

Computação Gráfica

Módulo I – Luz e Cor

UniverCidade - Prof. Ismael H F Santos

Considerações Gerais

- **Objetivo:** *Discutir os principais conceitos e os princípios básicos dos Sistemas Gráficos e a Programação em OpenGL.*
- **A quem se destina :** *Alunos e Profissionais que desejem aprofundar seus conhecimentos sobre Computação Gráfica e suas aplicações.*

Bibliografia

- *Computação Gráfica Volume 1. Jonas Gomes e Luiz Velho. Instituto de Matemática Pura e Aplicada – IMPA.*
- *Introdução a Computação Gráfica - Paulo Roma*
 - <http://www.lcg.ufrj.br/compgraf1/downloads/apostila.pdf>
 - <http://www.lcg.ufrj.br/compgraf1/downloads/apostila.ps.gz>
- *Notas do Curso ministrado na Universidade de Maryland pelo Prof. David Mount*
 - <ftp://ftp.cs.umd.edu/pub/faculty/mount/427/427lects.ps.gz>
 - <http://www.lcg.ufrj.br/~esperanc/CG/427lects.ps.gz>
- *Apostila Fundamentos da Imagem Digital – Antonio Scuri*
- *Computer Graphics: Principles and Practice, Second Edition. James Foley, Andries van Dam, Steven Feiner, John Hughes. Addison-Wesley.*
- *OpenGL Programming Guide, 2nd Edition. Mason Woo, Jackie Neider, Tom Davis. Addison Wesley.*

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

3

Bibliografia OpenGL

- *OpenGL® Programming Guide, 2nd Edition. Mason Woo, Jackie Neider, Tom Davis. Addison Wesley.*
 - <http://www.lcg.ufrj.br/redbook>
- *Manual de referência online*
 - <http://www.lcg.ufrj.br/opengl>
- *Sítio oficial do OpenGL*
 - www.opengl.org

April 05

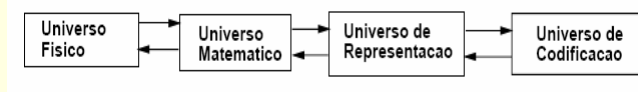
Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

4

Paradigmas dos Universos

Universos:

- físico → matemático → representação → codificação.



- Luz → modelo espectral → representação tricromática → sistemas de cor.



April 05

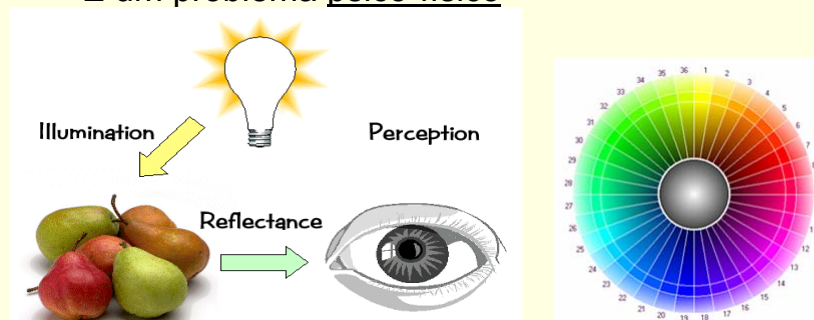
Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

5

Luz e Cor

O que é cor?

- Cor é uma **sensação** produzida no nosso cérebro pela luz que chega aos nossos olhos.
- É um problema psico-físico

