

Estudo sobre a percepção da cor

Aluna: Gabriela Fasolo Pivaro



Contato eletrônico:
gabifasolox(arroba)xgmail.com

Orientadora: Maria J. S. P. Brasil

<http://portal.ifi.unicamp.br/pessoas/corpo-docente/367-52>

Teoria:

Sabe-se que a luz é uma forma de energia eletromagnética. Chamamos de luz visível apenas o pequeno intervalo do espectro de radiação eletromagnética com comprimentos de onda entre cerca de 400 a 700 nanômetro, que o olho humano é capaz de detectar. Para cada comprimento de onda e conjuntos de comprimentos de onda, associamos o que chamamos de cor. Cada cor representa um conjunto de respostas diferentes dos detectores presentes no olho, chamados de cones.

Os humanos tem três cones diferentes, com respostas espectrais distintas, chamados de *short*, *middle* e *long* (curto, médio e longo). A resposta de cada cone depende do comprimento de onda da luz que chega, junto com sua intensidade. Cada tipo de cone tem o máximo de sua sensibilidade num comprimento de onda diferente, segundo o seu nome. A combinação das respostas dos três cones representa a cor final que nosso cérebro codifica, ou seja, que enxergamos.

Este processo tem implicações muito importantes para o entendimento de como vemos as cores. A distribuição espectral é colapsada em apenas três números, correspondentes a resposta dos três tipos de cone. Este conjunto de três valores, e não o espectro, é o que representa a cor em nossa percepção. Estes princípios são a base da tricromaticidade e metamerismo.

A tricromaticidade está presente nos modelos de codificação que usamos no dia-a-dia para formarmos as cores desejadas. Eles se baseiam em usar três cores como fontes primárias e a partir da combinação entre elas, obter a resposta dos 3 cones correspondentes a cor desejada. Este princípio é usado tanto nas impressões com tinta como nos monitores. A diferença na codificação são as cores bases escolhidas. Na impressão é usado o sistema CMYB (ciano, magenta, amarelo e preto), e, em monitores, RGB (vermelho, azul e verde). Enquanto o primeiro método é chamado subtrativo, o segundo é aditivo.

No método subtrativo, o conceito é usar pigmentos que absorvem regiões específicas do espectro visível para gerar diferentes espectros de luz espalhada. Podemos analisar a absorção de cada pigmento medindo sua curva espectral de reflectância, definida como a porcentagem de luz espalhada por um pigmento. A absorbância do pigmento representa o inverso da reflectância e corresponde a diferença entre o reflector perfeito e a reflectância do pigmento.

Apesar do método subtrativo contar com a presença da cor preta, vale notar que ainda é uma codificação tricromática. O preto está presente apenas para economizar o uso dos pigmentos coloridos quando se pretende obter tons mais escuros, diminuindo a intensidade total do espectro espalhado. No método aditivo ele não se faz necessário, uma vez que é possível apenas diminuir a intensidade da luz mostrada na tela.

Já no método aditivo, usamos fontes luminosas com emissões "quase monocromáticas" e geramos diferentes cores balanceando a intensidade das fontes. Usando três fontes "primárias", não se pode gerar exatamente todos as combinações de sinais de cones. Ou seja, não se pode gerar exatamente todas as cores, mas pode-se gerar um número relativamente grande de cores. Assim funcionam os monitores, projetores e tvs coloridos.

O metamerismo é o nome que se dá ao fenômeno de ser possível termos a mesma resposta dos cones para espectros diferentes, que geram, portanto, uma mesma sensação de cor interpretada pelo nosso cérebro. Isso é uma consequência da tricromaticidade.

É possível calcular a resposta de cada cone, a um dado espectro de luz incidente em nossos olhos. Para isto fazemos a integração do produto da curva de sensibilidade do cone e do espectro da luz incidente no cone. As curvas de sensibilidade dos cones apresentadas na figura abaixo podem ser achadas na literatura e representam a intensidade relativa das respostas dos cones a uma luz de intensidade constante nos diferentes comprimentos de onda do espectro visível.

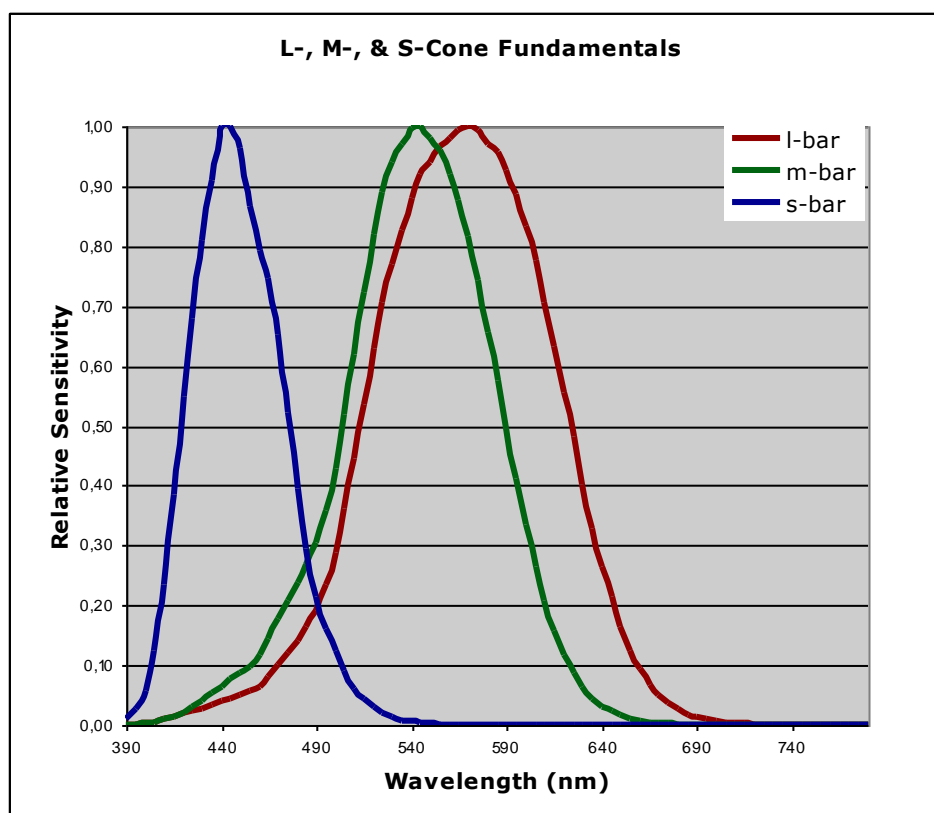


Fig. 1 - resposta espectral dos três cones presentes no olho humano, com suas sensibilidade máxima em diferentes comprimentos de onda. l-bar; m-bar e s-bar correspondem, respectivamente, aos cones *large*, *middle* e *small*.

A informação das respostas dos cones pode ser codificada e interpretada em um gráfico tridimensional onde cada eixo representa o nível de atividade de cada cone. Cada ponto neste espaço tri-dimensional representa uma diferente percepção de cor. O mais comum, no entanto, é utilizar uma representação em duas dimensões, utilizando 3 novas variáveis definidas a partir das 3 respostas dos 3 tipos de cones. Em geral, utilizam-se um conjunto de variáveis tal que uma delas corresponde na verdade a intensidade total dos cones, ou seja, representa a intensidade ou luminância da cor. Assim os gráficos bi-dimensionais são mostrados apenas para um valor constante de intensidade luminosa.

Um padrão comum é o sistema estabelecido pela CIE (*Comission Internacionale de Lumière*), com váriaveis xyY .

Nem todos os conjuntos de valores de xyY representam uma resposta possível de nossos 3 tipos de cones. Um exemplo simples é que é impossível ter um sinal diferente de zero apenas para o cone *middle*. Sempre que o cone *middle* tiver um sinal não-nulo, o cone *small* ou o cone *long* também terão um sinal não-nulo. A região do espaço xyY que corresponde a respostas possíveis do nossos cones delimitam um sub-espaço que tem a forma de uma ferradura, como mostra a figura abaixo. As cores correspondentes às bordas desta ferradura são chamadas de saturadas. As respostas dos cones a espectros monocromáticos, ou seja, a luz de um único comprimento de onda, chamadas cores espectrais saturadas, correspondem ao lado curvado da ferradura e seguem o padrão do arco-íris. A borda da base da ferradura corresponde as cores saturadas não-espectrais, lilás e magenta. Estas cores não podem ser representadas por um único comprimento de onda e correspondem a um espectro que envolve as duas cores espectrais dos limites de detecção humana, o azul e o vermelho. O interior da ferradura fica preenchido por cores cada vez menos saturadas, chegando ao branco no centro da figura.

