénon, igualmente muito parecidas entre si.

Analisando as imagens monocromáticas das bandas espectrais, as bandas do extremo da gama registada pelo sistema desenvolvido, são sem dúvida as mais informativas e interessantes. Com a imagem da banda dos 690 nm (ver pormenores apresentados na Figura 80) podemos observar não só uma região clara correspondente um restauro antigo (também observada da imagem da banda dos 420 nm), mas principalmente zonas de desenho subjacente na face do personagem representado e numa zona do manto. Quanto à banda dos 420 nm, observa-se nos pormenores na mesma figura quase como que uma análise de superfície da obra, visualizando-se relevos, pequenos *craquelets*, mas principalmente as zonas de reintegração cromática de restauro anterior, que coincide com zonas de junção de tábuas da obra, zonas de reintegração já

estudadas e identificadas por outros investigadores como no estudo realizado por Roldán, *et al.* (2011)

É curioso constatar que o tipo de informação possível de se observar na banda 690 nm (vermelho) assemelha-se ao tipo de dados que se obteria com fotografia e refletografia infravermelha e que a informação aos 420 nm (azul) ao mesmo género de dados que se adquiriria com fotografia ultravioleta, embora em qualquer dos casos as particularidades do tipo de informação, dado por cada uma destas técnicas, sejam menos notórias. Este facto explica-se pelo coeficiente de dispersão da luz na camada pictórica (também designada pelo termo em inglês de *scattering*) ser também dependente do comprimento de onda da radiação usada na observação e, quanto mais longo for o comprimento de onda da radiação EM, mais esta penetra a camada pictórica; por esta razão, com comprimentos de onda curtos (por exemplo, radiação UV ou da luz aos 420 nm) a radiação reflete nas camadas mais superficiais da obra e as radiações de comprimento de onda mais longo (por exemplo, radiação IV ou da luz aos 690 nm) penetra em camadas mais profundas, chegando em alguns casos à camada preparatória onde se pode encontrar - em alguns casos, como foi o aqui apresentado - desenho subjacente. As imagens com um comprimento de onda intermédio, como a da banda dos 550 nm (usada, abaixo, apenas para comparação), correspondem aproximadamente ao tipo de informação possível de observar com uma fotografia convencional ou observando diretamente a obra. A principal vantagem do uso desta técnica sobre a imagiografia com radiações não visíveis é que só é utilizada a região visível do espectro EM, normalmente menos prejudicial para a obra do que as radiações IV e, principalmente, a UV.



Figura 78: Simulação do aspeto da zona Z5 da obra “Tríptico de Miragaia” perante diferentes iluminantes e imagens monocromáticas de três bandas espectrais. Da esquerda para a direita e de cima para baixo, as imagens representam a zona Z5 sob iluminante: CIE D50 (luz de dia), CIE D65 (luz de dia), CIE A (lâmpada de tungsténio), Lâmpada SoLux, Lâmpada de Xénon, CIE F2 (lâmpada fluorescente); fila inferior, da esquerda para a direita, imagem dos canais ou bandas espectrais com pico de transmissão aos: 420 nm (cor azul, imagem otimizada no contraste), 550 nm (cor verde) e 690 nm (cor vermelha, imagem otimizada no contraste). Imagens por LBP.



Figura 79: Dois pormenores em imagens monocromáticas de três bandas espectrais - zona Z5 do “Tríptico de Miragaia”.

Da esquerda para a direita, as imagens representam pormenores na zona Z5 dos canais ou bandas espectrais com pico de transmissão aos: 420 nm (cor azul, imagem otimizada no contraste), 550 nm (cor verde) e 690 nm (cor vermelha, imagem otimizada no contraste). De realçar as zonas de reintegração da camada pictórica dum restauro antigo, as texturas e relevos de superfície, observados aos 420 nm e o desenho subjacente aos 690 nm; a imagem aos 550 nm assemelha-se ao que se pode observar em fotografia convencional. Imagens por LBP.

4.3.2- Pintura artística “*O Cabouqueiro*” (séc. XX)

Muitas das considerações sobre os resultados obtidos com esta obra seriam idênticas às já escritas acima, na obra “*Tríptico de Miragaia*”, pelo que seria redundante transcrevê-las para aqui. As simulações da visualização da obra em função do iluminante, tal como na obra anterior, apresentam uma aparência mais natural ou realista ao observador nos iluminantes de “luz do dia”, como se pode observar na Figura 81.

Esta obra, bem mais recente que a anterior, como seria de esperar encontra-se em melhor estado de conservação, não se observando por isso nas imagens monocromáticas das bandas dos 420 nm tantas zonas de reintegração nem tão extensas ou marcadamente visíveis como na obra anterior; na banda dos 690 nm, observa-se desenho subjacente, numa zona de carnação, e uma inscrição na zona inferior do quadro “POMAR 49”, provável assinatura pois trata-se do nome do artista e do ano de execução da pintura (Figura 82).

4.- Aplicações experimentais e Resultados



Figura 80: Simulação do aspeto da obra “O Cabouqueiro” perante diferentes iluminantes e imagens monocromáticas de três bandas espectrais.

Da esquerda para a direita e de cima para baixo, as imagens representam a obra sob iluminante: CIE D50, CIE D65, CIE A, Lâmpada SoLux, Lâmpada de Xénon, CIE F2; fila inferior, da esquerda para a direita, imagem dos canais ou bandas espectrais com pico de transmissão aos: 420 nm (cor azul, imagem otimizada no contraste), 550 nm (cor verde) e 690 nm (cor vermelha, imagem otimizada no contraste). Imagens por LBP.

4.- Aplicações experimentais e Resultados

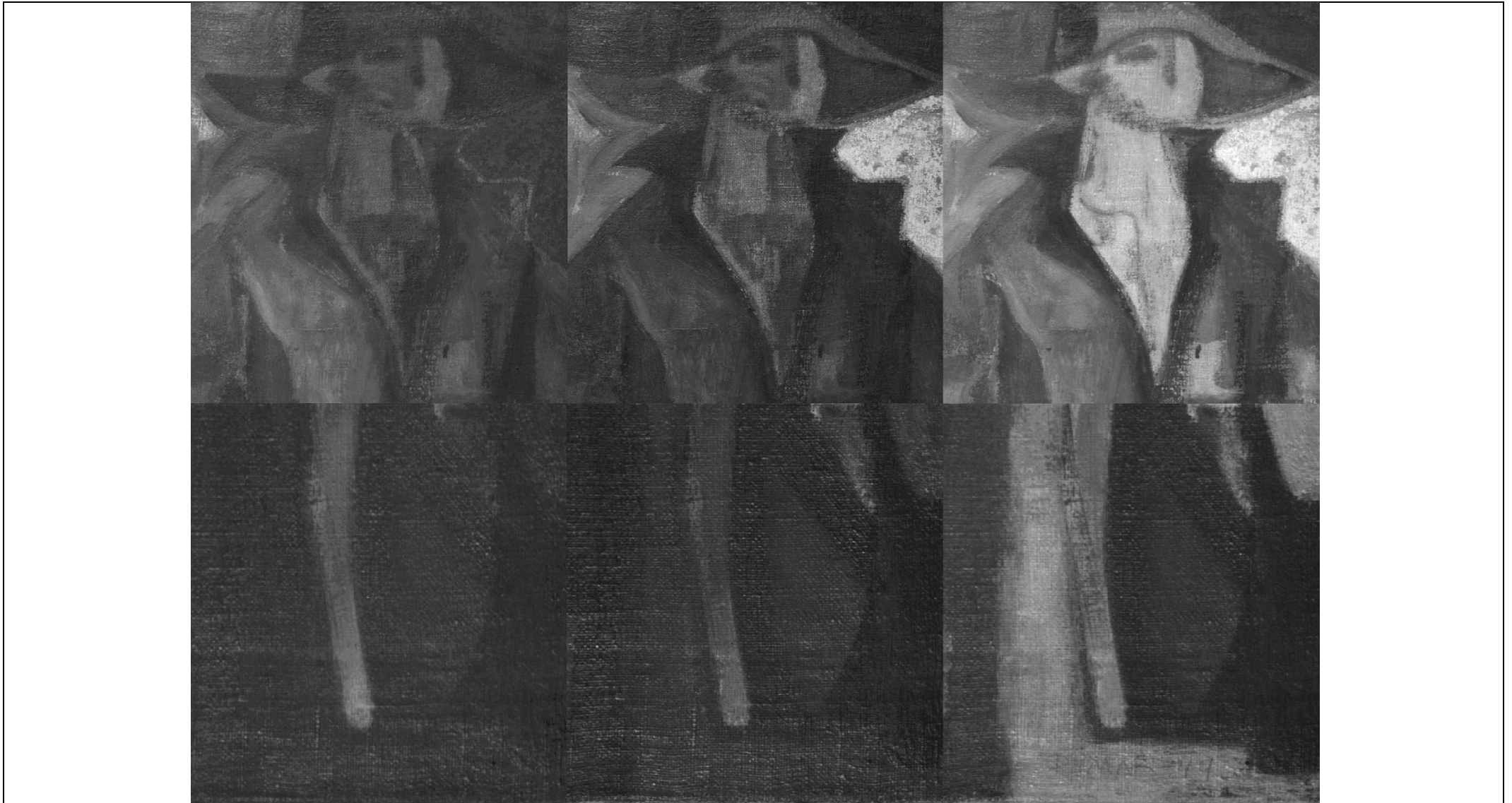


Figura 81: Dois pormenores em imagens monocromáticas de três bandas espectrais - “O cabouqueiro”.

Da esquerda para a direita, as imagens representam pormenores dos canais ou bandas espectrais com pico de transmissão aos: 420 nm (cor azul, imagem otimizada no contraste), 550 nm (cor verde) e 690 nm (cor vermelha, imagem otimizada no contraste). De realçar as texturas e relevos de superfície, observados aos 420 nm e o desenho subjacente aos 690 nm (zona de carnação no pescoço do personagem, em cima, e nome com data, em baixo). Imagens por LBP.

4.- Aplicações experimentais e Resultados

5.- Conclusões

5.- Conclusões

A digitalização hiperespectral de obras de arte tem sido objeto de intensa investigação nos últimos anos, principalmente quando aplicada ao estudo e documentação de pinturas artísticas. A possibilidade de se ter um registo preciso das distribuições de reflectâncias espectrais da superfície de uma obra abre um leque de utilizações que suscitam um grande interesse.

O primeiro passo para se aceder a esta possibilidade é precisamente o registo preciso da informação espectral, em número de bandas suficiente e cobrindo um intervalo amplo do espectro eletromagnético - pelo menos na zona visível do mesmo. Para esse registo, vários sistemas têm sido desenvolvidos nos últimos anos, normalmente protótipos de complexa e morosa utilização, o que limita logo à partida o seu uso a um público restrito de potenciais utilizadores. Haveria por isso uma grande vantagem no uso de equipamentos capazes de efetuar este tipo de digitalização, mas com base em componentes mais comuns e usuais nos estúdios fotográficos dos museus e centros de conservação de obras de arte, como por exemplo, criando-se sistemas de digitalização construídos em volta de câmaras fotográficas digitais. No entanto, assiste-se com muito menos frequência ao uso de câmaras fotográficas, com sensor digital e CFA (*Color Filter Array*), como dispositivos de digitalização espectral aplicado ao registo documental e análise de obras de arte. Apenas se conhece um caso em que se estudou a possibilidade de uso de uma câmara digital comercialmente disponível, com sensor tricromático com *Colour Filter Array* (Francisco H. Imai, 1998) desenvolvido para um uso fotográfico amplo, mas trata-se neste caso de uma câmara Sinar com um sensor de grande formato (um *Sinarback 54*), um tipo de equipamento menos frequente e acessível, logo por essa razão, de uso mais restrito para a generalidade dos fotógrafos e investigadores da conservação.

No âmbito dos trabalhos de investigação realizados com o presente trabalho, pela primeira vez se incorpora num sistema de digitalização de imagens hiperespectrais dedicado a obras de arte uma câmara do tipo D-SLR (sensor de formato DX, baseado nos sistemas de 35mm), tipo de câmara amplamente difundido por entre

os museus e centros de investigação que documentam e estudam obras de arte. Trata-se, na verdade, do tipo de câmara fotográfica mais usado pelos fotógrafos profissionais na atualidade. Daí o grande interesse que um trabalho, como o da presente tese, possa suscitar no sentido da validação ou rejeição deste tipo de câmaras para o uso em digitalização multiespectral ou hiperespectral.

Mas, ao avaliar os resultados do sistema testado, não se pode esquecer que estes refletem as capacidades do sistema *como um todo* e não apenas do componente representado pelo sensor da câmara. Ou seja, não se deve concluir dos resultados que o tipo (ou mesmo o modelo) de câmara, só por si, é que reflete a qualidade dos dados obtidos e as métricas a eles aplicadas, pois haverá outros componentes do sistema (câmara, filtros, fontes de luz, alvos de calibração, metodologias utilizadas, etc.) que afetarão de igual modo esses resultados. Também por esta razão, haverá sempre espaço para desenvolver o sistema em trabalhos futuros já que, aperfeiçoando qualquer um dos componentes integrantes ou metodologias, poder-se-á melhorar o desempenho final do sistema de digitalização hiperespectral.

O sistema foi assim construído com base na câmara D-SLR (modelo Nikon D300) que funcionou como detetor de imagem do sistema; a este, associou-se um conjunto de 13 filtros fotográficos e um sistema de iluminação constituído por 2 a 4 focos idênticos, que permitem assim uma distribuição homogénea da luz na obra (ou zona da obra) a digitalizar. Além da elevada resolução espectral o sistema permite também uma elevada resolução espacial, com os seus mais de 12 megapixéis: com o detetor posicionado a cerca de 1,8 metros da superfície da obra, consegue registar com uma resolução de 6,2 pixéis por milímetro e cobrir uma área de 69X46 cm². Mas a versatilidade deste sistema, ao contrário de outros sistemas, permite variar a resolução espacial consoante a necessidade: pela aproximação do detetor à superfície da obra, é possível aumentar proporcionalmente a resolução ou, se for mais importante cobrir uma área maior, afastá-lo da superfície a digitalizar.

Descrito detalhadamente ao longo do capítulo 3 da presente tese, o sistema hiperespectral proposto representa um sistema complementar dos sistemas existentes. Com o registo espectral permitido pelo sistema hiperespectral desenvolvido no presente trabalho, mesmo que este não permita o nível de precisão de outros sistemas específicos existentes, que pode constituir uma ferramenta de primeira linha de uso, mais versátil e simples de usar e com registo cuja qualidade permite uma primeira abordagem a este tipo de digitalização. Na prática, o sistema utilizado surpreendeu pela possibilidade de registar um grande número de bandas espectrais (28 bandas, de 10 em 10 nm, em que 22 bandas são medidas diretamente e 6 são interpoladas), muito superior a outros sistemas existentes, cobrindo cerca de 85% da banda do espectro eletromagnético (420 a 690 nm) tendo por base a banda permitida pelo sistema de referência (400 a 720 nm, em 33 bandas de 10 em 10 nm); mas, ao mesmo tempo, o manuseio e operação de todos os componentes do sistema e os protocolos necessários ao seu uso revelaram que, pelo menos nesta fase de protótipo, o sistema é mais complexo e moroso de operar do que inicialmente se previra, ainda assim mais simples que no caso de outros sistemas comparáveis; por fim, as métricas de avaliação da qualidade espectral dos dados são favoráveis à validação do sistema embora (como já se foi referindo ao longo do presente trabalho) não existe um consenso generalizado que estabeleça limites a partir dos quais se possa validar ou não um sistema hiperespectral.

A precisão do sistema em teste pode ser corroborada pelos valores das diferenças espectrais, colorimétricas e metaméricas entre as distribuições de reflectância espectral estimadas pelo sistema e as medidas pelo espectroradiómetro (que constituiu o sistema de referência). Para as amostras de cores homogêneas (medidas num alvo *ColorChecker X-Rite*, de 24 cores), em termos espectrais o sistema proposto apresenta em média erros de aproximadamente 3,4%, quantificados em termos de erro quadrático médio, e de 99,3% quantificados em termos de coeficiente de ajuste (*Goodness-of-Fit-Coefficient*). No que diz respeito à qualidade colorimétrica, o sistema hiperespectral apresenta diferenças de cor

médias na ordem 6,0968 unidades de ΔE_{ab}^* , 3,8228 unidades de ΔE_{94}^* e de 3,6794 unidades de ΔE_{00} . Quanto aos índices de metamerismo, o sistema revela níveis de metamerismo médios de 1,1457, 1,2410, 0,8078 e 0,7777 para os pares de iluminantes “D65,A” e “D65,F2” quantificados em termos das diferenças de cor de ΔE_{ab}^* e ΔE_{00} , respetivamente. Pode-se constatar ainda que nas amostras acromáticas, as métricas são mais precisas e que acompanham as diferentes luminosidades medidas e estimadas ao longo da escala acromática, o que demonstra a resposta fotométrica aproximadamente linear do sistema proposto.

Perante obras artísticas, apesar da maior complexidade cromática das amostras comparadas, numa das pinturas (*Tríptico de Miragaia*) o sistema apresentou resultados comparáveis com os obtidos no alvo de amostras de cor homogéneas (algumas métricas foram ligeiramente superiores, outras ligeiramente inferiores), enquanto que noutra obra (*O Cabouqueiro*, de Júlio Pomar), por esta apresentar elevados níveis de reflexos especulares, que se revelaram difíceis de reduzir na sua totalidade (e que, seguramente, contaminaram as imagens registadas), verificou-se de uma maneira geral um incremento das diferenças entre o sistema em teste e o sistema de referência, para todas as métricas utilizadas.

Sendo assim, da apreciação dos resultados apresentados ao longo do quarto capítulo, pode-se concluir que o sistema em estudo, quer no alvo de cores homogéneas, quer em obras de arte nas quais os pontos amostrados apresentam maior complexidade cromática, permite o registo das distribuições de reflectância espectrais com precisão aceitável, pelo menos para muitas das aplicações possíveis que usam este tipo de registo, e é por isso adequado o seu uso na digitalização hiperespectral de obras de arte.

Quanto às aplicações práticas implementadas no âmbito desta tese, além da utilidade de uma informação muito completa para registo futuro e arquivo documental - bastante mais completa que a simples fotografia convencional, que segue o modelo da tricromia RGB de apenas três bandas - o sistema permitiu o

registo desta informação eliminando a influência da fonte de luz (iluminante), por guardar a informação na forma de um ficheiro com valores de reflectâncias espectrais - enquanto que a fotografia convencional guarda informação de radiâncias - o que também elimina o efeito de eventuais pequenos erros no cálculo da exposição, balanço de brancos, entre outros, que determinam a qualidade do registo e reprodução cromática final.

Com a informação hiperespectral registada em duas pinturas artísticas, foi possível demonstrar algumas aplicações desta tecnologia: produção de uma imagem fotográfica resultante de uma reconstrução espectral mais precisa (livre, por exemplo, da influência de metamerismo), simular a aparência final dessa mesma imagem quando iluminada por diferentes tipos de fontes de luz; analisando imagens de bandas espectrais isoladas, foi possível também a identificação de zonas de repintes e reintegrações, analisar a superfície da obra, detetar desenho subjacente, possibilidades normalmente só trazidas pela fotografia com radiação infravermelha ou ultravioleta, mas aqui trazidas na gama visível do espectro eletromagnético, ou seja, evitando sujeitar a obra a radiações mais agressivas (como é, por exemplo, o caso da radiação ultravioleta).

No Apêndice J apresentam-se, lado a lado, gráficos que apresentam as reflectâncias medidas nas 24 cores do *ColorChecker* (para o sistema em teste e para o espectroradiómetro de referência) e os gráficos das correspondentes curvas de sensibilidade espectral do sistema “sensor + filtro” usado, a cada banda espectral, para recolher o registo dessa mesma banda. A apreciação crítica destes dados, embora empírica e subjetiva, parece sugerir uma pista interessante para o primeiro componente a melhorar no sistema hiperespectral em trabalhos futuros: os filtros de seleção da banda. Sempre que um canal do sensor (R, G ou B, nos gráficos da coluna direita), quando combinado com um determinado filtro, apresenta uma curva de sensibilidade resultante que se mostre muita ampla ou com picos secundários, os gráficos da coluna esquerda, respeitantes às distribuições de reflectâncias espectrais no *ColorChecker*, apresentam-se mais

desfasadas ou afastadas (exemplo: canal G sem filtro externo, aos 550 nm; canal G com o filtro *Edmund Optics Dichroic Green*, apresentando picos secundários, aos 580 nm); pelo contrário, se dessa combinação resultam curvas que representam uma seleção de banda espectral bem definida, estreita e sem picos secundários, as curvas do gráfico correspondente na coluna esquerda quase que se sobrepõem (exemplo: canal R com filtro *Celestron Red 25*, aos 640 nm).

Pelas razões expostas, em trabalhos futuros a primeira componente a ter em conta no sentido de melhorar o desempenho do sistema hiperespectral será a escolha de uma combinação de filtros mais adequada, que permita uma seleção de bandas espectrais menos amplas que, quando combinados com o sensor, apresentem curvas de sensibilidade espectral resultante estreitas, bem definidas e de preferência sem picos secundários; se possível, para reduzir os tempos de exposição e melhorar a relação sinal-ruído, que estes filtros apresentem também uma elevada transmitância espectral. Outra hipótese seria seguir a estratégia simples, mas menos inovadora, de usar filtros dicróicos de seleção de banda estreita (dos mais recentes, com melhor transmitância espectral), com um equi-espaçamento entre os seus comprimentos de onda centrais, ao longo de todo o espectro a cobrir.

Outros aspetos a melhorar no sistema hiperespectral, respeitantes à iluminação, seria criar um método de garantir sempre uma distribuição homogénea da luz sobre a zona a digitalizar; em alternativa, usar o método (mas que implica mais um passo) de digitalizar primeiro um alvo branco que cubra todo o campo visual, nas mesmas condições do objeto a digitalizar espectralmente e, por programação, reduzir posteriormente das imagens do alvo, através de operações matemáticas, as diferenças de sinal resultantes das diferenças de homogeneidade da iluminação. Mais difícil de resolver é o problema dos reflexos especulares, muito frequentes em obras de pintura artística; seria de investigar a possibilidade de um sistema, talvez baseado em luz polarizada, que elimine este problema.

Pela experiência prática com este sistema e com base nos dados consultados na bibliografia no âmbito desta tese, parece ser claro o interesse em alargar a sensibilidade espectral do sistema à região infravermelha do espectro eletromagnético, que será importante nas aplicações em que se pretenda realizar a identificação dos pigmentos presentes na camada pictórica, assim como o seu mapeamento.

No sentido de facilitar o uso pelo operador, valerá a pena desenvolver um sistema mecânico de translação da estrutura de suporte do detetor, que permita deslocar todo o conjunto em movimento vertical e horizontal, facilitando assim o varrimento e digitalização com elevada resolução de obras de grandes dimensões. Também haverá vantagem em melhorar o *workflow* de digitalização, principalmente no que ao controlo por computador e posterior recolha e tratamento dos dados diz respeito, nomeadamente pelo aperfeiçoamento dos programas de *software* implicados e criação de um interface de comunicação, que seja fácil de usar por qualquer operador.

Em suma, com a presente tese pensa-se ter conseguido demonstrar a validade da utilização de câmaras digitais do tipo D-SLR - que na sua conceção se destinam a um uso fotográfico genérico - para a digitalização hiperespectral, com precisão suficiente ao uso científico na digitalização hiperespectral de obras de arte. Sobre a fotografia convencional, as possibilidades trazidas por este tipo de tecnologia espectral são muitas e o facto de ser possível desenvolver aplicações práticas com equipamentos acessíveis, pode mesmo tornar o uso por um leque mais amplo de utilizadores uma realidade, cumprindo-se assim um dos objetivos iniciais da presente tese de doutoramento, com a qual se espera prestar um valioso contributo.

5.- Conclusões

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

- Alba Carcelén, L., & González Mozo, A. (2002). *Uso da Luz Ultravioleta para el Estúdio del Estado de Conservacion de la Pintura de Caballete*. Paper presented at the I Congreso del GEIC: Conservación del Patrimonio: Evolución y Nuevas Perspectivas., Valencia.
- Aldrovandi, A., Bertani, D., Cetica, M., Matteini, M., Moles, A., Poggi, P., & Tiano, P. (1988). Multispectral Image Processing of Paintings. *Studies in Conservation*, 33, 154-159.
- Aldrovandi, A., & Picollo, M. (2001). *Metodi di documentazione e indagini non invasive sui dipinti*. Padova: Il Prato.
- Allen, E., & Sophie Triantaphillidou, d. (2011). *The Manual of Photography* (10th ed.). Burlington, MA: Focal Press.
- Alves, E. (2006). Renovar as cores da arte, *Urbi et Orbi - jornal on-line da Ubi*. Retrieved 2009-05-28, from http://www.urbi.ubi.pt/060530/edicao/330ubi_digitalizador.htm
- Art Innovation, C. (2007). Multi-spectral art Imaging System. Retrieved 2007-01-12, from <http://www.art-innovation.nl>
- Athanassioua, A., Hilla, A. E., Fourriera, T., Burgiob, L., & Clarkb, R. J. H. (2000). The effects of UV laser light radiation on artists' pigments. *Journal of Cultural Heritage*, 1, 209-213.
- Attas, M., Cloutis, E., Collins, C., Goltz, D., Majzels, C., Mansfield, J. R., & Mantsch, H. H. (2003). Near-infrared Spectroscopic Imaging in Art Conservation: Investigation of Drawing Constituents. *Journal of Cultural Heritage*, 4, 127-136.
- Bacci, M. (2004). *Optical Spectroscopy and Colorimetry* (C. CLIV, Trans.). Amsterdam: International School of Physics "Enrico Fermi".

- Bacci, M., & Casini, A. (2005). A study on a set of drawings by Parmigianino: integration of art-historical analysis with imaging spectroscopy. *Journal of Cultural Heritage*, 6, 329-336.
- Balas, C., Antonopoulos, G., Epitropou, G., Tsairis, G., Argyriadou, K., Georgakilas, A., & Hadjinicolaou, N. (2008). *Hyper-spectral Imaging System with Embedded Spectral Segmentation and Classification Algorithms for the Non-destructive Analysis of Artworks and Manuscripts: An Application in Paintings by El Greco*. Paper presented at the 9th International Conference on NDT of Art, Jerusalem.
- Balas, C., Papadakis, V., Papadakis, N., Papadakis, A., Vazgiouraki, E., & Themelis, G. (2003). A novel hyper-spectral imaging apparatus for the non-destructive analysis of objects of artistic and historic value. *Journal of Cultural Heritage*, 4, 330-337.
- Barcelos, J. (2008). Pigmentos Inorgânicos. Retrieved 2009-05-28, from www.joaobarcelos.com.br
- Baronti, S., Casini, A., Lotti, F., & Porcinai, S. (1997). Principal Component Analysis of Visible and Near-infrared Multispectral Images of Works of Art. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 39, 103-114.
- Bernardo, L. M. (2010). *Histórias da Luz e das Cores (Vol. III)*. Porto: Editora da Universidade do Porto.
- Berns, R. S. (2001). The Science of Digitizing Paintings for Color-Accurate Image Archives: A Review. *Journal of Imaging Science & Technology*, 45, 305-325.
- Berns, R. S. (2002). Phase I Final Report to the National Gallery of Art, Washington. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.

- Berns, R. S. (2005). Color-Accurate Image Archives Using Spectral Imaging. *Scientific Examination of Art: Modern Techniques in Conservation and Analysis, National Academies Press*, 105-119.
- Berns, R. S. (2005). *Rejuvenating the Appearance of Cultural Heritage Using Color and Imaging Science Techniques*. Paper presented at the 10th Congress of the International Colour Association, Granada.
- Berns, R. S. (2006). Improving Artwork Reproduction Through 3D-Spectral Capture and Computer Graphics Rendering: Project Overview. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Berns, R. S. (2009). Improving Artwork Reproduction Through 3D-Spectral Capture and Computer Graphics Rendering Phase 1: Final Report. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Berns, R. S., & Imai, F. H. (2002). *The use of multi-channel visible spectrum imaging for pigment identification*. Paper presented at the 13th Triennial ICOM-CC meeting, Rio de Janeiro.
- Berns, R. S., Kruger, J. J., & Swicklik, M. M. (2002). Multiple pigment selection for inpainting using visible reflectance spectrophotometry. *Studies in Conservation*, 47, 46-61.
- Berns, R. S., & Mohammadi, M. (2007). Evaluating Single -and Two-Constant Kubelka-Munk Turbid Media Theory for Instrumental-Based Inpainting. *Studies in Conservation*, 52, 299-314.
- Berns, R. S., & Taplin, L. A. (2006). Practical Spectral Imaging Using a Color-Filter Array Digital Camera. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology,

College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.

Berns, R. S., Taplin, L. A., Imai, F. H., Day, E. A., & Day, D. C. (2003). *Spectral Imaging of Matisse's Pot of Geraniums: A Case Study*. Paper presented at the IS&T/SID, Color Imaging Conference, Spotlight Presentations II, Scottsdale, AZ.

Berns, R. S., Taplin, L. A., Nezamabadi, M., Mohammadi, M., & Zhao, Y. (2005). *Spectral imaging using a commercial colour-filter array digital camera*. Paper presented at the 14th Triennial ICOM-CC meeting, The Hague.

Berns, R. S., Taplin, L. A., Nezamabadi, M., & Zhao, Y. (2004). Modifications of a Sinarback 54 Digital Camera for Spectral and High-Accuracy Colorimetric Imaging: Simulations and Experiments. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.

Berns, R. S., Taplin, L. A., Nezamabadi, M., Zhao, Y., & Okumura, Y. (2005). *High-Accuracy Digital Imaging of Cultural Heritage without Visual Editing*. Paper presented at the IS&T's 2005 Archiving Conference, Washington, DC.

Bertani, D., & Consolandi, L. (2006). High resolution imaging in the near infrared. In L. MacDonald (Ed.), *Digital Heritage: Applying Digital Imaging to Cultural Heritage* (pp. 211-238). Burlington, MA: Butterworth-Heinemann.

Bigras, C., Choquette, M., & Powell, J. (2010). *Lighting Methods for Photographing Museum Objects*. Ottawa: Canadian Conservation Institute.

Blatner, D., Fleishman, G., & Roth, S. (1998). *Real World Scanning and Halftones* (2nd ed.). Berkeley, CA: Peachpit Press.

- Boer, J. R. J. V. A. d. (1970). *Infrared Reflectography: A Contribution to the Examination of Earlier European Paintings*. PhD, Central Research Laboratory for Objects of Art and Science, Amsterdam.
- Bouillot, R. (2006). *Cours de Photographie Numérique: Principes, Acquisition et Stockage* (2 édition ed.). Paris.
- Bradfield, P. (2007). SoLux: The best light for checking color from a digital output (Graphics or Photographic) Retrieved 2008-10-15, from <http://www.solux.net/cgi-bin/tlstore/infopages/color-proofing.html>
- Burns, P. D., & Berns, R. S. (1996). *Analysis Multispectral Image Capture*. Paper presented at the 4th Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications, IS&T/SID, Scottsdale, AZ.
- Burns, P. D., & Berns, R. S. (1999). *Quantization in Multispectral Color Image Acquisition*. Paper presented at the 7th Color Imaging Conference: Color Science and Engineering, Systems, Technologies and Applications, IS&T/SID, Scottsdale, AZ.
- Calvo, A. (1997). *Conservación y Restauración, Materiales, Técnicas y Procedimientos, de la A a la Z*. Barcelona: Ediciones del Serbal.
- Calvo, A., Afonso, J. F., Aguiar, M., Nodal, C., Carballo, J., & Pereira, L. B. (2005). Estudios sobre el Tríptico de Pentecostés, de la Iglesia de San Pedro de Miragaia, en Oporto *Investigación en Conservación y Restauración* (pp. 399-407). Barcelona: Museu Nacional d'Art de Catalunya.
- Cao, Z. (2011). *MIPPR 2011 : multispectral image acquisition, processing, and analysis, 4-6 November 2011, Guilin, China*. Bellingham, Wash.: SPIE.
- Carcagni, P., Patriaa, A. D., Fontana, R., Greco, M., Mastroianni, M., Materazzi, M., *et al.* (2007). Multispectral Imaging of Paintings by Optical Scanning. *Optics and Lasers in Engineering*, 45, 360-367.

- Casini, A., Lotti, F., Picollo, M., Stefani, L., & Buzzegoli, E. (1999). Image Spectroscopy Mapping Technique for Non-invasive Analysis of Paintings. *Studies in Conservation*, 44, 39-48.
- Casini, A., Lotti, F., & Stefani, L. (2003). Evoluzione di Apparatí di Spettroscopia d'Immagine per l'Analisi Non Invasiva di Dipanti Presso l'IFAC-CNR. Parma: SIOF - Società Italiana di Ottica e Fotonica.
- Castillejo, M., Martín, M., Oujja, M., Santamaría, J., Silva, D., Torres, R., *et al.* (2003). Evaluation of the chemical and physical changes induced by KrF laser irradiation of tempera paints. *Journal of Cultural Heritage*, 4, 257-263.
- Chang, C.-I. (2012). *Hyperspectral data processing: algorithm design and analysis*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- Chen, Y. (2008). *Model Evaluation and Measurement Optimization for the Reproduction of Artist Paint Surfaces through Computer Graphics Renderings*. M.S. Dissertation, Rochester Institute of Technology, Center for Imaging Science, Rochester, NY.
- Chen, Y., Berns, R. S., & Taplin, L. A. (2007). *Model Evaluation for Computer Graphics Renderings of Artist Paint Surfaces*. Paper presented at the 15th Color Imaging Conference: Color Science and Engineering, Systems, Technologies and Applications, IS&T/SID, Springfield, VA.
- Chen, Y., Berns, R. S., Taplin, L. A., & Imai, F. H. (2003). *A Multi-Ink Color-Separation Algorithm Maximizing Color Constancy*. Paper presented at the 11th Color Imaging Conference, IS&T, Springfield, VA.
- CoastalOptics, C. (2006). CoastalOpt Multispectral Lenses. Retrieved 2007-09-11, from http://www.jenoptik-inc.com/literature/cat_view/91-optical-lens-systems/24-coastaloptr-multispectral-lenses.html

- Comelli, D., Nevin, A., Gulotta, D., Toniolo, L., Valentini, G., & Cubeddu, R. (2008). *Integrated Hyperspectral and Time Resolved Fluorescence Imaging Combined with Statistical Data Analysis: Diagnostic Investigations of Wall Paintings*. Paper presented at the 9th International Conference on NDT of Art, Jerusalem.
- Comelli, D., Nevin, A., Osticioli, I., Valentini, G., Toniolo, L., & Cubeddu, R. (2010). *Analysis of Works of Art with Advanced Fluorescence and Reflectance Spectroscopic Imaging*. Paper presented at the Works of Art & Conservation Science Today, Thessaloniki.
- Conti, S., Aldrovandi, A., & Keller, A. (2008). *Textile Materials: Reference Standards for Characterization Using Multispectral Analyses*. Paper presented at the 9th International Conference on NDT of Art, Jerusalem.
- Creagh, D. C. (2005). The Characterization of Artefacts of Cultural Heritage Significance using Physical Techniques. *Radiation Physics and Chemistry*, 74, 426-442.
- Cruz, A. J. (2004). As cores vitruvianas. Os materiais da pintura mural romana segundo o tratado de Vitruvius. *Artis – Revista do Instituto de História da Arte da Faculdade de Letras de Lisboa*, 3, 67-86
- Cruz, A. J. (2006). Para que serve à história da arte a identificação dos pigmentos utilizados numa pintura? *Artis – Revista do Instituto de História da Arte da Faculdade de Letras de Lisboa*, 5, 445-462
- Cruz, A. J. (2007). A cor e a substância: sobre alguns pigmentos mencionados em antigos tratados portugueses de pintura - pigmentos amarelos. *Artis – Revista do Instituto de História da Arte da Faculdade de Letras de Lisboa*, 6, 139-160

- Cruz, A. J. (2009). Os materiais usados em pintura em Portugal no início do século XVIII, segundo Rafael Bluteau. *Artis – Revista do Instituto de História da Arte da Faculdade de Letras de Lisboa*, 7-8, 385-405
- Cudell, A. (2010). Estudo Científico e Tratamento de Conservação na pintura O Cabouqueiro. *Materiais e Técnicas de Pintores do Norte de Portugal*. Retrieved 2012-7-21, from http://artes.ucp.pt/citar/mtpnp/estudos/arte_contemporanea_04_estado_conservacao.pdf
- Dagen, P. (2008, 2008-04-25). "La Joconde" Mise à Nu Par La Science, *Le Monde*, p. 24.
- Damiani, E. (2008). *Signal processing for image enhancement and multimedia processing*. New York: Springer Science + Business Media.
- Day, D. C. (2003). Evaluation of Optical Flare and Its Effects On Spectral Estimation Accuracy. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Day, D. C. (2003). *Filter Selection for Spectral Estimation Using a Trichromatic Camera*. M.S. Dissertation, Rochester Institute of Technology, Center for Imaging Science, Rochester, NY.
- Day, D. C. (2003). Spectral Sensitivities of the Sinarback 54 Camera. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Day, E. A. (2002). Characterization of a Roper Scientific Quantix monochrome camera. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.

- Day, E. A. (2002). Colorimetric Characterization of a Computer- Controlled (SGI) CRT Display. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Day, E. A. (2003). *The Effects of Multi-channel Visible Spectrum Imaging on Perceived Spatial Image Quality and Color Reproduction Accuracy*. M.S. Dissertation, Rochester Institute of Technology, Center for Imaging Science, Rochester, NY.
- Day, E. A., Berns, R. S., Taplin, L. A., & Imai, F. H. (2003). *A Psychophysical Experiment Evaluating the Color Accuracy of Several Multispectral Image Capture Techniques*. Paper presented at the IS&T PICS Conference, Springfield, VA.
- Delaney, J. K., Walmsley, E., Berrie, B. H., & Fletcher, C. F. (2005). Multispectral Imaging of Paintings in the Infrared to Detect and Map Blue Pigments. *Scientific Examination of Art: Modern Techniques in Conservation and Analysis, National Academies Press*, 120-136.
- DPRReview. (2006). Sigma SD14. Retrieved 2012-09-30, from <http://www.dpreview.com/news/2006/9/26/sigmasd14>
- DPRReview. (2007). Fujifilm FinePix IS Pro - Specs Retrieved 2012-09-30, from http://www.dpreview.com/products/fujifilm/slrs/fuji_ispro
- DxOMark. (2004). Tests and reviews for the camera Nikon D70 Retrieved 2012-09-30, from <http://www.dxomark.com/index.php/Cameras/Camera-Sensor-Database/Nikon/D70>
- DxOMark. (2008). Tests and reviews for the camera Nikon D300 Retrieved 2012-09-30, from <http://www.dxomark.com/index.php/Cameras/Camera-Sensor-Database/Nikon/D300>

- Edmund Optics, C. (2012). *Optics and Optical Instruments Catalog: Edmund Optics-Europe, Inc.*
- Ehrlich, R. (1986). *Dicionário de Fotografia*. Lisboa: Publicações Dom Quixote.
- Emmers, E. (2006). Designing the Jobo GigaVu Pro Evolution. Retrieved from www.robgalbraith.com/public_files/giga_vu_pro_evolution_white_paper.pdf
- Epitropou, G. (2008). *Hyper-spectral imaging and spectral segmentation algorithms for the non-destructive analysis of El Greco's paintings*. Diploma Dissertation, Technical University of Crete, Chania.
- Fairchild, M. D. (2005). *Color Appearance Models* (2nd ed.). West Sussex, UK: John Wiley & Sons.
- Ferreira, F. B. (2010). *Digitalização Hiperespectral de Pinturas e Obras de Arte*. Dissertação Doutorado, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Fiadeiro, P. T. (2005). *Aula de colorimetria*. UBI. Covilhã.
- Fischer, C., & Kakoulli, I. (2006). Multispectral and Hyperspectral Imaging Technologies in Conservation: Current Research and Potential Applications. *Reviews in Conservation*, 7, 3-16.
- Forth-Photonics, C. (2008). MuSIS Advanced Spectral Imaging Solutions for Non-Destructive Analysis Retrieved 2008-06-06, from www.musis.forth-photonics.com/
- Fraser, B., Murphy, C., & Bunting, F. (2005). *Real World Color Management* (2nd ed.). Berkeley, CA: Peachpit Press.
- Freeman, M. (2010). *The Photographer's DSLR Pocketbook*. East Sussex: ILEX.
- Giorgianni, E. J., & Madden, T. E. (2008). *Digital Color Management: Encoding Solutions* (2nd ed.). West Sussex: John Wiley & Sons.