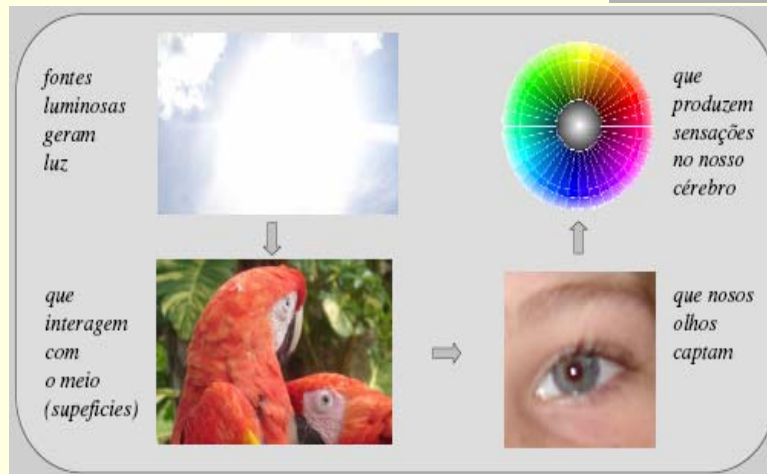


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

6

Luz e Cor



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

7

Modelos físico da luz

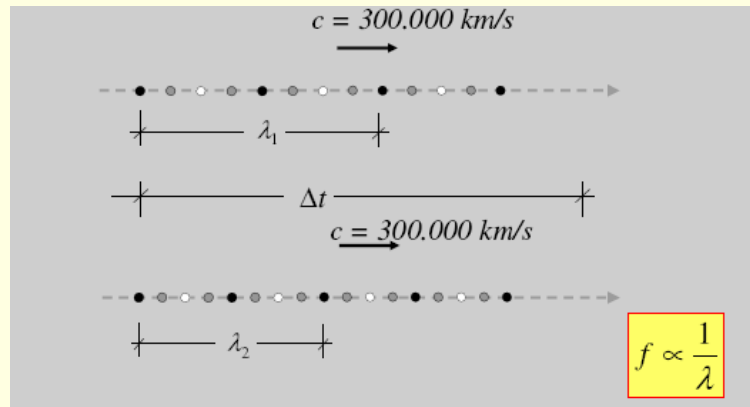
Huygens	Newton	Max Planck	Eistein
☆1629 †1695	☆1643 †1727	☆1858 †1947	☆1879 †1955
onda	partículas	fótons	fótons

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

8

Modelo de fótons



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

9

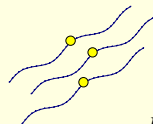
Física da luz

- Modelo de ondas - Óptica geométrica
 - Luz é uma **radiação** eletro-magnética que se propaga a $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ($E = h \cdot \nu$, $c = \lambda \cdot \nu$).

- Modelo quântico

Energia de um photon:

$$E_f = h\nu$$



h = constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$)

ν = frequência (Hz) [$c = \lambda \nu \text{ m/s}$]

c = velocidade da luz ($2.997925 \times 10^8 \text{ m/s}$)

April 05

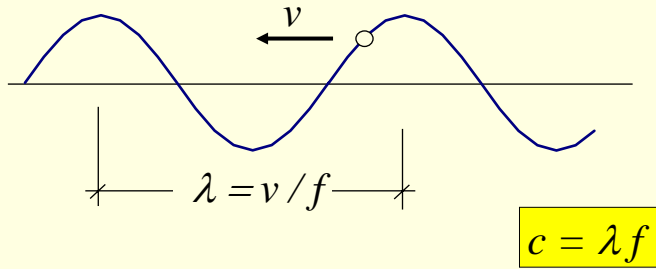
Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

10

Natureza da luz

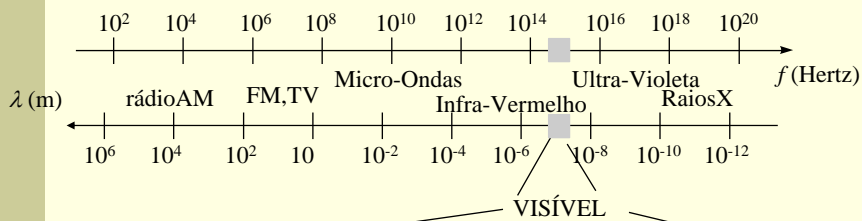
Ondulatória ou partículas?