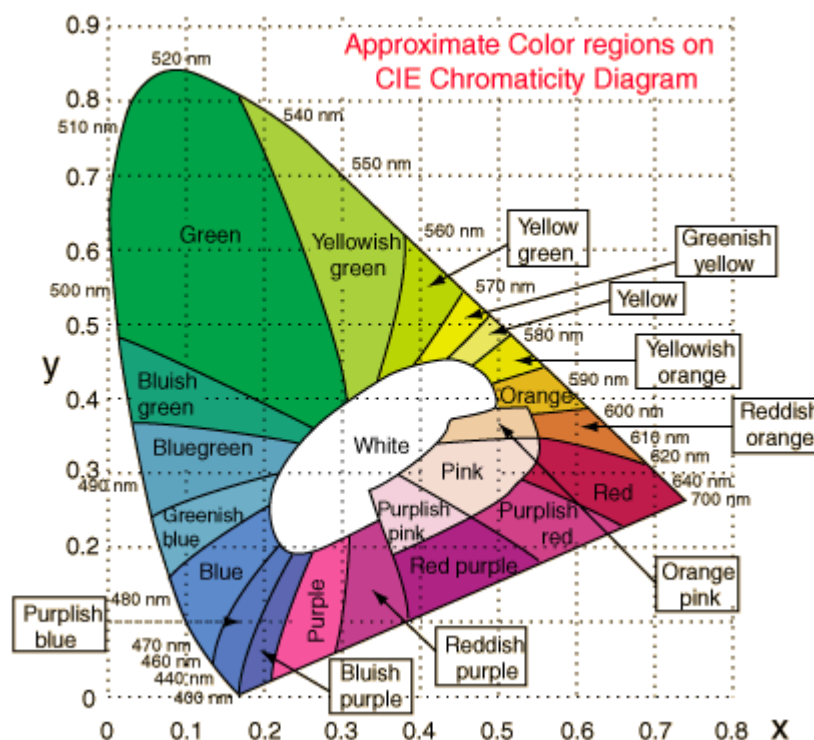


Fig. 2: diagrama cromático da CIE. A curva externa representa cores monocromáticas, em nanômetros.⁽¹⁾

Experimental:

Para entender e analisar a relação de como os cones respondem aos diferentes espectros e cores, foi montado um sistema experimental para medir o espectro de fontes de luzes e o espectro da luz espalhada por objetos coloridos iluminados por estas fontes.

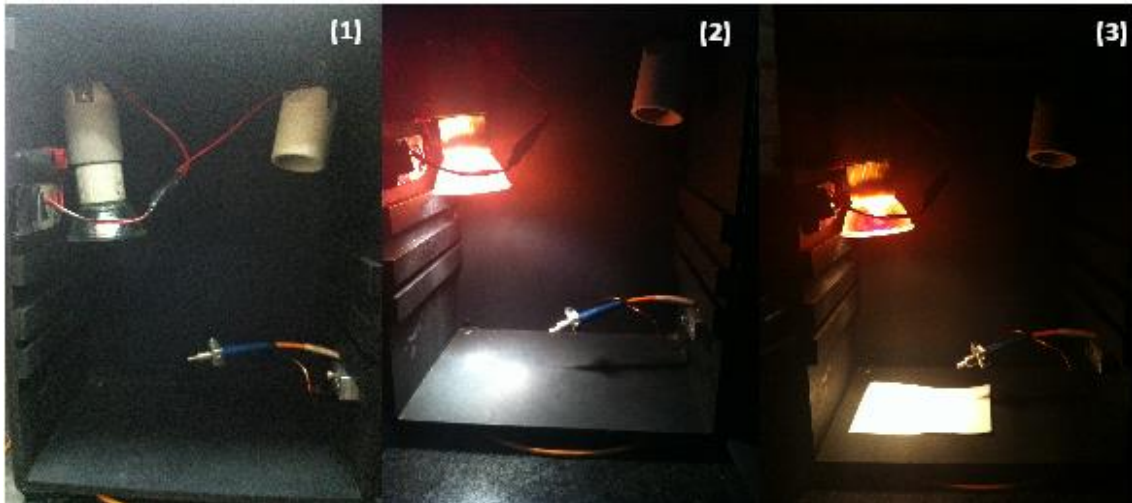


Fig. 3: fotos do interior do sistema experimental utilizado para a medida dos espectros mostrando: (1) o interior da caixa, com a luz apagada; (2) a mesma caixa com a luz acesa; (3) a caixa com uma amostra posicionada para medida.

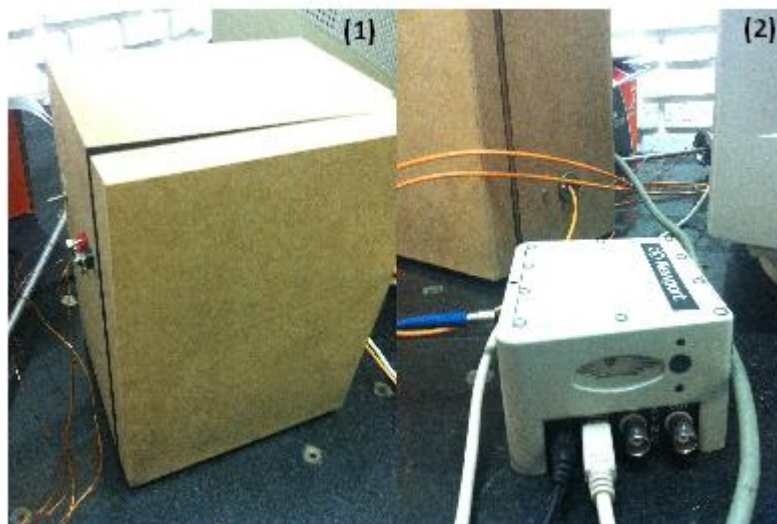


Fig. 4: fotos do exterior do sistema de medidas com os instrumentos usados mostrando: (1) exterior da caixa apresentada na fig.3; (2) mini-espectrômetro utilizado no experimento.

A caixa de madeira foi pintada de preto por dentro para eliminar o espalhamento de luz. Dentro dela instalamos uma lâmpada halogênea utilizada como fonte luminosa com seu interruptor localizado do lado esquerdo superior do lado de fora da caixa, como pode ser visto na foto da fig. 3.1. Na parte inferior das fotos da fig.2 aparece nossa fibra óptica, que entra na caixa por um pequeno furo e leva o sinal coletado da luz espalhada nas amostras para o sistema de análise espectral constituído de um pequeno espectrômetro e um detector tipo CCD (Minispec da Newport, modelo 78357SPL). Nesta mesma imagem, podemos ver a saída digital (USB) que liga o equipamento ao computador. O sistema de análise detecta a intensidade da luz na região visível fornecendo um gráfico de intensidade da luz vs o comprimento de onda, ou seja, o espectro. Isto é feito através de um programa de controle do equipamento (*Newport Oriel TRACQ Basic*, versão 1.6.6).

Para tratar nossos dados, utilizamos as respostas espectrais dos cones humanos fornecidos pelo site do *Rochester Institute of Technology*⁽²⁾ e mostrados na fig.1. As respostas espectrais são tabeladas em curvas de 79 pontos para cada cone com comprimentos de onda variando de 390 a 780 nanômetros.

Nossas medidas envolveram 3 etapas para obter a resposta dos cones a diferentes amostras:

- 1) Montagem e calibração do sistema e avaliação do erro envolvido nas medidas. Para isto fizemos várias medidas de uma mesma cor e observamos a variação dos resultados obtidos.
- 2) Comparação entre espectros de amostras originais com amostras digitalizadas e copiadas, para ver a diferença na suas composições.
- 3) Avaliação de espectros de cores padrões impressas a partir de sistemas digitais usando programas de desenho com as cores básicas das codificações CMYK e RGB.

1. Montagem e estimativa do erro das medidas:

O primeiro passo foi escolher amostras de cor para nossa análise. As condições que guiaram nossa escolha foram: usar tipo de material padrão de fácil acesso com variadas cores, superfície homogênea e variações de tonalidade. Decidimos utilizar papel pintado com tintas acrílicas.

Utilizamos tintas da marca Acrilex e uma cartolina de cor branca. Foram pintados pequenos quadrados coloridos, das cores puras (não-misturadas) e misturadas. A pintura foi feita de modo que toda a área do papel ficasse com uma cor mais homogênea possível. As amostras foram copiadas utilizando uma impressora laser HP Color LaserJet CM1312 MFP de duas formas diferentes. No primeiro caso, a amostra era copiada diretamente pela própria impressora. No segundo caso, a amostra era digitalizada e então impressa na mesma impressora. Os resultados das duas cópias foram analisadas e comparadas.



Fig. 5: foto das tintas de diferentes cores utilizadas no experimento. É importante ressaltar que as cores podem não corresponder a realidade, dependendo da configuração do dispositivo em que se está vendo.