- Gonzalez, R. C., Woods, R. E., & Eddins, S. L. (2004). *Digital Image Processing using Matlab*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Grahn, H., & Geladi, P. (2007). *Techniques and applications of hyperspectral image analysis*. Chichester: J. Wiley.
- Green, P. (2006). Colour Management in Heritage Photography. In L. MacDonald (Ed.), *Digital Heritage: Applying Digital Imaging to Cultural Heritage* (pp. 293-326). Burlington, MA: Butterworth-Heinemann.
- Grey, T. (2004). *Color Confidence*. Alameda, CA: Sybex.
- Guevara, L. A. (2008). SD14-F NIKON-F mount kit Retrieved 2012-09-30, from <http://www.sigmacumlaude.com/sd14f.aspx>
- Habel, R., Kudenov, M., & Wimmer, M. (2012). Practical Spectral Photography. *Eurographics*, 31(2).
- Hardeberg, J. Y. (1999). *Acquisition and reproduction of colour images: colorimetric and multispectral approaches*. PhD, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris.
- Hattenberger, E., Rosen, M., & Ohta, N. (2003). *The Impact of Spectrally-Stable Ink Variability On Spectral color Management*. Paper presented at the 11th Color Imaging Conference, IS&T, Springfield, VA.
- Hattenberger, E. F. (2003). *Spectrally Stable Ink Variability in a Multi-Primary Printer*. M.S. Dissertation, Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Rochester, NY.
- Havlik, D. (2012). Bryce Bayer, Kodak scientist who created ubiquitous Bayer Filter for color digital imaging, has passed away. Retrieved 2012-11-20, from www.imaging-resource.com/news/2012/11/20/bryce-bayer-who-created-bayer-filter-for-digital-cameras-has-died

- Haworth, K. (1999). Digital Archiving. Retrieved 2013-05-28, from http://scien.stanford.edu/pages/labsite/1999/psych221/projects/99/khaworth/_main.htm
- Hecht, E. (2002). *Óptica*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Hirsch, R., & Erf, G. (2011). *Exploring Color Photography: From Film to Pixels* (5th ed.). Burlington, MA: Focal Press.
- Hunt, R. W. G. (1998). *Measuring Colour* (3rd ed.). Kingston-upon-Thames: Fountain Press.
- Hunt, R. W. G. (2004). *The Reproduction of Colour*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Imai, F. H. (1998). Multi-spectral Image Acquisition and Spectral Reconstruction using a Trichromatic Digital Camera System Associated with Absorption Filters. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Imai, F. H. (2002). Simulation of spectral estimation of an oil paint target under different illuminants. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Imai, F. H., & Berns, R. S. (1998). *High-resolution multi-spectral image archives: a hybrid approach*. Paper presented at the IS&T/SID Sixth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and applications, Scottsdale, AZ.
- Imai, F. H., & Berns, R. S. (2001). *Spectral estimation of artist oil paints using multi-filter trichromatic imaging*. Paper presented at the 9th Congress of the International Colour Association, Rochester, NY.

- Imai, F. H., Berns, R. S., & Tzeng, D.-Y. (2000). A Comparative Analysis of Spectral Reflectance Estimated in Various Spaces Using a Trichromatic Camera System. *Journal of Imaging Science & Technology*, *44*, 280-287.
- Imai, F. H., Quan, S., Rosen, M. R., & Berns, R. S. (2001). *Digital camera filter design for colorimetric and spectral accuracy*. Paper presented at the 3th International Conference on Multispectral Color Science, IS&T, Joensuu.
- Imai, F. H., Rosen, M., Wyble, D., Berns, R. S., & Tzeng, D.-Y. (2001). *Spectral reproduction from scene to hardcopy I: Input and Output*. Paper presented at the SPIE Electronic Imaging, Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications II, San Jose, CA.
- Imai, F. H., Rosen, M. R., & Berns, R. S. (2000). *Comparison of spectrally narrow-band capture versus wide-band with a priori sample analysis for spectral reflectance estimation*. Paper presented at the 8th Color Imaging Conference: Color Science and Engineering, Systems, Technologies and Applications, IS&T/SID, Scottsdale, AZ.
- Imai, F. H., Rosen, M. R., & Berns, R. S. (2001). *Multi-spectral imaging of van Gogh's Self-portrait at the National Gallery of Art, Washington, D.C.* Paper presented at the IS&T, PICS 2001: Image Processing, Image Quality, Image Capture Systems Conference, Rochester, NY.
- Imai, F. H., Rosen, M. R., & Berns, R. S. (2002). *Comparative Study of Metrics for Spectral Match Quality*. Paper presented at the 1st European Conference on Color in Graphics CGIV, IS&T, Springfield, VA.
- Imai, F. H., Taplin, L. A., Day, D. C., Day, E. A., & Berns, R. S. (2002). *Imaging at the National Gallery of Art, Washington D.C.* Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.

- Imai, F. H., Taplin, L. A., & Day, E. A. (2002). Comparison of the accuracy of various transformations from multi-band images to reflectance spectra. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Imai, F. H., Taplin, L. A., & Day, E. A. (2003). Comparative study of spectral reflectance estimation based on broad-band Imaging systems. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Jacobson, R. E., Ray, S. F., Attridge, G. G., & Axford, N. R. (2000). *The Manual of Photography: Photographic and Digital Imaging* (9th ed.). Oxford: Focal Press.
- Johnson, G. M., & Fairchild, M. D. (1999). Full-spectral color calculations in realistic image synthesis. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19(4), 47-53.
- Karniyati. (2005). Evaluating a Camera for Archiving Cultural Heritage. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science.
- Kieran, M. (2003). *Photoshop Color Correction*. Berkeley, CA: Peachpit Press.
- Kuehni, R. G. (2005). *Color: An Introduction to Practice and Principles* (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley-interscience.
- Lahanier, C., Aitken, G., Pillay, R., Beraldin, J., Blais, F., Borgeat, L., *et al.* (2008). Two-dimensional Multi-spectral Digitization and Three-dimensional Modelling of Easel Paintings. *Science at work for Canada*.
- Langford, M., & Bilissi, E. (2008). *Langford's Advanced Photography* (7th ed.). Oxford: Focal Press.

- Lau, D., Villis, C., Furman, S., & Livett, M. (2008). Multispectral and Hyperspectral Image Analysis of Elemental and Micro-Raman Maps of Cross-sections from a 16th Century Painting. *Analytica Chimica Acta*, 610(1), 15-24.
- Lebourgeois, V., Bégué, A., Labbé, S., Mallavan, B., Prévot, L., & Roux, B. (2008). Can Commercial Digital Cameras Be Used as Multispectral Sensors? A Crop Monitoring Test. *Sensors*, 8(11), 7300-7322.
- Lee, H.-C. (2005). *Introduction to Color Imaging Science*. Cambridge, NY: Cambridge University Press.
- Lerma, J. L. (2001). *Documentation and Recovery of Rupestrian Painting: an Automatic Approach*. Paper presented at the CIPA International Symposium, Potsdam.
- Levkowitz, H. (1997). *Color Theory and Modelling for Computer Graphics, Visualization, and Multimedia Applications*. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers.
- Li, Z., & Berns, R. S. (2007). Comparison of methods of parametric correction for evaluating metamerism. *Color Research and Application*, 32, 293-303.
- Liang, H. (2012). Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 106(2), 309-323.
- Liang, H., Saunders, D., Cupitt, J., & Lahanier, C. (2010). Multispectral Imaging for Easel and Wall Paintings. Retrieved from The Getty website: http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/2nd_silkroad6.pdf
- Lightforce Technology, C. (2007). RIT Goniometer: Requirements and Specifications. Rochester, NY: Munsell Color Science Laboratory, Rochester Institute of Technology.

- Limp, W. F. (1989). *The use of multispectral digital imagery in archeological investigations* (2nd ed.). Fayetteville, AK: Arkansas Archeological Survey.
- Linhares, J. M. M. (2011). *Diversidade cromática de cenários complexos digitalizados com imagiografia hiperespectral*. PhD Tese de doutoramento em Ciências (área do conhecimento em Física), Universidade do Minho, Braga. Available from <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/19641>
- Lu, H., & Zhang, T. (2003). *Multispectral image processing and pattern recognition: Third International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition: 20-22 October, 2003, Beijing, China*. Bellingham, WA: SPIE.
- Luijk, G. (2007). What is Dcraw Retrieved 2010-05-18, from http://www.guillermoluijk.com/tutorial/dcraw/index_en.htm
- Lumiere Technology, C. (2004). Multispectral High Definition Digitalization. Retrieved 2008-06-21, from www.lumiere-technology.com
- Lumiere Technology, C. (2007). Leonardo da Vinci's The Lady with an Ermine: its virtual cleaning by the Lumiere-Technology Specialists. Retrieved from <http://www.lumiere-technology.com/news/news6.html>
- Maître, H. (2007). *MIPPR 2007: multispectral image processing: 15-17 November 2007, Wuhan, China*. Bellingham, WA: SPIE.
- Mansfield, J. R., Sowa, M. G., Majzels, C., Collins, C., Cloutis, E., & Mantsch, H. H. (1999). Near Infrared Spectroscopic Reflectance Imaging: Supervised vs. Unsupervised Analysis Using an Art Conservation Application. *Vibrational Spectroscopy*, 19, 33-45.
- Matsushiro, N., Imai, F. H., & Ohta, N. (2001). *Principal Component Analysis of Spectral Images Based on the Independence of the Color Matching*

Function Vectors. Paper presented at the 3rd International Conference on Multispectral Color Science, IS&T, Joensuu.

McDonald, R. (1997). *Colour Physics for Industry* (2nd ed.). West Yorkshire: Society of Dyers and Colourists.

McGuire, K. (2008). SoLux 4700k Specification Page Retrieved 2008-10-15, from <http://www.solux.net/edu4.htm>

Mohammadi, M., & Berns, R. S. (2004). Verification of the Kubelka-Munk Turbid Media Theory for Artist Acrylic Paint. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.

Mohammadi, M., & Berns, R. S. (2005). *Diagnosing and Correcting Systematic Errors in Spectral-Based Digital Imaging*. Paper presented at the IS&T/SID, 13th Color Imaging Conference, Springfield, VA.

Mohammadi, M., & Berns, R. S. (2006). Testing Instrumental-Based Color matching for Artist Acrylic Paints. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Munsell Color Science Laboratory.

Mohammadi, M., Nezamabadi, M., Berns, R. S., & Taplin, L. A. (2005). *A Prototype Calibration Target for Spectral Imaging*. Paper presented at the 10th Congress of the International Colour Association, Granada.

Morais, V., & Vieira, C. (2006). *Matlab 7&6*. Lisboa: Lidel - Edições Técnicas.

Morovic, J. (2008). *Color Gamut Mapping*. West Sussex: John Wiley & Sons.

Motta, G., Rizzo, F., & Storer, J. A. (2006). *Hyperspectral Data Compression*, . New York: Springer Science+Business Media, Inc.

- Murphy, E. P. (2005). *A Testing Procedure to Characterize Color and Spatial Quality of Digital Cameras Used to Image Cultural Heritage*. M.S. Dissertation, Rochester Institute of Technology, Center for Imaging Science, Rochester, NY.
- Nascimento, S. M. C., & Ferreira, T. (2007). Sessão de apresentação da Widecolour: Imagiografia hiperespectral e Aplicações em Pinturas Artísticas. In M. N. S. d. Reis (Ed.). Porto.
- Navulur, K. (2007). *Multispectral Image Analysis Using the Object-Oriented Paradigm*. Boca Raton, FL: CRC Press: Taylor & Francis Group.
- Nezamabadi, M. (2005). Gain Measurement of the Sinarback 54 Digital Camera. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Nezamabadi, M. (2008). *The Effect of Image Size on the Color Appearance of Image Reproductions*. Ph.D. Dissertation, Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Springfield, VA.
- Nezamabadi, M., & Berns, R. S. (2005). *The Effect of Image Size on the Color Appearance of Image Reproductions*. Paper presented at the 13th Color Imaging Conference, IS&T, Springfield, VA.
- Nyström, D. (2006). *Colorimetric and Multispectral Image Acquisition*. Licentiate Dissertation, Linköping University, Institute of Technology, Norrköping.
- Okumura, Y. (2005). *Developing a Spectral and Colorimetric Database of Artist Paint Materials*. M.S. Dissertation, Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Rochester, NY.
- Padoan, R., Steemers, T. A. G., Klein, M. E., Aalderink, B. J., & Bruin, G. d. (2008). *Quantitative Hyperspectral Imaging of Historical*

Documents: Technique and Applications. Paper presented at the 9th International Conference on NDT of Art, Jerusalem.

Pascale, D. (2006). RGB Coordinates of the Macbeth ColorChecker. Retrieved from Babel Color website: www.BabelColor.com

Pedrini, H., & Schwartz, W. R. (2008). *Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações*. São Paulo: Thomson.

Pelagotti, A., Pezzati, L., Piva, A., & Mastio, A. D. (2006). *Multispectral UV Fluorescence Analysis of Painted Surfaces*. Paper presented at the 14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2006), Florence.

Pereira, A., & Poupa, C. (2012). *Como Escrever uma Tese, Monografia ou Livro Científico Usando o Word* (5th ed.). Lisboa: Silabo.

Pereira, L. B. (2005). *Uso de câmaras fotográficas Reflex digitais (DSLR) na fotografia com luz Infravermelha de pintura sobre madeira: um caso prático na análise do Tríptico de Pentecostes, da Igreja de S. Pedro de Miragaia, Porto (Óleo sobre madeira, séc. XVI)*. Paper presented at the 4º Encontro do Instituto Português de Conservação e Restauro, Lisboa.

Pereira, L. B. (2006). *Fotografia digital com luz Infravermelha: Novas tecnologias na visualização do traço oculto*. Paper presented at the EITEC, Coimbra.

Pereira, L. B. (2008). *Análise Multiespectral de Pintura usando câmaras DSLR digitais*. Paper presented at the V Jornadas de Arte e Ciência UCP, Porto.

Pereira, L. B. (2008). *Imagens digitais compostas no estudo de obras de arte*. Paper presented at the EITEC, Porto.

Pereira, L. B. (2010). UV Fluorescence Photography of Works of Art: Replacing the Traditional UV Cut Filters with Interference Filters. *International Journal of Conservation Science*, 1(3), 161-166.

- Pereira, L. B. (2011). *Uso de câmaras reflex digitais (D-SLR) na captura de imagens multiespectrais de obras de arte*. Paper presented at the I Encontro Luso-Brasileiro de Conservação e Restauro, Porto.
- Pereira, M. J. T., & Fiadeiro, P. T. (2010). *Óptica Geométrica Ocular*. Covilhã: SGUBI: Serviços Gráficos e Publicações da Universidade da Beira Interior.
- Pinto, P. D. (2010). *Colorimetria hiperespectral de pinturas artísticas*. PhD Tese de doutoramento em Ciências (área do conhecimento em Física), Universidade do Minho, Braga. Available from <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/13866>
- Pinto, P. D., Linhares, J. M. M., & Nascimento, S. M. C. (2008). Correlated color temperature preferred by observers for illumination of artistic paintings. *Journal of the Optical Society of America*, 25(3), 623-630.
- Pinto, P. D., Linhares, J. M. M., & Nascimento, S. M. C. (2008). *Illuminant spectrum maximizing the number of perceived colors in art paintings*. Paper presented at the CGIV 2008 and MCS'08, Terrassa.
- Pires, H., Lima, P., & Pereira, L. B. (2009). *Novos Métodos de registo digital de arte rupestre: digitalização tridimensional e fotografia multiespectral*. Paper presented at the Jornadas Raianas, Sabugal.
- Poynton, C. (1997). Frequently Asked Questions about Color. Retrieved 2009-11-18, from <http://www.poynton.com/PDFs/ColorFAQ.pdf>
- Quan, S. (2002). *Evaluation and Optimal Design of Spectral Sensitivities for Digital Color Imaging*. Ph.D. Dissertation, Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Rochester, NY.
- Quijano Ruiz, J. I. (2010). *Quality Metrics for Spectral Estimation*. Barcelona: Escola Técnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona.

- Rao, P., Rosen, M. R., & Berns, R. S. (2005). Performance Evaluation of Profile Maker Professional 5.0 ICC Profiling Software. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Imaging Arts and Sciences, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Ray, S. F. (2008). *Scientific Photography and Applied Imaging*. São Paulo: Focal Press.
- Ribés Cortés, A. (2003). *Analyse multispectrale et reconstruction de la réflectance spectrale de tableaux de maître*. Ph. D. Dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris.
- Ribés Cortés, A., & Schmitt, F. (2003). A fully automatic method for the reconstruction of spectral reflectance curves by using mixture density networks. *Pattern Recognition Letters*, 24, 1691-1701.
- Rice, P. (2005). *Digital Infrared Photography: Professional Techniques and Images*. Buffalo, NY: Amherst Media.
- Roldán, C., Ferrero, J., Juanes, D., Carballo, J., Calvo, A., & Aguiar, M. (2011). *EDXRF Analysis of the Pentecost Triptych from the "San Pedro de Miragaia" Church (Porto, Portugal)*.
- Rørslett, B. (2008). The Javelin Warrior: Multispectral Bronze Age Rock Carving Retrieved 2008-04-19, from <http://nikongear.com/smf/index.php?topic=9171.0>
- Rosen, M. R. (2003). *Navigating the Roadblocks to Spectral Color Reproduction: Data-Efficient Multi-Channel Imaging and Spectral Color Management*. Ph.D. Dissertation, Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Rochester, NY.

- Rosen, M. R., Fairchild, M. D., Johnson, G. M., & Wyble, D. R. (2000). *Color Management within a Spectral Image Visualization Tool*. Paper presented at the IS&T, Color Imaging Conference, Color Workflow, Scottsdale, AZ.
- Rosen, M. R., Imai, F. H., Jiang, X.-Y. W., & Ohta, N. (2001). *Spectral reproduction from scene to hardcopy II: Image processing*. Paper presented at the Proceedings of the SPIE, San Jose, CA.
- Rosen, M. R., Imai, F. H., & Tominaga, S. (2006). *Spectral imaging: Eighth International Symposium on Multispectral Color Science: 16-17 January 2006*. Bellingham, WA: SPIE.
- Rosen, M. R., & Jiang, X.-Y. W. (1999). *Lippmann2000: A Spectral Image Database Under Construction*. Paper presented at the International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives, Chiba.
- Rosen, M. R., & Ohta, N. (2003). *Spectral Color Processing using an Interim Connection Space*. Paper presented at the 11th Color Imaging Conference, IS&T, Springfield, VA.
- Rosen, M. R., Zhao, Y., O'Sullivan, D., & Berns, R. S. (2005). *Computer Display as Camera Profiling Target: When "Good Enough" is Good Enough*. Paper presented at the 10th Congress of the International Colour Association, Granada.
- Rosi, F., Burnstock, A., Berg, K. J. V. d., Miliani, C., Brunetti, B. G., & Sgamelotti, A. (2009). Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A*, 71, 1655-1662.
- Rudolf, P. (2006). Principles and evolution of digital cameras. In L. MacDonald (Ed.), *Digital Heritage: Applying Digital Imaging to Cultural Heritage* (pp. 177-210). Burlington, MA: Butterworth-Heinemann.

- Ryer, A. (1997). *Light Measurement Handbook*. Newburyport, MA: International Light, Inc.
- Saffir, D. (2007). *Mastering Digital Color*. Boston, MA: Thomson Course Technology.
- Saunders, D. (1995). Photographic Flash: Threat or Nuisance *National Gallery technical bulletin* (Vol. 16, pp. 66-72).
- Saunders, D., Cupitt, J., & Padfield, J. (2006). Digital Imaging for Easel Paintings. In L. MacDonald (Ed.), *Digital Heritage: Applying Digital Imaging to Cultural Heritage* (pp. 521-548). Burlington, MA: Butterworth-Heinemann.
- Savazzi, E. (2011). *Digital Photography for Science* (3rd ed.). Marston Gate: Amazon.
- Scanlon, V. C., & Sanders, T. (2007). *Essentials of Anatomy and Physiology* (5th ed.). Philadelphia, PA: F. A. Davis Company.
- Scholten, J. H., Klein, M. E., Steemers, T. A. G., & Bruin, G. d. (2004). Hyperspectral Imaging - Concepts and Potencial in Paper and Writing Durability Research. Retrieved from <http://www.art-innovation.nl>
- Sepulchre, J.-M. (2009). *91 tests d'objectifs pour le Nikon D300*: Édtions VM.
- Sharma, G. (2003). *Digital Color Imaging Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Shen, J., Wang, P. S. P., & Zhang, T. (2001). *Multispectral image processing and pattern recognition*. River Edge, NJ: World Scientific.
- Shen, S. S., & Lewis, P. E. (2011). *Algorithms and technologies for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery XVII: 25-28 April 2011, Orlando, Florida, United States*. Bellingham, WA: SPIE.

- Shevell, S. K. (2003). *The Science of Color* (2nd ed.). Oxford: Optical Society of America.
- Silva, L. G., & Valadares, J. A. S. (1977). *Física V-Óptica: Curso Complementar do Ensino Secundário, Curso Propedêutico*. Lisboa: Livraria Popular de Francisco Franco.
- Smith, W. L. (2006). *Multispectral, hyperspectral and ultraspectral remote sensing technology, techniques and applications : 13-16 November, 2006, Goa, India*. Bellingham, WA: SPIE.
- Sousa, G. V. (1998). *Metodologia da Investigação, Redacção e Apresentação de Trabalhos Científicos*. Porto: Livraria Civilização Editora.
- Suello, M., Abramov, I., Gordon, J., & Weintraub, S. (2004). Museum Lighting: Why are Some Illuminants Preferred? *Journal of the Optical Society of America*, 21(2), 306-311.
- Sun, Q. (2003). *Spectral Imaging of Human Portraits and Image Quality*. Ph.D. Dissertation, Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Rochester, NY.
- Sun, Q., & Fairchild, M. D. (2002). Statistical characterization of face spectral reflectances and its application to human portraiture spectral estimation. *Journal of Imaging Science & Technology*, 46, 498-506.
- Sydenham, A. (2013, April 15th). Hedler DF15 and DX15 Lighting heads. *Amateur Photographer*, 53.
- Taplin, L. A. (2001). *Spectral Modeling of a Six-Color Inkjet Printer*. M.S. Dissertation, Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Rochester, NY.

- Taplin, L. A., & Berns, R. S. (2005). *Practical spectral capture systems for museum imaging*. Paper presented at the 10th Congress of the International Colour Association, Granada.
- Tzeng, D.-Y. (1999). *Spectral-Based Color Separation Algorithm Development for Multiple-Ink Color Reproduction*. Ph.D. Dissertation, Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Rochester, NY.
- Tzeng, D.-Y., & Berns, R. S. (1998). *Spectral-Based Ink Selection for Multiple-Ink Printing I. Colorant Estimation of Original Objects*. Paper presented at the 6th Color Imaging Conference, IS&T/SID, Springfield, VA.
- Tzeng, D.-Y., & Berns, R. S. (1999). *Spectral-Based Ink Selection for Multiple-Ink Printing II. Optimal Ink Selection*. Paper presented at the 7th Color Imaging Conference: Color Science and Engineering, Systems, Technologies and Applications, IS&T/SID, Springfield, VA.
- Tzeng, D.-Y., & Berns, R. S. (2000). *Spectral-Based Six-Color Separation Minimizing Metamerism*. Paper presented at the 8th Color Imaging Conference: Color Science and Engineering, Systems, Technologies and Applications, IS&T, Springfield, VA.
- U.D.G.I. (2008). Antigos Estudantes Ilustres da Universidade do Porto - Julio Pomar. Retrieved 2012-10-15, from http://sigarra.up.pt/up/pt/web_base.gera_pagina?P_pagina=1000957
- Urban, P., Berns, R. S., & Grigat, R.-R. (2007). *Color Correction by Considering the Distribution of Metamers within the Mismatch Gamut*. Paper presented at the IS&T/SID Color Imaging Conference (CIC), Albuquerque, NM.
- Varshney, P. K., & Arora, M. K. (2004). *Advanced image processing techniques for remotely sensed hyperspectral data*. Berlin: Springer.

- Westland, S., & Ripamonti, C. (2004). *Computational Color Science using Matlab*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Williams, R., & Williams, G. (2002). Medical and Scientific Photography. Retrieved 2005-09-23, from <http://msp.rmit.edu.au/>
- Wyble, D. R., & Berns, R. S. (2010). Validating the Accuracy of the MCSL Imaging Goniospectrometer. Rochester, NY: The Andrew W. Mellon Foundation, Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Wyszecki, G., & Stiles, W. S. (2000). *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae* (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley Classics Library Edition.
- Zhao, Y. (2008). *Image Segmentation and Pigment Mapping of Cultural Heritage Based on Spectral Imaging*. Ph.D. Dissertation, Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Rochester, NY.
- Zhao, Y., & Berns, R. S. (2006). Further Investigations of Colorant Database Development for Two-Constant Kubelka-Munk Theory for Artist Acrylic and Oil Paints. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Zhao, Y., & Berns, R. S. (2007). Image-based spectral reflectance reconstruction using the Matrix R method. *Color Research and Application*, 32, 343-351.
- Zhao, Y., Berns, R. S., Okumura, Y., & Taplin, L. A. (2005). *Improvement of Spectral Imaging by Pigment Mapping*. Paper presented at the IS&T/SID, Thirteenth Color Imaging Conference, Scottsdale, AZ.

- Zhao, Y., Berns, R. S., Taplin, L. A., & Coddington, J. (2008). An investigation of multispectral imaging for the mapping of pigments in paintings. *SPIE, 6810* (681007-9).
- Zhao, Y., Taplin, L. A., Nezamabadi, M., & Berns, R. S. (2004). Methods of Spectral Reflectance Reconstruction for a Sinarback 54 Digital Camera. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory.
- Zhao, Y., Taplin, L. A., Nezamabadi, M., & Berns, R. S. (2005). *Using the Matrix R Method for Spectral Image Archives*. Paper presented at the 10th Congress of the International Colour Association, Granada.

Publicações e comunicações

Nesta secção apresentam-se as comunicações e publicações do autor em que o seu conteúdo se relacione com o tema da presente tese - aplicação à documentação e obras de arte de fotografia digital e técnicas associadas, como por exemplo a fotografia UV, IV, radiografia X, refletografia IV, fluorescência UV.

Comunicações (em congressos e jornadas)

Aguiar, M., Carballo, J., Pereira, L. B., & Calvo, A. (2007). *Original, Réplica ou Cópia? Complementaridade entre Conservação, Ciência e História de Arte*. Paper presented at the Comunicação nas Jornadas Nacionais: Conservação e Restauro em Portugal, na encruzilhada de Bolonha – desafios e oportunidades, Lisboa.

Calvo, A., Aguiar, M., Carballo, J., & Pereira, L. B. (2007). *The Contribution of non-destructive methods such as radiography, infrared reflectography and EDXRF in the determination of authenticity in easel paintings*. Paper presented at the TECHNART 2007 - Non-Destructive and Microanalytical techniques in Art and Cultural Heritage Research, Lisboa.

Carballo, J., & Pereira, L. B. (2007). *A Ciência Aplicada à Conservação e Restauro*. Paper presented at the Comunicação nas Jornadas Nacionais: Conservação e Restauro em Portugal, na encruzilhada de Bolonha – desafios e oportunidades, Lisboa.

Pereira, L. B. (2005). *Uso de câmaras fotográficas Reflex digitais (DSLR) na fotografia com luz Infravermelha de pintura sobre madeira: um caso prático na análise do Tríptico de Pentecostes, da Igreja de S. Pedro de Miragaia, Porto (Óleo sobre madeira, séc. XVI)*. Paper presented at the 4º Encontro do Instituto Português de Conservação e Restauro, Lisboa.

Pereira, L. B. (2006). *Fotografia digital com luz Infravermelha: Novas tecnologias na visualização do traço oculto*. Paper presented at the EITEC, Coimbra.

Pereira, L. B. (2008). *Análise Multiespectral de Pintura usando câmaras DSLR digitais*. Paper presented at the V Jornadas de Arte e Ciência UCP, Porto.

Pereira, L. B. (2008). *High Dynamic Range (HDR) images of Radiographies: modern digital replacement of negatoscopes?* Paper presented at the Colours 2008, Évora.

Pereira, L. B. (2008). *Imagens digitais compostas no estudo de obras de arte*. Paper presented at the EITEC, Porto.

Pereira, L. B. (2011). *Uso de câmaras reflex digitais (D-SLR) na captura de imagens multiespectrais de obras de arte*. Paper presented at the I Encontro Luso-Brasileiro de Conservação e Restauro, Porto.

Pereira, L. B. (2012). *Fotografia digital na documentação e análise científica de obras de arte*. Paper presented at the III Curso de Extensão Universitária "Preservação de Patrimônio Cultural: Tecnologia e Conservação, Porto Alegre, RGS.

Pires, H., Lima, P., & Pereira, L. B. (2009). *Novos Métodos de registo digital de arte rupestre: digitalização tridimensional e fotografia multiespectral*. Paper presented at the Jornadas Raianas, Sabugal.

Publicações (artigos e capítulo de livro)

Calvo, A., Afonso, J. F., Aguiar, M., Nodal, C., Carballo, J., & Pereira, L. B. (2005). Estudios sobre el Tríptico de Pentecostés, de la Iglesia de San Pedro de Miragaia, en Oporto *Investigación en Conservación y Restauración* (pp. 399-407). Barcelona: Museu Nacional d'Art de Catalunya.

- Pereira, L. B. (2009). High Dynamic Range (HDR) images of radiographies: modern digital replacement of negatoscopes? *Estudos de Conservação e Restauro*, 1(1), 140-152.
- Pereira, L. B. (2010). UV Fluorescence Photography of Works of Art: Replacing the Traditional UV Cut Filters with Interference Filters. *International Journal of Conservation Science*, 1(3), 161-166.

Pósters em conferências

- Calvo, A., Afonso, J. F., Aguiar, M., Nodal, C., Carballo, J., & Pereira, L. B. (2005). *Estudios sobre el Tríptico de Pentecostés, de la Iglesia de San Pedro de Miragaia, en Oporto*. Paper presented at the II Congreso Barcelona GE-IIC (Grupo Español del Internacional Institute for Conservation), Barcelona.
- Calvo, A., Aguiar, M., Nodal, C., Carballo, J., Ferrero, J., Pereira, L. B., *et al.* (2004). *Estudo da pintura mural de Nossa Senhora da Rosa na Igreja de S. Francisco do Porto*. Paper presented at the II Jornadas de Arte e Ciência da UCP – Técnica e conservação de pintura mural, Porto.
- Calvo, A., Carballo, J., Nodal, C., Pereira, L. B., & Parra, E. (2005). *Estudo técnico dos dezasseis painéis da Igreja Matriz de Freixo de Espada-à-Cinta*. Paper presented at the III Jornadas de Arte e Ciência da UCP - A pintura sobre madeira: estudo e conservação, Porto.
- Lourenço, A. P., Carballo, J., & Pereira, L. B. (2006). *Conservation of a polychrome wooden sculpture – methodology and criteria in academic context*. Paper presented at the Theory and Practice in Conservation – a tribute to Cesare Brandi, Lisboa.

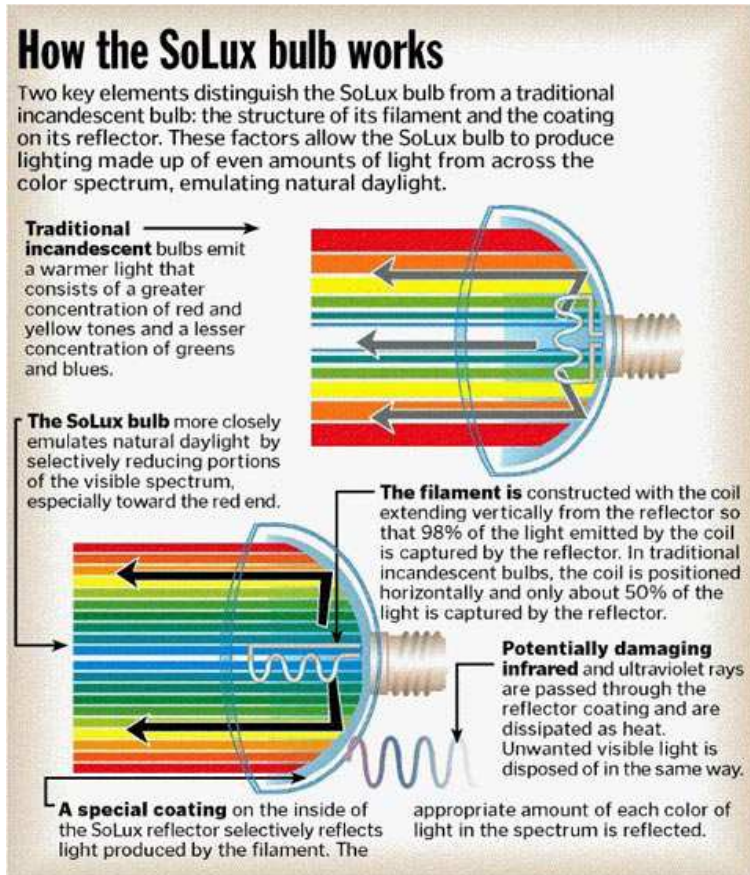
Pereira, L. B. (2013). *Hyperspectral Imaging of works of Art with a D-SLR camera*.
Paper presented at the Inart2013 - 1st International Conference on
Innovation in Art Research and Technology, Évora.

Anexos

Conteúdo:

Anexo A: Funcionamento das Lâmpadas SoLux	317
Anexo B: Panfleto da objetiva Coastal Optics 60mm f/4	318
Anexo C: Pigmentos analisados da pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX).....	321

Anexo A: Funcionamento das Lâmpadas SoLux



Source: Tailored Lighting Inc.

HERM AUCH staff artist

Ilustração retirada do endereço de Internet “<http://www.solux.net/cgi-bin/tlistore/infopages/solux-how-it-works.html.html>”, em Junho de 2012.

Anexo B: Panfleto da objetiva Coastal Optics 60mm f/4

Disponível (formato PDF) em: http://www.jenoptik-inc.com/literature/cat_view/91-optical-lens-systems/24-coastalopt-multispectral-lenses.html, em Junho de 2012.

UV-VIS-IR 60mm 1:4 Apo Macro

High performance UV-VIS-IR lens for forensics, science, and fine art



- Perfect lens for *Fuji IS Pro* DSLR
- Ideal for Forensics and Law Enforcement
- Superb correction from UV thru IR



Coastal Optical Systems, Inc.
4480 South Tiffany Drive
West Palm Beach, FL 33407
USA

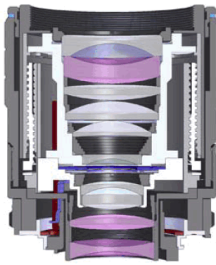
Phone | 561 881-7400
Fax | 561 881-1947
E-Mail | sales@coastalopt.com
Web | www.coastalopt.com



UV-VIS-IR 60mm 1:4 Apo Macro

High performance UV-VIS-IR lens for forensics, science, and fine art

- No focus shift from UV thru IR
- Excellent UV transmission
- Flare and ghosting minimized across the UV-IR spectrum with advanced ultra broadband AR coatings
- Automatic diaphragm for maximum viewfinder brightness
- Precision manual focus with long life all-metal construction
- Advanced floating element design including five calcium fluoride elements ensures stunning performance in all conditions



Specifications

Focal Length: 60 mm
Aperture Range: f/4 - f/45
No. of Elements/Groups: 10/9
Maximum Format Size: 24 x 36 (mm)
Transmission Waveband: 290 - 1500 (nm)
Apochromatic Waveband: 315 - 1100 (nm)
Focus Range: 264 mm - Infinity
Maximum Magnification: 1:1.5
Mounting Flange: Nikon F Mount
Filter: M 52 x 0.75
Weight: 535 grams
Length: 73.4 mm

Coastal Optical Systems, Inc.
4480 South Tiffany Drive
West Palm Beach, FL 33407
USA

Phone | 561 881-7400
Fax | 561 881-1947
E-Mail | sales@coastalopt.com
Web | www.coastalopt.com

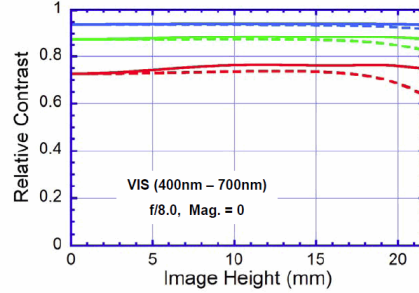
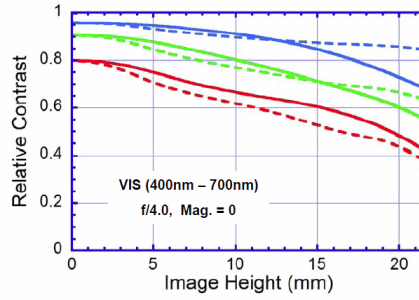
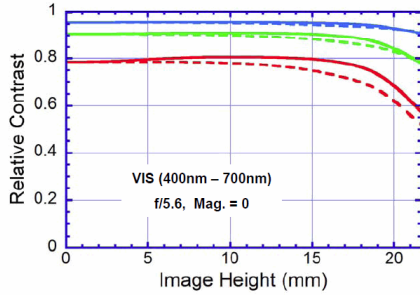


UV-VIS-IR 60mm 1:4 Apo Macro

Performance Data: MTF

- 10 cycles/mm, Sagittal — 10 cycles/mm, Tangential
- 20 cycles/mm, Sagittal — 20 cycles/mm, Tangential
- 40 cycles/mm, Sagittal — 40 cycles/mm, Tangential

Note: UV, VIS and IR data are all evaluated at the same focal plane



Coastal Optical Systems, Inc.
4480 South Tiffany Drive
West Palm Beach, FL 33407
USA

Phone | 561 881-7400
Fax | 561 881-1947
E-Mail | sales@coastalopt.com
Web | www.coastalopt.com

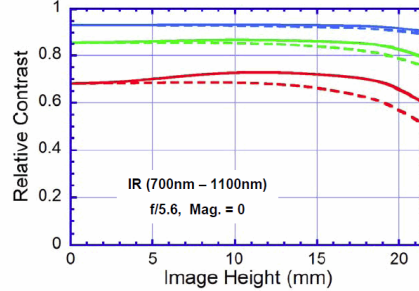
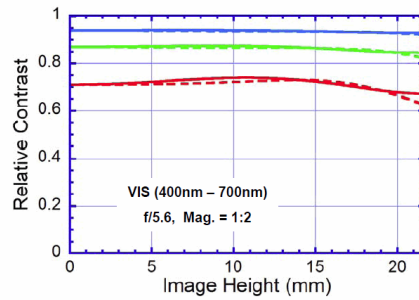
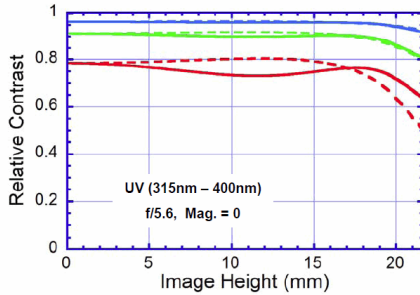


UV-VIS-IR 60mm 1:4 Apo Macro

Performance Data: MTF, continued

- 10 cycles/mm, Sagittal — 10 cycles/mm, Tangential
- 20 cycles/mm, Sagittal — 20 cycles/mm, Tangential
- 40 cycles/mm, Sagittal — 40 cycles/mm, Tangential

Note: UV, VIS and IR data are all evaluated at the same focal plane



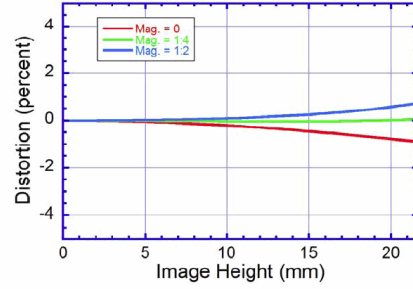
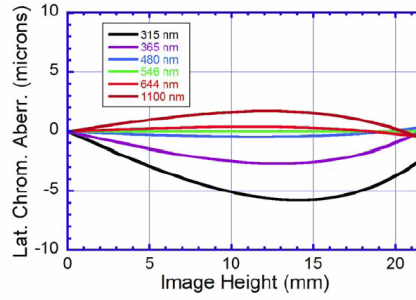
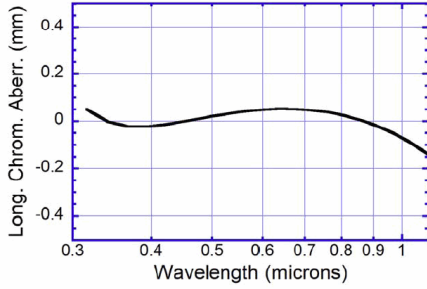
Coastal Optical Systems, Inc.
4480 South Tiffany Drive
West Palm Beach, FL 33407
USA

Phone | 561 881-7400
Fax | 561 881-1947
E-Mail | sales@coastalopt.com
Web | www.coastalopt.com



Anexos

UV-VIS-IR 60mm 1:4 Apo Macro Performance Data: Chromatic Aberrations and Distortion

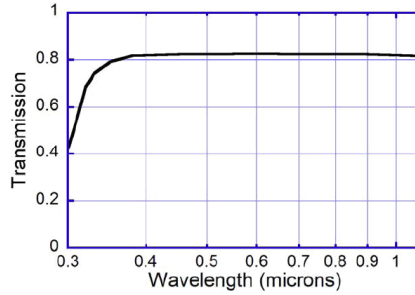
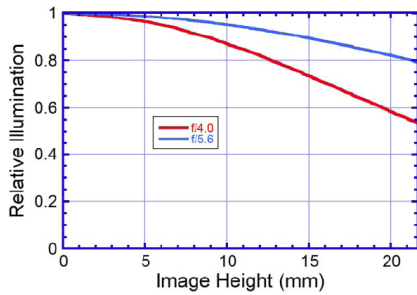


Coastal Optical Systems, Inc.
4480 South Tiffany Drive
West Palm Beach, FL 33407
USA

Phone | 561 881-7400
Fax | 561 881-1947
E-Mail | sales@coastalopt.com
Web | www.coastalopt.com



UV-VIS-IR 60mm 1:4 Apo Macro Performance Data: Relative Illumination and Transmission



Coastal Optical Systems, Inc.
4480 South Tiffany Drive
West Palm Beach, FL 33407
USA

Phone | 561 881-7400
Fax | 561 881-1947
E-Mail | sales@coastalopt.com
Web | www.coastalopt.com



Anexo C: Pigmentos analisados da pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX)

Neste Anexo apresentam-se alguns dados não publicados (pelo menos até à data em que a presente tese foi escrita) sobre a possível composição pictórica da pintura artística de Júlio Pomar “O Cabouqueiro”, dados estes gentilmente cedidos por Ana Cudell⁸⁵. Apresentam-se aqui estes dados, mesmo que incompletos, apenas por ter sido com base nos pontos analisados que se selecionaram a maioria das áreas a comparar no âmbito da presente tese.