$c = \text{velocidade da luz} \cong 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$



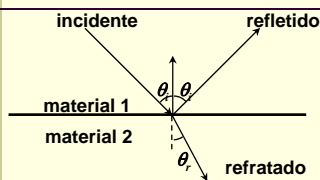
Ondas eletromagnéticas

Luz branca é uma mistura de radiações com diferentes comprimentos de onda.



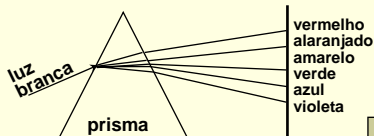
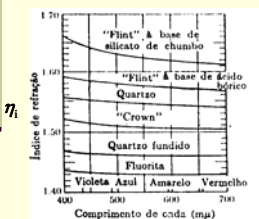
vermelho (4.3×10^{14} Hz), laranja, amarelo, ..., verde, azul, violeta (7.5×10^{14} Hz)

Reflexão e Refração



$$\text{sen } \theta_r = \frac{n_2}{n_1} \text{sen } \theta_i \quad \text{lei de Snell (1621)}$$

$$n_i = \frac{\text{velocidade da luz no vácuo}}{\text{velocidade da luz no material i}}$$



luz branca (acromática) tem todos os comprimentos de onda

Cor	λ
Violeta	380-440 nm
Azul	440-490 nm
Verde	490-565 nm
Amarelo	565-590 nm
Laranja	590-630 nm
Vermelho	630-780 nm

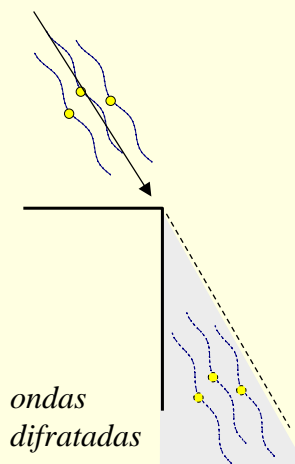
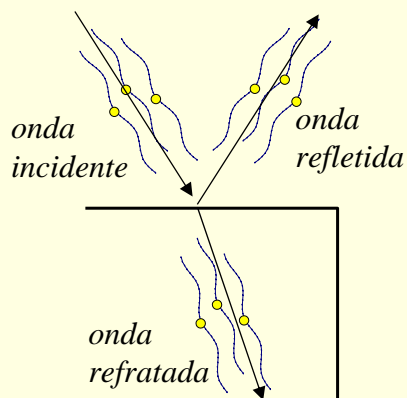
Newton

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

13

Onda em obstáculos



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

14

Energia e Fluxo Radiante

1 fóton com comprimento de onda λ : $e_\lambda = h \frac{c}{\lambda}$

n_λ fótons com comprimento de onda λ : $Q_\lambda = n_\lambda e_\lambda = n_\lambda h \frac{c}{\lambda}$ [J/nm]

Energia radiante: $Q = \int_0^\infty Q_\lambda d\lambda$ [J]

Fluxo radiante: $\Phi = \frac{dQ}{dt}$ [J/s=Watts]

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

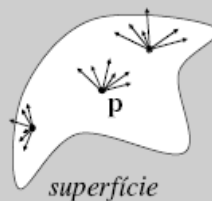
15

Potência (fluxo) radiante

Φ Watts = Joule/seg

exemplos:

- lâmpadas: ~100 W
- Sol: 3.91×10^{26} W



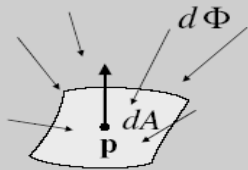
varia de ponto a ponto e depende da direção.