As medidas das cores incluem duas medidas iniciais. A primeira é do valor do *background* do sistema, medido com a caixa preta fechada e a luz apagada. Esse valor, que corresponde a resposta do sistema no escuro, é subtraído das demais medidas. A segunda medida preliminar importante é o espectro branco. Esse espectro é medido com a luz da caixa acesa espalhada por uma superfície branca similar a das amostras, ou seja, o papel original não colorido.

Consideramos que a amostra branca de referência espalha todos os comprimentos de luz da fonte com eficiência constante de modo que ela representa a luz incidente nas demais amostras. Assim, na análise iremos comparar o sinal da amostra branca de referência com a luz espalhada pelas amostras coloridas. Na prática, o espectro branco servia também como um controle de erro, pois sabemos que os valores dos demais espectros não deveriam ultrapassar os valores do espectro branco.

Fizemos vários testes para analisar os parâmetros das medidas e escolhemos utilizar os seguintes parâmetros: tempo de integração de 1000 microssegundos, série com 10 integrações. A fibra foi posicionada próxima das amostras, num ângulo que minimizasse a reflexão especular nas amostras.

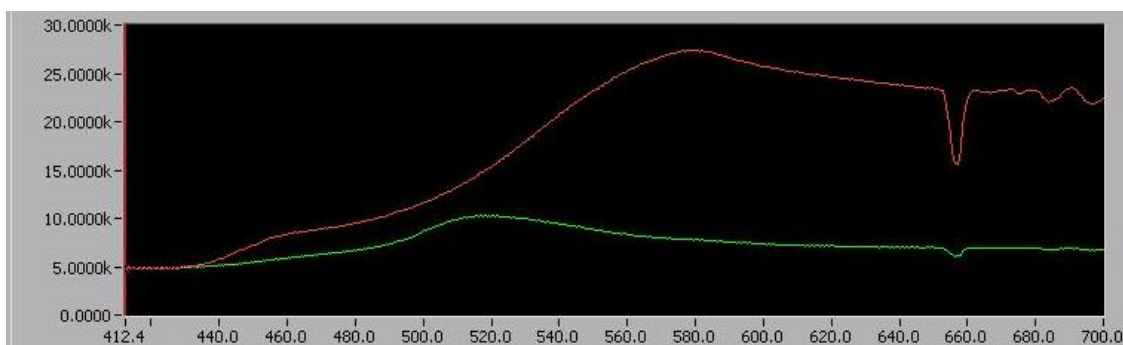


Fig. 6: exemplo de espectro diretamente obtido pelo programa de controle. Em vermelho temos o espectro da luz espalhada por uma superfície branca que corresponde ao espectro da

fonte de luz (lâmpada halogênica) e em verde temos o exemplo de um espectro de uma amostra de cor azul.

Uma vez medidos os espectros de referência, prosseguimos com as medidas das amostras pintadas. Posicionamos as amostras a serem analisadas na mesma posição da amostra branca e mantivemos a fibra óptica sempre na mesma distância e ângulo para cada série de medidas. Os dados obtidos foram tratados com o programa Origin (versão 8.1).

Primeiro, subtraímos o valor de *background* de todos os dados medidos. Nesta análise básica, normalizamos os espectros dividindo-os pelo seu maior valor de intensidade. Assim, ficamos com dados em uma escala de zero a um. Em seguida, calculamos a resposta de cada cone separadamente. Para isto, multiplicamos o valor de cada ponto do espectro normalizado pela resposta espectral de um cone, e somamos todos os pontos do espectro resultante. Para fazer este cálculo foi preciso fazer primeiro a interpolação dos dois dados, para obtermos espectros da luz espalhada e da resposta do cone com um mesmo número de pontos, correspondentes aos mesmos comprimentos de onda. Realizamos estes cálculos usando o programa Origin. Fizemos a integral para os três cones, obtendo assim três números que correspondem aos valores das respostas que visávamos achar.

Antes de medir o conjunto de amostras de cores, fizemos algumas medidas de teste para estimar o erro de nossas medidas. Escolhemos uma amostra que boa uniformidade na cor, e tiramos uma série de medidas da mesma amostra e de sua cópia impressa. A amostra escolhida foi a azul. Apresentamos a seguir os resultados obtidos para três medidas para cada amostra. Cada gráfico representa o espectro da luz espalhada e as respostas espectrais dos cones.

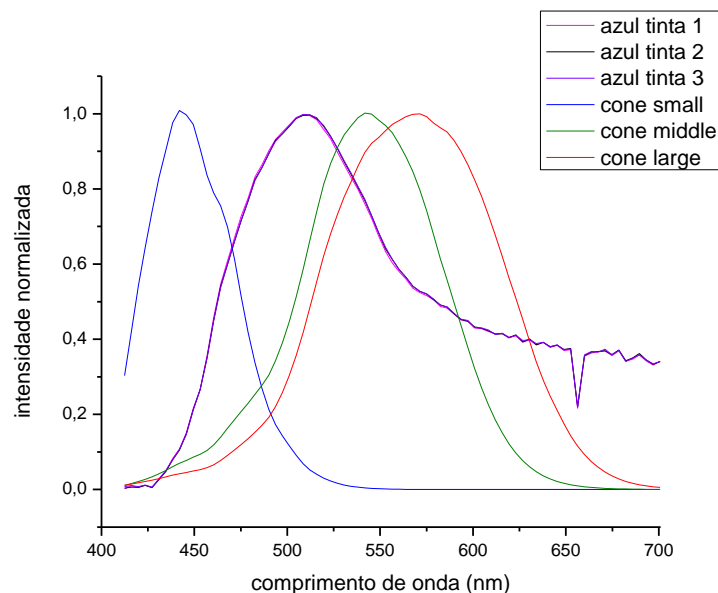


Fig. 7.1: Três medidas do espectro da luz espalhada pela amostra de tinta azul e resposta espectral dos três cones humanos.

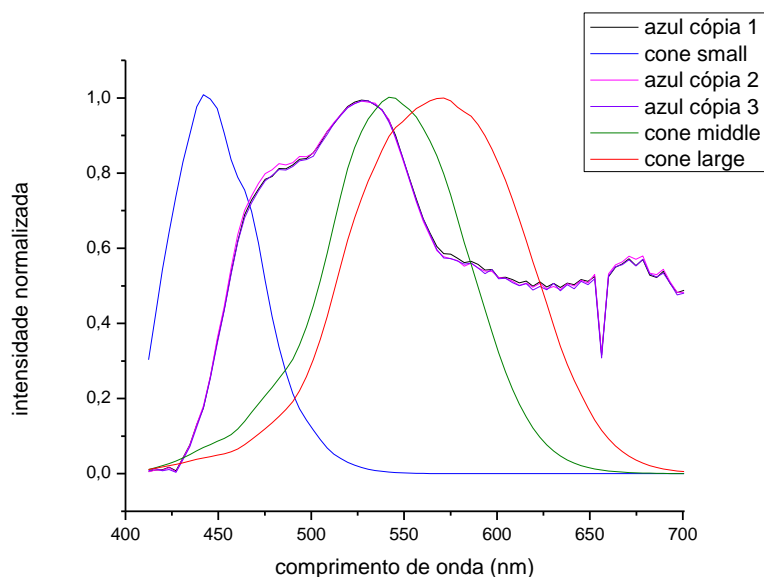


Fig. 7.2: Três medidas do espectro da luz espalhada pela cópia da amostra de tinta azul e resposta espectral dos três cones humanos.

A partir dos dados apresentados na fig. 7, obtivemos a resposta de cada cone fazendo os cálculos descritos anteriormente. Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas abaixo:

	tinta 1	tinta 2	tinta 3
cone small	4,94869	4,88577	4,88469
cone middle	17,7684	17,85783	17,88131
cone large	18,89927	19,0009	19,02465

Fig. 8.1: respostas dos cones à amostra azul pintada obtidas integrando os dados da fig. 7.1

	impressão1	impressão2	impressão3
cone small	5,96103	5,66037	5,51466
cone middle	19,70797	19,64917	19,60411
cone large	21,63688	18,31404	18,2872

Fig. 8.2: respostas dos cones à cópia da amostra azul pintada obtidas integrando os dados da fig. 7.2

Observando os resultados, pode-se notar que a dispersão da maioria dos resultados está dentro de uma incerteza da ordem de 1% com exceção da média 1 da amostra impressa que teve um erro relativamente grande, que indica que durante esta medida ocorreu algum erro

espúrio, provavelmente o deslocamento da fibra óptica. Esta medida será, portanto, desconsiderada de nossa análise.

Fazendo uma simples média, chegamos ao resultado de um **erro experimental de 3 %**.

2. Diferenças entre amostras originais e suas cópias:

Apresentamos a seguir os resultados obtidos comparando os resultados de amostras de cartolina branca pintadas com diferentes cores e impressas de duas formas diferentes: usando o próprio sistema de digitalização da impressora (que denominaremos apenas de **cópia**) e imprimindo o arquivo digitalizado da imagem pela impressora usando o programa Windows Photo View (que denominaremos **impressa**). Incluímos também uma amostra que corresponde à **cópia** da **cópia** da amostra original, para evidenciar mais profundamente as diferenças induzidas pelo processo de cópia utilizado.