Fig. R.1 - Localização dos pontos analisados

- 1 – FTIR, EDXRF, SEM-EDS, amostra estratigráfica (micro-amostra nº1) - azul do fundo;
- 2 – FTIR, EDXRF (micro-amostra nº2) - verde do fundo;
- 3 – FTIR, EDXRF (micro-amostra nº3) - repinte verde;
- 4 – FTIR, EDXRF, SEM-EDS; amostra estratigráfica (micro-amostra nº4) – preto;
- 5 – EDXRF – vermelho;
- 6 – EDXRF – carnação;
- 7 – EDXRF – amarelo;
- 8 – EDXRF – castanho;
- 9 – EDXRF – castanho;
- 10 – EDXRF – castanho;
- 11 – EDXRF – castanho;
- 12 – EDXRF - reverso da obra;

Tabela R1 - Interpretação dos elementos identificados por EDXRF

Área analisada / cor	Elementos Identificados	Pigmentos responsáveis pela cor	Outros pigmentos	Cargas
1 - Azul	Zn, Ba/Ti, Co	Azul de cobalto	Branco de zinco; Litopone (?), branco de titânio (?)	Branco de bário
2 - Verde	Zn, Ba/Ti, Cr	Viridian	Branco de zinco; Litopone (?), branco de titânio (?)	Branco de bário
3 - Verde (repinte)	Zn, Ba/Ti, Cr, Co	Verde de cobalto, viridian	Branco de zinco; Litopone (?), branco de titânio (?)	Branco de bário
4 - Preto	Zn, Ba/Ti, Cr, Ca		Branco de zinco; Litopone (?), branco de titânio (?)	Branco de bário, composto de cálcio
5 - Vermelho	Zn, Ba/Ti, Se, Cd, Fe	Vermelho de cádmio	Branco de zinco; Litopone (?), branco de titânio (?)	Branco de bário
6- Carnação	Zn, Ba/Ti, Fe, Ca	Ocre vermelho	Branco de zinco; Litopone (?), branco de titânio (?)	Branco de bário, composto de cálcio
7- Amarelo	Zn, Ba/Ti, Cd	Amarelo de cádmio	Branco de zinco; Litopone (?), branco de titânio (?)	Branco de bário
8, 9, 10, 11 - Castanhos	Zn, Ba/Ti, Fe, Pb, Ca	Ocres castanhos, minio	Branco de zinco; Litopone (?), branco de titânio (?)	Branco de bário, Composto de cálcio

⁸⁵ É no âmbito da sua própria tese de doutoramento que os dados deste Apêndice foram recolhidos. Alguns dados foram já publicados no âmbito de um projeto de estudo dos pintores do Norte de Portugal (Cudell, 2010).

Apêndices

Conteúdo:

Apêndice A: Tabela das reflectâncias no alvo ColorChk de 24 cores com o espectroradiómetro PR650.....	325
Apêndice B: Tabela descritiva dos filtros fotográficos analisados	326
Apêndice C: Sensibilidade espectral dos sensores das câmaras, com e sem os filtros externos	342
Apêndice D: Exposição em função dos filtros e canais seleccionados para separação de bandas espectrais	347
Apêndice E: Resultados das reflect. medidas no ColorChecker com o sistema hiperespectral de 5 filtros.....	348
Apêndice F: Resultados das reflect. medidas no ColorChecker com o sistema hiperespectral de 13 filtros.....	349
Apêndice G-1: Diferenças de cor e espectrais - ColorChecker - sistema hiperespectral de 5 filtros.....	350
Apêndice G-2: Diferenças de cor e espectrais - ColorChecker - sistema hiperespectral de 13 filtros.....	351
Apêndice H-1: Índices de metamerismo - ColorChecker - sistema hiperespectral de 5 filtros	352
Apêndice H-2: Índices de metamerismo - ColorChecker - sistema hiperespectral de 13 filtros	353
Apêndice I: Gráficos de reflectâncias espectrais medidas no ColorChecker	354
Apêndice J: Reflectâncias no alvo ColorChecker, por comprimento de onda e Sensibilidade espectral do sensor+filtro correspondente.....	358
Apêndice K: Mapas de sinalização das áreas digitalizadas na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc. XVI)	366
Apêndice L: Resultados das reflectâncias medidas na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc.XVI).....	369
Apêndice M: Diferenças de cor e espectrais medidas na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc.XVI).....	370
Apêndice N: Índices de metamerismo medidos na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc.XVI)	371
Apêndice O: Gráficos de reflectâncias espectrais medidas na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc.XVI).....	372
Apêndice P: Mapas de sinalização das áreas digitalizadas na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX)	375
Apêndice Q: Resultados das reflectâncias medidas na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX)	377
Apêndice R: Diferenças de cor e espectrais medidas na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX).....	379
Apêndice S: Índices de metamerismo medidos na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX).....	381
Apêndice T: Gráficos de reflectâncias espectrais medidas na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX).....	383

Apêndices

Apêndice A: Tabela das reflectâncias medidas no alvo ColorChecker de 24 cores com o espectrorradiômetro PR650

Medição de 33 bandas de referência, dos 400 aos 720nm, com a geometria descrita no subcapítulo 3.9, “Figura 62: Esquema explicativo da montagem usada para digitalização dos alvos e pinturas (Montagem I), com recurso a 2 focos iluminantes e geometria 45°/0°.”
 Ver também Apêndice I, onde se apresentam gráficos realizados a partir dos dados contidos nesta tabela, em conjunto com as medições realizadas com os sistemas testados (Apêndices E e F).

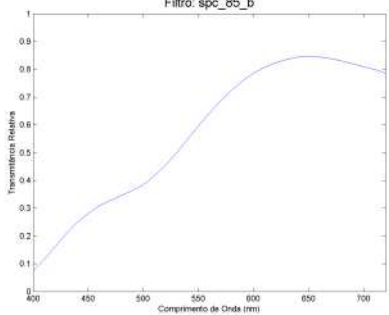
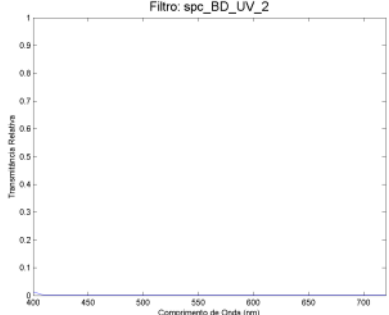
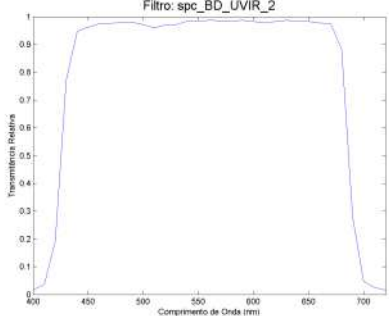
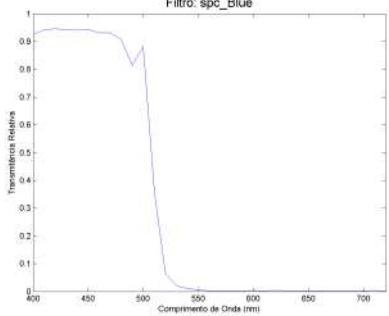
Bandas n.º →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Comprimento de onda λ (nm): →	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700	710	720
1 Dark Skin	0,0372	0,0422	0,0447	0,0466	0,0477	0,0482	0,0486	0,0493	0,0493	0,0505	0,0529	0,0589	0,0654	0,0680	0,0686	0,0713	0,0770	0,0891	0,1056	0,1209	0,1286	0,1308	0,1345	0,1435	0,1545	0,1642	0,1704	0,1689	0,1599	0,1503	0,1480	0,1530	0,1608
2 Light Skin	0,1374	0,1491	0,1557	0,1601	0,1683	0,1804	0,2004	0,2311	0,2672	0,2946	0,3106	0,3100	0,2807	0,2410	0,2260	0,2353	0,2339	0,2430	0,2943	0,3748	0,4393	0,4797	0,5038	0,5224	0,5381	0,5558	0,5740	0,5943	0,6141	0,6343	0,6519	0,6659	0,6787
3 Blue Sky	0,2528	0,2977	0,3051	0,3031	0,3033	0,2954	0,2850	0,2729	0,2625	0,2511	0,2367	0,2231	0,2088	0,1925	0,1780	0,1671	0,1567	0,1430	0,1313	0,1247	0,1227	0,1242	0,1259	0,1271	0,1279	0,1303	0,1341	0,1338	0,1293	0,1223	0,1148	0,1093	0,1091
4 Foliage	0,0450	0,0463	0,0472	0,0477	0,0486	0,0487	0,0496	0,0503	0,0517	0,0540	0,0602	0,0670	0,1358	0,1660	0,1656	0,1492	0,1310	0,1151	0,1067	0,1006	0,0955	0,0909	0,0900	0,0923	0,0953	0,0961	0,1001	0,0990	0,0952	0,0914	0,0898	0,0907	0,0919
5 Blue Flower	0,3073	0,3786	0,4036	0,4053	0,4058	0,3979	0,3940	0,3838	0,3402	0,3113	0,2558	0,2369	0,2112	0,2004	0,1949	0,1791	0,1799	0,1750	0,1655	0,1658	0,1831	0,1975	0,2091	0,2216	0,2524	0,2814	0,3044	0,2964	0,2959	0,2943	0,2911	0,2978	0,3125
6 Bluish Green	0,1931	0,2503	0,2762	0,2924	0,3127	0,3371	0,3726	0,4185	0,4636	0,4948	0,5108	0,5124	0,5049	0,4908	0,4700	0,4396	0,4044	0,3610	0,3161	0,2844	0,2221	0,1928	0,1790	0,1710	0,1667	0,1626	0,1650	0,1717	0,1799	0,1896	0,1948	0,1914	0,1812
7 Orange	0,0528	0,0490	0,0520	0,0495	0,0514	0,0502	0,0521	0,0518	0,0544	0,0566	0,0641	0,0861	0,1237	0,1510	0,1657	0,1853	0,2271	0,3086	0,4099	0,5055	0,5579	0,5735	0,5770	0,5783	0,5772	0,5737	0,5762	0,5862	0,5956	0,6038	0,6082	0,6067	0,6033
8 Purple/Blue	0,1805	0,2272	0,3064	0,3517	0,3842	0,3955	0,3912	0,3674	0,3253	0,2678	0,2101	0,1668	0,1317	0,1077	0,0951	0,0874	0,0811	0,0772	0,0769	0,0785	0,0802	0,0805	0,0813	0,0844	0,0918	0,1050	0,1234	0,1507	0,1847	0,2283	0,2789	0,3280	0,3741
9 Moderate Red	0,1391	0,1362	0,1331	0,1299	0,1288	0,1266	0,1225	0,1173	0,1125	0,1070	0,1020	0,0974	0,0922	0,0912	0,0906	0,0912	0,0935	0,1035	0,1520	0,2707	0,4006	0,4962	0,5437	0,5656	0,5737	0,5756	0,5770	0,5743	0,5703	0,5643	0,5580	0,5544	0,5514
10 Purple	0,1631	0,1787	0,1839	0,1735	0,1590	0,1379	0,1201	0,1028	0,0891	0,0782	0,0686	0,0627	0,0591	0,0547	0,0525	0,0520	0,0527	0,0518	0,0509	0,0510	0,0562	0,0707	0,0938	0,1222	0,1482	0,1744	0,2040	0,2414	0,2863	0,3393	0,3980	0,4534	0,5070
11 Yellow Green	0,0666	0,0613	0,0603	0,0635	0,0685	0,0730	0,0849	0,1066	0,1433	0,1942	0,2691	0,3687	0,4609	0,5125	0,5305	0,5256	0,5120	0,4860	0,4546	0,4109	0,3688	0,3363	0,3189	0,3113	0,3063	0,3035	0,3061	0,3190	0,3330	0,3475	0,3550	0,3573	0,3502
12 Orange Yellow	0,0814	0,0747	0,0707	0,0686	0,0692	0,0687	0,0697	0,0694	0,0710	0,0736	0,0838	0,1204	0,2079	0,3180	0,3982	0,4383	0,4678	0,5054	0,5473	0,5827	0,6052	0,6167	0,6225	0,6119	0,6098	0,6123	0,6314	0,6391	0,6435	0,6449	0,6481	0,6514	0,6609
13 Blue	0,0961	0,1379	0,2097	0,2530	0,2858	0,3012	0,2895	0,2581	0,2179	0,1752	0,1331	0,1023	0,0782	0,0599	0,0496	0,0438	0,0411	0,0401	0,0396	0,0397	0,0405	0,0410	0,0414	0,0425	0,0433	0,0450	0,0470	0,0474	0,0462	0,0462	0,0455	0,0485	0,0547
14 Green	0,0581	0,0551	0,0572	0,0572	0,0595	0,0652	0,0741	0,0927	0,1227	0,1641	0,2192	0,2780	0,3127	0,3182	0,3047	0,2781	0,2488	0,2155	0,1819	0,1455	0,1187	0,1020	0,0947	0,0908	0,0885	0,0872	0,0880	0,0927	0,0986	0,1046	0,1082	0,1089	0,1060
15 Red	0,0471	0,0452	0,0469	0,0460	0,0461	0,0466	0,0466	0,0453	0,0447	0,0443	0,0454	0,0479	0,0503	0,0517	0,0512	0,0521	0,0541	0,0613	0,0755	0,1089	0,1784	0,3014	0,4403	0,5476	0,6028	0,6283	0,6423	0,6471	0,6500	0,6507	0,6517	0,6515	0,6523
16 Yellow	0,0633	0,0577	0,0563	0,0566	0,0573	0,0598	0,0644	0,0740	0,0941	0,1315	0,2087	0,3352	0,4722	0,5594	0,6081	0,6367	0,6570	0,6738	0,6875	0,6952	0,7003	0,7042	0,7107	0,7205	0,7294	0,7393	0,7469	0,7513	0,7537	0,7559	0,7558	0,7574	0,7610
17 Magenta	0,2974	0,3599	0,3735	0,3550	0,3326	0,2995	0,2707	0,2446	0,2153	0,1880	0,1656	0,1490	0,1260	0,1055	0,0989	0,1042	0,1053	0,1098	0,1411	0,2070	0,2900	0,4015	0,5257	0,6442	0,7247	0,7747	0,8048	0,8175	0,8238	0,8282	0,8306	0,8319	0,8334
18 Cyan	0,2027	0,2436	0,2649	0,2861	0,3225	0,3573	0,3918	0,4263	0,4427	0,4371	0,4118	0,3720	0,3213	0,2687	0,2206	0,1760	0,1399	0,1139	0,0967	0,0887	0,0807	0,0760	0,0734	0,0733	0,0737	0,0743	0,0766	0,0783	0,0769	0,0755	0,0720	0,0707	0,0724
19 White	0,4202	0,6514	0,7926	0,8271	0,8424	0,8466	0,8543	0,8545	0,8564	0,8564	0,8602	0,8622	0,8623	0,8619	0,8629	0,8626	0,8615	0,8624	0,8658	0,8680	0,8714	0,8735	0,8760	0,8800	0,8810	0,8792	0,8782	0,8695	0,8653	0,8591	0,8551	0,8548	0,8564
20 Neutral 8	0,3704	0,5094	0,5617	0,5626	0,5692	0,5695	0,5685	0,5636	0,5605	0,5595	0,5603	0,5609	0,5623	0,5635	0,5643	0,5618	0,5624	0,5628	0,5640	0,5633	0,5627	0,5622	0,5595	0,5577	0,5550	0,5520	0,5482	0,5426	0,5361	0,5297	0,5246	0,5191	0,5158
21 Neutral 6,5	0,2928	0,3423	0,3524	0,3523	0,3571	0,3571	0,3558	0,3524	0,3485	0,3475	0,3480	0,3485	0,3489	0,3503	0,3507	0,3501	0,3507	0,3514	0,3517	0,3510	0,3496	0,3475	0,3449	0,3429	0,3400	0,3371	0,3351	0,3305	0,3266	0,3208	0,3161	0,3117	0,3090
22 Neutral 5 (18%)	0,1710	0,1821	0,1857	0,1835	0,1877	0,1886	0,1874	0,1860	0,1842	0,1840	0,1841	0,1848	0,1858	0,1865	0,1875	0,1873	0,1880	0,1890	0,1900	0,1894	0,1882	0,1867	0,1851	0,1835	0,1820	0,1800	0,1789	0,1773	0,1749	0,1717	0,1695	0,1674	0,1659
23 Neutral 3,5	0,0912	0,0931	0,0936	0,0922	0,0929	0,0934	0,0916	0,0904	0,0898	0,0894	0,0893	0,0894	0,0895	0,0894	0,0899	0,0898	0,0896	0,0898	0,0901	0,0899	0,0896	0,0891	0,0887	0,0885	0,0885	0,0880	0,0861	0,0849	0,0833	0,0831	0,0819	0,0798	0,0794
24 Black	0,0363	0,0360	0,0359	0,0348	0,0345	0,0341	0,0348	0,0343	0,0338	0,0341	0,0342	0,0340	0,0340	0,0340	0,0341	0,0337	0,0340	0,0339	0,0342	0,0344	0,0340	0,0341	0,0338	0,0337	0,0338	0,0338	0,0336	0,0339	0,0339	0,0333	0,0332	0,0333	0,0330

Apêndice B: Tabela descritiva dos filtros fotográficos analisados

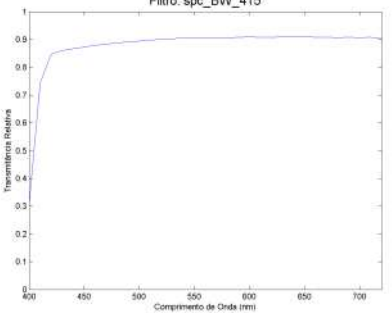
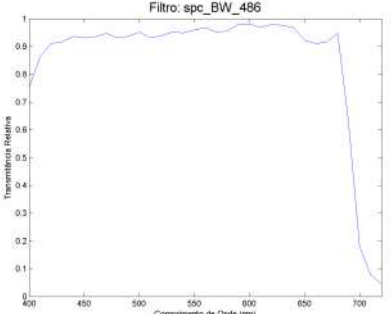
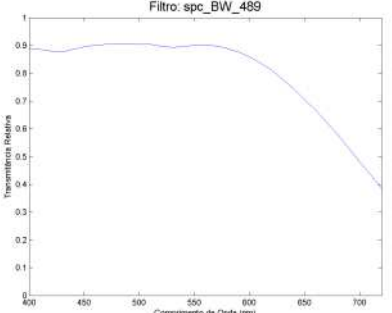
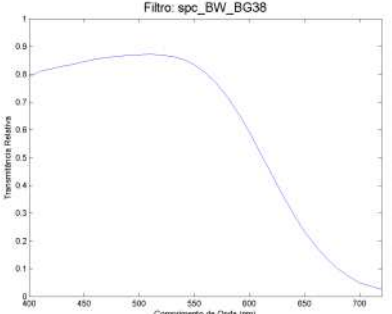
Neste Apêndice descrevem-se os filtros analisados e testados, que foram caracterizados com o espectroradiômetro PR650 (curvas de transmitância relativa, última coluna na tabela);

5F: filtro usado no sistema com 5 filtros;

13F: filtro usado no sistema com 13 filtros.

N.º:	Ref. ^a :	Nome Descritivo:	Curva de transmitância:
1	85B	Rowi 85B 5F 13F	 <p>Filtro: spc_85_b</p>
2	BD_U2	Baader Venus U (UV pass)	 <p>Filtro: spc_BD_UV_2</p>
3	BD_UVIR2	Baader UV-IR cut (new version)	 <p>Filtro: spc_BD_UVIR_2</p>
4	BLUE EO	Edmund Optics Dichroic Blue 13F	 <p>Filtro: spc_Blue</p>

Apêndices

5	BW_415	B+W 415	 <p>Filtro: spc_BW_415</p>
6	BW_486	B+W 486	 <p>Filtro: spc_BW_486</p>
7	BW_489	B+W 489	 <p>Filtro: spc_BW_489</p>
8	BW_BG38	B+W BG38	 <p>Filtro: spc_BW_BG38</p>

Apêndices

9	CYAN EO	Edmund Optics Dichroic Cyan 13F	
10	EO_IR_CUT	Edmund Optics Dichroic IR Cut	
11	FUJI_S3	Internal Fuji S3 anti-IR/aliasing	
12	GREEN EO	Edmund Optics Dichroic Green 5F 13F	

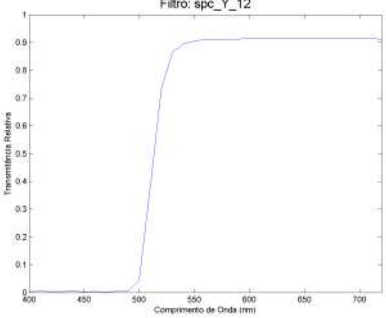
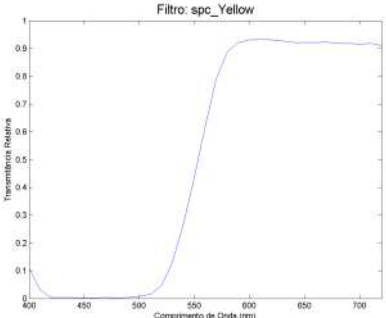
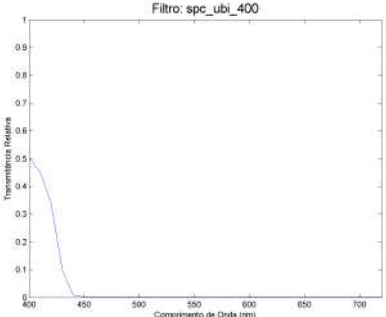
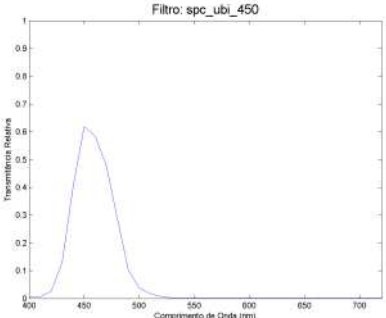
Apêndices

13	IR720	Generic IR 720nm	
14	KODAK_760	Internal Kodak DCS760 anti-IR/aliasing	
15	MAGENTA EO	Edmund Optics Dichroic Magenta 5F 13	
16	ORANGE21	Generi Orange n.º 21	

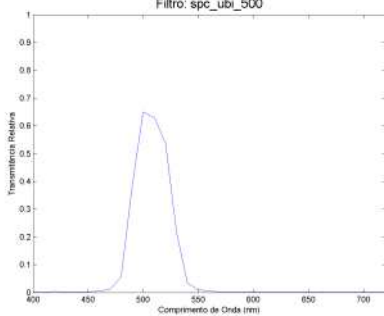
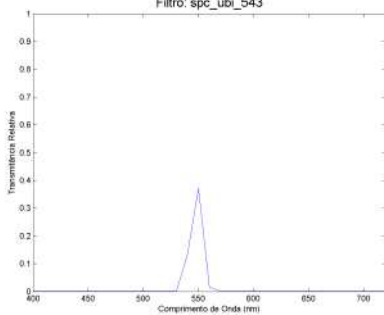
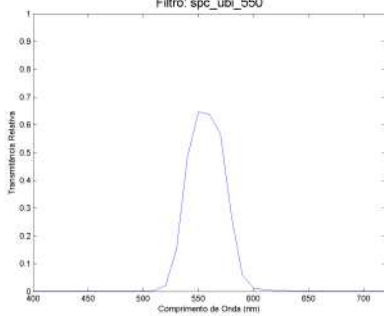
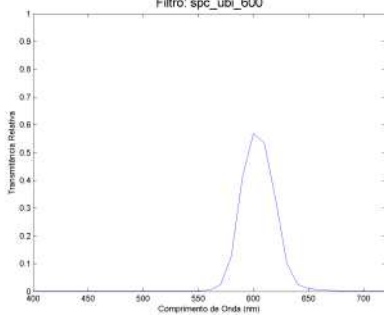
Apêndices

17	RED EO	Edmund Optics Dichroic Red	
18	RED25	Celestron Red 25 5F 13F	
19	UVIR_1	Baader UV-IR rejection (old version)	
20	UVIR+489	Combinação (Baader UV-IR rejection) + (B+W 489)	

Apêndices

21	Y_12	Generic Yellow n.º 12	 <p>Filtro: spc_Y_12</p>
22	YELLOW EO	Edmund Optics Dichroic Yellow 13F	 <p>Filtro: spc_Yellow</p>
23	UBI_400	Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=400\text{nm}$ 13F	 <p>Filtro: spc_ubi_400</p>
24	UBI_450	Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=450\text{nm}$ 13F	 <p>Filtro: spc_ubi_450</p>

Apêndices

25	UBI_500	Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=500\text{nm}$	
26	UBI_543	Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=543\text{nm}$	
27	UBI_550	Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=550\text{nm}$	
28	UBI_600	Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=600\text{nm}$	

Apêndices

29	UBI_632	Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=632\text{nm}$	<p>Filtro: spc_ubi_632</p>
30	UBI_650	Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=650\text{nm}$	<p>Filtro: spc_ubi_650</p>
31	UBI_700	Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=700\text{nm}$	<p>Filtro: spc_ubi_700</p>
32	UBI_AZUL	Generic Blue	<p>Filtro: spc_ubi_azul</p>

Apêndices

33	UBI_VERDE_730	Generic Green	<p>Filtro: spc_ubi_verde_730</p>
34	CK 80A	Cokin 80A	<p>Filtro: spc_cokin_80A</p>
35	CK 80B	Cokin 80B 5F	<p>Filtro: spc_cokin_80B</p>
36	CK81A	Cokin 81A	<p>Filtro: spc_cokin_81A</p>

Apêndices

37	CK 81B	Cokin 81B	<p>Filtro: spc_cokin_81B</p>
38	CK 81C	Cokin 81C	<p>Filtro: spc_cokin_81C</p>
39	R_08	Rosco ref.ª 08	<p>Filtro: spc_r_08</p>
40	R_33	Rosco ref.ª 33	<p>Filtro: spc_r_33</p>

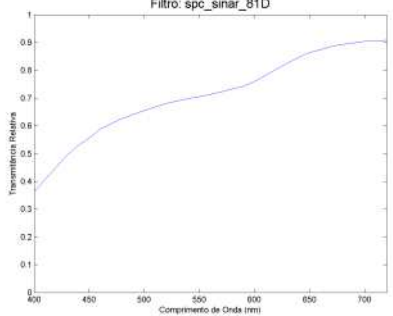
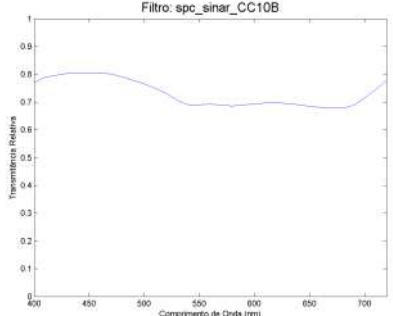
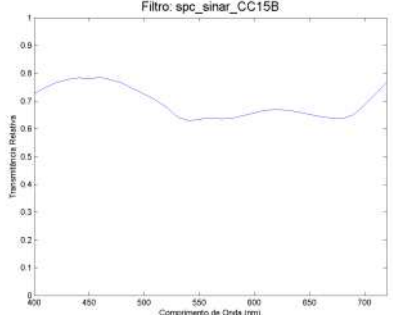
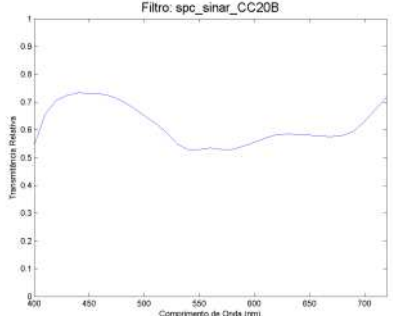
Apêndices

41	R_3202	Rosco ref. ^a 3202	<p>Filtro: spc_r_3202</p>
42	R_3204	Rosco ref. ^a 3204	<p>Filtro: spc_r_3204</p>
43	R_3208	Rosco ref. ^a 3208	<p>Filtro: spc_r_3208</p>
44	R_3304	Rosco ref. ^a 3304	<p>Filtro: spc_r_3304</p>

Apêndices

45	R_3401	Rosco ref. ^a 3401	<p>Filtro: spc_r_3401</p>
46	R_3408	Rosco ref. ^a 3408	<p>Filtro: spc_r_3408</p>
47	R_3409	Rosco ref. ^a 3409	<p>Filtro: spc_r_3409</p>
48	SIN_81EF	Sinar 81EF	<p>Filtro: spc_sinar81EF</p>

Apêndices

49	SIN_81D	Sinar 81D	 <p>Filtro: spc_sinar_81D</p>
50	SIN_CC10B	Sinar CC10B	 <p>Filtro: spc_sinar_CC10B</p>
51	SIN_CC15B	Sinar CC15B	 <p>Filtro: spc_sinar_CC15B</p>
52	SIN_CC20B	Sinar CC20B	 <p>Filtro: spc_sinar_CC20B</p>

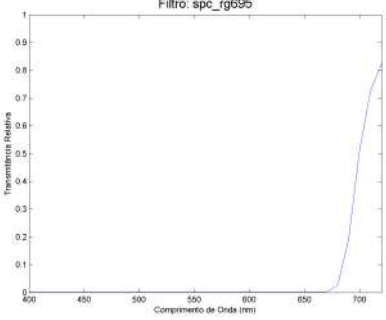
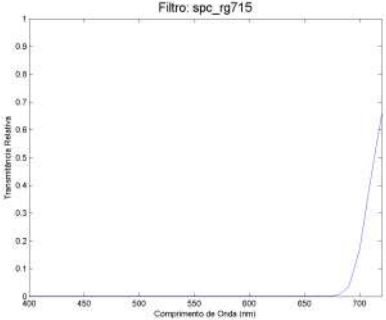
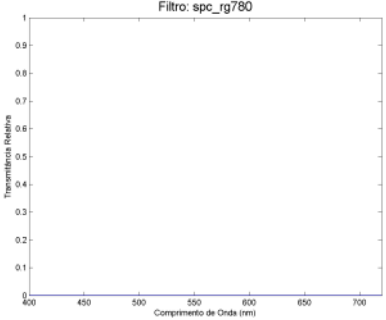
Apêndices

53	SIN_CC30M	Sinar CC30M 13F	<p>Filtro: spc_sinar_CC30M</p>
54	c12	Celestron 12	<p>Filtro: spc_c12</p>
55	c21	Celestron 21	<p>Filtro: spc_c21</p>
56	CBLUE	Celestron 80A	<p>Filtro: spc_cblue</p>

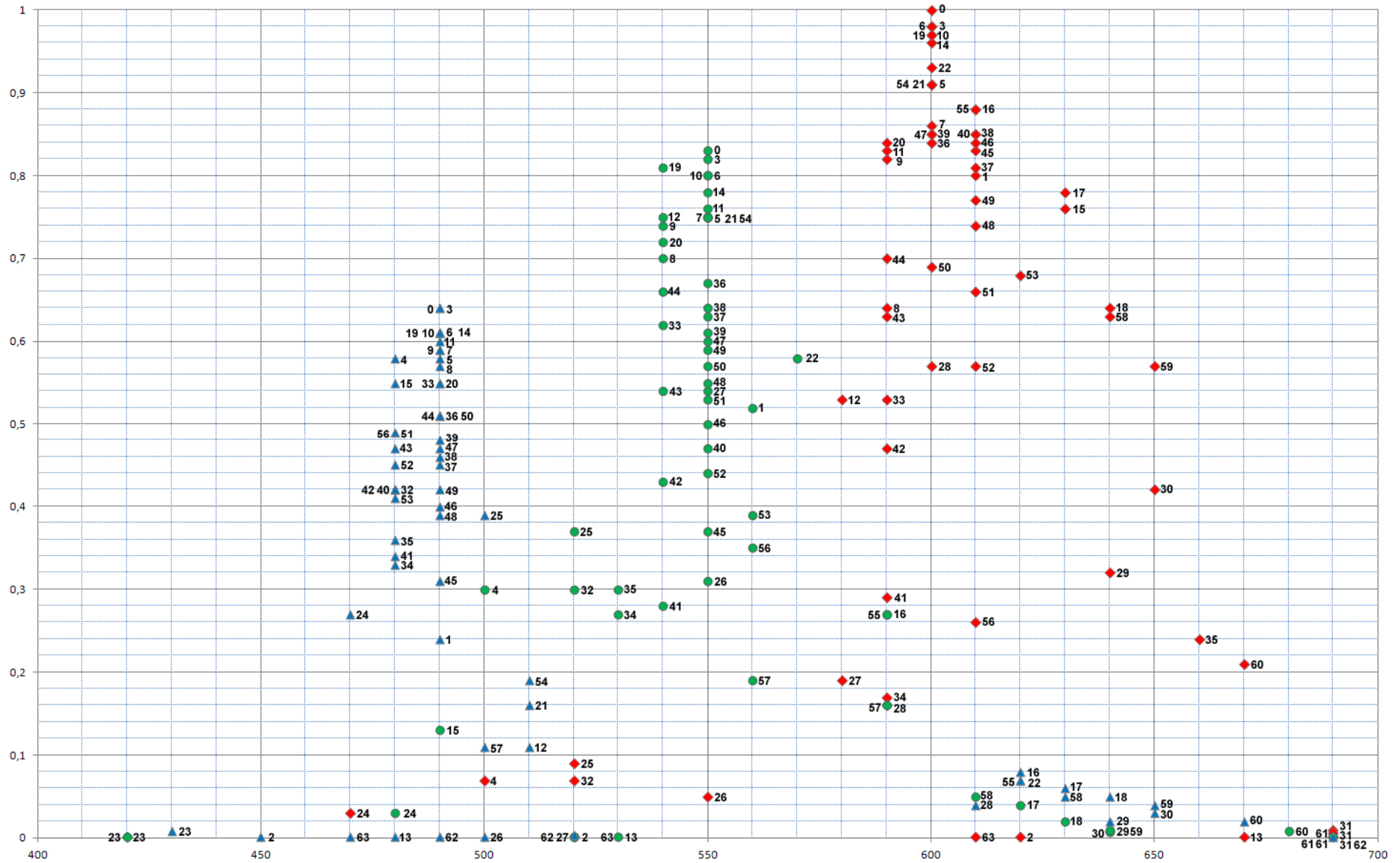
Apêndices

57	CGREEN	Celestron 58A	<p>Filtro: spc_cgreen</p>
58	CK03	Cokin 03 Red	<p>Filtro: spc_ck03</p>
59	RG630	Schott RG630 13F	<p>Filtro: spc_rg630</p>
60	RG665	Schott RG665 13F	<p>Filtro: spc_rg665</p>

Apêndices

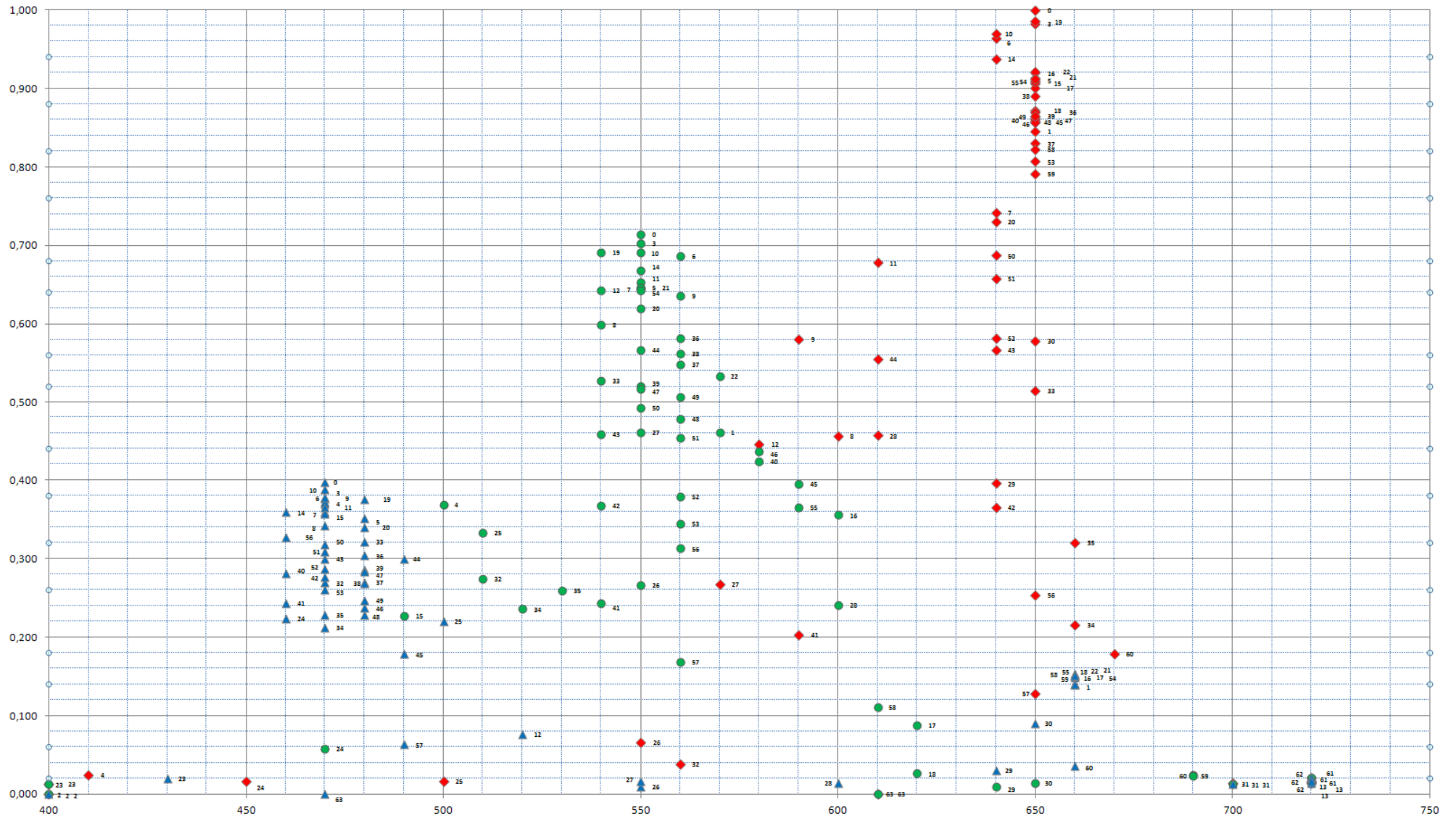
61	RG695	Schott RG695 13F	 <p>Filtro: spc_rg695</p>
62	RG715	Schott RG715	 <p>Filtro: spc_rg715</p>
63	RG780	Schott RG780	 <p>Filtro: spc_rg780</p>

Apêndice C: Sensibilidade espectral dos sensores das câmaras, com e sem os filtros externos



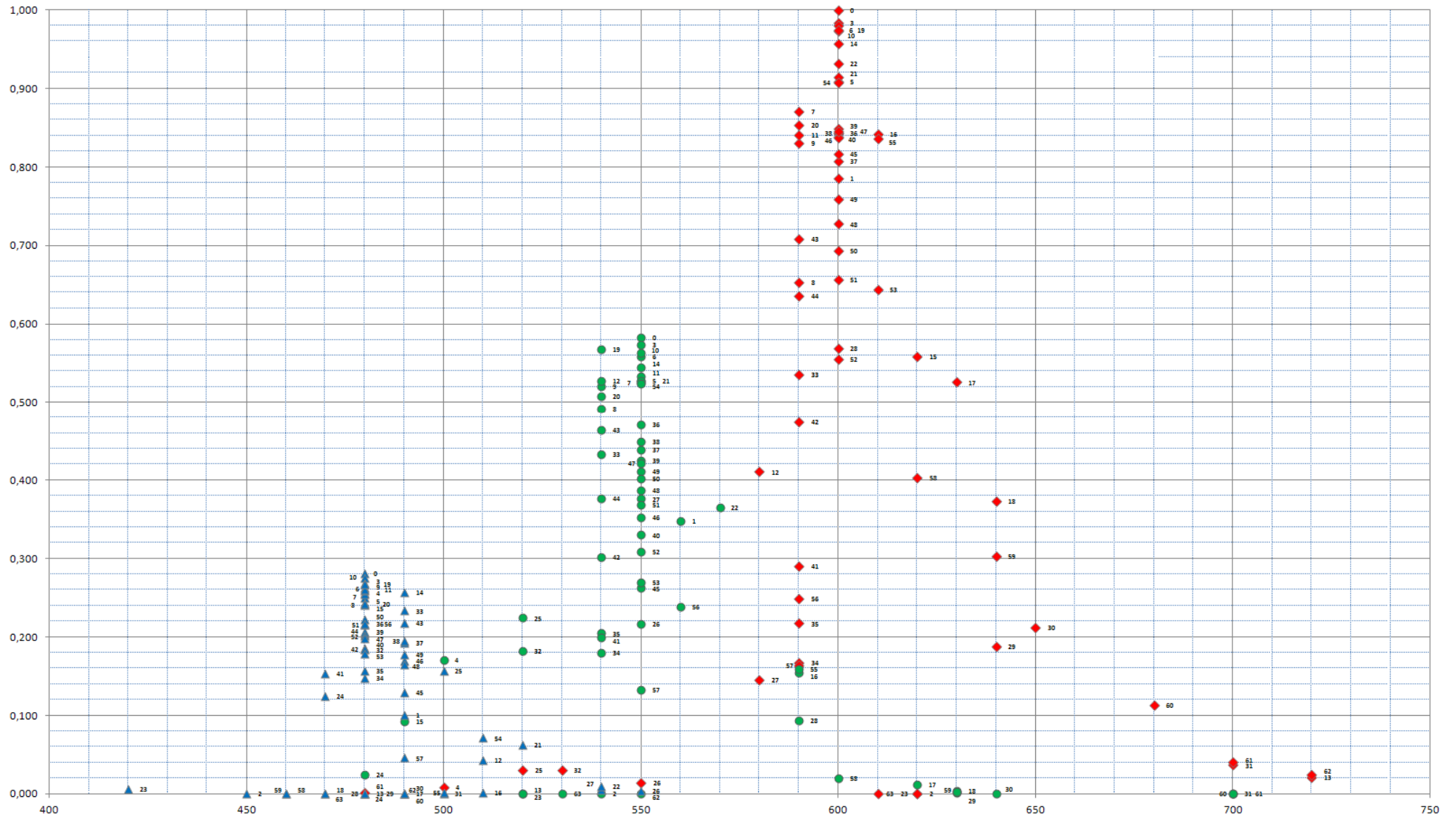
Nikon D300: Legenda: eixo Y, sensibilidade espectral relativa; eixo X, comprimento de onda em nm; pontos vermelhos, verdes e azuis correspondem a informação dos canais da câmara R, G e B respectivamente; numeração: "0" corresponde à sensibilidade medida sem filtros externos (sensibilidade original da câmara); os números correspondem à numeração dos filtros na coluna esquerda da tabela do Apêndice B.