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

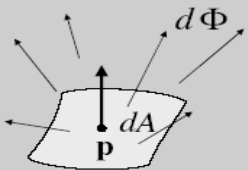
16

Irradiação e Radiosidade



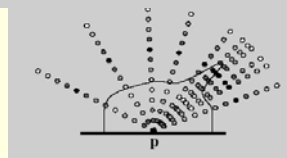
irradiação

$$E(\mathbf{p}) = \frac{d\Phi}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$



radiosidade

$$B(\mathbf{p}) = \frac{d\Phi}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$



Emissão não uniforme de um ponto de luz

April 05

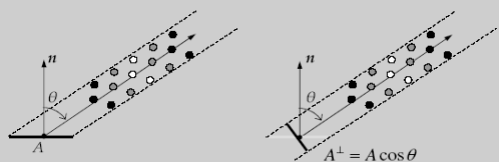
Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

17

Área Aparente e Angulo Sólido

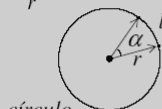
Uma área A vista de um ângulo θ é equivalente a uma área menor, $A \cos \theta$, tanto para emitir quanto para receber radiação luminosa.

Area Aparente ou foreshortening



Angulo Sólido em steradian

$$\alpha = \frac{l}{r} \text{ [rad]}$$



$$\alpha = 0 \dots 2\pi \text{ rad}$$

$$\Omega = \frac{a}{r^2} \text{ [str]}$$



$$\Omega = 0 \dots 4\pi \text{ str}$$

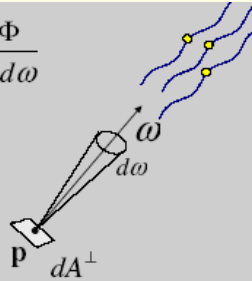
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

18

Radiância

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA^\perp d\omega}$$



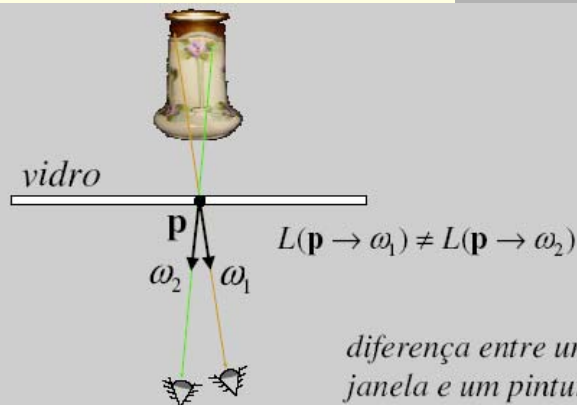
$$\left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right]$$

$L(\mathbf{p} \leftarrow \omega)$ recebida

$L(\mathbf{p} \rightarrow \omega)$ emitida

Radiance – the amount of flux radiated by a projected area of surface per steradian of solid angle. The radiometric unit is “watts per square meter per steradian”;

Radiância em função da direção

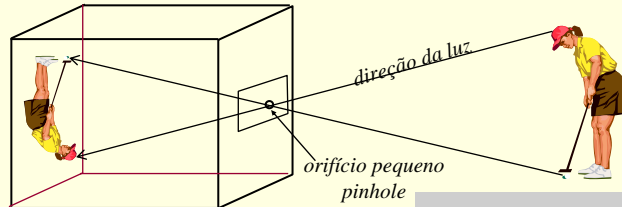


diferença entre uma janela e um pintura.

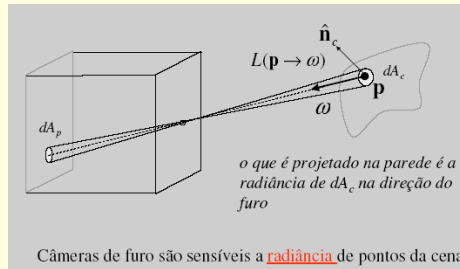
Olhos são sensíveis a radiância de pontos da cena

Luz viaja em linha reta

Modelo de Camera pinhole



1. *Projeção cônica da imagem.*
2. *Câmeras pinhole (de furo) são sensíveis a radiância de pontos da cena*