Na cartolina, foram pintados quadrados de cor azul, verde e amarelo puras e amostra de misturas graduais de azul e amarelo, resultando em tonalidades verdes. Estas amostras foram então copiadas gerando então o conjunto que denominaremos: original, cópia, cópia da cópia e impressa.

Os resultados das respostas dos cones obtidos conforme descrito acima foram apresentados aqui na forma de barras coloridas representando os 3 tipos de cone: *large* (vermelha), *middle* (verde) e *small* (azul).

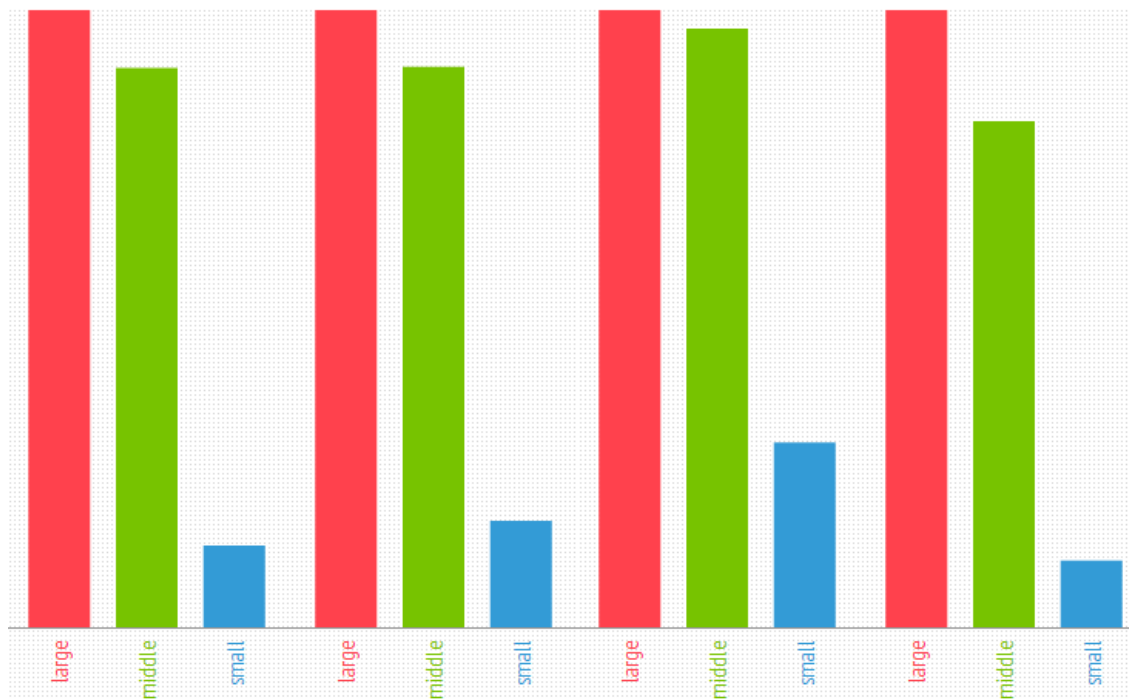


Fig. 9.1: respostas dos cones relativa a amostra azul. Em sequência: amostra original, cópia, cópia da cópia e impressa.

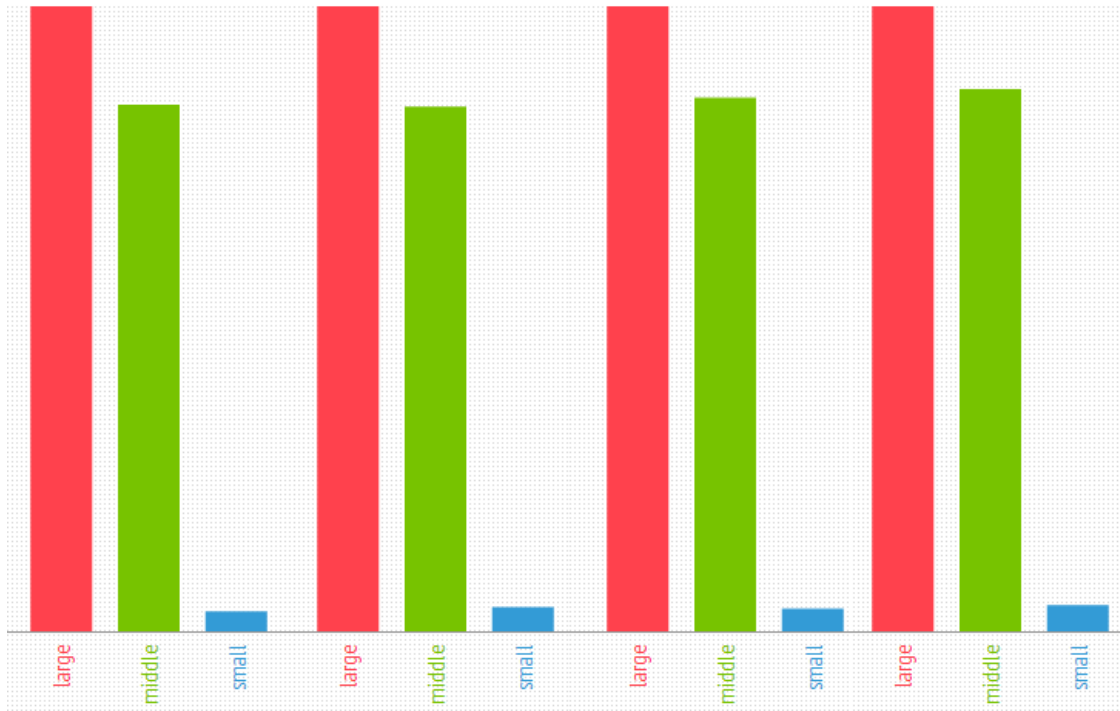


Fig. 9.2: respostas dos cones relativa a amostra azul+amarelo. Em seqüência: amostra original, cópia, cópia da cópia e impressa.

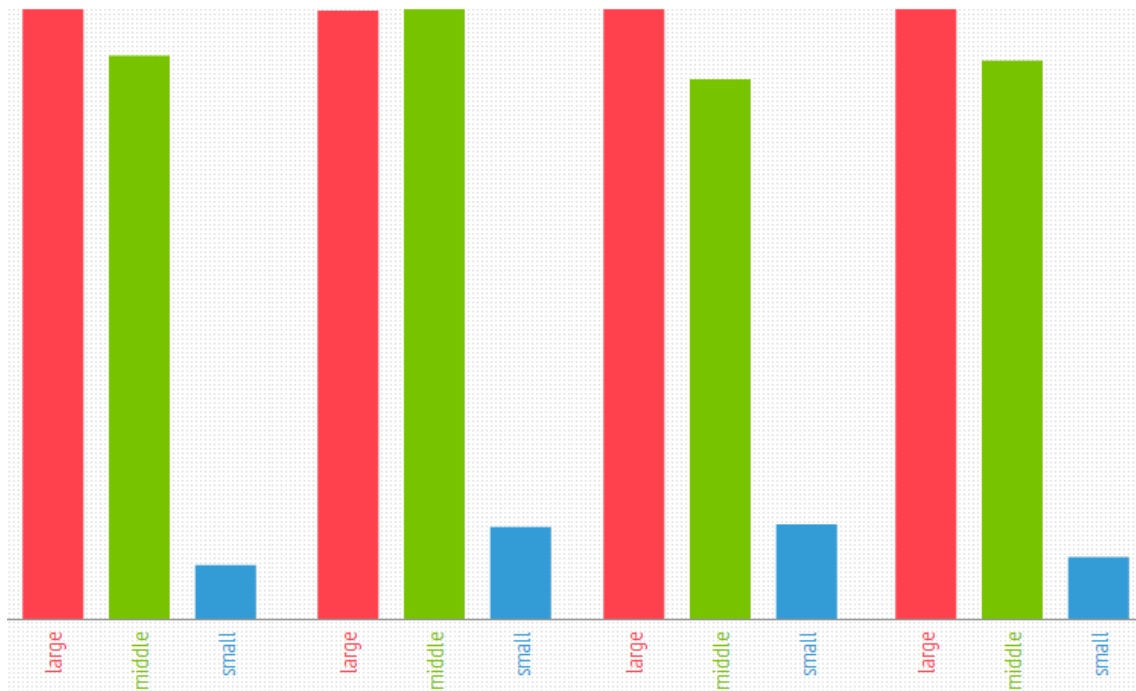


Fig. 9.1: respostas dos cones relativa a amostra verde. Em seqüência: amostra original, cópia, cópia da cópia e impressa.