Apêndices



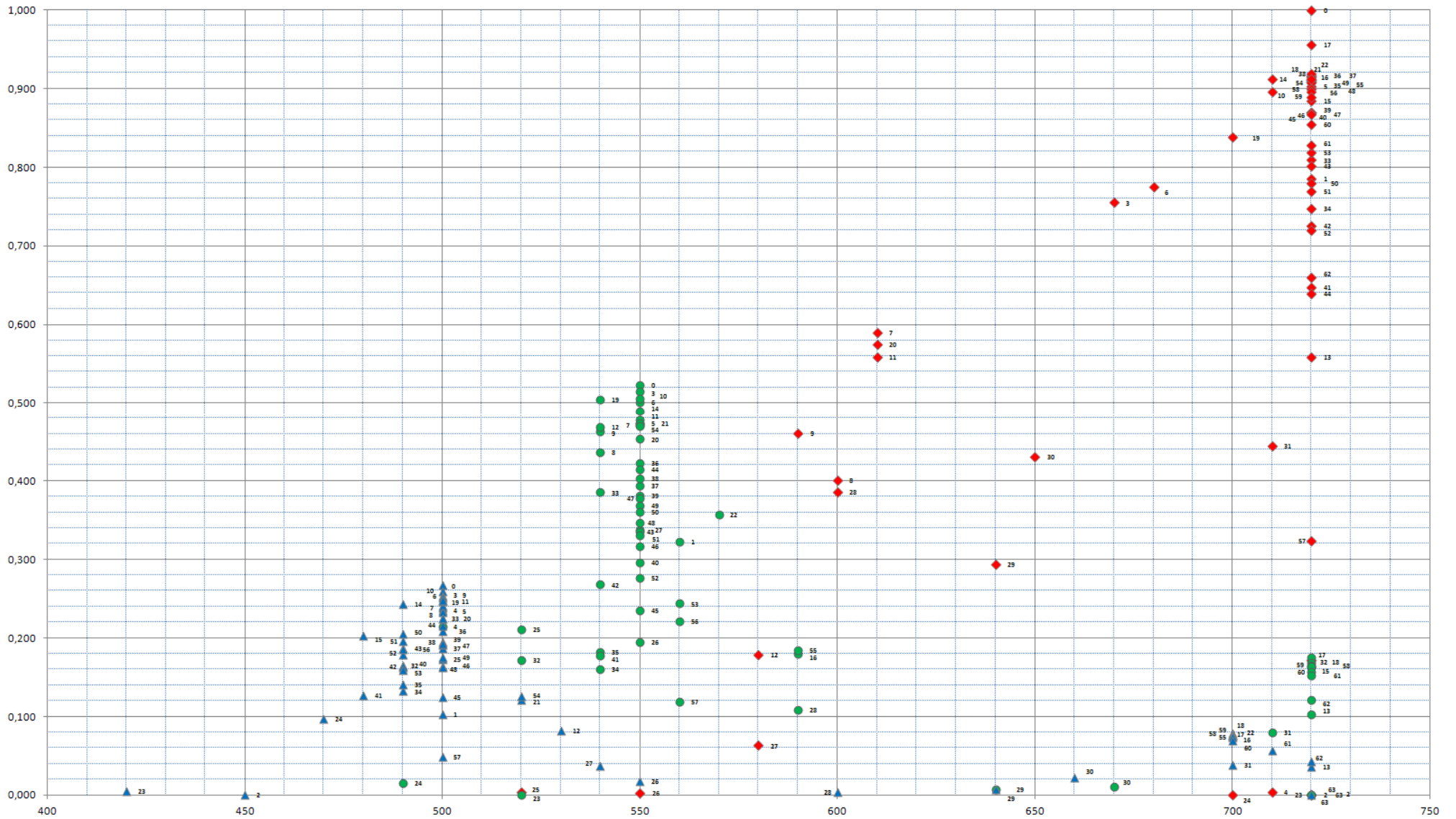
Sigma SD14: Legenda: eixo Y, sensibilidade espectral relativa; eixo X, comprimento de onda em nm; pontos vermelhos, verdes e azuis correspondem a informação dos canais da câmara R, G e B respetivamente; numeração: "0" corresponde à sensibilidade medida sem filtros externos (sensibilidade original da câmara); os números correspondem à numeração dos filtros na coluna esquerda da tabela do Apêndice B.

Apêndices



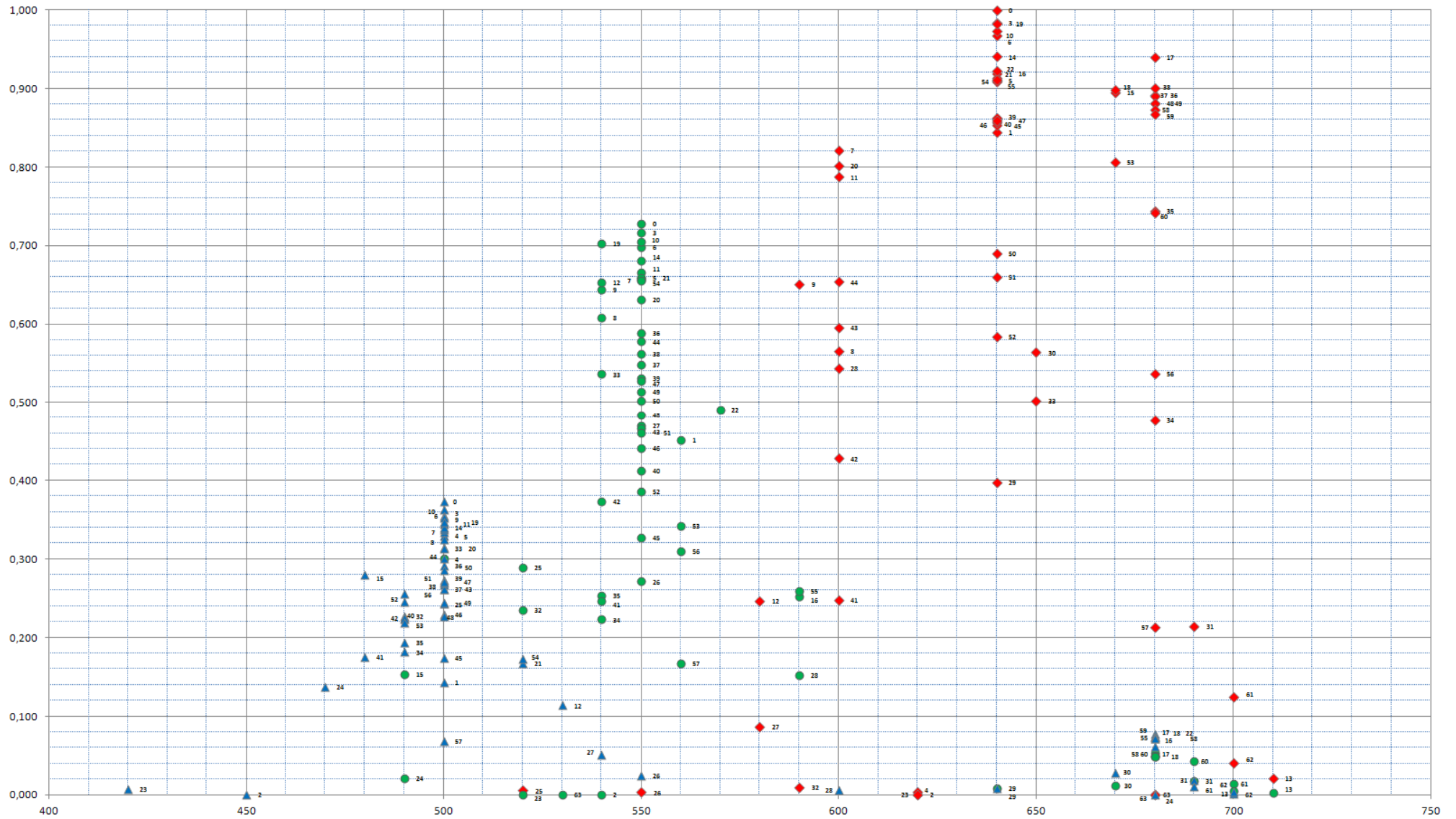
Nikon D70: Legenda: eixo Y, sensibilidade espectral relativa; eixo X, comprimento de onda em nm; pontos vermelhos, verdes e azuis correspondem a informação dos canais da câmara R, G e B respectivamente; numeração: "0" corresponde à sensibilidade medida sem filtros externos (sensibilidade original da câmara); os números correspondem à numeração dos filtros na coluna esquerda da tabela do Apêndice B.

Apêndices



Fuji ISPro: Legenda: eixo Y, sensibilidade espectral relativa; eixo X, comprimento de onda em nm; pontos vermelhos, verdes e azuis correspondem a informação dos canais da câmara R, G e B respetivamente; numeração: "0" corresponde à sensibilidade medida sem filtros externos (sensibilidade original da câmara); os números correspondem à numeração dos filtros na coluna esquerda da tabela do Apêndice B.

Apêndices



Fuji ISPro com Filtro IV/UV cut B+W 486: Legenda: eixo Y, sensibilidade espectral relativa; eixo X, comprimento de onda em nm; pontos vermelhos, verdes e azuis correspondem a informação dos canais da câmara R, G e B respetivamente; numeração: "0" corresponde à sensibilidade medida só com filtro B+W486; os números correspondem à numeração dos filtros na coluna esquerda da tabela do Apêndice B.

Apêndice D: Exposição em função dos filtros e canais selecionados para separação de bandas espaciais

Legenda: com duas aberturas possíveis para o diafragma da objetiva, F4 ou F5.6, calcula-se a exposição em função da intensidade da luz que chega à zona do alvo ou da obra a digitalizar. A intensidade luminosa incidente foi medida com o fotômetro manual Sekonic Flashmate L-308B (com cúpula pontual *Lumidisc*), em modo "EV" (que dá medições de iluminação em E.V.); o valor medido que for mais aproximado a um dos apresentados nas linhas de cabeçalho da tabela abaixo (preenchidas a cinza mais escuro, unidades em 1/3 de E.V.) indicam a coluna com os tempos de exposição que deveremos usar. Por ex.: se com o fotômetro referido medirmos uma intensidade da luz de 7,0 E.V., com o diafragma da lente a f/4 e o filtro 06 (Red 25) podemos digitalizar com a câmara uma imagem com velocidade de obturação de 1 segundo; já se optarmos por uma abertura de diafragma de f/5.6, no mesmo exemplo, a exposição necessária seria de 2 segundos.

Quando os tempos de exposição se apresentam em valor superior a 30 segundos, é necessário regular a câmara em modo "Bulb" e usar um disparador remoto, que usa notação de tempo em "horas:minutos:segundos", razão pela qual na tabela os tempos superiores a 1 minuto se apresentam nessa notação.

Os filtros descritos são: 00, câmara sem filtros externos; 01, Edmund Optics Dichroic Blue; 02, Edmund Optics Dichroic Cyan; 03, Edmund Optics Dichroic Green; 04, Edmund Optics Dichroic Magenta; 05, Edmund Optics Dichroic Yellow; 06, Celestron Red 25; 07, Schott RG630; 08, Schott RG665; 09, Schott RG695; 10, Rowi 85B; 11, Sinar CC30M; 12, Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=400\text{nm}$; 13, Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=450\text{nm}$.

F4.0		3,0 E.V.	3,3 E.V.	3,7 E.V.	4,0 E.V.	4,3 E.V.	4,7 E.V.	5,0 E.V.	5,3 E.V.	5,7 E.V.	6,0 E.V.	6,3 E.V.	6,7 E.V.	7,0 E.V.	7,3 E.V.	7,7 E.V.	8,0 E.V.	8,3 E.V.	8,7 E.V.	9,0 E.V.	9,3 E.V.	9,7 E.V.
FILTRO N.º:	Filtro, Canal RGB, λ :	Tempo de exposição (em segundos ou, quando superior a 60 seg., em notação horas:minutos:segundos (e seu equivalente em segundos, entre parêntesis):																				
00	D300_Red 600nm	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13	1/15	1/20	1/25	1/30
00	D300_Blue 490nm	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13	1/15	1/20	1/25	1/30
00	D300_Green 550nm	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13	1/15	1/20	1/25	1/30	1/40	1/50
01	EO_B_Green 500nm	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8
02	EO_C_Red 590nm	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10
03	EO_G_Blue 510nm	30	25	20	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3
03	EO_G_Green 540nm	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13	1/15	1/20	1/25
03	EO_G_Red 580nm	25	20	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4
04	EO_M_Blue 480nm	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13	1/15	1/20
04	EO_M_Red 630nm	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13
05	EO_Y_Green 570nm	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13	1/15
06	RED25_Red 640nm	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6
07	RG630_Red 650nm	20	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5
08	RG665_Green 680nm	0:26:40(1600")	0:20:50(1250")	0:16:40(1000")	0:13:20(800")	0:10:40(640")	0:08:20(500")	0:06:40(400")	0:05:20(320")	0:04:10(250")	0:03:20(200")	0:02:40(160")	0:02:05(125")	0:01:40(100")	0:01:20(80")	0:01:00(60")	50	40	30	25	20	15
08	RG665_Red 670nm	0:02:05(125")	0:01:40(100")	0:01:20(80")	0:01:00(60")	50	40	30	25	20	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3
09	RG695_Red 690nm	1:23:20(5000")	1:06:40(4000")	0:53:20(3200")	0:41:40(2500")	0:33:20(2000")	0:26:40(1600")	0:20:50(1250")	0:16:40(1000")	0:13:20(800")	0:10:40(640")	0:08:20(500")	0:06:40(400")	0:05:20(320")	0:04:10(250")	0:03:20(200")	0:02:40(160")	0:02:05(125")	0:01:40(100")	0:01:20(80")	0:01:00(60")	50
10	RW85B_Green 560nm	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13	1/15	1/20	1/25
10	RW85B_Red 610nm	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13	1/15	1/20	1/25
11	SinCC30M_Red 620nm	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13	1/15	1/20
12	UBI400_Blue 430nm	0:02:40(160")	0:02:05(125")	0:01:40(100")	0:01:20(80")	0:01:00(60")	50	40	30	25	20	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6
12	UBI400_Red 420nm	0:16:40(1000")	0:13:20(800")	0:10:40(640")	0:08:20(500")	0:06:40(400")	0:05:20(320")	0:04:10(250")	0:03:20(200")	0:02:40(160")	0:02:05(125")	0:01:40(100")	0:01:20(80")	0:01:00(60")	50	40	30	25	20	15	13	10
13	UBI450_Blue 470nm	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8
F5.6		3,0 E.V.	3,3 E.V.	3,7 E.V.	4,0 E.V.	4,3 E.V.	4,7 E.V.	5,0 E.V.	5,3 E.V.	5,7 E.V.	6,0 E.V.	6,3 E.V.	6,7 E.V.	7,0 E.V.	7,3 E.V.	7,7 E.V.	8,0 E.V.	8,3 E.V.	8,7 E.V.	9,0 E.V.	9,3 E.V.	9,7 E.V.
FILTRO N.º:	Filtro, Canal RGB, λ :	Tempo de exposição (em segundos ou, quando superior a 60 seg., em notação horas:minutos:segundos (e seu equivalente em segundos, entre parêntesis):																				
00	D300_Red 600nm	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13	1/15
00	D300_Blue 490nm	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13	1/15
00	D300_Green 550nm	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13	1/15	1/20	1/25
01	EO_B_Green 500nm	25	20	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4
02	EO_C_Red 590nm	20	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5
03	EO_G_Blue 510nm	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")	0:01:00(60")
03	EO_G_Green 540nm	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13
03	EO_G_Red 580nm	50	40	30	25	20	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2
04	EO_M_Blue 480nm	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10
04	EO_M_Red 630nm	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6
05	EO_Y_Green 570nm	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8
06	RED25_Red 640nm	30	25	20	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3
07	RG630_Red 650nm	40	30	25	20	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5
08	RG665_Green 680nm	0:53:20(3200")	0:41:40(2500")	0:33:20(2000")	0:26:40(1600")	0:20:50(1250")	0:16:40(1000")	0:13:20(800")	0:10:40(640")	0:08:20(500")	0:06:40(400")	0:05:20(320")	0:04:10(250")	0:03:20(200")	0:02:40(160")	0:02:05(125")	0:01:40(100")	0:01:20(80")	0:01:00(60")	50	40	30
08	RG665_Red 670nm	0:04:10(250")	0:03:20(200")	0:02:40(160")	0:02:05(125")	0:01:40(100")	0:01:20(80")	0:01:00(60")	50	40	30	25	20	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5
09	RG695_Red 690nm	2:46:40(10000")	2:13:20(8000")	1:46:40(6400")	1:23:20(5000")	1:06:40(4000")	0:53:20(3200")	0:41:40(2500")	0:33:20(2000")	0:26:40(1600")	0:20:50(1250")	0:16:40(1000")	0:13:20(800")	0:10:40(640")	0:08:20(500")	0:06:40(400")	0:05:20(320")	0:04:10(250")	0:03:20(200")	0:02:40(160")	0:02:05(125")	0:01:40(100")
10	RW85B_Green 560nm	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13
10	RW85B_Red 610nm	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10	1/13
11	SinCC30M_Red 620nm	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10
12	UBI400_Blue 430nm	0:05:20(320")	0:04:10(250")	0:03:20(200")	0:02:40(160")	0:02:05(125")	0:01:40(100")	0:01:20(80")	0:01:00(60")	50	40	30	25	20	15	13	10	8	6	5	4	3
12	UBI400_Red 420nm	0:33:20(2000")	0:26:40(1600")	0:20:50(1250")	0:16:40(1000")	0:13:20(800")	0:10:40(640")	0:08:20(500")	0:06:40(400")	0:05:20(320")	0:04:10(250")	0:03:20(200")	0:02:40(160")	0:02:05(125")	0:01:40(100")	0:01:20(80")	0:01:00(60")	50	40	30	25	20
13	UBI450_Blue 470nm	25	20	15	13	10	8	6	5	4	3	2,5	2	1,6	1,3	1	1/1,3	1/1,6	1/2	1/2,5	1/3	1/4

Apêndice E: Resultados das reflectâncias medidas no ColorChecker com o sistema hiperespectral de 5 filtros

Tabela superior: reflectâncias medidas (ver também Apêndice I) nas cores do *ColorChecker* pelo sistema hiperespectral intermédio "D-SLR D300 + 5 filtros". Mediram-se 12 bandas; os comprimentos de onda ausentes (na linha de cabeçalho marcados com cor cinza) foram interpolados (interpolação bicúbica), de que resultam o total de 17 bandas.

Tabela inferior ("Referência UCP"): cores do *ColorChecker* medidas (ver também Apêndice I) com o espectrorradiômetro de referência Spectrascan PR650 (17 bandas). Nos cabeçalhos das colunas, os comprimentos de onda que foram medidos.

Abreviaturas dos filtros usados: D300, câmara sem filtros externos; EO G, Edmund Optics Dichroic Green; EO M, Edmund Optics Dichroic Magenta; RED, Celestron Red 25; RW85B, Rowi 85B; 80B, Cokin 80B.

_Red, _Green, _Blue: canais do sensor da câmara R, G e B, respetivamente.

	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12	
	EO M _Blue 480nm	D300 _Blue 490nm	500	EO G _Blue 510nm	520	80B _Green 530nm	EO G _Green 540nm	D300 _Green 550nm	RW85B _Green 560nm	570	EO G _Red 580nm	590	D300 _Red 600nm	RW85B _Red 610nm	620	EO M _Red 630nm	RED25 _Red 640nm							
1 Dark Skin	0,0533	0,0556	0,0620	0,0687	0,0731	0,0766	0,0794	0,0784	0,0827	0,0794	0,0828	0,1074	0,1312	0,1343	0,1369	0,1476	0,1691							
2 Light Skin	0,2344	0,2636	0,2813	0,2943	0,3044	0,2947	0,2710	0,2990	0,3002	0,2725	0,2829	0,3759	0,4657	0,4780	0,4915	0,5332	0,6062							
3 Blue Sky	0,2862	0,2749	0,2371	0,2096	0,2139	0,2109	0,1820	0,1974	0,1841	0,1628	0,1499	0,1476	0,1455	0,1380	0,1431	0,1513	0,1441							
4 Foliage	0,0506	0,0644	0,1073	0,1358	0,1244	0,1203	0,1470	0,1226	0,1262	0,1276	0,1178	0,1051	0,0976	0,0982	0,0941	0,0917	0,1034							
5 Blue Flower	0,3663	0,3445	0,2820	0,2384	0,2485	0,2493	0,2085	0,2342	0,2214	0,1921	0,1824	0,2063	0,2288	0,2245	0,2375	0,2630	0,2783							
6 Bluish Green	0,3805	0,4302	0,4834	0,5075	0,4844	0,4529	0,4480	0,4412	0,4229	0,3871	0,3387	0,2878	0,2510	0,2369	0,2227	0,2037	0,1818							
7 Orange	0,0575	0,0719	0,1115	0,1466	0,1592	0,1778	0,2134	0,2117	0,2417	0,2587	0,3020	0,4138	0,5161	0,5366	0,5338	0,5507	0,6175							
8 Purplish Blue	0,3599	0,3126	0,2070	0,1369	0,1568	0,1635	0,1016	0,1395	0,1194	0,0913	0,0843	0,0951	0,1017	0,0934	0,1070	0,1250	0,1122							
9 Moderate Red	0,1239	0,1159	0,1007	0,0976	0,1154	0,1213	0,1021	0,1249	0,1364	0,1175	0,1454	0,2763	0,4004	0,4247	0,4544	0,5169	0,6058							
10 Purple	0,1234	0,1053	0,0767	0,0604	0,0690	0,0732	0,0563	0,0633	0,0614	0,0518	0,0516	0,0705	0,0892	0,0934	0,1083	0,1363	0,1713							
11 Yellow Green	0,1004	0,1784	0,3426	0,4473	0,4097	0,3974	0,4974	0,4295	0,4459	0,4651	0,4427	0,3891	0,3519	0,3546	0,3226	0,2882	0,3184							
12 Orange Yellow	0,0633	0,0951	0,1935	0,2645	0,2557	0,2807	0,3811	0,3292	0,3703	0,3938	0,4090	0,4698	0,5371	0,5609	0,5488	0,5496	0,6190							
13 Blue	0,2481	0,2089	0,1281	0,0752	0,0904	0,0969	0,0522	0,0774	0,0631	0,0437	0,0390	0,0461	0,0494	0,0421	0,0518	0,0628	0,0454							
14 Green	0,0870	0,1359	0,2286	0,2870	0,2650	0,2456	0,2803	0,2478	0,2417	0,2390	0,2150	0,1667	0,1278	0,1215	0,1078	0,0917	0,0942							
15 Red	0,0507	0,0451	0,0443	0,0508	0,0634	0,0667	0,0558	0,0656	0,0738	0,0508	0,0691	0,1871	0,3003	0,3242	0,3774	0,4832	0,6262							
16 Yellow	0,0803	0,1634	0,3594	0,4914	0,4590	0,4685	0,6159	0,5315	0,5750	0,6278	0,6476	0,6603	0,6818	0,7044	0,6723	0,6581	0,7715							
17 Magenta	0,2655	0,2325	0,1633	0,1222	0,1450	0,1540	0,1092	0,1447	0,1458	0,1084	0,1267	0,2613	0,3883	0,4095	0,4657	0,5777	0,7182							
18 Cyan	0,3543	0,3553	0,3143	0,2815	0,2848	0,2623	0,1978	0,2318	0,2029	0,1626	0,1356	0,1172	0,1017	0,0892	0,0941	0,0983	0,0739							
19 White	0,8365	0,8774	0,8920	0,8892	0,8780	0,8673	0,8681	0,8838	0,8645	0,8096	0,7826	0,8292	0,8746	0,8560	0,8507	0,8637	0,8713							
20 Neutral 8	0,5552	0,5706	0,5662	0,5593	0,5617	0,5637	0,5606	0,5696	0,5588	0,5364	0,5265	0,5433	0,5590	0,5495	0,5410	0,5437	0,5603							
21 Neutral 6.5	0,3465	0,3514	0,3455	0,3409	0,3454	0,3497	0,3476	0,3513	0,3466	0,3362	0,3308	0,3367	0,3430	0,3391	0,3327	0,3324	0,3457							
22 Neutral 5 (18%)	0,1790	0,1791	0,1791	0,1800	0,1820	0,1835	0,1831	0,1825	0,1818	0,1780	0,1748	0,1759	0,1787	0,1793	0,1771	0,1769	0,1844							
23 Neutral 3.5	0,0848	0,0815	0,0812	0,0825	0,0840	0,0852	0,0848	0,0816	0,0827	0,0800	0,0760	0,0758	0,0784	0,0810	0,0814	0,0815	0,0842							
24 Black	0,0323	0,0304	0,0290	0,0291	0,0312	0,0326	0,0317	0,0320	0,0311	0,0274	0,0247	0,0265	0,0297	0,0311	0,0319	0,0328	0,0341							

REFERÊNCIA UCP:	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17	
Nome da cor	480nm	490nm	500	510nm	520	530nm	540nm	550nm	560nm	570	580nm	590	600nm	610nm	620	630nm	640nm																	
1 Dark Skin	0,0554	0,0562	0,0582	0,0641	0,0711	0,0742	0,0749	0,0770	0,0827	0,0949	0,1130	0,1297	0,1381	0,1403	0,1422	0,1503	0,1617																	
2 Light Skin	0,2902	0,3239	0,3434	0,3468	0,3199	0,2725	0,2503	0,2587	0,2598	0,2623	0,3085	0,3959	0,4698	0,5158	0,5417	0,5604	0,5765																	
3 Blue Sky	0,2811	0,2691	0,2552	0,2397	0,2251	0,2076	0,1918	0,1799	0,1685	0,1547	0,1417	0,1338	0,1312	0,1300	0,1342	0,1356	0,1360																	
4 Foliage	0,0547	0,0566	0,0618	0,0862	0,1384	0,1769	0,1784	0,1614	0,1408	0,1231	0,1133	0,1072	0,1014	0,0967	0,0945	0,0962	0,0995																	
5 Blue Flower	0,3650	0,3335	0,3020	0,2761	0,2539	0,2303	0,2156	0,2105	0,2037	0,1939	0,1893	0,1949	0,2067	0,2221	0,2328	0,2446	0,2659																	
6 Bluish Green	0,4921	0,5260	0,5463	0,5511	0,5459	0,5307	0,5069	0,4741	0,4352	0,3917	0,3442	0,2940	0,2462	0,2151	0,1985	0,1909	0,1850																	
7 Orange	0,0574	0,0601	0,0654	0,0873	0,1276	0,1601	0,1754	0,1934	0,2318	0,3145	0,4235	0,5277	0,5881	0,6044	0,6034	0,6022	0,5987																	
8 Purplish Blue	0,3602	0,2994	0,2387	0,1868	0,1471	0,1183	0,1030	0,0945	0,0876	0,0826	0,0815	0,0824	0,0841	0,0851	0,0846	0,0873	0,0941																	
9 Moderate Red	0,1176	0,1130	0,1086	0,1028	0,0983	0,0946	0,0944	0,0948	0,0974	0,1043	0,1462	0,2635	0,4073	0,5128	0,5636	0,5850	0,5920																	
10 Purple	0,0965	0,0841	0,0741	0,0672	0,0629	0,0585	0,0552	0,0549	0,0555	0,0549	0,0538	0,0534	0,0579	0,0716	0,0946	0,1237	0,1503																	
11 Yellow Green	0,1361	0,1879	0,2571	0,3621	0,4641	0,5225	0,5406	0,5379	0,5218	0,4954	0,4634	0,4234	0,3780	0,3444	0,3252	0,3150	0,3087																	
12 Orange Yellow	0,0678	0,0707	0,0778	0,1097	0,1947	0,3149	0,3960	0,4374	0,4633	0,4993	0,5435	0,5830	0,6090	0,6233	0,6294	0,6348	0,6361																	
13 Blue	0,2374	0,1911	0,1471	0,1107	0,0844	0,0642	0,0521	0,0457	0,0424	0,0413	0,0407	0,0403	0,0407	0,0412	0,0416	0,0422	0,0427																	
14 Green	0,1193	0,1628	0,2164	0,2822	0,3257	0,3345	0,3221	0,2959	0,2645	0,2294	0,1934	0,1552	0,1236	0,1043	0,0950	0,0910	0,0883																	
15 Red	0,0468	0,0471	0,0478	0,0497	0,0524	0,0537	0,0533	0,0529	0,0551	0,0617	0,0744	0,1068	0,1789	0,3083	0,4567	0,5665	0,6224																	
16 Yellow	0,0918	0,1291	0,1966	0,3316	0,4808	0,5823	0,6324	0,6635	0,6844	0,7010	0,7145	0,7252	0,7299	0,7340	0,7381	0,7466	0,7547																	
17 Magenta	0,2251	0,1953	0,1726	0,1548	0,1348	0,1105	0,1007	0,1044	0,1066	0,1083	0,1337	0,1948	0,2795	0,3898	0,5175	0,6389	0,7242																	
18 Cyan	0,4522	0,4498	0,4299	0,3900	0,3409	0,2844	0,2332	0,1866	0,1472	0,1191	0,1015	0,0914	0,0833	0,0781	0,0756	0,0739	0,0742																	
19 White	0,9055	0,9058	0,9048	0,9058	0,9056	0,9050	0,9048	0,9051	0,9019	0,8990	0,8969	0,8939	0,8914	0,8909	0,8884	0,8868	0,8863																	
20 Neutral 8	0,5845	0,5820	0,5822	0,5819	0,5819	0,5830	0,5814	0,5816	0,5797	0,5794	0,5789	0,5770	0,5736	0,5713	0,5665	0,5616	0,5582																	
21 Neutral 6.5	0,3627	0,3613	0,3608	0,3610	0,3616	0,3629	0,3624	0,3617	0,3609	0,3612	0,3615	0,3604	0,3575	0,3550	0,3511	0,3474	0,3450																	
22 Neutral 5 (18%)	0,1893	0,1880	0,1884	0,1892	0,1901	0,1904	0,1906	0,1908	0,1907	0,1916	0,1919	0,1919	0,1906	0,1894	0,1872	0,1851	0,1832																	
23 Neutral 3.5	0,0906	0,0898	0,0902	0,0897	0,0901	0,0900	0,0900	0,0894	0,0889	0,0892	0,0891	0,0888	0,0879	0,0872	0,0862	0,0851	0,0843																	
24 Black	0,0367	0,0366	0,0367	0,0367	0,0363	0,0363	0,0359	0,0360	0,0360	0,0362	0,0359	0,0355	0,0361	0,0355	0,0360	0,0359	0,0360																	

Apêndice F: Resultados das reflectâncias medidas no ColorChecker com o sistema hiperespectral de 13 filtros

Tabela superior: reflectâncias medidas (ver também Apêndice I) nas cores do *ColorChecker* pelo sistema hiperespectral "D-SLR D300 + 13 filtros". Mediram-se 22 bandas; os comprimentos de onda das 6 bandas ausentes (na linha de cabeçalho, células apenas com o comprimento de onda, sem referência ao filtro ou canal do sensor) foram interpolados (interpolação bicúbica), de que resultam o total de 28 bandas.

Tabela inferior ("Referência UCP"): cores do *ColorChecker* medidas (ver também Apêndice I) com o espectrorradiômetro de referência Spectrascan PR650 (28 bandas).

Nos cabeçalhos das colunas, os comprimentos de onda que foram medidos.

Abreviaturas dos filtros usados: D300, câmara sem filtros externos; EO_B, Edmund Optics Dichroic Blue; EO_C, Edmund Optics Dichroic Cyan; EO_G, Edmund Optics Dichroic Green; EO_M, Edmund Optics Dichroic Magenta; EO_Y, Edmund Optics Dichroic Yellow; RED25, Celestron Red 25; RG630, Schott RG630; RG665, Schott RG665; RG695, Schott RG695; RW85B, Rowi 85B; SinCC30M, Sinar CC30M; UBI400, Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=400\text{nm}$; UBI450, Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=450\text{nm}$.

_Red, _Green, _Blue: canais do sensor da câmara R, G e B, respetivamente.