Um caso curioso e não esperado aconteceu com a tinta de cor amarela. Nestas medidas observamos que a luz espalhada em alguns casos era maior que a luz espalhada pelo papel branco de referência.

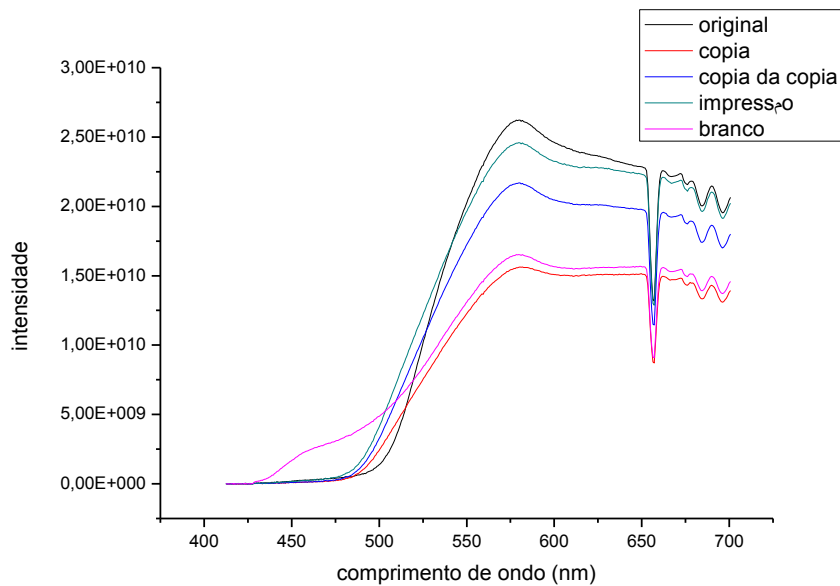


Fig. 10: espectros da luz espalhada pelas amostras amarelas.

Este comportamento é típico de cores chamadas de neon, que consistem de materiais com propriedades fluorescentes. A fluorescência é um fenômeno descrito quando um material que absorve fótons de alta energia (baixo comprimento de onda) e emite fótons de menor energia (maior comprimento de onda). Isto possibilita a conversão de luz da região ultra-violeta em luz na região visível, de modo que o material espalha mais luz visível do que um papel branco. No caso da tinta amarela, o resultado pode ser explicado por uma propriedade fluorescente das tintas acrílica e da impressora.

No caso dos espectros azuis e verdes, podemos notar alguns padrões. Pode ser visto que o sistema de digitalização da impressora utilizado para fazer a cópia "puxa" a cor para o lado azul. Isso é visto com o aumento da resposta dos cones que respondem para menores comprimentos de onda, o *small*, e diminuição das respostas do cone de comprimento mais longos, o *large*. É fácil notar que a cópia da cópia está ainda mais deslocada para o azul do que a cópia somente.

Por outro lado, quando se usa o sistema de digitalização através do programa do computador e então faz-se a impressão, esse padrão muda. Não observamos a distorção para o azul, e as respostas parecem ficar balanceadas mais de acordo com a amostra original.

3. Comparação entre codificação RGB e CMYB:

Nesta parte do experimento, utilizamos o auxílio do programa CorelDraw. Neste caso, as amostras originais foram na verdade amostras geradas diretamente por *software*. Criamos

quadrados coloridos com cores padrões básicas. Primeiro, utilizamos as cores padrões da impressora, que como trabalha na codificação CMYK, são o ciano, o magenta e o amarelo, e misturas de intensidades iguais de duas destas cores básicas. Usando o mesmo programa, podemos fazer a transformação entre as duas codificações, tendo assim a representação das cores do CMYK na codificação RGB. A codificação RGB trabalha intensificando as luzes vermelho, azul e verde numa escala que varia de 0 a 255. Então as suas cores primárias têm valores máximos na cor que leva seu nome, e valores nulos nas outras duas. Com o programa em questão, obtivemos as seguintes relações:

	R (vermelho)	G (verde)	B (azul)
ciano	0	175	239
magenta	236	38	143
amarelo	255	242	18

Fig. 11: tabela com os valores da relação das codificações RGB com CMYK

Uma vez imprimindo essas cores na impressora, tiramos seus espectros e, da mesma forma como foi trabalhado nos itens anteriores, calculamos a resposta dos cones. Aqui, apresentamos essa resposta de forma diferente. Em vez de apenas mostrar a relação de intensidade das respostas umas com as outras, mostramos todo o processo de integração das curvas.

Nas imagens abaixo, a primeira coluna da esquerda se refere ao espectro da luz espalhada pela amostra; a da direita é o gráfico da resposta espectral dos cones; e a última (abaixo) representa o produto da das duas curvas, exposta aqui de maneira mais fácil de visualizar como é feita essa resposta.

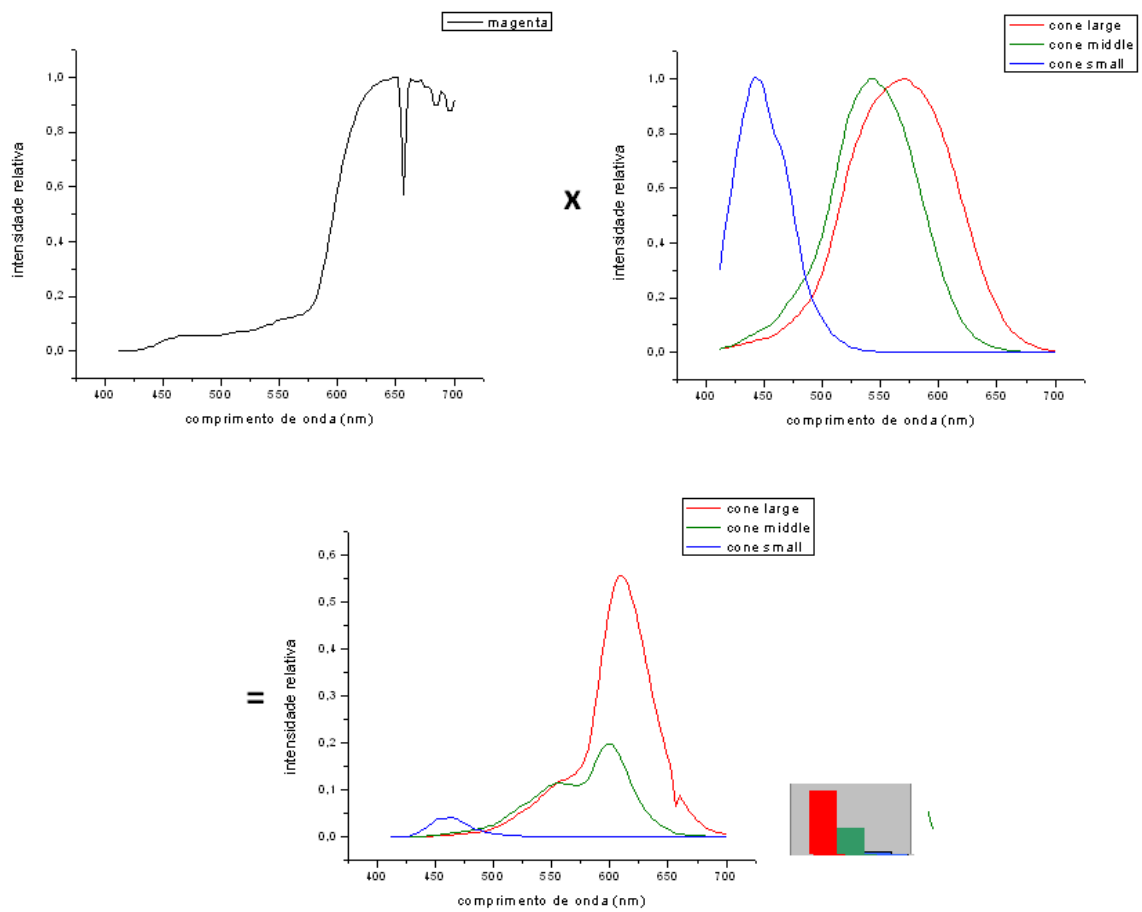


Fig. 11.1: espectro de refletância da cor magenta, juntamente com curvas de atuação dos cones e gráficos de suas respostas.

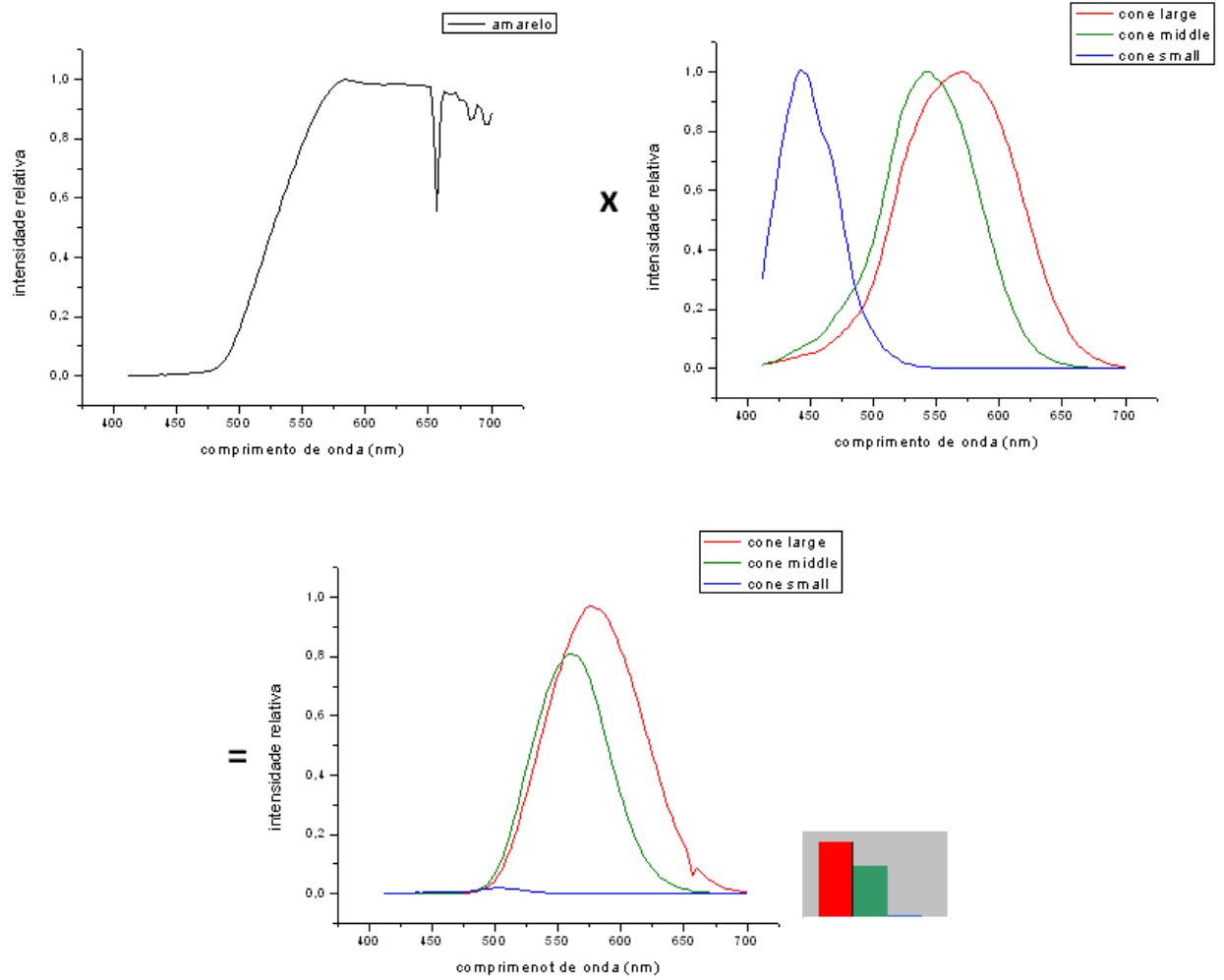


Imagem 11.2: espectro de refletância da cor o amarelo, juntamente com curvas de atuação dos cones e gráficos de suas respostas.

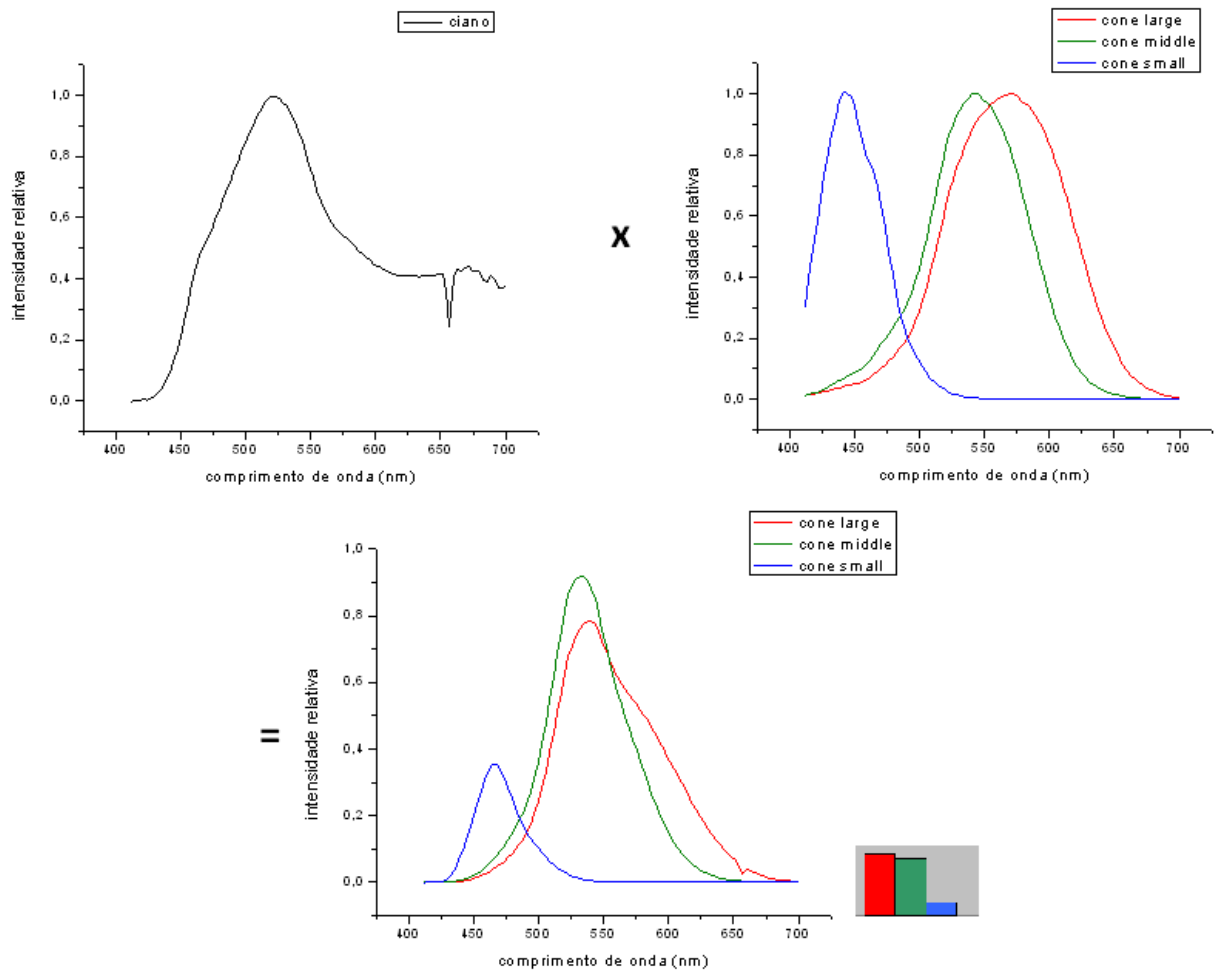


Imagem 11.3: espectro de refletância da cor o ciano, juntamente com curvas de atuação dos cones e gráficos de suas respostas.