MEDIÇÃO COM 13 FILTROS:

























	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22							
	UBI400	UBI400	UBI450	EO_B	D300	EO_G	EO_G	EO_G	D300	RW85B	EO_Y	EO_G	EO_C	D300	RW85B	SinCC30M	EO_M	RED25	RG630	RG665	RG695	RG695							
Nome da cor	Red 420nm	Blue 430nm	Blue 440nm	440nm	450nm	460nm	470nm	Blue 480nm	Blue 490nm	Green 500nm	EO_G 510nm	520nm	530nm	EO_G 540nm	Green 550nm	Green 560nm	EO_Y 570nm	EO_G 580nm	EO_C 590nm	D300 600nm	Red 610nm	Red 620nm	EO_M 630nm	Red 640nm	Red 650nm	660nm	Red 670nm	Green 680nm	Red 695nm
1 Dark Skin ■	0,0516	0,0484	0,0485	0,0490	0,0499	0,0511	0,0576	0,0613	0,0587	0,0787	0,0816	0,0832	0,0837	0,0824	0,0817	0,0952	0,0658	0,1021	0,1344	0,1344	0,1303	0,1334	0,1510	0,1544	0,1607	0,1564	0,1522	0,1594	0,1791
2 Light Skin ■	0,1584	0,1519	0,1569	0,1701	0,1896	0,2066	0,2408	0,2645	0,2930	0,3045	0,2972	0,2836	0,2763	0,3002	0,2868	0,2962	0,3015	0,3402	0,4068	0,4549	0,4965	0,5434	0,5522	0,5634	0,5656	0,5679	0,5635	0,5825	0,6121
3 Blue Sky ■	0,2928	0,2849	0,2851	0,2854	0,2862	0,2873	0,2993	0,2839	0,2738	0,2227	0,2050	0,1935	0,1995	0,2049	0,1810	0,1549	0,1634	0,1695	0,1534	0,1358	0,1461	0,1569	0,1313	0,1361	0,1351	0,1342	0,1369	0,1441	
4 Foliage ■	0,0528	0,0500	0,0505	0,0517	0,0531	0,0542	0,0551	0,0708	0,0634	0,1469	0,1524	0,1552	0,1560	0,1311	0,1278	0,1305	0,1111	0,1008	0,1328	0,1247	0,1006	0,1025	0,0966	0,0981	0,1024	0,1019	0,1014	0,1046	0,1081
5 Blue Flower ■	0,3780	0,3732	0,3735	0,3745	0,3762	0,3787	0,3900	0,3909	0,3362	0,2556	0,2369	0,2254	0,2216	0,2475	0,2225	0,1997	0,2045	0,2264	0,2437	0,2242	0,2394	0,2852	0,2857	0,2772	0,2899	0,3008	0,3071	0,3183	
6 Blush Green ■	0,2838	0,2814	0,2916	0,3189	0,3494	0,3812	0,4132	0,4564	0,4728	0,5514	0,5377	0,5095	0,4859	0,4738	0,4336	0,3982	0,3915	0,3519	0,2753	0,2439	0,2527	0,2288	0,1785	0,1767	0,1735	0,1714	0,1863	0,2328	
7 Orange ■	0,0488	0,0484	0,0487	0,0476	0,0493	0,0515	0,0598	0,0757	0,0853	0,1637	0,1878	0,2101	0,2183	0,2121	0,2323	0,3182	0,3277	0,3662	0,5148	0,5127	0,5161	0,5585	0,5987	0,5998	0,5559	0,5420	0,5505	0,5616	
8 Purplish Blue ■	0,2686	0,2794	0,3028	0,3393	0,3662	0,3792	0,3761	0,3236	0,3068	0,1461	0,1230	0,1101	0,1061	0,1471	0,1202	0,0871	0,0951	0,1241	0,1098	0,0938	0,1073	0,1309	0,1039	0,1136	0,1302	0,1526	0,1822	0,3163	
9 Moderate Red ■	0,1316	0,1308	0,1292	0,1268	0,1248	0,1239	0,1298	0,1234	0,1177	0,1030	0,1032	0,1038	0,1038	0,1049	0,1306	0,1351	0,1621	0,1548	0,2129	0,4075	0,4105	0,4237	0,5374	0,5664	0,5785	0,5755	0,5746	0,5801	0,5565
10 Purple ■	0,1949	0,1929	0,1911	0,1900	0,1976	0,1281	0,1298	0,1129	0,0969	0,0866	0,0912	0,0588	0,0580	0,0665	0,0612	0,0585	0,0587	0,0908	0,0964	0,0929	0,1021	0,1429	0,1618	0,1812	0,2134	0,2508	0,2853	0,4457	
11 Yellow Green ■	0,0828	0,0820	0,0849	0,0719	0,0818	0,0928	0,1095	0,1883	0,1936	0,4904	0,5094	0,5234	0,5279	0,4485	0,4483	0,4717	0,4598	0,4088	0,3750	0,3581	0,3554	0,3128	0,3194	0,3091	0,3111	0,3163	0,3316	0,3795	
12 Orange Yellow ■	0,0638	0,0630	0,0631	0,0638	0,0641	0,0650	0,0710	0,1347	0,0794	0,2872	0,3637	0,3961	0,4109	0,3784	0,4851	0,4756	0,4590	0,3708	0,5715	0,5720	0,6002	0,6177	0,6177	0,6177	0,6177	0,6177	0,6177	0,6177	0,6177
13 Blue ■	0,1776	0,1888	0,2071	0,2381	0,2822	0,2735	0,2878	0,2249	0,2074	0,0867	0,0867	0,0803	0,0573	0,0874	0,0881	0,0455	0,0510	0,0728	0,0578	0,0485	0,0583	0,0885	0,0435	0,0481	0,0478	0,0478	0,0836	0,1211	
14 Green ■	0,0590	0,0581	0,0607	0,0672	0,0761	0,0859	0,0988	0,1489	0,1780	0,3110	0,3100	0,3095	0,3004	0,2940	0,2493	0,2319	0,2434	0,1885	0,1432	0,1293	0,1313	0,1018	0,0938	0,0967	0,0977	0,0990	0,1168	0,1745	
15 Red ■	0,0532	0,0527	0,0527	0,0529	0,0531	0,0534	0,0583	0,0546	0,0539	0,0600	0,0609	0,0613	0,0623	0,0731	0,0799	0,1017	0,0850	0,1028	0,3125	0,3245	0,3411	0,5101	0,6071	0,6419	0,6670	0,6854	0,6962	0,6871	
16 Yellow ■	0,0600	0,0602	0,0602	0,0602	0,0721	0,0790	0,0901	0,1739	0,1722	0,5341	0,6064	0,6496	0,6822	0,5578	0,5846	0,6861	0,7273	0,6398	0,7213	0,7159	0,7052	0,7124	0,7617	0,7693	0,7819	0,7967	0,8105	0,8045	
17 Magenta ■	0,3581	0,3687	0,3563	0,3290	0,3017	0,2893	0,2913	0,2539	0,2252	0,1377	0,1276	0,1221	0,1204	0,1564	0,1546	0,1625	0,1524	0,2042	0,4162	0,4229	0,4473	0,6302	0,7235	0,7642	0,8062	0,8369	0,8478	0,8394	
18 Cyan ■	0,2495	0,2616	0,2886	0,3660	0,3675	0,3823	0,3833	0,3870	0,4149	0,3082	0,2613	0,2299	0,2168	0,2580	0,2174	0,1414	0,1577	0,1649	0,1155	0,0857	0,1089	0,1104	0,0741	0,0779	0,0789	0,0802	0,0976	0,1495	
19 White ■	0,7138	0,7329	0,7583	0,7894	0,8220	0,8578	0,8888	0,9050	0,9186	0,9316	0,9282	0,9245	0,9215	0,9211	0,8856	0,8988	0,9034	0,8860	0,8233	0,8873	0,9148	0,9237	0,8837	0,8802	0,8581	0,8358	0,8320	0,8031	
20 Neutral 8 ■	0,5381	0,5606	0,5612	0,5699	0,5788	0,5897	0,6052	0,6047	0,6145	0,6056	0,6059	0,6067	0,6071	0,6070	0,5848	0,5852	0,6134	0,5954	0,6011	0,5775	0,5936	0,5923	0,5999	0,5969	0,5957	0,5816	0,5663	0,5314	
21 Neutral 6.5 ■	0,3636	0,3692	0,3720	0,3738	0,3757	0,3789	0,3846	0,3825	0,3901	0,3828	0,3835	0,3849	0,3856	0,3828	0,3713	0,3759	0,3966	0,3851	0,3775	0,3644	0,3683	0,3725	0,3583	0,3600	0,3626	0,3662	0,3715	0,3492	
22 Neutral 5 (18%) ■	0,1914	0,2007	0,2003	0,1996	0,1987	0,1984	0,1988	0,1979	0,2016	0,2052	0,2056	0,2058	0,2059	0,2001	0,1957	0,1970	0,2154	0,2037	0,1988	0,1934	0,1967	0,1967	0,1908	0,1946	0,1973	0,2002	0,2057	0,2033	
23 Neutral 3.5 ■	0,1011	0,1087	0,1074	0,1045	0,1012	0,0987	0,0974	0,0968	0,0972	0,0879	0,0977	0,0973	0,0967	0,0965	0,0939	0,0947	0,0989	0,0985	0,0935	0,0910	0,0943	0,0931	0,0891	0,0932	0,0924	0,0915	0,0936	0,1033	
24 Black ■	0,0407	0,0442	0,0434	0,0416	0,0393	0,0374	0,0359	0,0359	0,0353	0,0377	0,0375	0,0369	0,0362	0,0351	0,0353	0,0359	0,0348	0,0348	0,0339	0,0336	0,0339	0,0336	0,0339	0,0337	0,0334	0,0336	0,0339	0,0336	

REFERÊNCIA UCP:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Nome da cor	420nm	430nm	440nm	450nm	460nm	470nm	480nm	490nm	500	510nm	520	530nm	540nm	550nm	560nm	570	580nm	590	600nm	610nm	620	630nm	640nm	650nm	660nm	670nm	680nm	695nm
1 Dark Skin ■	0,0447	0,0466	0,0477	0,0482	0,0498	0,0493	0,0493	0,0505	0,0520	0,0569	0,0654	0,0690	0,0698	0,0713	0,0770	0,0891	0,1056	0,1209	0,1298	0,1308	0,1345	0,1435	0,1545	0,1642	0,1704	0,1689	0,1599	0,1503
2 Light Skin ■	0,1557	0,1601	0,1683	0,1804	0,2004	0,2311	0,2672	0,2946	0,3108	0,3100	0,2807	0,2410	0,2290	0,2353	0,2339	0,2430	0,2943	0,3748	0,4303	0,4797	0,5038	0,5224	0,5381	0,5568	0,5740	0,5943	0,6141	0,6343
3 Blue Sky ■	0,3051	0,3031	0,3033	0,2954	0,2850	0,2720	0,2625	0,2511	0,2367	0,2231	0,2088	0,1926	0,1780	0,1671	0,1567	0,1430	0,1313	0,1247	0,1227	0,1242	0,1259	0,1279	0,1279	0,1303	0,1341	0,1338	0,1263	0,1223
4 Foliage ■	0,0472	0,0477	0,0486	0,0487	0,0496	0,0500	0,0517	0,0540	0,0602	0,0670	0,0730	0,0786	0,0846	0,0912	0,1012	0,1130	0,1251	0,1386	0,1536	0,1696	0,1871	0,2059	0,2259	0,2469	0,2689	0,2919	0,3159	0,3409
5 Blue Flower ■	0,4038	0,4053	0,4058	0,3979	0,3840	0,3638	0,3402	0,3113	0,2568	0,2389	0,2112	0,2004	0,1949	0,1791	0,1789	0,1750	0,1655	0,1658	0,1831	0,1975	0,2091	0,2216	0,2524	0,2814				

























Apêndice G-1: Diferenças de cor e espectrais - ColorChecker - sistema hiperespectral de 5 filtros

Diferenças de cor e espectrais entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectrorradiômetro de referência, para o conjunto das 24 amostras de cor do alvo *ColorChecker*.

<i>Nome da cor</i>	ΔE_{ab}^*	ΔE_{94}^*	ΔE_{00}	<i>GFC</i>	<i>RMSE</i>
<i>Dark Skin</i> 	2,0148	1,4329	1,6064	0,9956	0,0109
<i>Light Skin</i> 	8,2206	6,1952	6,4854	0,9958	0,0392
<i>Blue Sky</i> 	2,8304	2,2108	2,7239	0,9976	0,0137
<i>Foliage</i> 	2,0466	1,5286	1,4453	0,9770	0,0260
<i>Blue Flower</i> 	1,5659	1,2413	1,8173	0,9980	0,0167
<i>Bluish Green</i> 	8,8646	6,6275	6,1729	0,9966	0,0521
<i>Orange</i> 	8,3147	3,4508	3,7503	0,9920	0,0599
<i>Purplish Blue</i> 	3,6759	2,2509	2,6649	0,9877	0,0271
<i>Moderate Red</i> 	5,6140	2,1792	2,1083	0,9933	0,0422
<i>Purple</i> 	5,7724	3,6008	3,8040	0,9941	0,0161
<i>Yellow Green</i> 	4,6531	2,9041	2,4735	0,9915	0,0602
<i>Orange Yellow</i> 	8,9826	4,3522	4,3658	0,9874	0,0896
<i>Blue</i> 	2,0870	1,7627	1,6314	0,9857	0,0181
<i>Green</i> 	7,5938	5,1445	4,6269	0,9909	0,0347
<i>Red</i> 	2,7911	2,1470	2,0438	0,9835	0,0472
<i>Yellow</i> 	4,1469	2,6093	2,2776	0,9917	0,0888
<i>Magenta</i> 	3,6634	2,9311	2,7544	0,9906	0,0451
<i>Cyan</i> 	10,8817	5,0803	4,5077	0,9814	0,0606
<i>White</i> 	2,7551	2,6575	2,5624	0,9995	0,0502
<i>Neutral 8</i> 	1,4662	1,4617	1,1587	0,9998	0,0261
<i>Neutral 6.5</i> 	1,3091	1,3086	1,0705	0,9998	0,0179
<i>Neutral 5 (18%)</i> 	1,2126	1,2114	1,2416	0,9998	0,0106
<i>Neutral 3.5</i> 	1,5684	1,5629	1,3262	0,9993	0,0080
<i>Black</i> 	2,4032	2,3840	1,8386	0,9969	0,0064
<i>Média:</i>	4,3514	2,8431	2,7691	0,9927	0,0361
<i>Desvio padrão (±):</i>	2,9507	1,5754	1,5304	0,0063	0,0240
<i>Máximo:</i>	10,8817	6,6275	6,4854	0,9998	0,0896
<i>Mínimo:</i>	1,2126	1,2114	1,0705	0,9770	0,0064

























Apêndice G-2: Diferenças de cor e espectrais - ColorChecker - sistema hiperespectral de 13 filtros

Diferenças de cor e espectrais entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectrorradiômetro de referência, para o conjunto das 24 amostras de cor do alvo *ColorChecker*.

Nome da cor	ΔE_{ab}^*	ΔE_{94}^*	ΔE_{00}	<i>GFC</i>	<i>RMSE</i>
Dark Skin 	4,5748	3,5133	4,4135	0,9948	0,0113
Light Skin 	6,5350	4,6671	5,5472	0,9971	0,0300
Blue Sky 	4,8064	3,4355	3,2453	0,9956	0,0223
Foliage 	1,2414	1,1991	1,0814	0,9908	0,0156
Blue Flower 	9,9051	6,4844	5,5684	0,993	0,0389
Bluish Green 	7,8540	5,5484	5,0772	0,9943	0,0404
Orange 	9,9382	4,8342	5,7667	0,9943	0,0465
Purplish Blue 	12,3938	6,5456	3,8549	0,9803	0,0441
Moderate Red 	7,5824	3,2862	3,1590	0,9951	0,0356
Purple 	2,9962	2,9954	2,3914	0,9932	0,0279
Yellow Green 	1,5899	0,6639	0,6868	0,9946	0,0364
Orange Yellow 	8,2865	4,1416	5,1240	0,9912	0,0622
Blue 	14,7815	7,8770	4,2519	0,966	0,0379
Green 	6,7031	3,9047	3,4779	0,9902	0,0261
Red 	4,7982	3,2299	3,0707	0,9944	0,0382
Yellow 	4,9206	2,4961	2,8667	0,9953	0,0607
Magenta 	6,2364	3,7155	3,5959	0,9959	0,0437
Cyan 	10,1114	4,8470	4,4587	0,9857	0,0438
White 	7,7228	5,7160	7,2678	0,9984	0,0510
Neutral 8 	4,2085	3,8588	4,3955	0,9994	0,0327
Neutral 6.5 	3,0426	2,9988	3,0227	0,9997	0,0302
Neutral 5 (18%) 	1,9776	1,9572	2,1727	0,9994	0,0170
Neutral 3.5 	1,7635	1,6947	1,5807	0,9992	0,0093
Black 	2,3538	2,1367	2,2297	0,9973	0,0043
<i>Média:</i>	6,0968	3,8228	3,6794	0,9931	0,0336
<i>Desvio padrão (±):</i>	3,5933	1,7708	1,5943	0,0073	0,0151
<i>Máximo:</i>	14,7815	7,8770	7,2678	0,9997	0,0622
<i>Mínimo:</i>	1,2414	0,6639	0,6868	0,9660	0,0043

























Apêndice H-1: Índices de metamerismo - ColorChecker - sistema hiperespectral de 5 filtros

Índices de metamerismo entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectrorradiômetro de referência, para o conjunto das 24 amostras de cor do alvo *ColorChecker*.

Nome da cor	ΔE_{ab}^*		ΔE_{00}	
	(D65, A)	(D65, F2)	(D65, A)	(D65, F2)
Dark Skin 	0,7510	0,5002	0,5748	0,3389
Light Skin 	3,1473	3,4233	2,1721	2,5015
Blue Sky 	0,3831	0,5260	0,2308	0,4755
Foliage 	7,5257	9,1743	3,8430	4,3393
Blue Flower 	0,0840	0,4326	0,0508	0,4627
Bluish Green 	0,7623	0,5902	0,3791	0,3659
Orange 	0,9683	0,6378	0,5178	0,2273
Purplish Blue 	0,4839	1,1423	0,1810	0,8534
Moderate Red 	3,0317	2,5776	1,4781	1,6129
Purple 	1,4844	0,6099	1,2897	0,5857
Yellow Green 	7,3804	8,9965	2,7364	2,9230
Orange Yellow 	11,7508	14,0405	2,7794	3,1670
Blue 	0,5578	1,1422	0,3074	0,9008
Green 	2,5421	3,4768	1,3084	1,7526
Red 	1,4561	1,5849	0,5070	1,0391
Yellow 	15,2243	20,0763	3,2244	4,0294
Magenta 	1,0171	0,4092	0,4147	0,3107
Cyan 	3,8099	2,2150	1,1358	1,1301
White 	0,4311	0,2792	0,4863	0,2814
Neutral 8 	0,1919	0,1381	0,2392	0,1918
Neutral 6.5 	0,1603	0,2234	0,1625	0,2494
Neutral 5 (18%) 	0,3020	0,3681	0,3194	0,3692
Neutral 3.5 	0,6735	0,8384	0,6632	0,8039
Black 	1,0523	1,2437	1,0106	1,1911
<i>Média:</i>	2,7155	3,1103	1,0838	1,2543
<i>Desvio padrão (±):</i>	3,9238	5,0137	1,0833	1,2383
<i>Máximo:</i>	15,2243	20,0763	3,8430	4,3393
<i>Mínimo:</i>	0,0840	0,1381	0,0508	0,1918

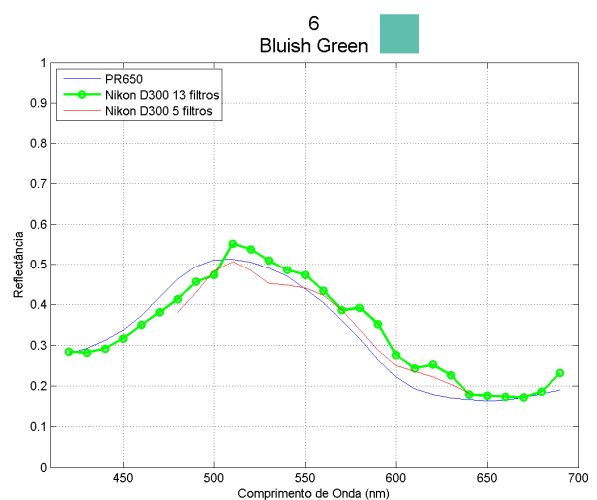
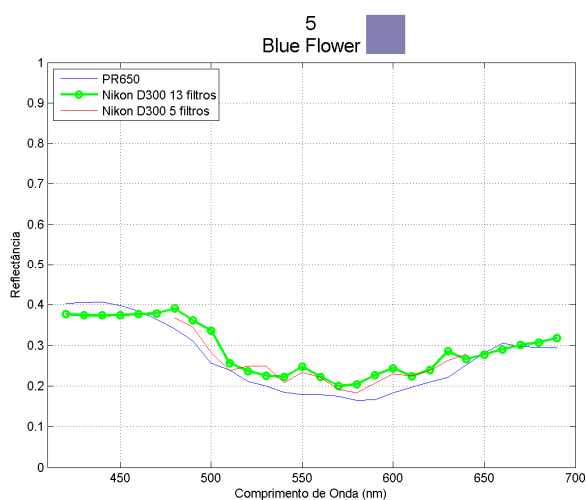
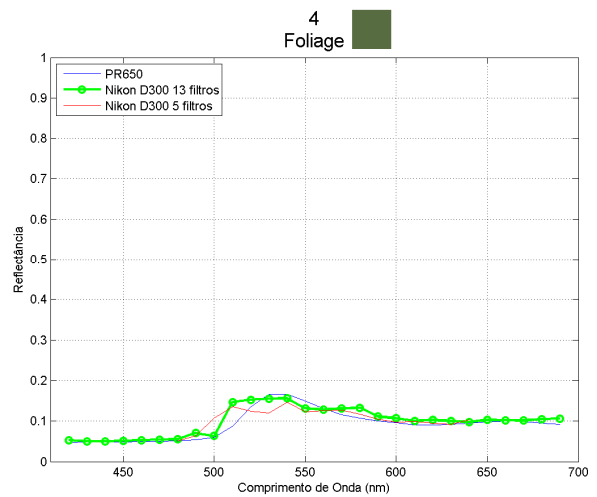
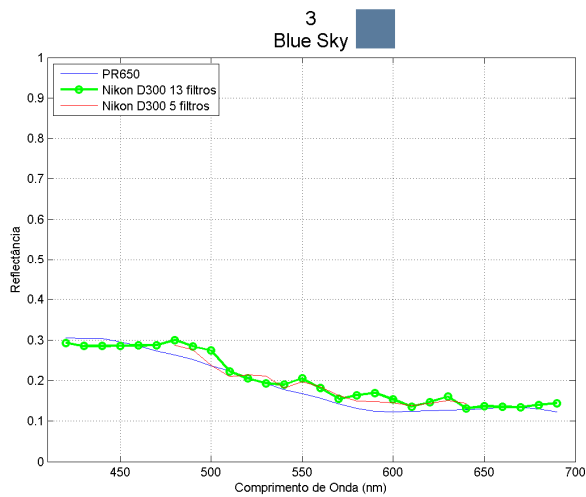
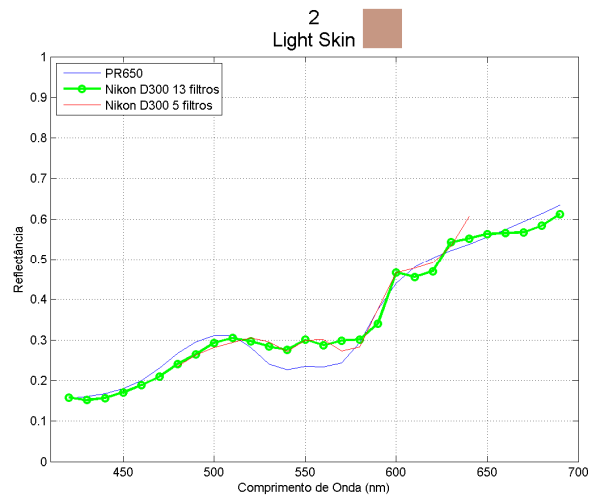
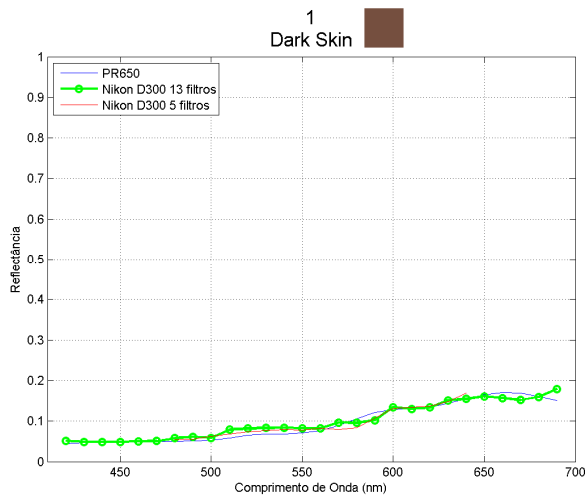
Apêndice H-2: Índices de metamerismo - ColorChecker - sistema hiperespectral de 13 filtros

Índices de metamerismo entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectrorradiômetro de referência, para o conjunto das 24 amostras de cor do alvo *ColorChecker*.

Nome da cor	ΔE_{ab}^*		ΔE_{00}	
	(D65, A)	(D65, F2)	(D65, A)	(D65, F2)
Dark Skin 	0,3517	0,5117	0,2840	0,4085
Light Skin 	1,2402	1,4820	0,9691	1,3303
Blue Sky 	1,0703	0,7467	0,7884	0,3443
Foliage 	1,1695	1,5154	0,8834	1,1732
Blue Flower 	1,6101	0,6438	1,1341	0,6057
Bluish Green 	0,2222	0,4378	0,1406	0,2835
Orange 	0,8819	1,4875	0,3663	0,4075
Purplish Blue 	3,0874	1,3786	1,8051	0,3686
Moderate Red 	1,4998	2,4168	0,7451	1,5991
Purple 	1,8863	1,3575	1,1763	0,7200
Yellow Green 	0,8803	1,7307	0,5376	0,8301
Orange Yellow 	1,2934	3,0991	0,7500	1,6754
Blue 	3,8557	1,5996	2,2181	0,5547
Green 	0,1615	0,5881	0,0839	0,3079
Red 	0,4850	0,6833	0,1911	0,4297
Yellow 	1,2858	2,4576	0,7475	1,1512
Magenta 	0,4004	1,0007	0,2066	0,5931
Cyan 	2,4186	3,0303	1,0467	1,8027
White 	0,8092	0,6630	1,1224	0,7267
Neutral 8 	0,8425	0,3997	1,2200	0,5534
Neutral 6.5 	0,8401	0,4598	1,2255	0,5877
Neutral 5 (18%) 	0,6289	0,6244	0,9362	0,7229
Neutral 3.5 	0,4125	0,7313	0,6020	0,7504
Black 	0,1646	0,7379	0,2062	0,7377
<i>Média:</i>	1,1457	1,2410	0,8078	0,7777
<i>Desvio padrão (±):</i>	0,9168	0,8137	0,5293	0,4453
<i>Máximo:</i>	3,8557	3,0991	2,2181	1,8027
<i>Mínimo:</i>	0,1615	0,3997	0,0839	0,2835

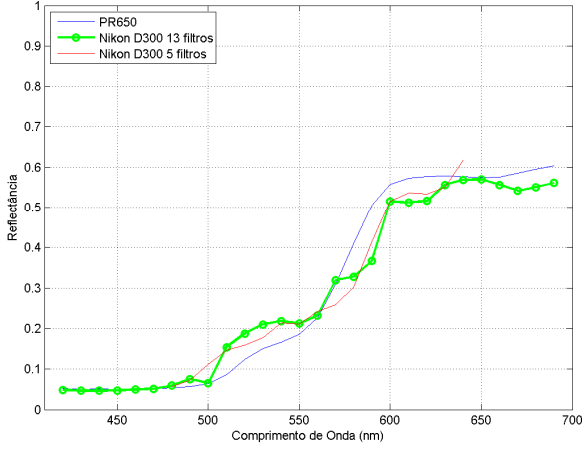
Apêndice I: Gráficos de reflectâncias espectrais medidas no ColorChecker

Gráficos representativos das reflectâncias espectrais relativas, para o conjunto das 24 amostras de cor do alvo *ColorChecker*, medidas com o espectrorradiômetro de referência (Photoresearch PR650) e estimadas com os sistemas testados, intermédio e definitivo (Nikon D300+5 filtros e Nikon D300+13 filtro, respetivamente).

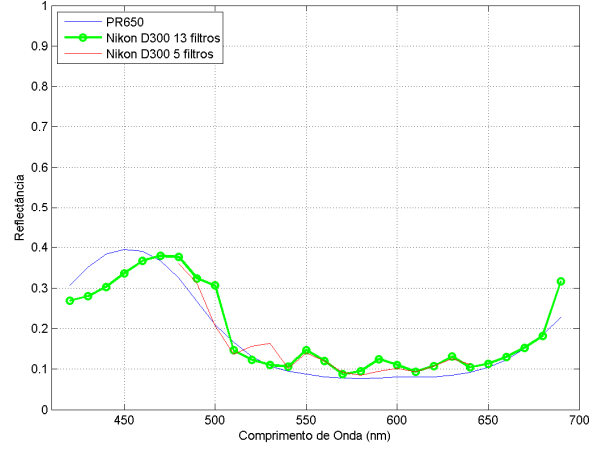


Apêndices

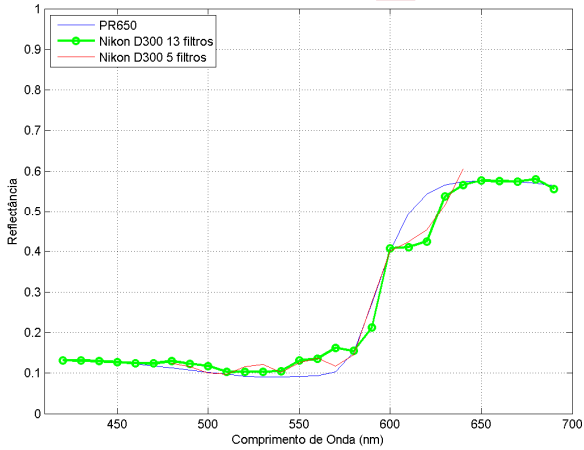
7 Orange



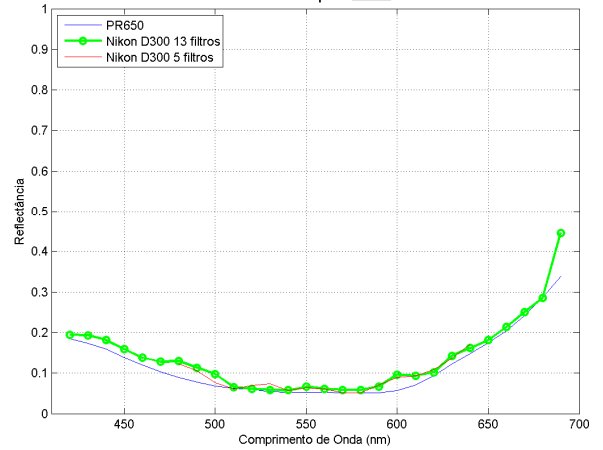
8 Purplish Blue



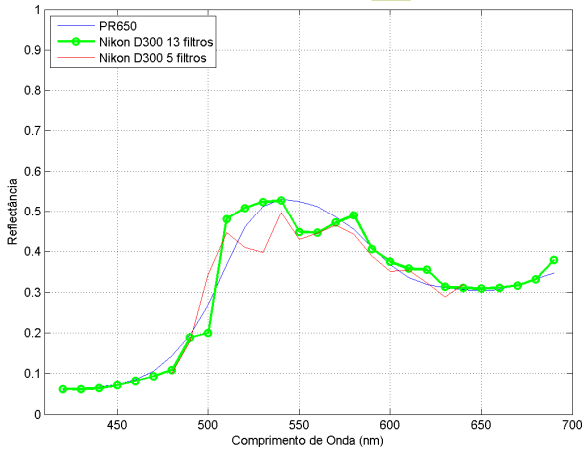
9 Moderate Red



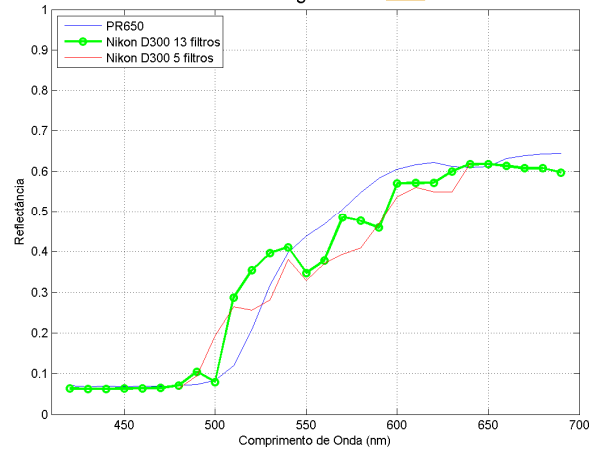
10 Purple



11 Yellow Green

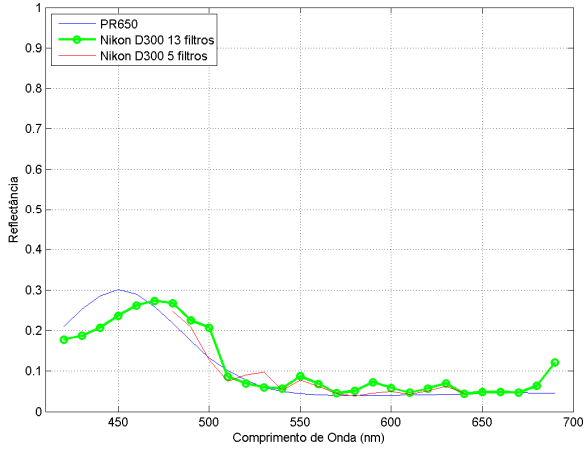


12 Orange Yellow

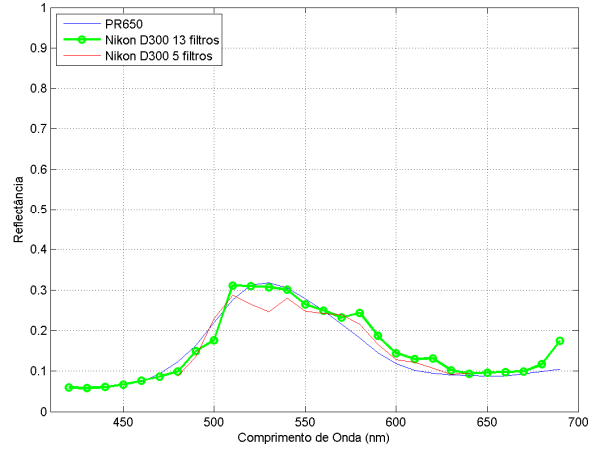


Apêndices

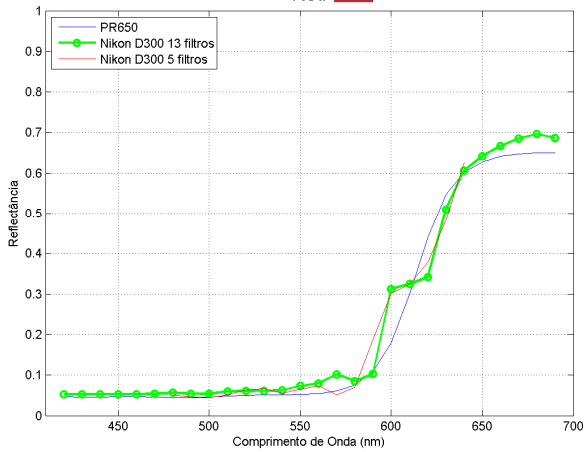
13 Blue



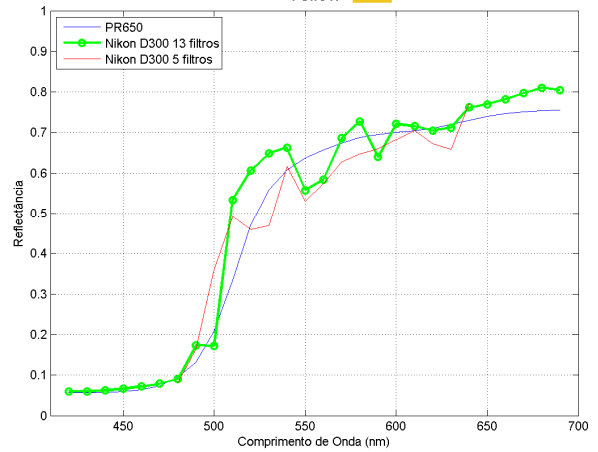
14 Green



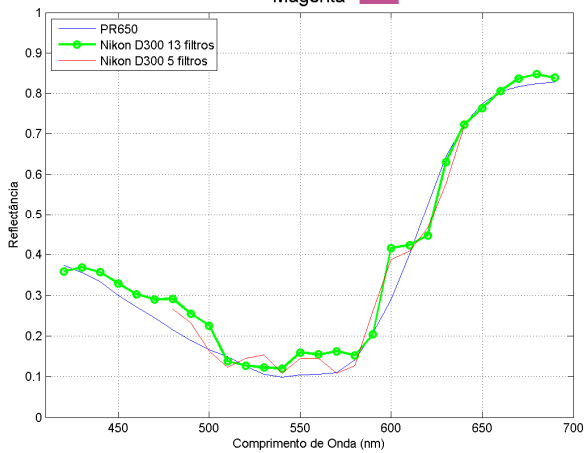
15 Red



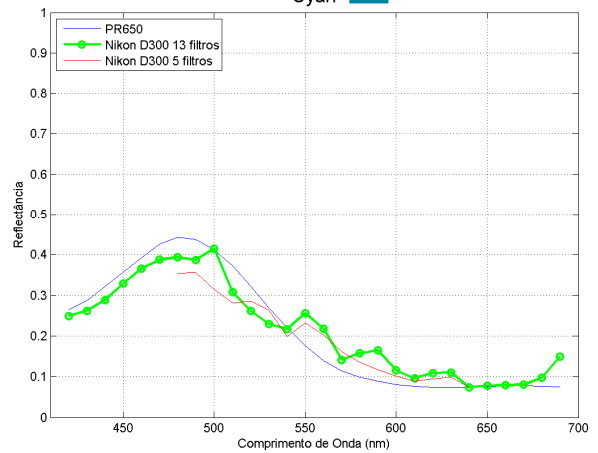
16 Yellow



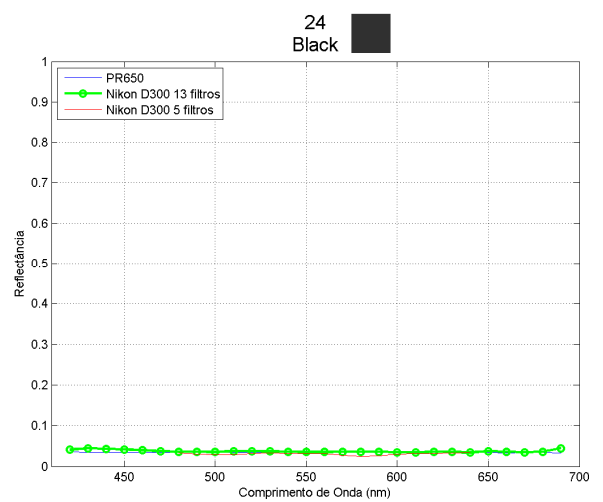
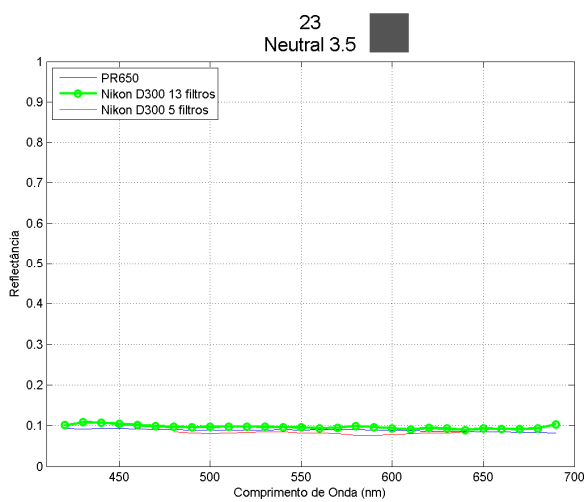
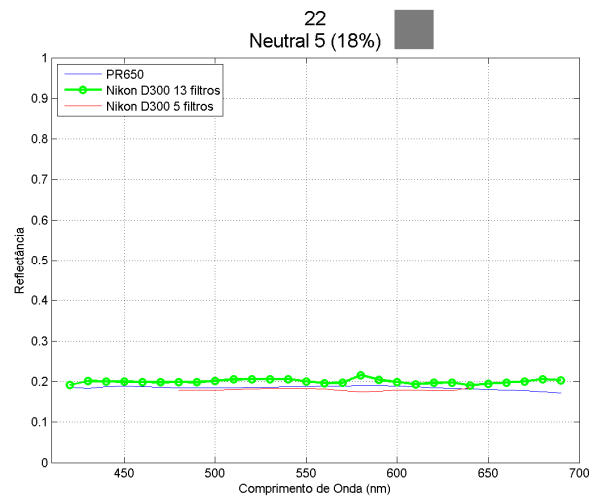
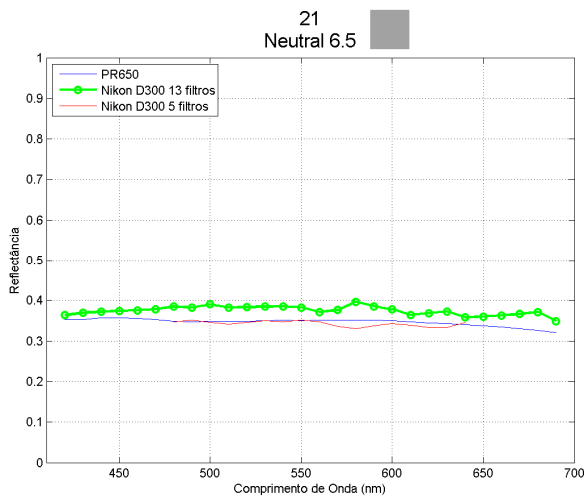
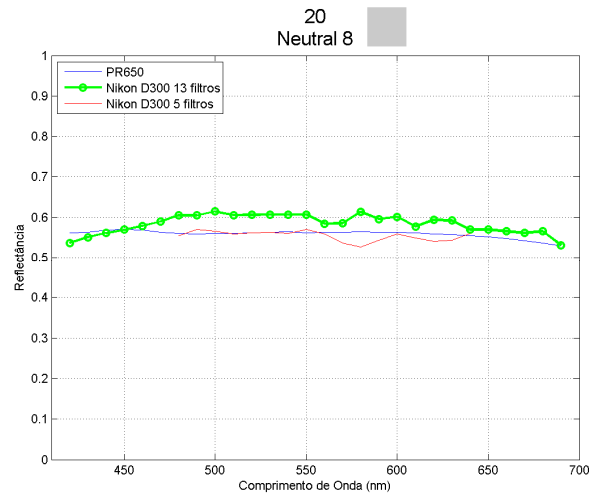
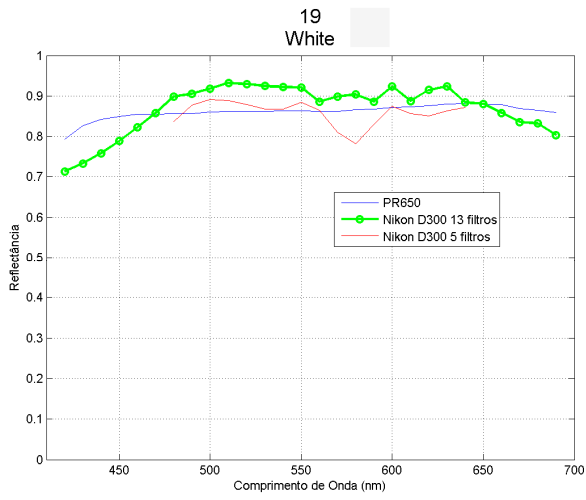
17 Magenta



18 Cyan



Apêndices



Apêndice J: Reflectâncias no alvo ColorChecker, por comprimento de onda e Sensibilidade espectral do sensor+filtro correspondente

Na **coluna esquerda** da tabela abaixo, apresentam-se os gráficos das reflectâncias medidas nas 24 cores do ColorChecker, cada gráfico (um por cada linha da tabela) representa uma só banda do espectro EM, por passos de 10 nm, entre os 420 nm e os 690 nm (limites do sistema hiperespectral testado).

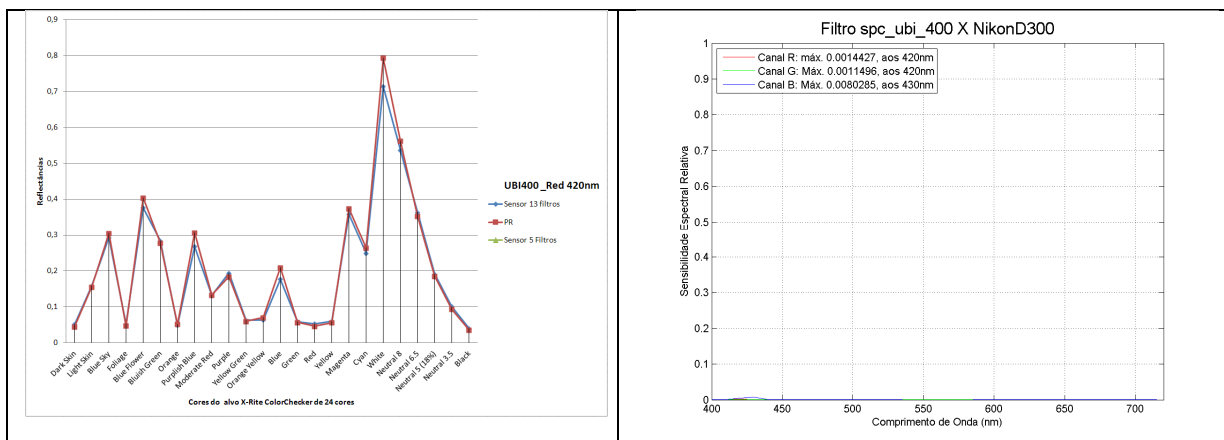
Na **coluna direita** da tabela, apresentam-se os gráficos que representam as curvas das sensibilidades espectrais relativas do sensor, quando combinados com cada um dos 13 filtros usados no sistema hiperespectral em teste. Cada linha da tabela representa um só comprimento de onda e apenas foi usado um dos canais (R, G ou B) da câmara (referido na legenda, no outro gráfico da coluna esquerda, como “_Red”, “_Green” ou “_Blue”) para calcular as reflectâncias para esse comprimento de onda. Mesmo assim, nos gráficos da coluna direita surgem sempre os três canais da câmara (o usado nessa banda e os outros dois, não usados). Como alguns comprimentos de onda foram medidos com a mesma combinação de filtros mas fazendo uso de outro canal da câmara, alguns destes gráficos surgem, obviamente, repetidos em linhas correspondentes a bandas de outro comprimento de onda, que usam a mesma combinação de filtro.

Nas bandas cujos valores, em vez de terem sido medidos, tenham sido estimados por interpolação bicúbica, na coluna da direita e linha correspondente surge a palavra “*Interpolados*”.

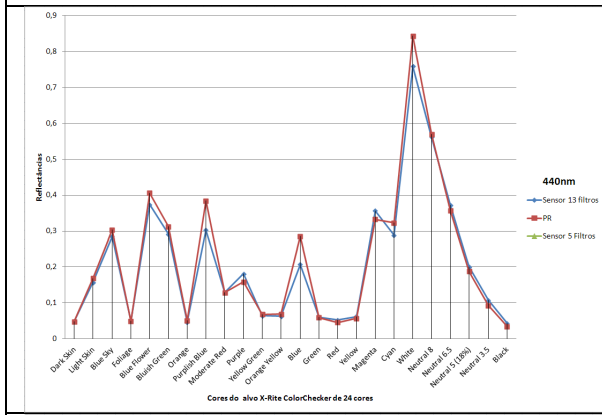
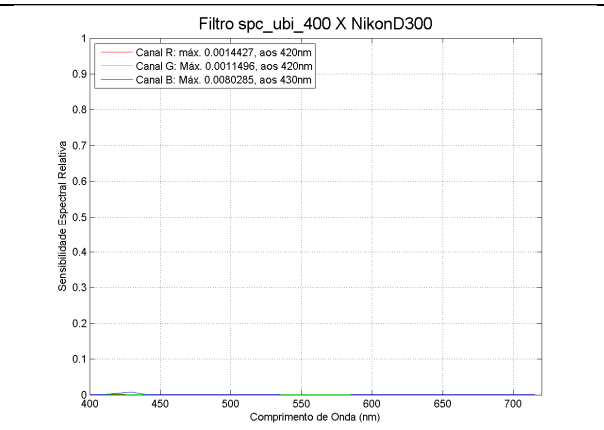
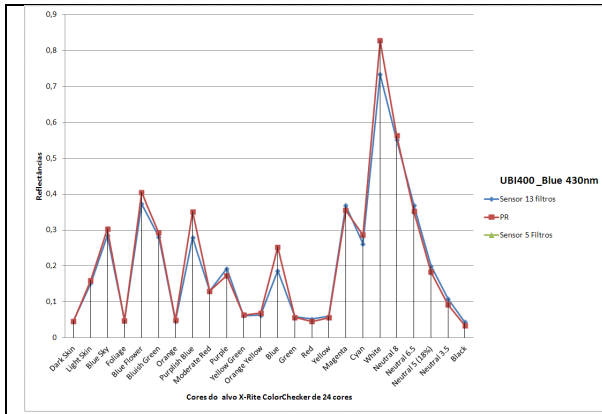
Abreviaturas e termos usadas nas legendas: D300, câmara sem filtros externos; EO_B, filtro Edmund Optics Dichroic Blue; EO_C, filtro Edmund Optics Dichroic Cyan; EO_G, filtro Edmund Optics Dichroic Green; EO_M, filtro Edmund Optics Dichroic Magenta; EO_Y, filtro Edmund Optics Dichroic Yellow; RED25, filtro Celestron Red 25; RG630, filtro Schott RG630; RG665, filtro Schott RG665; RG695, filtro Schott RG695; RW85B, filtro Rowi 85B; SinCC30M, filtro Sinar CC30M; UBI400, filtro Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=400\text{nm}$; UBI450, filtro Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=450\text{nm}$; _Red, _Green, _Blue: canais do sensor da câmara R, G e B, respetivamente; “Sensor 13 filtros”, sistema hiperespectral testado D-SLR D300 + 13 filtros; “Sensor 5 filtros”, sistema hiperespectral intermédio D-SLR D300 + 5 filtros; “PR”, espectrorradiômetro de referência Spectrascan PR650”.

Exemplos de leitura da Tabela:

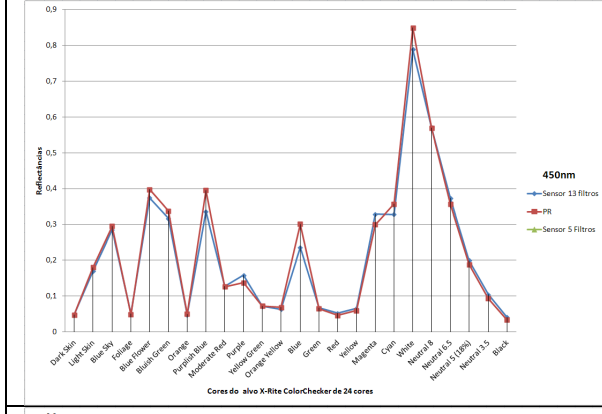
- Exemplo 1: na primeira linha da Tabela, no gráfico da coluna esquerda, refere na legenda “UBI400 _Red 420nm”; significa que este gráfico apresenta as reflectâncias das 24 amostras de cor do *ColorChecker*, para o comprimento de onda de 420 nm e que, no caso dos sistemas com a Nikon D300, os valores foram medidos com a combinação do filtro externo “Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=400\text{nm}$ ” (UBI400) e o canal “R” do sensor desta câmara (_Red);
- Exemplo 2: na terceira linha da Tabela, no gráfico da coluna esquerda surge referido na legenda apenas “440nm” e, na coluna direita, em vez de um gráfico surge a palavra “Interpolados”; isto significa que os valores de reflectância, aos 440 nm e para o sistema de teste, não foram medidos, mas sim interpolados matematicamente.



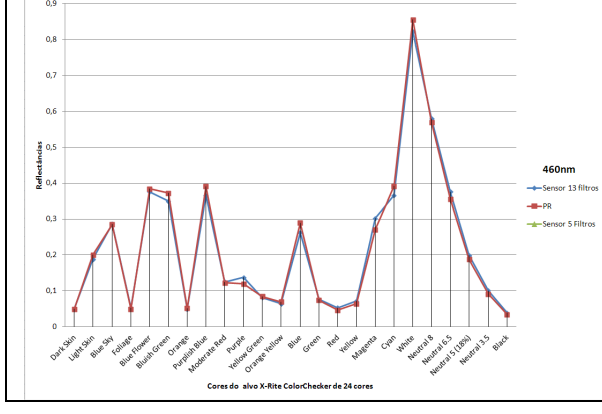
Apêndices



INTERPOLADOS

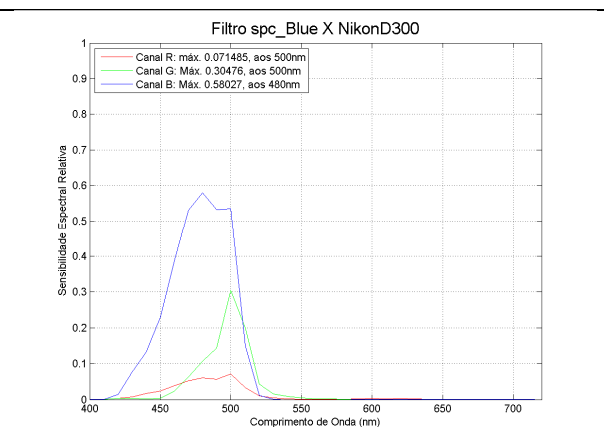
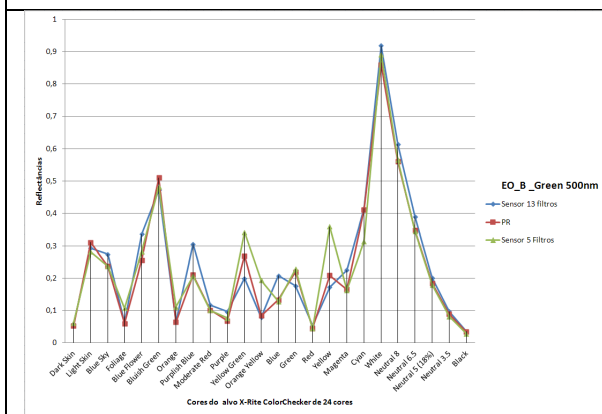
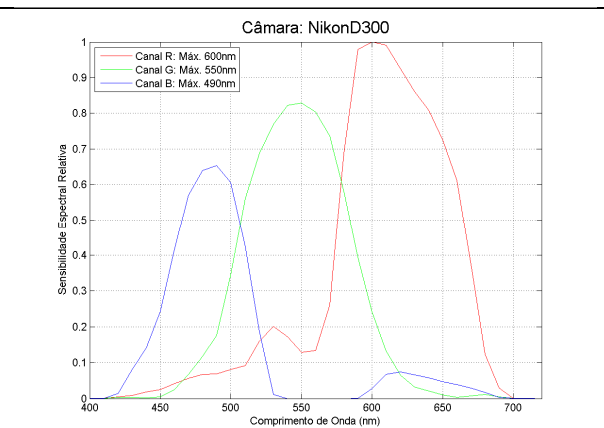
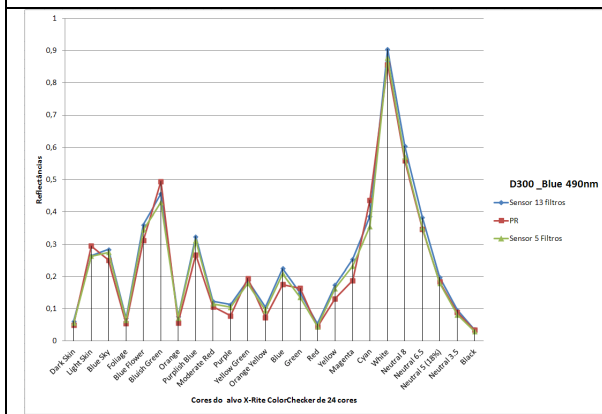
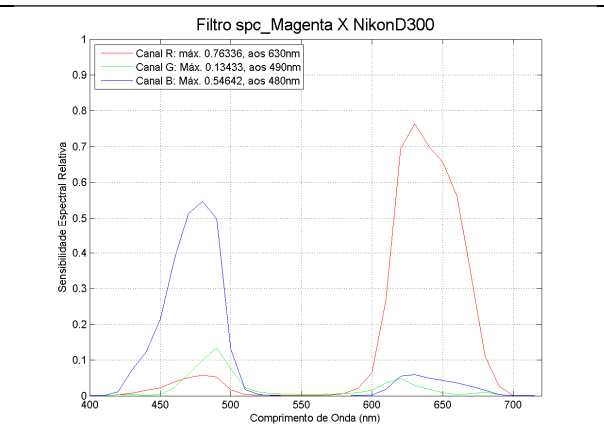
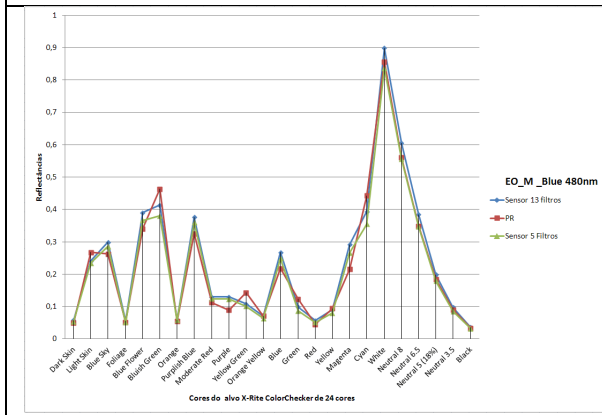
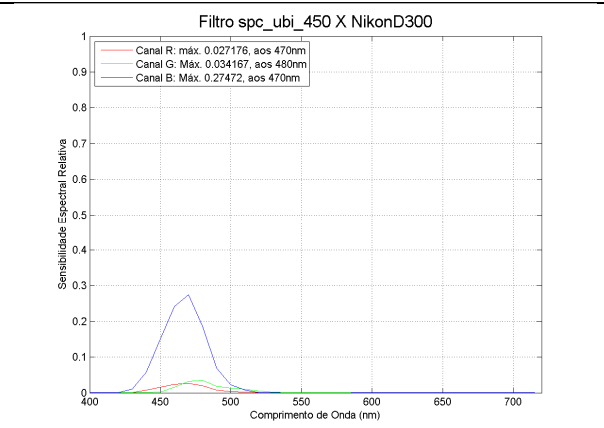
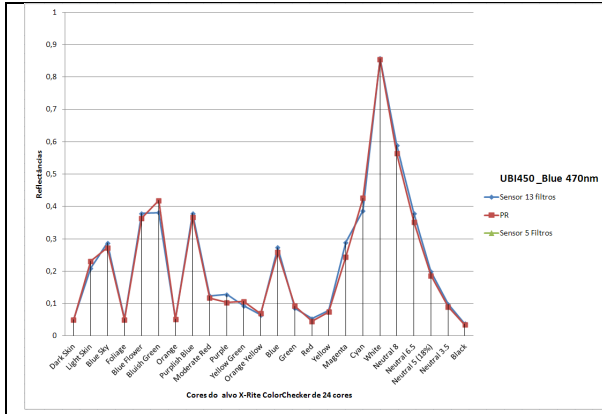


INTERPOLADOS

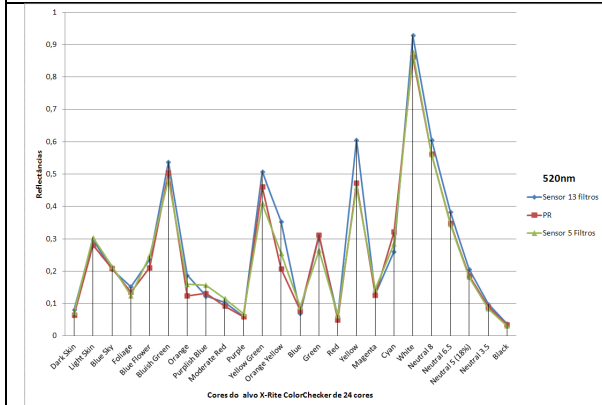
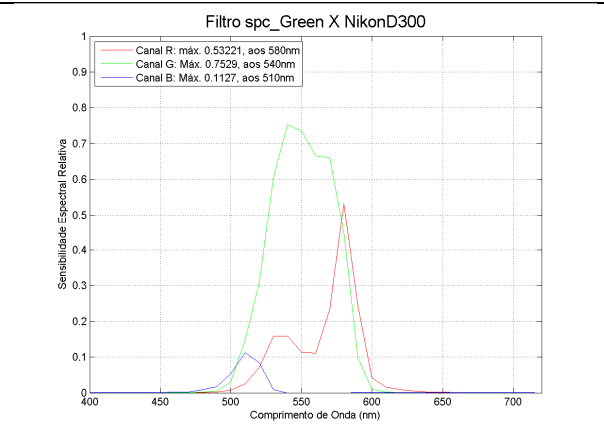
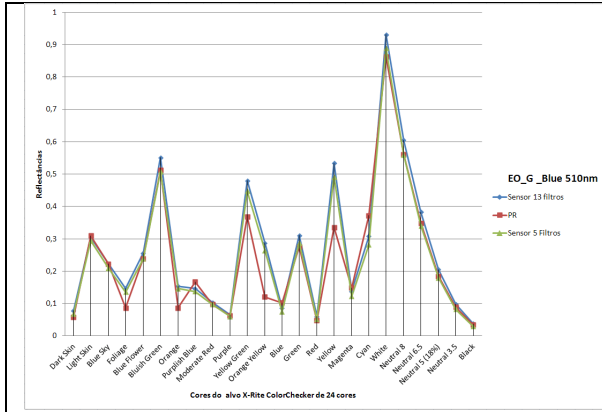


INTERPOLADOS

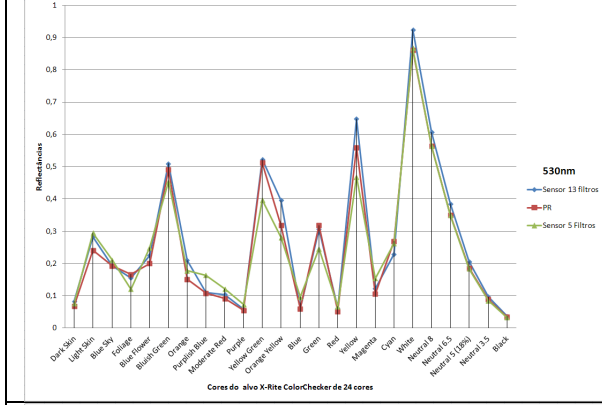
Apêndices



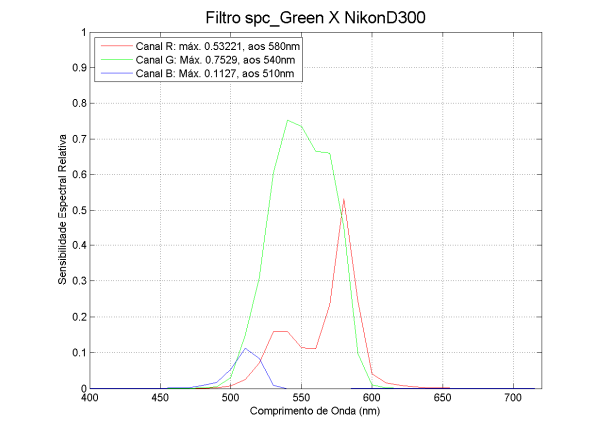
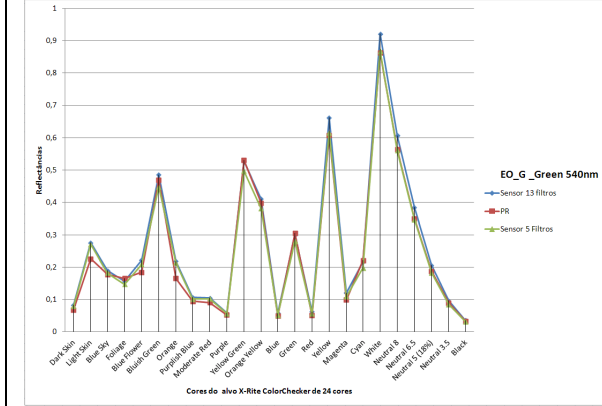
Apêndices



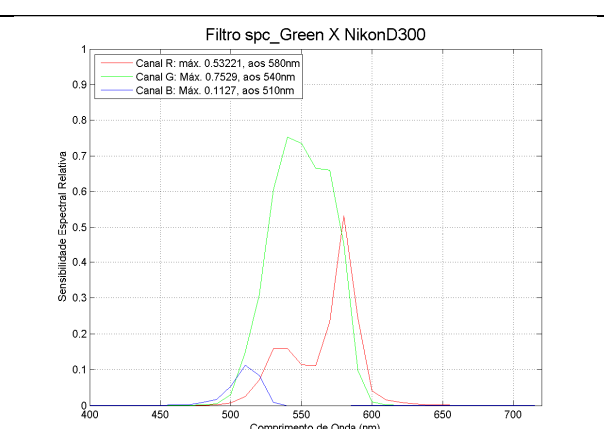
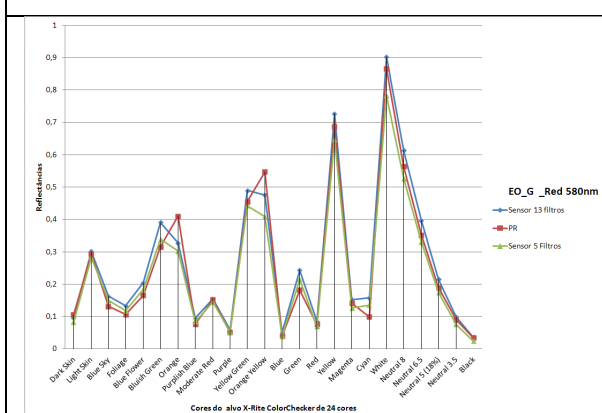
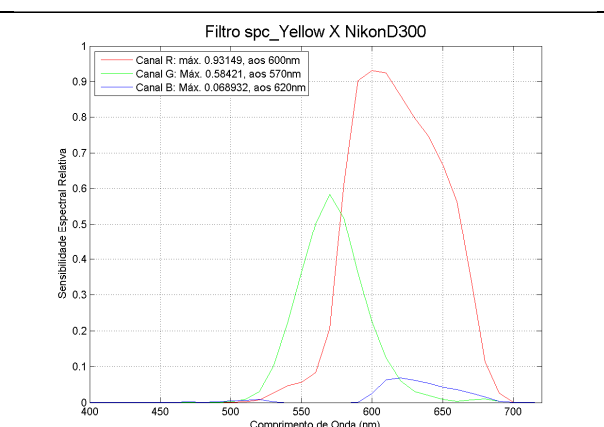
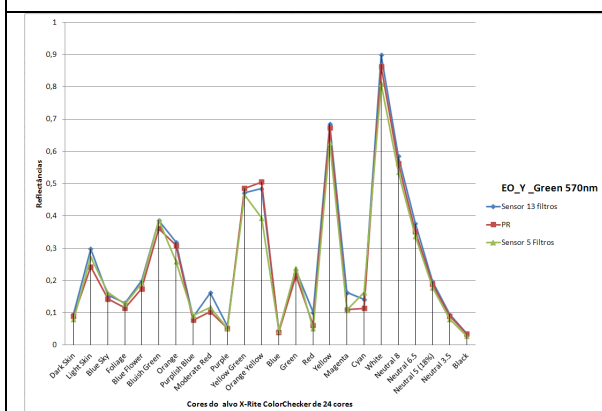
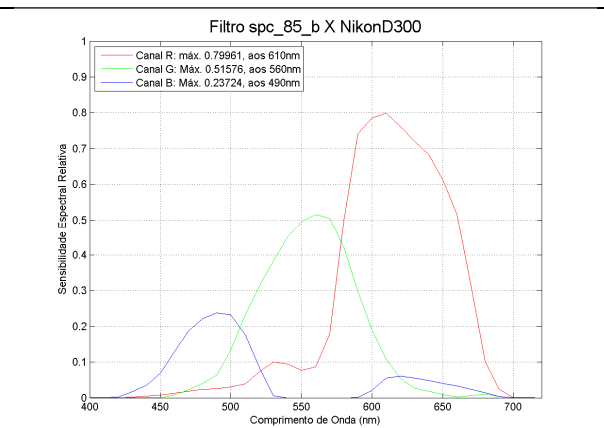
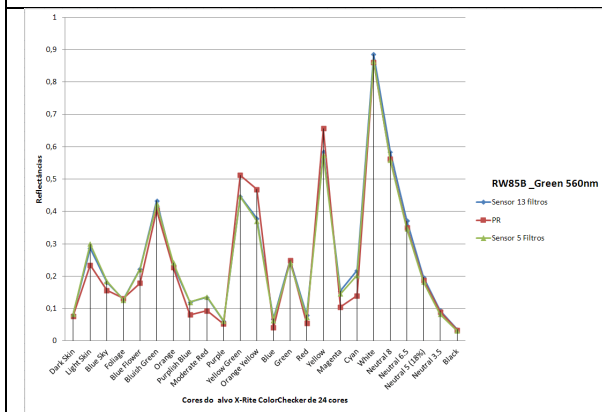
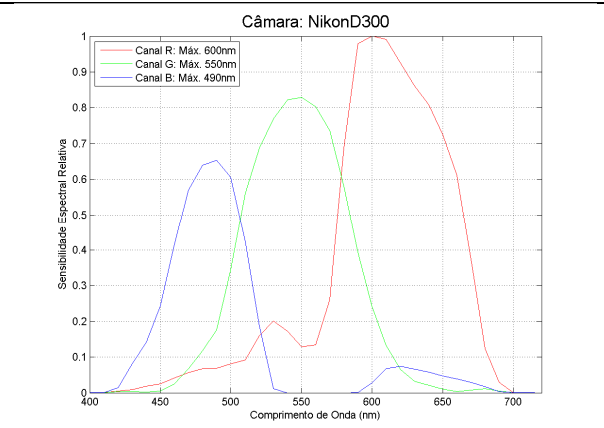
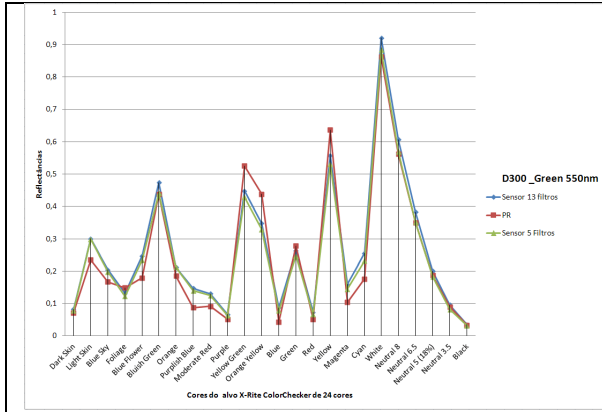
INTERPOLADOS



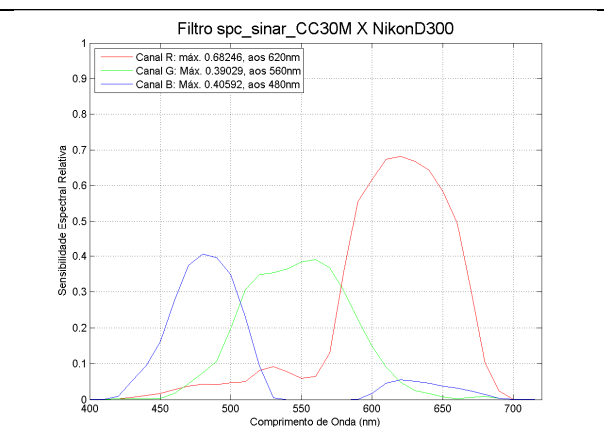
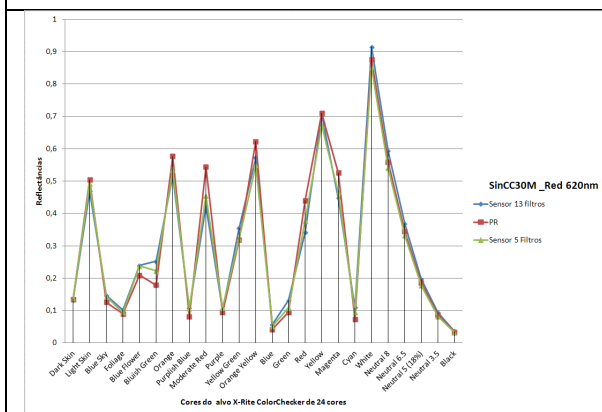
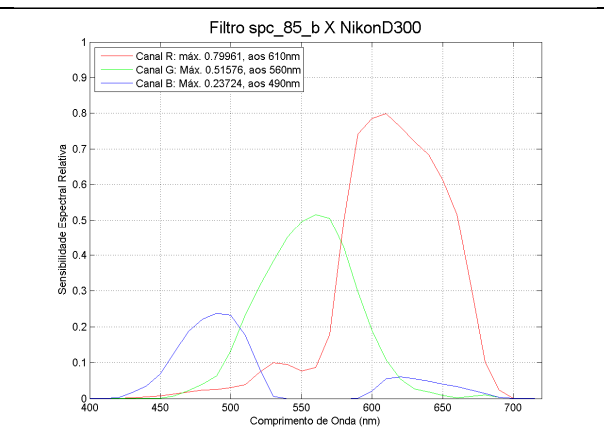
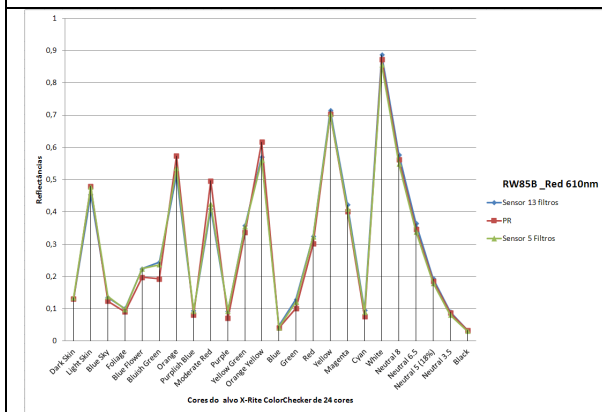
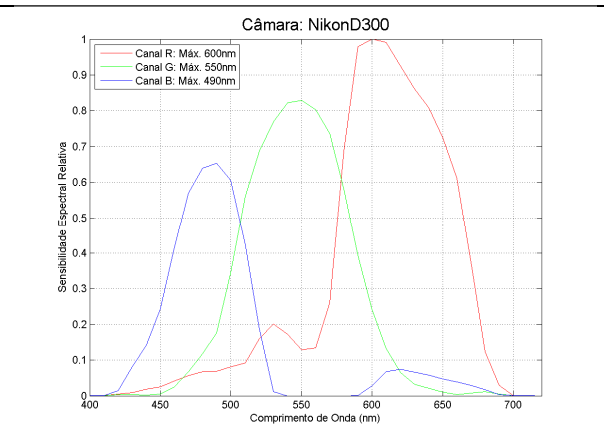
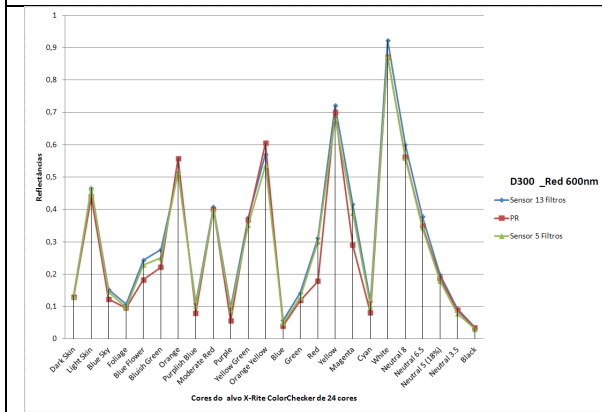
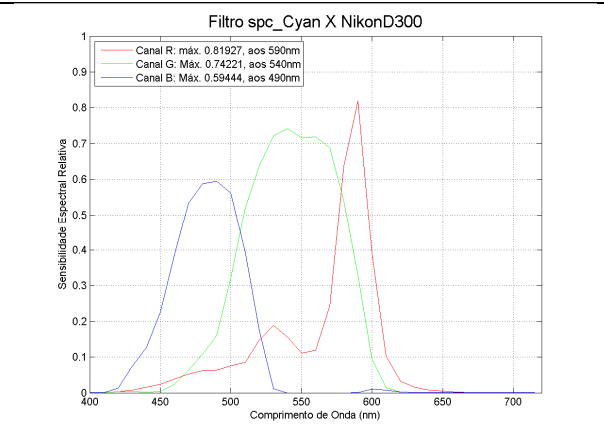
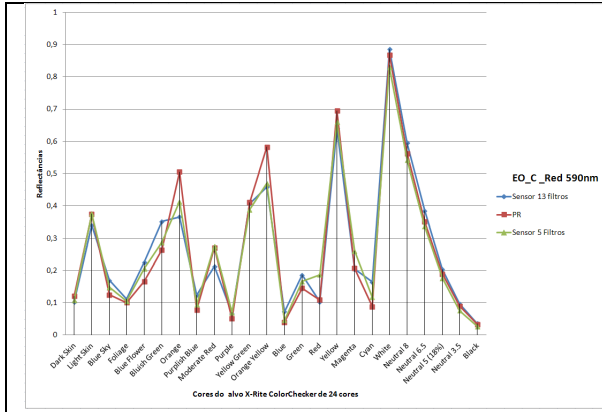
INTERPOLADOS



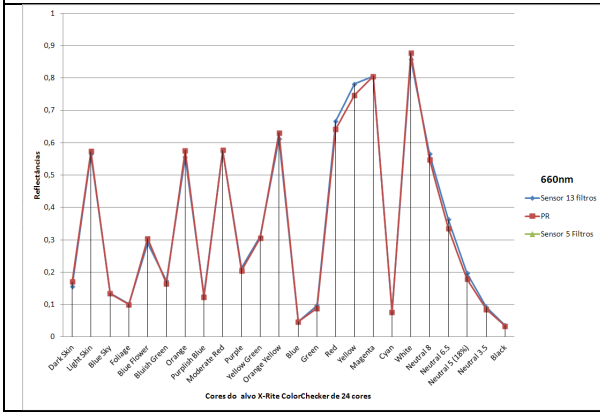
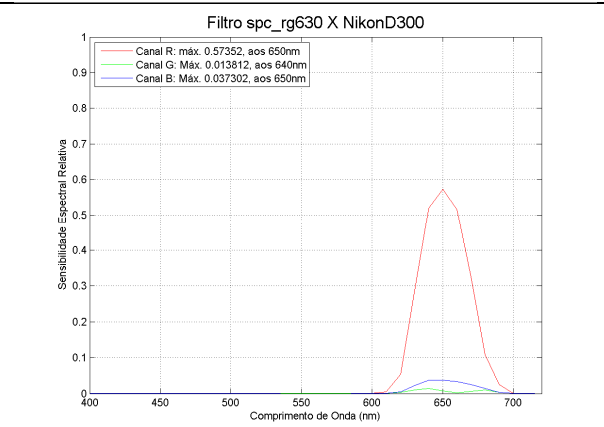
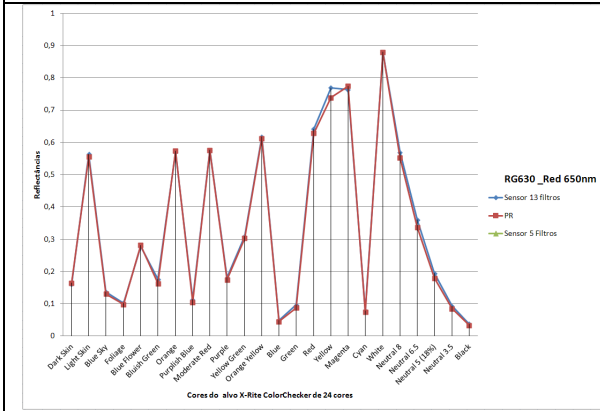
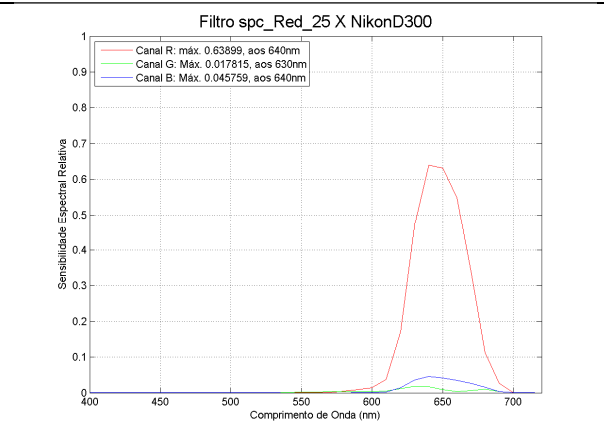
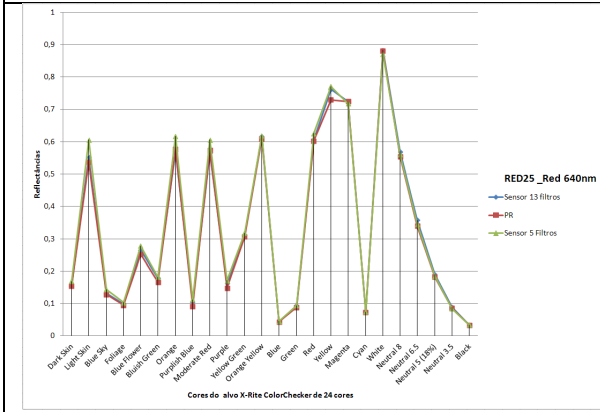
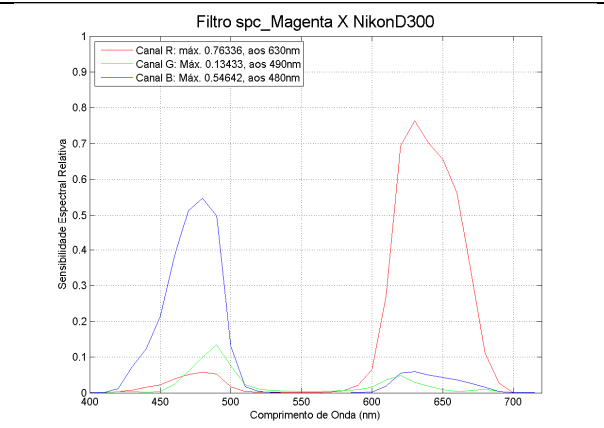
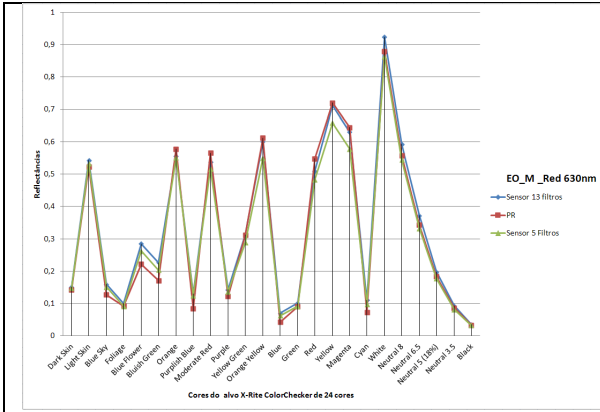
Apêndices