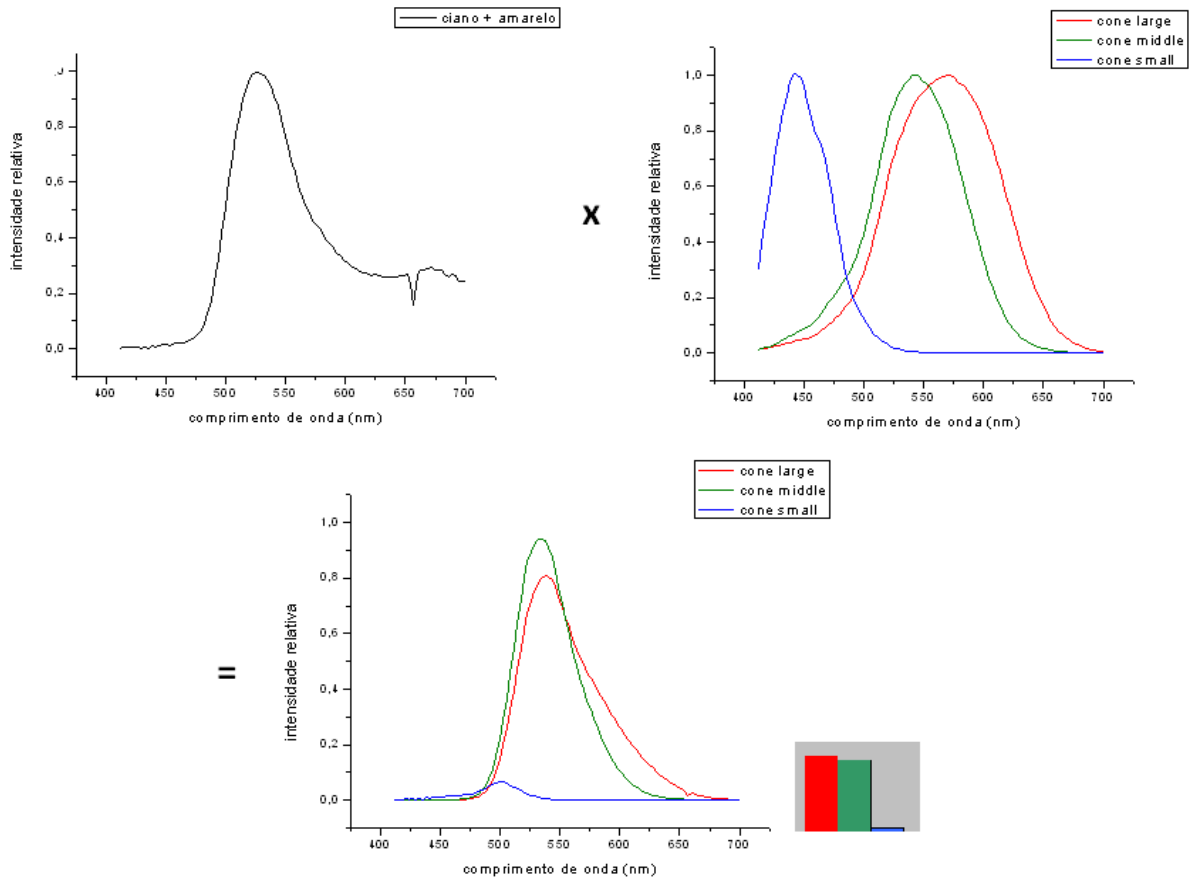


Imagem 11.4: espectro de refletância da mistura de cores ciano e amarelo, juntamente com curvas de atuação dos cones e gráficos de suas respostas.

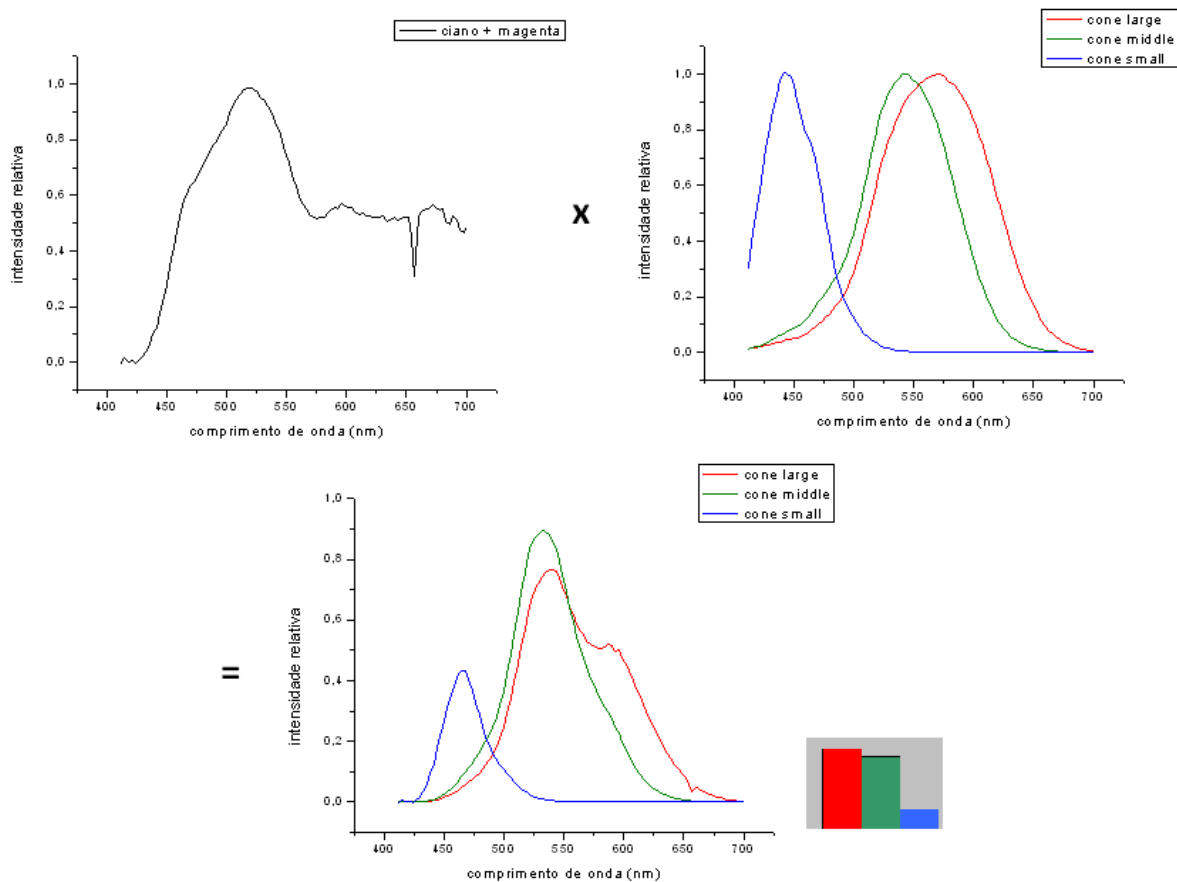


Imagem 11.4: espectro de refletância da mistura de cores ciano e magenta, juntamente com curvas de atuação dos cones e gráficos de suas respostas.

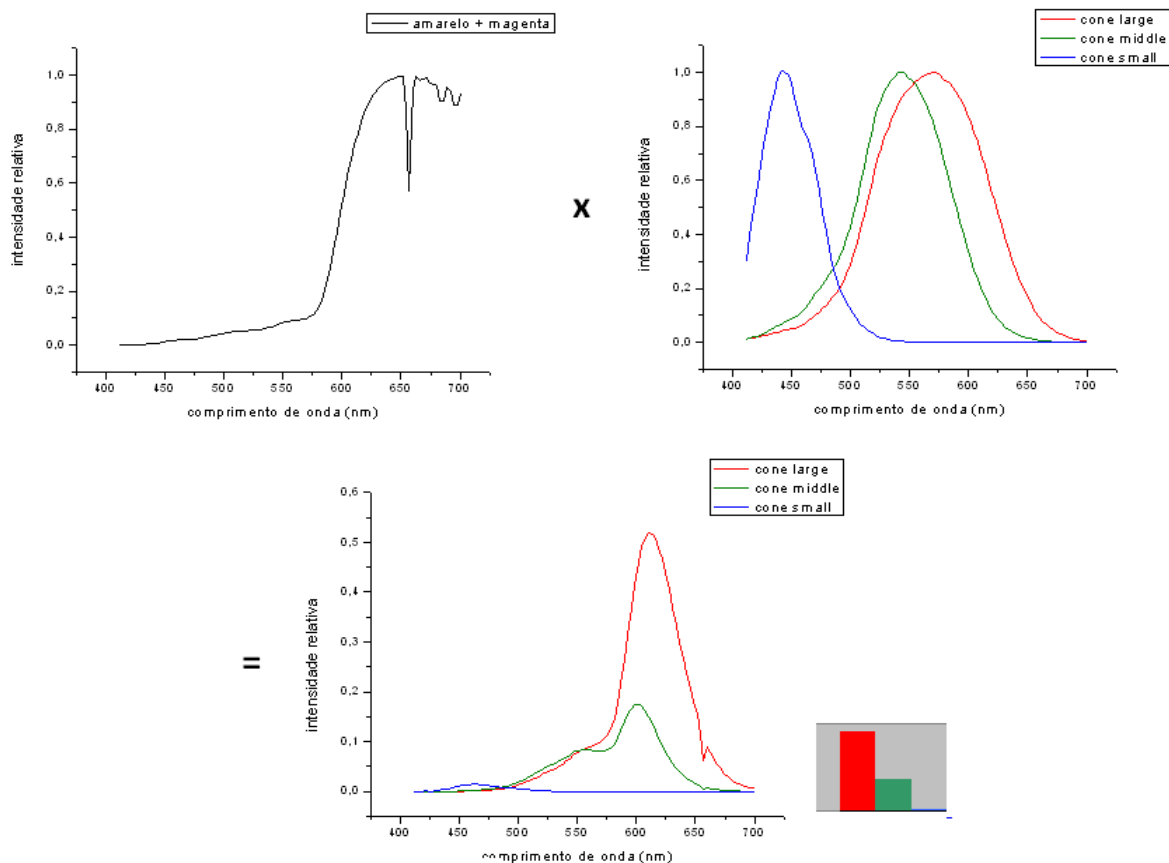


Imagem 11.6: espectro de refletância da mistura de cores amarelo e magenta, juntamente com curvas de atuação dos cones e gráficos de suas respostas.