Apêndices

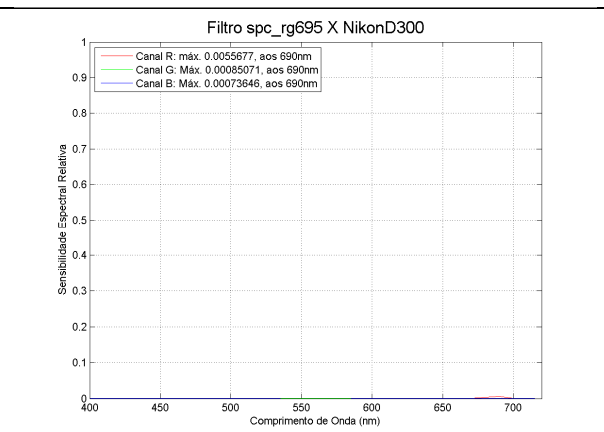
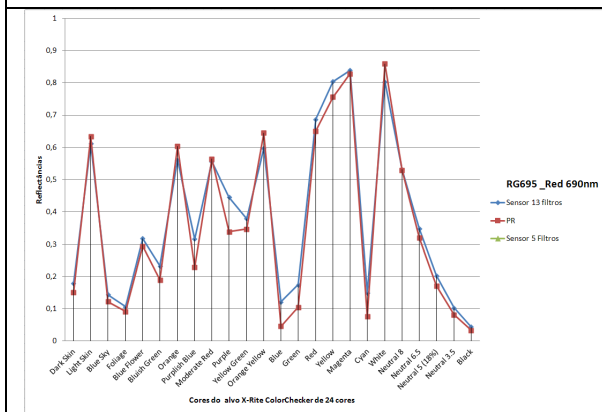
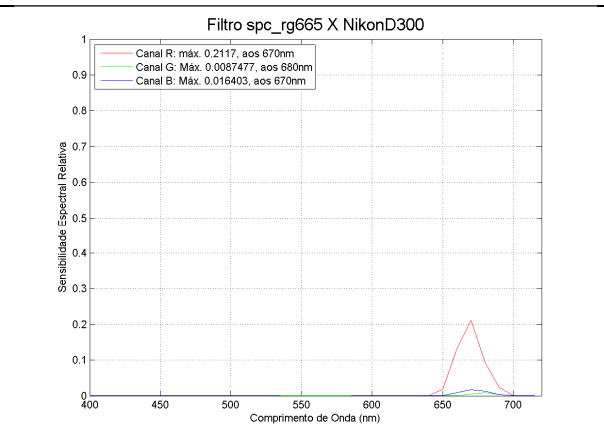
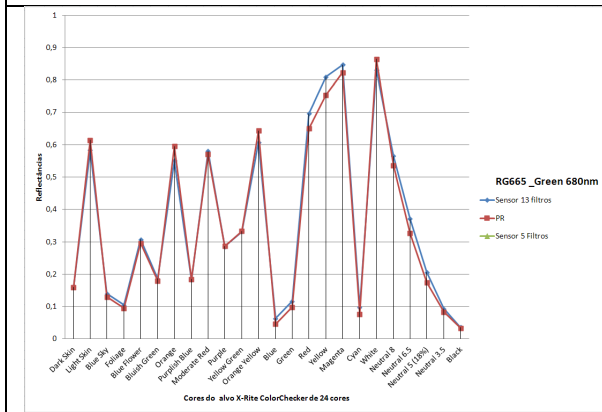
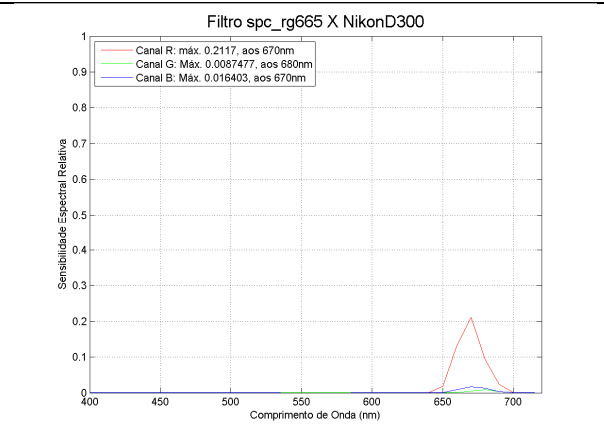
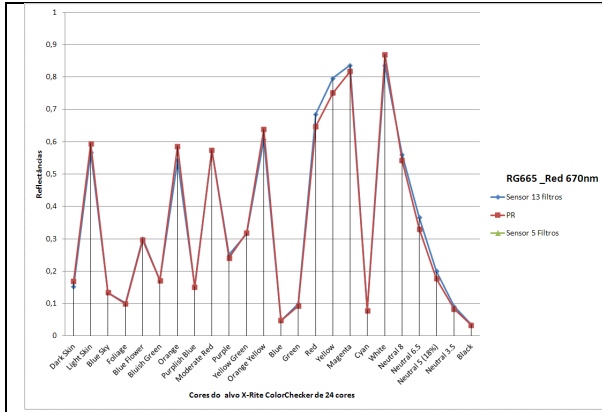


Apêndices



INTERPOLADOS

Apêndices

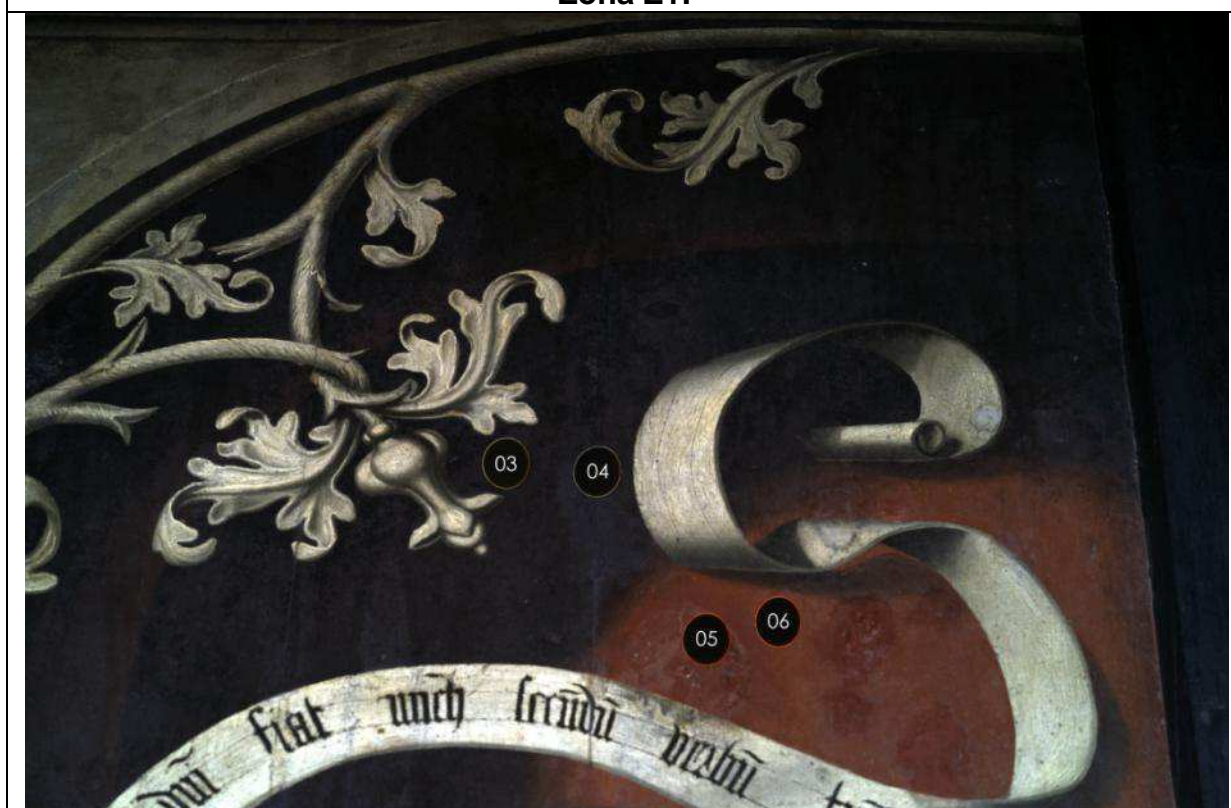


Apêndice K: Mapas de sinalização das áreas digitalizadas na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc. XVI)

Cada zona (Z1 a Z5) corresponde a uma região digitalizada com o sistema hiperespectral “Nikon D300+13 filtros”. Dentro de cada zona, assinalam-se com círculos e/ou elipses pretas (numeradas) as áreas que foram comparadas com as medições do sistema de referência (espetrorradiômetro *Photoresearch PR650*). Os círculos que assinalam as regiões resultam da sobreposição de fotografias tiradas pela ocular do espectrorradiômetro e correspondem, com precisão suficiente para a comparação, às áreas medidas por este equipamento. Posteriormente, nos ficheiros da digitalização hiperespectral em teste mediram-se as áreas correspondentes às das figuras, para que as diferenças entre medições do sistema testado e o de referência fossem possíveis de comparar.

N.º:	Ref.ª:	Nome da Cor:	Localização:
1	Z1-03	Castanho fundo - original	Aba esquerda, exterior
2	Z1-04	Castanho fundo - retoque	Idem
3	Z1-05	Vermelho fundo - retoque	Idem
4	Z1-06	Vermelho fundo - original	Idem
5	Z2-6A	Verde tunica - original	Painel central
6	Z2-7A	Verde tunica - repinte	Idem
7	Z3-19A	Vermelho robe - repinte	Idem
8	Z3-20A	Vermelho robe - original	Idem
9	Z3-100A	Castanho suporte - repinte	Idem
10	Z3-101A	Castanho suporte - original	Idem
11	Z4-3A	Ocre arco - repinte	Idem
12	Z4-4A	Ocre arco - original	Idem
13	Z5-23A	Azul céu - repinte	Aba direita, interior
14	Z5-24A	Azul céu - original	Idem

Zona Z1:



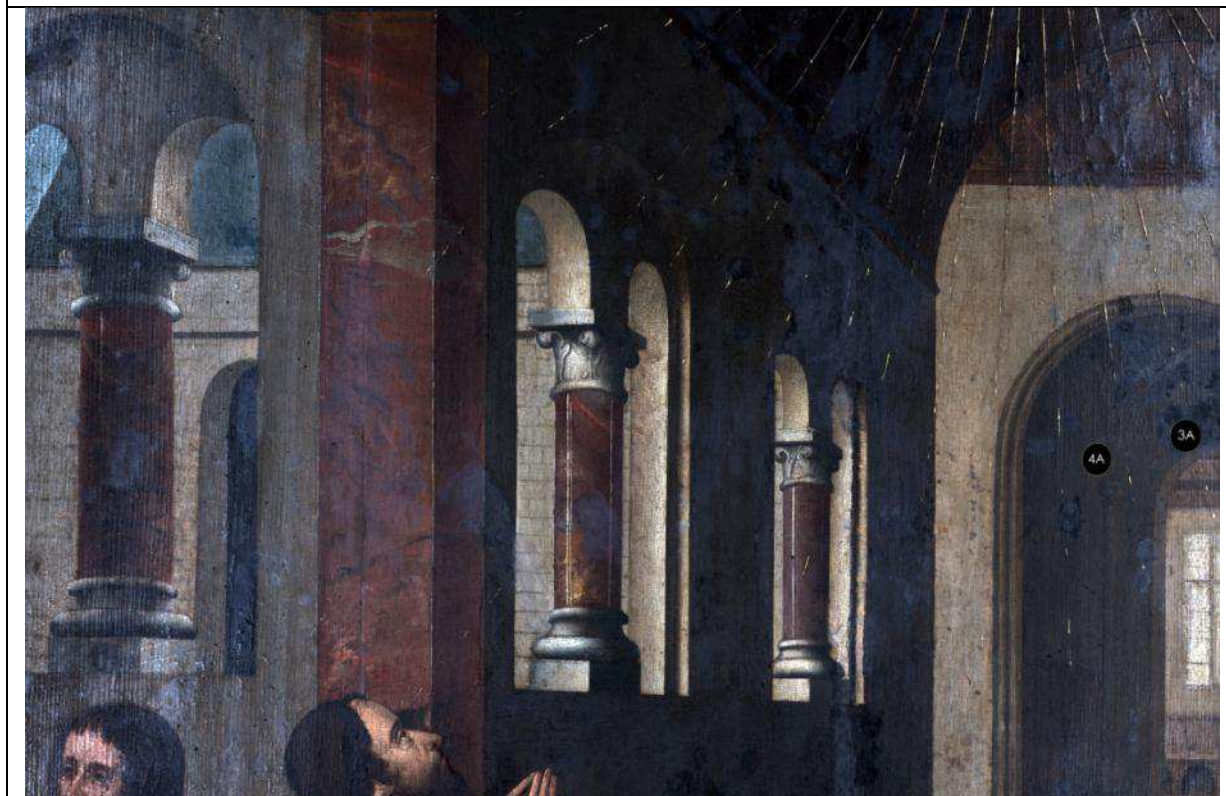
Zona Z2:



Zona Z3:



Zona Z4:



Zona Z5:



Apêndice L: Resultados das reflectâncias medidas na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc.XVI)

Tabela superior: medidas registadas (ver também Apêndice O) com o espetroradiómetro de referência *Spectrascan PR650* (33 bandas), nas 14 áreas analisados na pintura.

Tabela inferior: reflectâncias medidas (ver também Apêndice O) nas 14 áreas analisadas na pintura pelo sistema hiperespectral “D-SLR D300 + 13 filtros”. Mediram-se 22 bandas; os comprimentos de onda das 6 bandas ausentes (na linha de cabeçalho, células apenas com o comprimento de onda, sem referência ao filtro ou canal do sensor) foram interpolados (interpolação bicúbica), de que resultam o total de 28 bandas.

Abreviaturas dos filtros usados: D300, câmara sem filtros externos; EO_B, Edmund Optics Dichroic Blue; EO_C, Edmund Optics Dichroic Cyan; EO_G, Edmund Optics Dichroic Green; EO_M, Edmund Optics Dichroic Magenta; EO_Y, Edmund Optics Dichroic Yellow; RED25, Celestron Red 25; RG630, Schott RG630; RG665, Schott RG665; RG695, Schott RG695; RW85B, Rowi 85B; SinCC30M, Sinar CC30M; UBI400, Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=400\text{nm}$; UBI450, Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=450\text{nm}$.
_Red, _Green, _Blue: canais do sensor da câmara R, G e B, respetivamente.

As referências (“Ref.ª”) das 14 áreas analisadas correspondem às referências apresentadas no Apêndice anterior para as 5 zonas (Z1 a Z5) e suas respetivas áreas elípticas, assinaladas nas figuras.

Medidas do PR650		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Ref.ª	Nome da cor	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700	710	720
1	Z1-03 Castanho fundo - original	0,0126	0,0121	0,0127	0,0137	0,0132	0,0147	0,0152	0,0154	0,0155	0,0156	0,0159	0,0168	0,0167	0,0166	0,0170	0,0176	0,0182	0,0192	0,0203	0,0223	0,0241	0,0254	0,0268	0,0272	0,0278	0,0283	0,0294	0,0303	0,0308	0,0328	0,0341	0,0351	0,0370
2	Z1-04 Castanho fundo - retoque	0,0164	0,0176	0,0183	0,0189	0,0200	0,0194	0,0203	0,0200	0,0199	0,0205	0,0209	0,0208	0,0210	0,0211	0,0216	0,0218	0,0223	0,0230	0,0239	0,0248	0,0264	0,0267	0,0270	0,0268	0,0271	0,0274	0,0274	0,0268	0,0266	0,0277	0,0267	0,0270	0,0280
3	Z1-05 Vermelho fundo - retoque	0,0180	0,0194	0,0196	0,0211	0,0215	0,0221	0,0227	0,0244	0,0262	0,0274	0,0286	0,0294	0,0305	0,0321	0,0336	0,0364	0,0415	0,0527	0,0761	0,1101	0,1396	0,1622	0,1763	0,1858	0,1933	0,2015	0,2095	0,2180	0,2248	0,2335	0,2413	0,2479	0,2560
4	Z1-06 Vermelho fundo - original	0,0163	0,0169	0,0180	0,0182	0,0199	0,0213	0,0219	0,0230	0,0238	0,0249	0,0260	0,0280	0,0300	0,0323	0,0357	0,0397	0,0459	0,0590	0,0820	0,1194	0,1600	0,1909	0,2085	0,2198	0,2288	0,2358	0,2420	0,2483	0,2544	0,2621	0,2697	0,2751	0,2800
5	Z2-6A Verde tunica - original	0,0246	0,0254	0,0253	0,0253	0,0268	0,0272	0,0288	0,0300	0,0322	0,0353	0,0388	0,0429	0,0480	0,0529	0,0582	0,0626	0,0655	0,0668	0,0664	0,0648	0,0620	0,0589	0,0560	0,0528	0,0505	0,0487	0,0465	0,0457	0,0444	0,0439	0,0434	0,0433	0,0430
6	Z2-7A Verde tunica - repinte	0,0643	0,0653	0,0653	0,0656	0,0660	0,0670	0,0679	0,0690	0,0706	0,0724	0,0763	0,0806	0,0856	0,0910	0,0961	0,1001	0,1015	0,1002	0,0979	0,0958	0,0939	0,0921	0,0908	0,0905	0,0912	0,0930	0,0944	0,0974	0,1020	0,1084	0,1135	0,1166	0,1270
7	Z3-19A Vermelho robe - repinte	0,0769	0,0780	0,0807	0,0826	0,0848	0,0864	0,0860	0,0857	0,0851	0,0856	0,0851	0,0841	0,0841	0,0857	0,0888	0,0913	0,0949	0,1033	0,1199	0,1412	0,1647	0,1839	0,1991	0,2123	0,2257	0,2375	0,2476	0,2556	0,2635	0,2711	0,2769	0,2844	
8	Z3-20A Vermelho robe - original	0,0543	0,0581	0,0633	0,0672	0,0718	0,0765	0,0786	0,0808	0,0816	0,0824	0,0838	0,0852	0,0859	0,0884	0,0925	0,0974	0,1026	0,1126	0,1301	0,1550	0,1791	0,2002	0,2164	0,2292	0,2388	0,2454	0,2506	0,2554	0,2594	0,2639	0,2689	0,2731	0,2779
9	Z3-100A Castanho suporte - repinte	0,0583	0,0612	0,0630	0,0653	0,0681	0,0708	0,0723	0,0741	0,0752	0,0776	0,0806	0,0842	0,0874	0,0898	0,0925	0,0975	0,1038	0,1094	0,1139	0,1196	0,1248	0,1290	0,1299	0,1319	0,1389	0,1527	0,1691	0,1844	0,1941	0,2021	0,2088	0,2123	0,2168
10	Z3-101A Castanho suporte - original	0,0621	0,0626	0,0684	0,0711	0,0747	0,0791	0,0823	0,0849	0,0872	0,0904	0,0937	0,0980	0,1030	0,1081	0,1127	0,1180	0,1232	0,1303	0,1377	0,1469	0,1543	0,1608	0,1660	0,1708	0,1751	0,1788	0,1825	0,1855	0,1892	0,1928	0,1978	0,2018	0,2067
11	Z4-3A Ocre arco - repinte	0,0773	0,0773	0,0784	0,0789	0,0798	0,0806	0,0806	0,0809	0,0803	0,0811	0,0817	0,0825	0,0837	0,0837	0,0837	0,0847	0,0854	0,0863	0,0873	0,0888	0,0901	0,0910	0,0916	0,0921	0,0926	0,0935	0,0946	0,0954	0,0960	0,0970	0,0980	0,0984	0,0999
12	Z4-4A Ocre arco - original	0,0660	0,0661	0,0673	0,0686	0,0697	0,0710	0,0721	0,0732	0,0740	0,0753	0,0770	0,0787	0,0804	0,0822	0,0833	0,0853	0,0870	0,0887	0,0908	0,0932	0,0955	0,0974	0,0995	0,1013	0,1024	0,1039	0,1052	0,1059	0,1069	0,1083	0,1108	0,1126	0,1148
13	Z5-23A Azul céu - repinte	0,1624	0,1706	0,1802	0,1904	0,2056	0,2188	0,2291	0,2377	0,2466	0,2585	0,2731	0,2870	0,2992	0,3081	0,3133	0,3213	0,3271	0,3244	0,3210	0,3230	0,3260	0,3284	0,3285	0,3300	0,3407	0,3658	0,3942	0,4210	0,4446	0,4664	0,4823	0,4923	0,5084
14	Z5-24A Azul céu - original	0,1198	0,1300	0,1420	0,1516	0,1638	0,1778	0,1912	0,2035	0,2165	0,2277	0,2397	0,2489	0,2587	0,2656	0,2714	0,2775	0,2824	0,2871	0,2909	0,2951	0,2985	0,3016	0,3051	0,3084	0,3116	0,3160	0,3195	0,3245	0,3289	0,3325	0,3395	0,3439	0,3495

Medidas com a DSLR Nikon D300		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28					
Ref.ª	Nome da cor	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700	710	720
1	Z1-03 Castanho fundo - original	0,0130	0,0123	0,0126	0,0132	0,0137	0,0140	0,0123	0,0125	0,0144	0,0175	0,0174	0,0171	0,0166	0,0142	0,0167	0,0185	0,0204	0,0185	0,0208	0,0235	0,0234	0,0223	0,0278	0,0270	0,0288	0,0322	0,0357	0,0450					
2	Z1-04 Castanho fundo - retoque	0,0167	0,0164	0,0169	0,0180	0,0191	0,0196	0,0185	0,0202	0,0221	0,0265	0,0279	0,0288	0,0302	0,0341	0,0383	0,0497	0,0494	0,0536	0,0973	0,1039	0,1045	0,1086	0,1452	0,1452	0,1503	0,1586	0,1649	0,1840					
3	Z1-05 Vermelho fundo - retoque	0,0160	0,0144	0,0151	0,0166	0,0181	0,0188	0,0178	0,0193	0,0200	0,0272	0,0291	0,0302	0,0319	0,0368	0,0407	0,0544	0,0514	0,0572	0,1154	0,1170	0,1156	0,1238	0,1666	0,1667	0,1707	0,1774	0,1829	0,2056					
4	Z1-06 Vermelho fundo - original	0,0301	0,0293	0,0301	0,0318	0,0334	0,0342	0,0313	0,0357	0,0371	0,0572	0,0601	0,0617	0,0622	0,0554	0,0543	0,0687	0,0672	0,0615	0,0573	0,0550	0,0586	0,0550	0,0513	0,0515	0,0511	0,0506	0,0505	0,0635					
5	Z2-6A Verde tunica - original	0,0629	0,0661	0,0668	0,0673	0,0676	0,0677	0,0606	0,0634	0,0645	0,0865	0,0889	0,0902	0,0906	0,0872	0,0815	0,0979	0,0891	0,0842	0,0863	0,0814	0,0873	0,0881	0,0828	0,0837	0,0819	0,0801	0,0811	0,1105					
6	Z2-7A Verde tunica - repinte	0,0708	0,0660	0,0668	0,0694	0,0736	0,0796	0,1011	0,1013	0,0933	0,1081	0,1061	0,1022	0,1002	0,1085	0,0984	0,1209	0,0964	0,1112	0,1712	0,1530	0,1556	0,2191	0,2278	0,2377	0,2096	0,1815	0,1957	0,2044					
7	Z3-19A Vermelho robe - repinte	0,0731	0,0678	0,0701	0,0757	0,0827	0,0893	0,0954	0,1048	0,0952	0,1136	0,1134	0,1130	0,1128	0,1293	0,1237	0,1459	0,1220	0,1369	0,1979	0,2017	0,1969	0,2333	0,2437	0,2498	0,2348	0,2198	0,2366	0,2371					
8	Z3-20A Vermelho robe - original	0,0841	0,0884	0,0872	0,0846	0,0820	0,0808	0,0923	0,0969	0,0915	0,1177	0,1173	0,1167	0,1163	0,1203	0,1141	0,1366	0,1135	0,1191	0,1461	0,1378	0,1347	0,1625	0,1593	0,1610	0,1514	0,1417	0,1524	0,1721					
9	Z3-100A Castanho suporte - repinte	0,0930	0,0985	0,0980	0,0968	0,0956	0,0951	0,1118	0,1189	0,1120	0,1431	0,1428	0,1424	0,1421	0,1480	0,1338	0,1651	0,1362	0,1451	0,1794	0,1646	0,1597	0,1993	0,1923	0,1928	0,1681	0,1433	0,1564	0,1714					
10	Z3-101A Castanho suporte - original	0,0965	0,0909	0,0852	0,0793	0,0747	0,0728	0,0740	0,0773	0,0719	0,0846	0,0839	0,0826	0,0819	0,0820	0,0811	0,0874	0,0740	0,0749	0,0843	0,0841	0,0893	0,0806	0,0788	0,0714	0,0627	0,0587	0,0705						
11	Z4-3A Ocre arco - repinte	0,0867	0,0840	0,0801	0,0753	0,0713	0,0696	0,0713	0,0752	0,0716	0,0851	0,0849	0,0847	0,0845	0,0870	0,0844	0,0916	0,0806	0,0827	0,0936	0,0932	0,1009	0,0998	0,0950	0,0934	0,0865	0,0792	0,0768	0,0949					
12	Z4-4A Ocre arco - original	0,1523	0,1532	0,1579	0,1674	0,1788	0,1893	0,1986	0,2331	0,2313	0,2812	0,2838	0,2847	0,2871	0,3069	0,2734	0,3015	0,2927	0,2795	0,3146	0,2925	0,2833	0,3092	0,3504	0,3294	0,3398	0,3546	0,3618	0,7678					
13	Z5-23A Azul céu - repinte	0,1249	0,1257	0,1318	0,1442	0,1578	0,1673	0,1718	0,2053	0,2130	0,2566	0,2590	0,2599	0,2622	0,2831	0,2557	0,2834	0,2792	0,2714	0,3011	0,2837	0,2734	0,2940	0,3266	0,3038	0,2993	0,2977	0,3017	0,6061					
14	Z5-24A Azul céu - original																																	

Apêndice M: Diferenças de cor e espectrais medidas na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc.XVI)

Diferenças de cor e espectrais entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectrorradiômetro de referência, para o conjunto das 14 áreas analisadas na pintura. As referências das áreas correspondem às descritas no Apêndice K.

<i>Refer.^a da área</i>	ΔE_{ab}^*	ΔE_{94}^*	ΔE_{00}	<i>GFC</i>	<i>RMSE</i>
Z1-03	1,1105	1,0531	1,1449	0,9888	0,0033
Z1-04	1,3150	1,2807	1,0180	0,9938	0,0028
Z1-05	9,7991	6,1863	5,2748	0,9937	0,0380
Z1-06	11,2613	6,7513	5,7790	0,9926	0,0461
Z2-6A	2,4974	1,8147	2,2364	0,9920	0,0069
Z2-7A	2,1577	1,8706	1,7331	0,9968	0,0095
Z3-19A	9,1478	7,5089	8,7681	0,9847	0,0268
Z3-20A	7,1768	5,6029	6,5952	0,9929	0,0193
Z3-100A	4,5200	4,0664	4,7976	0,9843	0,0227
Z3-101A	5,9536	5,1172	6,4499	0,9866	0,0256
Z4-3A	2,1894	2,1451	2,0891	0,9896	0,0140
Z4-4A	2,4931	2,1711	2,1153	0,9926	0,0113
Z5-23A	5,2322	3,5425	3,5522	0,9756	0,0706
Z5-24A	5,2011	2,8902	3,1579	0,9782	0,0574
<i>Média:</i>	5,0039	3,7144	3,9080	0,9887	0,0253
<i>Desvio padrão (\pm):</i>	3,3125	2,1654	2,3888	0,0062	0,0208
<i>Máximo:</i>	11,2613	7,5089	8,7681	0,9968	0,0706
<i>Mínimo:</i>	1,1105	1,0531	1,0180	0,9756	0,0028

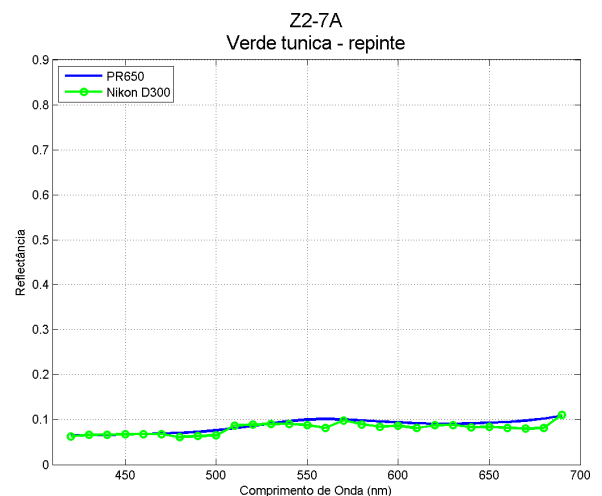
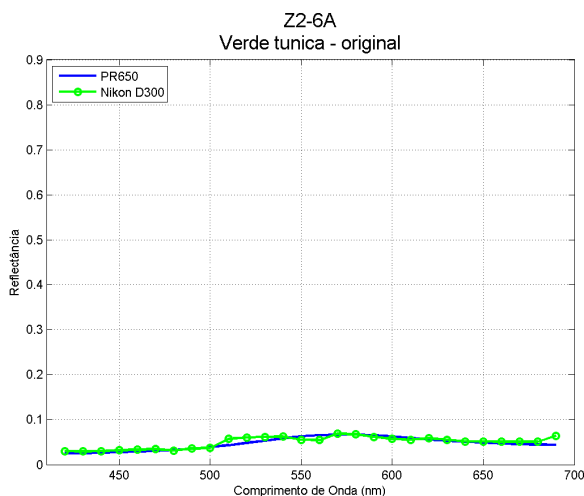
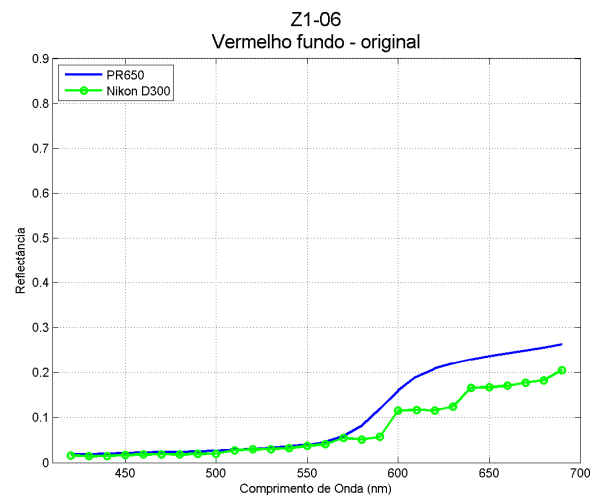
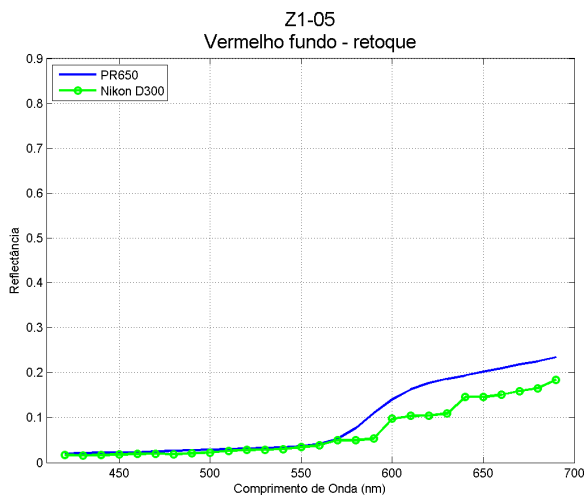
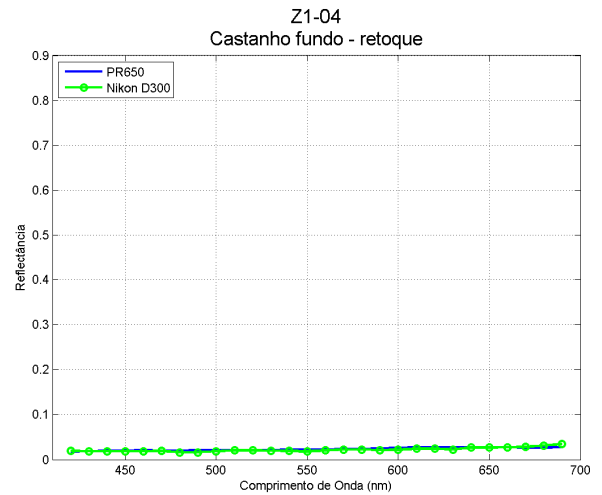
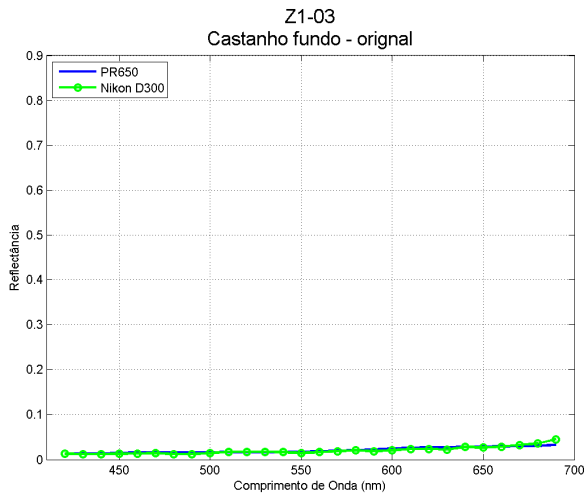
Apêndice N: Índices de metamerismo medidos na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc.XVI)

Índices de metamerismo entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectrorradiômetro de referência, para o conjunto das 14 áreas analisadas na pintura. As referências das áreas correspondem às descritas no Apêndice K..

<i>Refer.^a da área</i>	ΔE_{ab}^*		ΔE_{00}	
	(D65, A)	(D65, F2)	(D65, A)	(D65, F2)
Z1-03	0,3349	0,0910	0,3903	0,0696
Z1-04	0,3701	0,2064	0,4774	0,2594
Z1-05	3,5129	2,6047	2,4197	2,0333
Z1-06	3,9437	2,7371	2,6477	2,1032
Z2-6A	0,5875	0,8077	0,7226	0,7471
Z2-7A	0,3198	0,4198	0,3897	0,4891
Z3-19A	0,2475	0,4111	0,1980	0,2930
Z3-20A	0,1183	0,1849	0,0571	0,1786
Z3-100A	0,5237	1,5933	0,5436	1,3932
Z3-101A	0,5349	1,5938	0,5316	1,3460
Z4-3A	0,8978	0,6413	1,2538	0,6033
Z4-4A	0,5905	0,8438	0,7627	0,7283
Z5-23A	0,4664	0,2504	0,5094	0,1911
Z5-24A	0,4274	0,2374	0,3684	0,2600
<i>Média:</i>	0,9197	0,9016	0,8051	0,7639
<i>Desvio padrão (\pm):</i>	1,2070	0,8901	0,7851	0,6864
<i>Máximo:</i>	3,9437	2,7371	2,6477	2,1032
<i>Mínimo:</i>	0,1183	0,0910	0,0571	0,0696

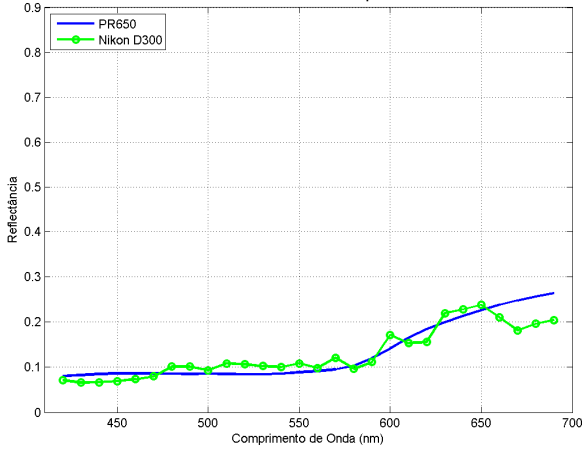
Apêndice O: Gráficos de reflectâncias espectrais medidas na pintura artística “Tríptico de Miragaia” (séc.XVI)

Gráficos representativos das reflectâncias espectrais relativas, para o conjunto de 14 áreas amostradas da pintura, medidas com o espectroradiômetro de referência (Photoresearch PR650) e estimadas com o sistema hiperespectral “Nikon D300+13 filtros”. As áreas amostradas estão referenciadas nas imagens do Apêndice K.

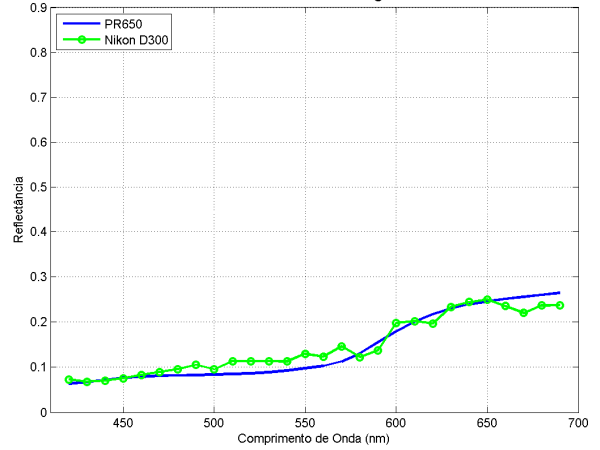


Apêndices

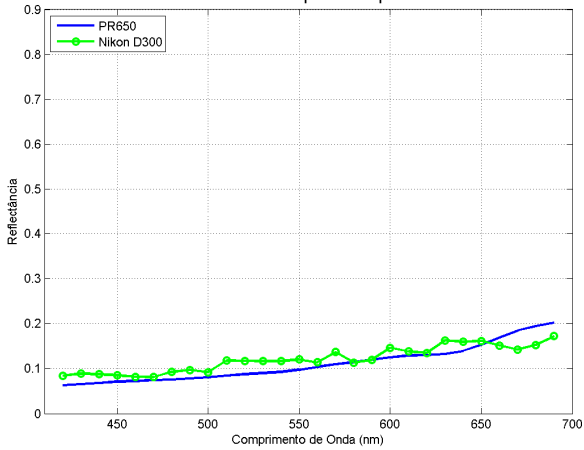
Z3-19A
Vermelho robe - repinte



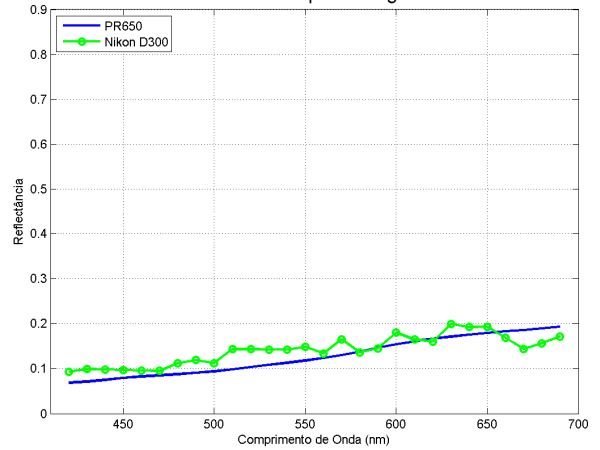
Z3-20A
Vermelho robe - original



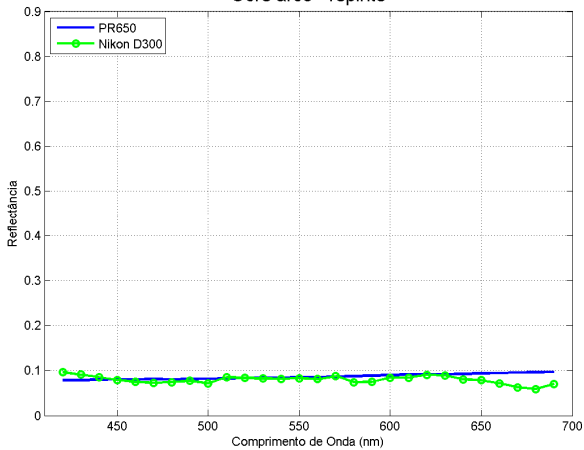
Z3-100A
Castanho suporte - repinte



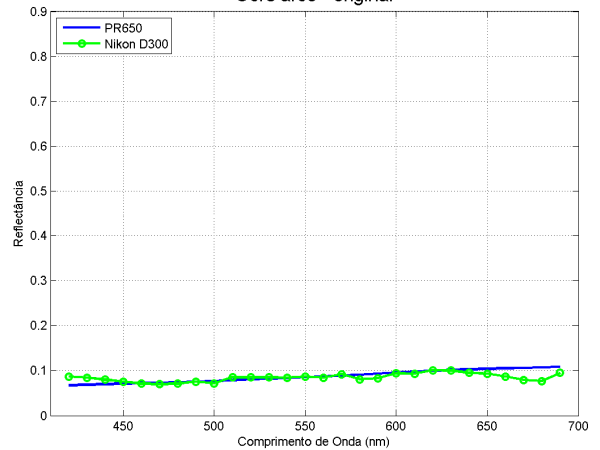
Z3-101A
Castanho suporte - original



Z4-3A
Ocre arco - repinte

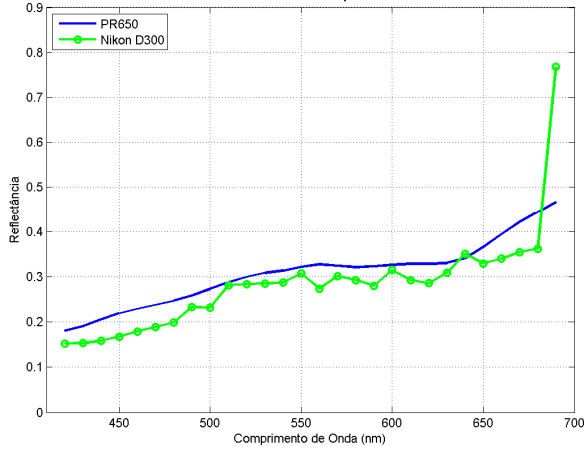


Z4-4A
Ocre arco - original

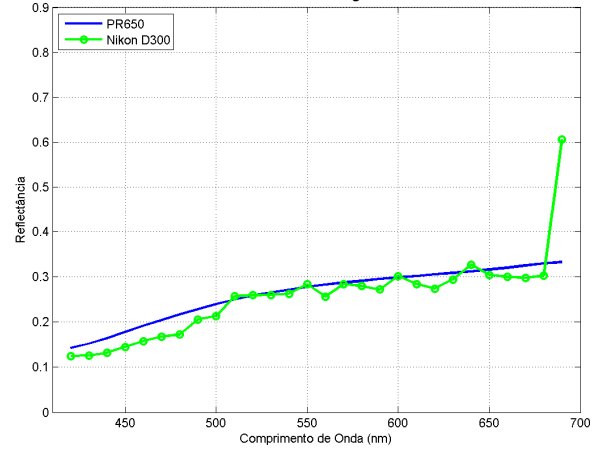


Apêndices

Z5-23A
Azul céu - repinte



Z5-24A
Azul céu - original



Apêndice P: Mapas de sinalização das áreas digitalizadas na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX)

Mapas da área total digitalizada com o sistema hiperespectral “Nikon D300+13 filtros”. Dentro deste, assinalam-se com círculos/elipses pretas (numeradas) as áreas que foram comparadas com as medições do sistema de referência (espetrorradiómetro *Photoresearch PR650*). Os círculos que assinalam as regiões resultam da sobreposição de fotografias tiradas pela ocular do espetrorradiómetro e correspondem, com precisão suficiente para a comparação, às áreas medidas por este equipamento, sobre estas regiões. Posteriormente, nos ficheiros da digitalização hiperespectral em teste mediram-se as áreas correspondentes às das figuras, para que as diferenças entre medições do sistema testado e o de referência fossem possíveis de comparar.

P.1- Digitalização com fonte de luz indireta, difusa (5 áreas amostradas):

N.º:	Ref.ª:	Nome da Cor:
1	02	Verde - fundo
2	05	Vermelho
3	06	Carnação
4	07	Amarelo
5	13	Laranja - pá



P.2- Digitalização com fonte de luz direta (11 áreas amostradas):

N.º:	Ref.ª:	Nome da Cor:
1	01	Azul - fundo
2	02	Verde - fundo
3	03	Verde - repinte
4	05	Vermelho
5	06	Carnação
6	07	Amarelo
7	08	Castanho - chapéu
8	09	Castanho - chapéu
9	10	Castanho - chapéu
10	11	Castanho - fundo
11	13	Castanho - fundo

Mapa das áreas medidas:



Apêndice Q: Resultados das reflectâncias medidas na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX)

Tabela superior: medidas registadas (ver também Apêndice T) com o espectroradiómetro de referência *Spectrascan PR650* (33 bandas), nas áreas analisadas na pintura.

Tabela inferior: reflectâncias medidas (ver também Apêndice T) nas áreas analisadas na pintura pelo sistema hiperespectral “D-SLR D300 + 13 filtros”. Mediram-se 22 bandas; os comprimentos de onda das 6 bandas ausentes (na linha de cabeçalho, células apenas com o comprimento de onda, sem referência ao filtro ou canal do sensor) foram interpolados (interpolação bicúbica), de que resultam o total de 28 bandas.

Abreviaturas dos filtros usados: D300, câmara sem filtros externos; EO_B, Edmund Optics Dichroic Blue; EO_C, Edmund Optics Dichroic Cyan; EO_G, Edmund Optics Dichroic Green; EO_M, Edmund Optics Dichroic Magenta; EO_Y, Edmund Optics Dichroic Yellow; RED25, Celestron Red 25; RG630, Schott RG630; RG665, Schott RG665; RG695, Schott RG695; RW85B, Rowi 85B; SinCC30M, Sinar CC30M; UBI400, Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=400\text{nm}$; UBI450, Melles Griot F - Bandpass Interference Filters $\lambda=450\text{nm}$.

_Red, _Green, _Blue: canais do sensor da câmara R, G e B, respetivamente.

As referências (“Ref.^a”) das áreas analisadas correspondem às referências apresentadas no Apêndice anterior para as respetivas áreas elípticas, assinaladas nas figuras.

Q.1- Digitalização com fonte de luz indireta, difusa (5 áreas amostradas):

		Medidas do PR650																																	
Ref. ^a	Nome da cor	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700	710	720	
1	02	Verde - fundo	0,0154	0,0529	0,0674	0,0699	0,0696	0,0737	0,0819	0,0924	0,1094	0,1366	0,1628	0,1750	0,1801	0,1724	0,1613	0,1546	0,1431	0,1352	0,1239	0,1232	0,1183	0,1129	0,1153	0,1158	0,1178	0,1253	0,1314	0,1436	0,1580	0,1783	0,1959	0,2153	0,2412
2	05	Vermelho	0,0039	0,0188	0,0302	0,0348	0,0314	0,0359	0,0343	0,0345	0,0398	0,0390	0,0410	0,0397	0,0405	0,0471	0,0458	0,0488	0,0478	0,0599	0,0854	0,1227	0,1553	0,1765	0,1924	0,2048	0,2142	0,2194	0,2272	0,2378	0,2507	0,2506	0,2688	0,2841	0,2996
3	06	Camação	0,0194	0,0500	0,0563	0,0570	0,0514	0,0708	0,0720	0,0702	0,0788	0,0735	0,0805	0,0808	0,0828	0,0814	0,0846	0,0860	0,0906	0,0931	0,1008	0,1123	0,1214	0,1397	0,1527	0,1632	0,1764	0,1914	0,1967	0,2031	0,2155	0,2275	0,2316	0,2515	0,2622
4	07	Amarelo	0,0116	0,0227	0,0236	0,0357	0,0393	0,0329	0,0367	0,0434	0,0657	0,1083	0,1583	0,2078	0,2426	0,2571	0,2667	0,2782	0,2823	0,2908	0,2982	0,3066	0,3085	0,3140	0,3195	0,3238	0,3296	0,3317	0,3379	0,3438	0,3555	0,3574	0,3627	0,3746	0,3983
5	13	Laranja - pá	0,0039	0,0090	0,0170	0,0172	0,0189	0,0277	0,0198	0,0234	0,0365	0,0466	0,0547	0,0675	0,0777	0,0752	0,0826	0,0833	0,0891	0,0982	0,1126	0,1359	0,1586	0,1765	0,1917	0,2003	0,2050	0,2093	0,2174	0,2189	0,2223	0,2288	0,2384	0,2427	0,2403

		Medidas com a DSLR Nikon D300																																
Ref. ^a	Nome da cor	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700	710	720
1	02	Verde - fundo	0,1021	0,1218	0,1190	0,1126	0,1054	0,1002	0,0976	0,1192	0,1390	0,1883	0,1866	0,1822	0,1758	0,1618	0,1608	0,1532	0,1516	0,1332	0,1333	0,1296	0,1420	0,1307	0,1341	0,1339	0,1371	0,1448	0,1646	0,2460				
2	05	Vermelho	0,0873	0,0989	0,0957	0,0886	0,0814	0,0782	0,0782	0,0889	0,1011	0,1318	0,1308	0,1283	0,1248	0,1178	0,1215	0,1305	0,1295	0,1248	0,1623	0,1651	0,1743	0,1797	0,2000	0,2045	0,2131	0,2234	0,2327	0,3038				
3	06	Camação	0,1008	0,1151	0,1141	0,1114	0,1073	0,1022	0,0915	0,1019	0,1146	0,1398	0,1385	0,1353	0,1314	0,1257	0,1285	0,1319	0,1302	0,1232	0,1510	0,1532	0,1575	0,1669	0,1871	0,1926	0,2032	0,2150	0,2236	0,2875				
4	07	Amarelo	0,0788	0,0882	0,0866	0,0832	0,0798	0,0782	0,0786	0,1267	0,1400	0,2849	0,2886	0,2905	0,2910	0,2614	0,2735	0,2987	0,3036	0,2654	0,3034	0,3117	0,3140	0,3082	0,3321	0,3344	0,3417	0,3518	0,3612	0,4245				
5	13	Laranja - pá	0,0659	0,0735	0,0725	0,0705	0,0684	0,0674	0,0681	0,0840	0,0986	0,1602	0,1599	0,1590	0,1574	0,1449	0,1536	0,1735	0,1761	0,1671	0,2093	0,2158	0,2234	0,2342	0,2575	0,2619	0,2738	0,2855	0,2894	0,3458				

Apêndices

Q.2- Digitalização com fonte de luz direta (11 áreas amostradas):

Medidas do PR650		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
Ref.ª	Nome da cor	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700	710	720	
1	01	Azul - fundo	0,1876	0,2452	0,2735	0,2969	0,3148	0,3291	0,3341	0,3254	0,3029	0,2708	0,2347	0,2011	0,1763	0,1552	0,1404	0,1317	0,1243	0,1205	0,1165	0,1140	0,1133	0,1137	0,1145	0,1174	0,1203	0,1290	0,1360	0,1507	0,1697	0,1979	0,2315	0,2687	0,3163
2	02	Verde - fundo	0,1292	0,1445	0,1434	0,1415	0,1438	0,1639	0,1889	0,2146	0,2430	0,2723	0,3037	0,3166	0,3097	0,2817	0,2467	0,2078	0,1781	0,1506	0,1316	0,1178	0,1087	0,1037	0,1010	0,1015	0,1065	0,1180	0,1278	0,1422	0,1681	0,2016	0,2252	0,2497	0,3173
3	03	Verde - repinte	0,0551	0,0618	0,0675	0,0676	0,0710	0,0757	0,0818	0,0889	0,0972	0,1069	0,1192	0,1217	0,1183	0,1105	0,1006	0,0925	0,0857	0,0784	0,0705	0,0660	0,0611	0,0587	0,0562	0,0557	0,0551	0,0553	0,0560	0,0593	0,0594	0,0637	0,0680	0,0676	0,0672
4	05	Vermelho	0,0552	0,0574	0,0641	0,0638	0,0661	0,0662	0,0720	0,0718	0,0699	0,0713	0,0715	0,0730	0,0752	0,0768	0,0783	0,0810	0,0850	0,0979	0,1296	0,1768	0,2196	0,2490	0,2707	0,2848	0,2986	0,3111	0,3237	0,3355	0,3467	0,3603	0,3702	0,3792	0,3903
5	06	Castanho	0,0890	0,1174	0,1290	0,1421	0,1508	0,1579	0,1633	0,1669	0,1704	0,1704	0,1713	0,1711	0,1707	0,1758	0,1814	0,1868	0,1893	0,1964	0,2116	0,2348	0,2626	0,2916	0,3209	0,3485	0,3698	0,3892	0,4053	0,4165	0,4305	0,4425	0,4541	0,4627	0,4721
6	07	Amarelo	0,0607	0,0550	0,0588	0,0651	0,0632	0,0658	0,0707	0,0828	0,1234	0,2000	0,2913	0,3803	0,4459	0,4799	0,5008	0,5166	0,5319	0,5435	0,5559	0,5663	0,5769	0,5861	0,5943	0,6022	0,6096	0,6191	0,6285	0,6361	0,6446	0,6527	0,6615	0,6682	0,6752
7	08	Castanho - chapéu	0,0588	0,0642	0,0692	0,0712	0,0668	0,0697	0,0732	0,0725	0,0737	0,0744	0,0762	0,0776	0,0803	0,0814	0,0851	0,0896	0,0954	0,1068	0,1208	0,1365	0,1507	0,1605	0,1667	0,1732	0,1770	0,1819	0,1850	0,1910	0,1967	0,2028	0,2084	0,2144	0,2169
8	09	Castanho - chapéu	0,0881	0,0909	0,0920	0,0953	0,0974	0,0999	0,1009	0,1010	0,1013	0,1040	0,1061	0,1100	0,1153	0,1209	0,1292	0,1401	0,1564	0,1806	0,2128	0,2475	0,2751	0,2944	0,3091	0,3159	0,3239	0,3320	0,3422	0,3527	0,3682	0,3801	0,3956	0,4118	0,4271
9	10	Castanho - chapéu	0,0630	0,0644	0,0749	0,0695	0,0747	0,0786	0,0794	0,0786	0,0797	0,0804	0,0823	0,0846	0,0834	0,0840	0,0859	0,0867	0,0881	0,0899	0,0926	0,0964	0,0972	0,0979	0,0997	0,1011	0,1018	0,1037	0,1044	0,1089	0,1082	0,1128	0,1152	0,1164	0,1190
10	11	Castanho - fundo	0,0264	0,0336	0,0345	0,0373	0,0370	0,0331	0,0363	0,0364	0,0362	0,0361	0,0388	0,0389	0,0392	0,0408	0,0418	0,0451	0,0509	0,0621	0,0805	0,1045	0,1279	0,1483	0,1588	0,1651	0,1724	0,1828	0,1951	0,2065	0,2224	0,2325	0,2429	0,2544	0,2664
11	13	Castanho - fundo	0,0399	0,0539	0,0514	0,0525	0,0589	0,0554	0,0589	0,0621	0,0621	0,0606	0,0612	0,0613	0,0621	0,0626	0,0625	0,0628	0,0635	0,0640	0,0647	0,0652	0,0670	0,0681	0,0684	0,0705	0,0715	0,0723	0,0754	0,0765	0,0807	0,0836	0,0857	0,0909	0,0996

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22						
UBI400_Red_420nm	UBI400_Blue_430nm	UBI400_Red_440nm	UBI400_Blue_450nm	UBI400_Red_460nm	UBI450_Blue_470nm	EO_M_Blue_480nm	D300_Blue_490nm	EO_B_Blue_500nm	EO_G_Blue_510nm	EO_G_Blue_520nm	EO_G_Blue_530nm	EO_G_Green_540nm	D300_Green_550nm	RW859_Green_560nm	EO_Y_Green_570nm	EO_G_Green_580nm	EO_C_Red_590nm	D300_Red_600nm	RW859_Red_610nm	CC30M_Red_620nm	EO_M_Red_630nm	RED25_Red_640nm	RG630_Red_650nm	RG630_Red_660nm	RG665_Red_670nm	RG665_Green_680nm	RG665_Red_690nm

Medidas com a DSLR Nikon D300		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28					
Ref.ª	Nome da cor	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700	710	720
1	01	Azul - fundo	0,1875	0,1991	0,2107	0,2212	0,2299	0,2338	0,2347	0,2171	0,2092	0,1445	0,1377	0,1260	0,1238	0,1399	0,1256	0,1088	0,1029	0,1132	0,1107	0,1028	0,1069	0,1196	0,1060	0,1038	0,1056	0,1101	0,1222	0,1279				
2	02	Verde - fundo	0,1467	0,1517	0,1622	0,1768	0,1899	0,1956	0,1914	0,1941	0,2004	0,1905	0,1787	0,1669	0,1616	0,1678	0,1526	0,1314	0,1273	0,1216	0,1091	0,1042	0,1050	0,1077	0,1018	0,0994	0,1035	0,1122	0,1272	0,2420				
3	03	Verde - repinte	0,0552	0,0551	0,0599	0,0705	0,0811	0,0859	0,0820	0,0914	0,0939	0,1085	0,1058	0,1007	0,0975	0,0970	0,0912	0,0823	0,0801	0,0735	0,0664	0,0621	0,0621	0,0589	0,0545	0,0534	0,0548	0,0578	0,0638	0,0941				
4	05	Vermelho	0,0684	0,0718	0,0727	0,0732	0,0736	0,0745	0,0771	0,0775	0,0775	0,0821	0,0857	0,0890	0,0934	0,1012	0,1085	0,1259	0,1274	0,1426	0,2275	0,2397	0,2370	0,2782	0,3235	0,3351	0,3537	0,3705	0,3782	0,4318				
5	06	Castanho	0,1218	0,1272	0,1325	0,1376	0,1436	0,1513	0,1642	0,1649	0,1650	0,1746	0,1803	0,1847	0,1883	0,1913	0,1930	0,2133	0,1950	0,1986	0,2633	0,2693	0,2812	0,3254	0,3474	0,3595	0,3752	0,3900	0,3996	0,4550				
6	07	Amarelo	0,0619	0,0605	0,0624	0,0675	0,0750	0,0838	0,0989	0,1726	0,1728	0,4143	0,4523	0,4737	0,4804	0,4226	0,4513	0,5171	0,4883	0,4452	0,5199	0,5379	0,5306	0,5385	0,5754	0,5781	0,5799	0,5807	0,5712	0,6202				
7	08	Castanho - chapéu	0,0582	0,0573	0,0581	0,0599	0,0617	0,0625	0,0611	0,0621	0,0579	0,0700	0,0715	0,0723	0,0726	0,0724	0,0757	0,0875	0,0800	0,0838	0,1137	0,1142	0,1203	0,1297	0,1355	0,1327	0,1302	0,1278	0,1253	0,1490				
8	09	Castanho - chapéu	0,0824	0,0831	0,0825	0,0812	0,0798	0,0792	0,0900	0,0911	0,0877	0,1037	0,1112	0,1164	0,1201	0,1226	0,1256	0,1564	0,1445	0,1501	0,2102	0,2157	0,2168	0,2430	0,2541	0,2562	0,2540	0,2495	0,2424	0,2967				
9	10	Castanho - chapéu	0,0697	0,0699	0,0703	0,0710	0,0720	0,0734	0,0768	0,0768	0,0760	0,0822	0,0833	0,0838	0,0844	0,0851	0,0832	0,0926	0,0848	0,0838	0,0994	0,0961	0,1010	0,1079	0,1072	0,1076	0,1052	0,1013	0,0983	0,1212				
10	11	Castanho - fundo	0,0521	0,0502	0,0507	0,0518	0,0529	0,0534	0,0518	0,0521	0,0488	0,0570	0,0589	0,0600	0,0615	0,0651	0,0678	0,0875	0,0837	0,0890	0,1366	0,1399	0,1454	0,1666	0,1836	0,1869	0,1986	0,2103	0,2135	0,2646				
11	13	Castanho - fundo	0,0684	0,0720	0,0719	0,0717	0,0714	0,0710	0,0698	0,0705	0,0751	0,0751	0,0754	0,0760	0,0763	0,0734	0,0736	0,0779	0,0820	0,0775	0,0807	0,0812	0,0816	0,0830	0,0876	0,0887	0,0962	0,1040	0,1056	0,1408				

Apêndice R: Diferenças de cor e espectrais medidas na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX)

Diferenças de cor e espectrais entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectrorradiômetro de referência, para o conjunto das áreas analisadas na pintura. As referências das áreas correspondem às descritas no Apêndice P.

R.1- Digitalização com fonte de luz indireta, difusa (5 áreas amostradas):

<i>Refer.^a da área</i>	ΔE_{ab}^*	ΔE_{94}^*	ΔE_{00}	<i>GFC</i>	<i>RMSE</i>
02	8,4822	5,4413	5,3883	0,9895	0,0258
05	23,1853	17,1240	15,8607	0,9406	0,0537
06	9,5984	8,2432	8,4008	0,9828	0,0373
07	15,8592	5,9643	5,3743	0,9925	0,0341
13	16,1339	11,5573	10,7330	0,9805	0,0624
<i>Média:</i>	14,6518	9,6660	9,1514	0,9772	0,0426
<i>Desvio padrão (\pm):</i>	5,9177	4,8160	4,3734	0,0210	0,0150
<i>Máximo:</i>	23,1853	17,1240	15,8607	0,9925	0,0624
<i>Mínimo:</i>	8,4822	5,4413	5,3743	0,9406	0,0258

R.2- Digitalização com fonte de luz direta (11 áreas amostradas):

<i>Refer.^a da área</i>	ΔE_{ab}^*	ΔE_{94}^*	ΔE_{00}	<i>GFC</i>	<i>RMSE</i>
01	10,7257	6,7300	5,3442	0,9889	0,0544
02	21,0552	15,4912	14,1796	0,9737	0,0550
03	4,1199	3,2160	3,3719	0,9916	0,0110
05	3,9393	2,4130	2,4604	0,9958	0,0232
06	4,8535	3,9072	4,8717	0,9984	0,0198
07	5,0078	3,2203	2,5781	0,9972	0,0547
08	6,8109	5,5654	5,2743	0,9956	0,0355
09	8,5304	6,1734	6,2595	0,9954	0,0592
10	1,1599	0,9855	0,9708	0,9984	0,0056
11	7,6275	4,6046	4,2386	0,9929	0,0159
13	3,1081	3,0971	2,6229	0,9953	0,0189
<i>Média:</i>	6,9944	5,0367	4,7429	0,9930	0,0321
<i>Desvio padrão (\pm):</i>	5,3823	3,8584	3,5038	0,0070	0,0202
<i>Máximo:</i>	21,0552	15,4912	14,1796	0,9984	0,0592
<i>Mínimo:</i>	1,1599	0,9855	0,9708	0,9737	0,0056

Apêndice S: Índices de metamerismo medidos na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX)

Índices de metamerismo entre os valores estimados pelo sistema hiperespectral proposto e os medidos através do espectrorradiômetro de referência, para o conjunto das áreas analisadas na pintura. As referências das áreas correspondem às descritas no Apêndice P..

S.1- Digitalização com fonte de luz indireta, difusa (5 áreas amostradas):

<i>Refer.^a da área</i>	ΔE_{ab}^*		ΔE_{00}	
	(D65, A)	(D65, F2)	(D65, A)	(D65, F2)
02	0,8868	2,0931	0,5542	1,3454
05	1,3196	3,3304	0,9547	2,2156
06	0,4742	3,4279	0,2830	2,9397
07	0,4665	1,9409	0,2013	0,6853
13	1,6781	4,9319	1,0590	2,4262
<i>Média:</i>	0,9650	3,1448	0,6105	1,9224
<i>Desvio padrão (\pm):</i>	0,5315	1,2108	0,3865	0,8997
<i>Máximo:</i>	1,6781	4,9319	1,0590	2,9397
<i>Mínimo:</i>	0,4665	1,9409	0,2013	0,6853

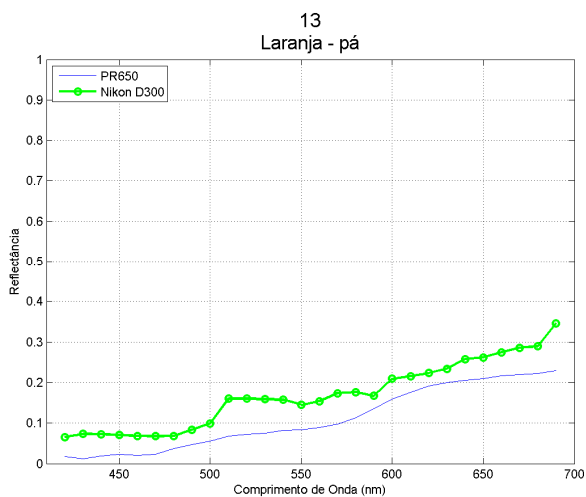
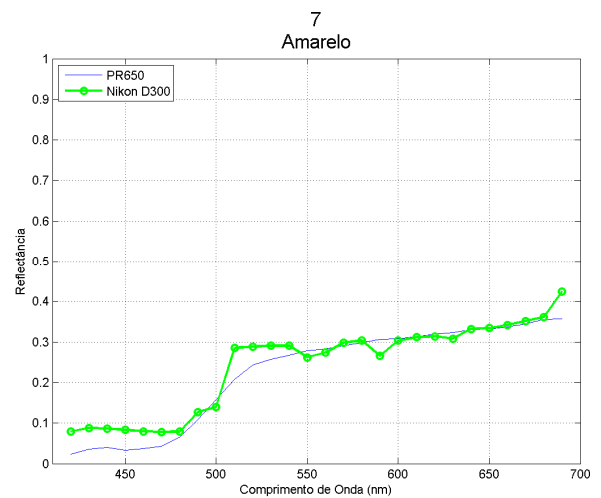
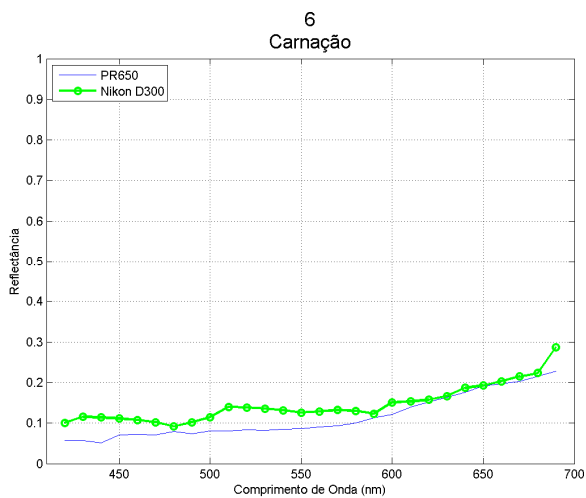
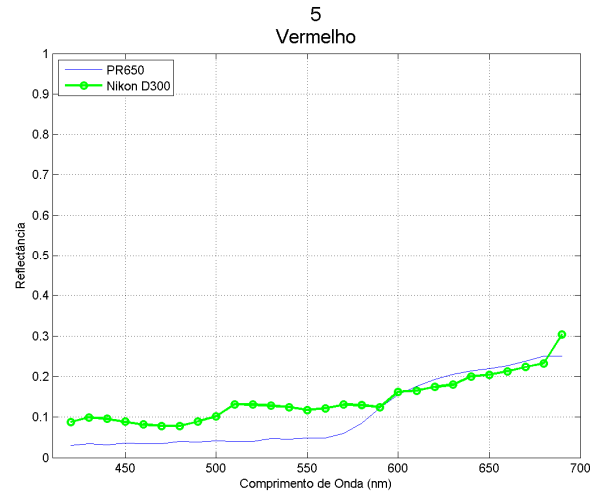
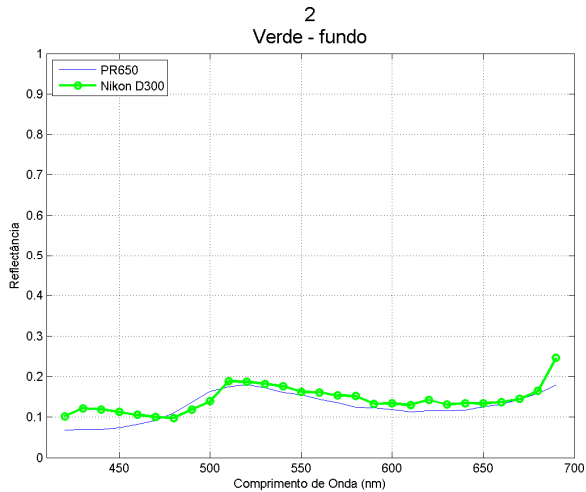
S.2- Digitalização com fonte de luz direta (11 áreas amostradas):

<i>Refer.^a da área</i>	ΔE_{ab}^*		ΔE_{00}	
	(D65, A)	(D65, F2)	(D65, A)	(D65, F2)
01	1,5361	1,7778	1,0653	0,8467
02	3,1508	2,4858	1,5618	1,6295
03	0,8394	1,4148	0,6533	1,1047
05	0,3255	1,0890	0,2270	0,6151
06	0,8424	0,4681	0,6842	0,4673
07	0,8614	0,2323	0,4524	0,1312
08	1,9740	1,0567	1,7552	0,9656
09	2,2773	1,0321	1,6653	0,9601
10	0,1660	0,5115	0,1957	0,4277
11	0,0891	0,5575	0,0677	0,4514
13	1,1073	0,9602	1,4607	0,9032
<i>Média:</i>	1,1972	1,0532	0,8899	0,7730
<i>Desvio padrão (\pm):</i>	0,9554	0,6538	0,6360	0,4112
<i>Máximo:</i>	3,1508	2,4858	1,7552	1,6295
<i>Mínimo:</i>	0,0891	0,2323	0,0677	0,1312

Apêndice T: Gráficos de reflectâncias espectrais medidas na pintura artística “O Cabouqueiro” (séc. XX)

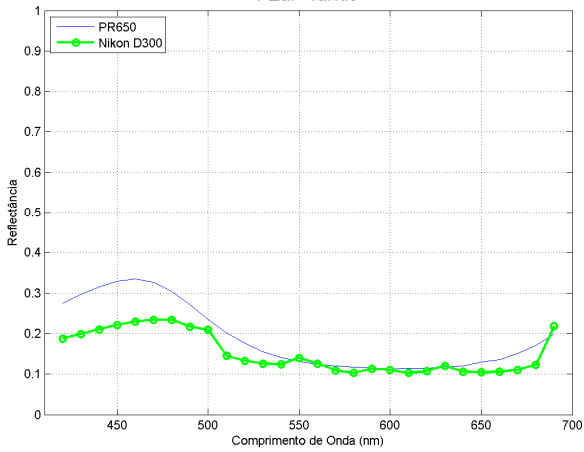
Gráficos representativos das reflectâncias espectrais relativas, para o conjunto de áreas amostradas da pintura, medidas com o espectroradiômetro de referência (*Photoresearch PR650*) e estimadas com o sistema hiperespectral “Nikon D300+13 filtros”. As áreas amostradas estão referenciadas nas imagens do Apêndice P.

T.1- Digitalização com fonte de luz indireta, difusa (5 áreas amostradas):

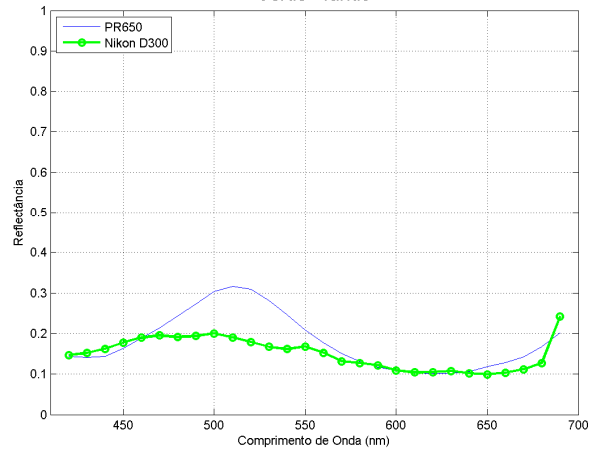


T.2- Digitalização com fonte de luz direta (11 áreas amostradas):

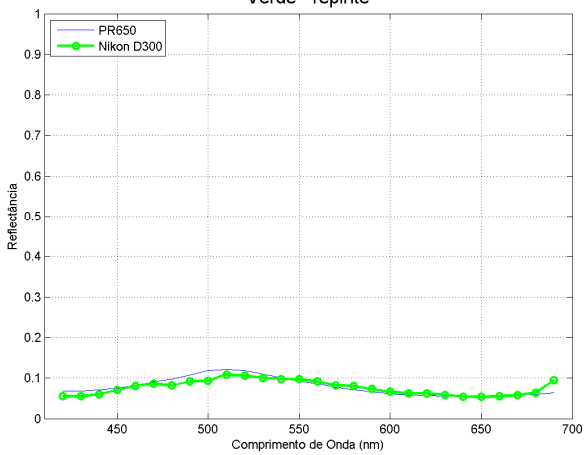
1
Azul - fundo



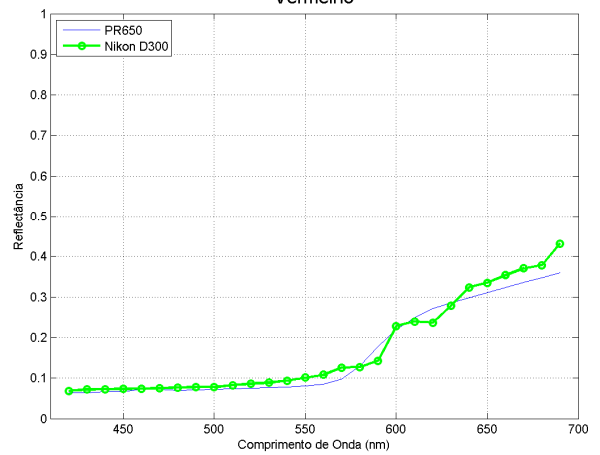
2
Verde - fundo



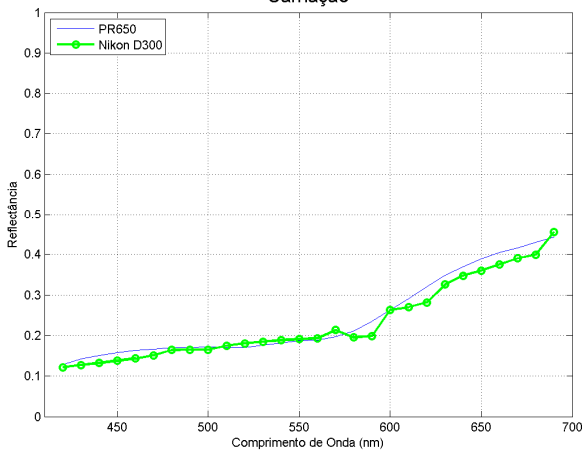
3
Verde - repinte



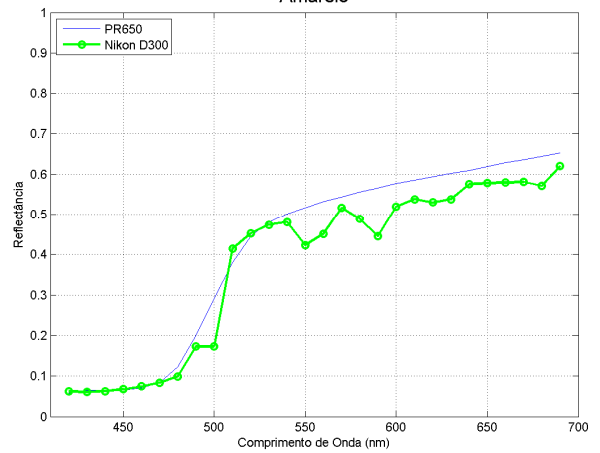
5
Vermelho



6
Carnação



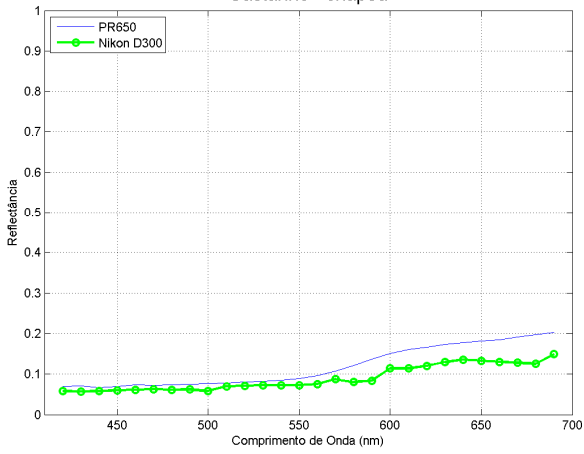
7
Amarelo



Apêndices

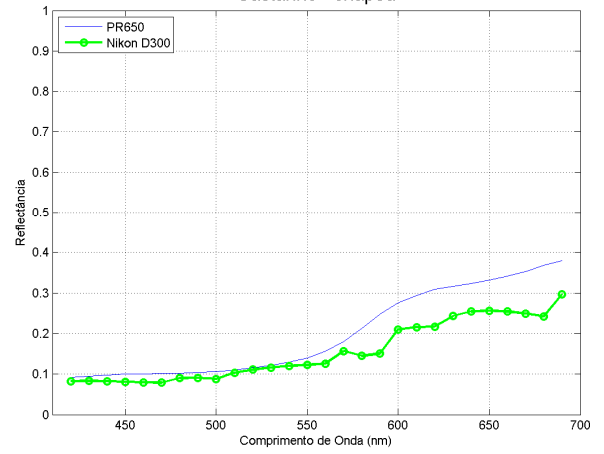
8

Castanho - chapéu



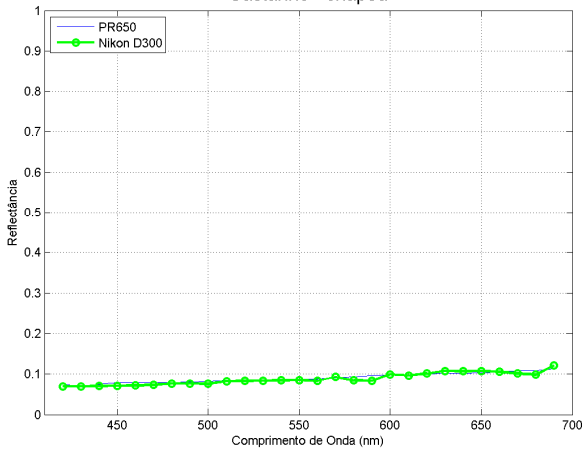
9

Castanho - chapéu



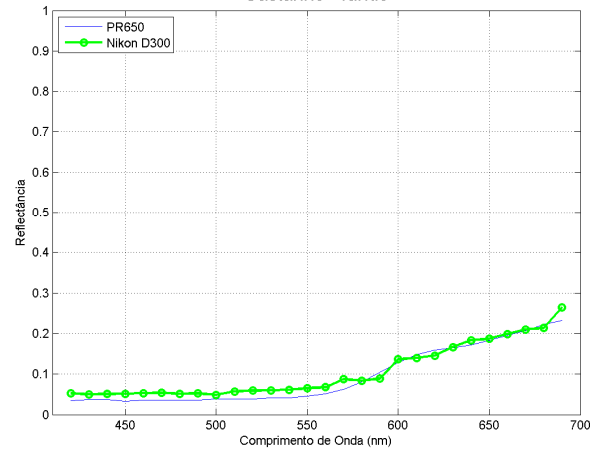
10

Castanho - chapéu



11

Castanho - fundo



13

Castanho - fundo