Observando as figuras 11 é possível comprovar a composição das cores analisadas. Podemos notar, por exemplo, que o amarelo corta bastante os comprimentos de onda na faixa do azul, tendo mais intensidade na faixa do vermelho e verde. As misturas, por sua vez, também se encaixam na teoria. Nas amostras com misturas de cores, as intensidades representam uma média da intensidade das cores formadoras. A cor que tiver um valor mais alto acaba inibindo a outra cor. Olhando, por exemplo, o caso magenta com ciano, em que o espectro aumentou sua presença nos dois extremos do eixo de comprimentos de onda, como resultado da combinação de uma cor muito presente no azul, e de outra muito presente no vermelho.

Os resultados descrevem bem a geração das cores do sistema CMYB. Vamos analisar agora a relação inversa. Como essas cores se comportam se forem codificadas no sistema RGB, disposto em um monitor?

Para isso, medimos diretamente os espectros de cores básicas do monitor como uma fonte de luz. Neste caso, é mais difícil o isolamento de interferência externa, por se tratar de uma fonte grande e que fica exposta. Há este fator, combinado com o fato da luz que sai do monitor ser mais fraca do que a lâmpada usada nos outros experimentos. Por esses motivos, já se era esperado os espectros aparecerem com mais ruído. O método de medidas foi, então, diferenciado dos itens anteriores.

Com as cores dispostas nas telas, um pano preto foi colocado sobre o monitor, a fim de minimizar a interferência externa. As medidas foram feitas com mesmo tempo de integração mas com médias de 100 vezes. Com isso, colocou-se a fibra óptica por baixo do pano e as medidas foram realizadas.

As seis cores foram impressas e medidas, além do espectro branco e do valor de background, que, como antes, foi subtraído dos espectros a serem analisados. Apesar do ruído ser alto, pode-se perceber que os picos dos gráficos correspondem ao comprimento de onda da cor que, em teoria, são representadas.

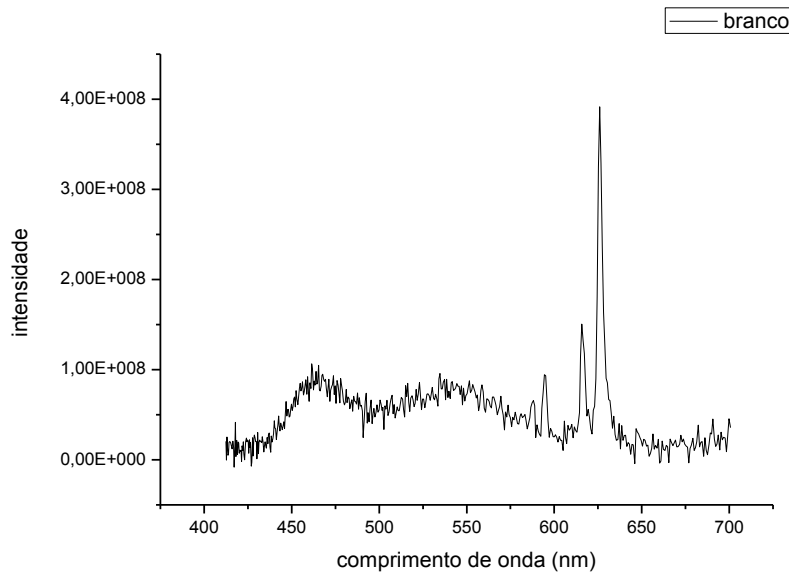


Imagem 12: espectro do branco de um monitor. Este espectro representa o máximo que cada comprimento de onda pode ter de intensidade.

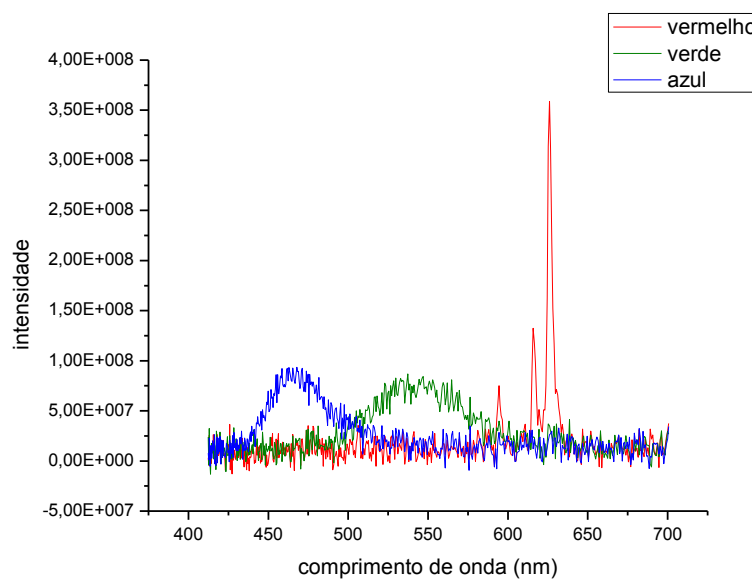


Fig. 14: espectro dos três componentes da codificação RGB- vermelho, azul e verde.

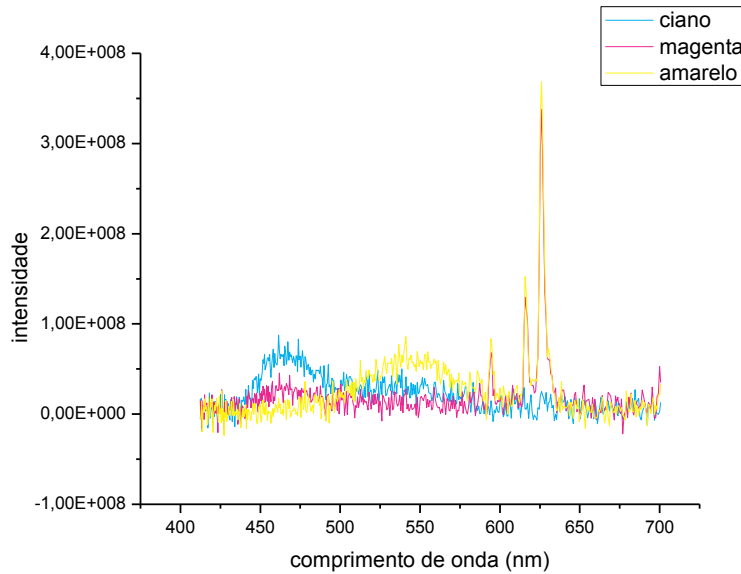


Fig. 15: espectro dos três componentes da codificação CMY- ciano, magenta e amarelo, representadas na codificação RGB.

É notável em ambas as figuras 14 e 15 que a combinação das três cores primárias das duas codificações resulta no espectro branco (fig. 13), como se era esperado. Também muito evidente os picos da fig. 14, coincidindo com a faixa do espectro que cada cor representada pertence. Ou seja, azul está entre 440 e 480, verde entre 520 – 570 e vermelho se mostra entre 620 e 740.

Na fig. 15, podemos perceber a formação de cada cor, novamente por seus picos. Como diz a tabela da imagem 11, o ciano é composto por sua maior parte azul, e um pouco de verde. O magenta por um pouco de azul e muito vermelho. Enquanto o amarelo por muito verde e vermelho.

Referências:

⁽¹⁾ 1. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/cie.html> Acessado pela última vez em 21/05/2013, versão pdf em <http://migre.me/eEPNS>

⁽²⁾ 2. www.cis.rit.edu/research/mcs12/online/CIE/CIE2006CMFs.xls Acessado pela última vez em 21/05/2013.

3. NASSAU, Kurt. *The Physics and Chemistry os Color: The Fifteen Causes of Color*, 2º Edição. pp 496, 2000.

4. LIVINGSTONE, Margaret S. *Vision and Art: The Biology os Seeing*, 2006.

5. STONE, Maureen C. *A Field Guide to Digital Color*, 2003

Parecer final da orientadora:

A aluna Gabriela Pivaro desenvolveu um projeto sobre a percepção da cor com minha orientação. Neste trabalho, a Gabriela estudou como funciona o mecanismo da visão, e em especial, a detecção e codificação das cores. Além disso, ela trabalhou numa montagem experimental para medidas de espectros da luz espalhada por amostras coloridas e realizou várias medidas para compreender como funciona nossa percepção das cores. A Gabriela se dedicou ao trabalho com interesse e responsabilidade e acredito que o projeto tenha sido bastante proveitoso para sua formação. Apesar do assunto ser extremamente complexo, de modo que ainda exista muito a estudar para se aprofundar neste tema, a Gabriela certamente tem agora uma boa ideia de como funciona a percepção de cores e pode apresentar o tema de uma maneira simplificada para estudantes em geral.