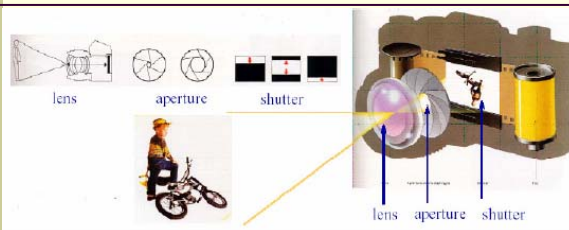


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tegraf.puc-rio.br

21

Câmeras fotográficas



Câmera Convencional

Câmera Digital



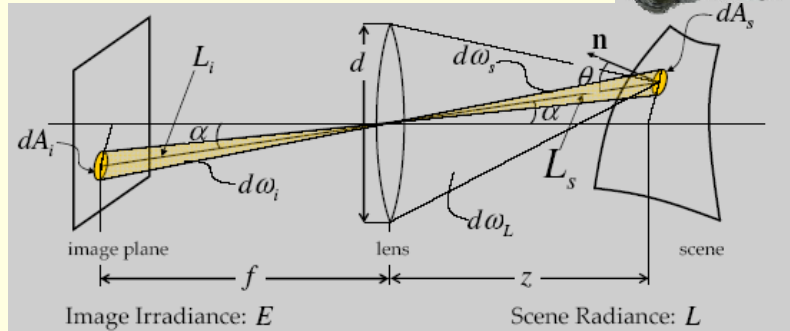
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tegraf.puc-rio.br

22

O que mede uma câmera fotografica

Câmeras fotográficas medem a **radiância** de pontos da cena



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

23

Radiancia ou Luminância

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA^\perp d\omega}$$

$\left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right]$	$\left[\frac{lumens}{m^2 \cdot sr} = \frac{lux}{sr} \right]$
---	---

$L(\mathbf{p} \leftarrow \omega)$ *recebida*
 $L(\mathbf{p} \rightarrow \omega)$ *emitida*

$L(\mathbf{p} \rightarrow \omega) = L(\mathbf{p} \leftarrow -\omega)$ *no espaço*

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

24

Luz

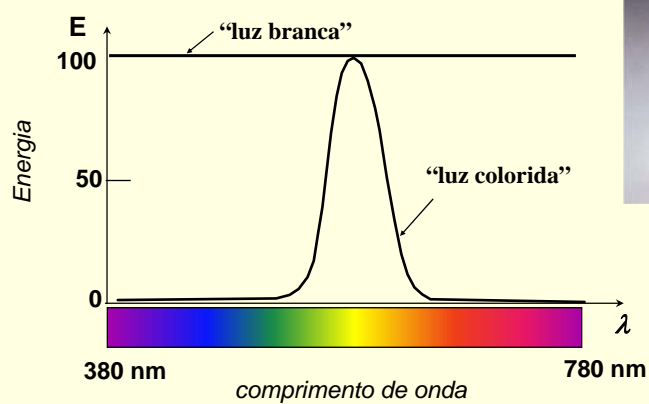
1. Espectro de fontes luminosas
2. Processos de formação de cor

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

25

Espectro idealizado de fontes luminosas

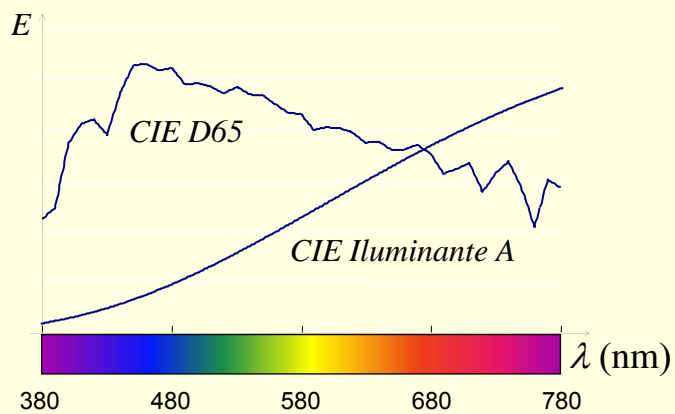


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

26

Espectros de luz branca

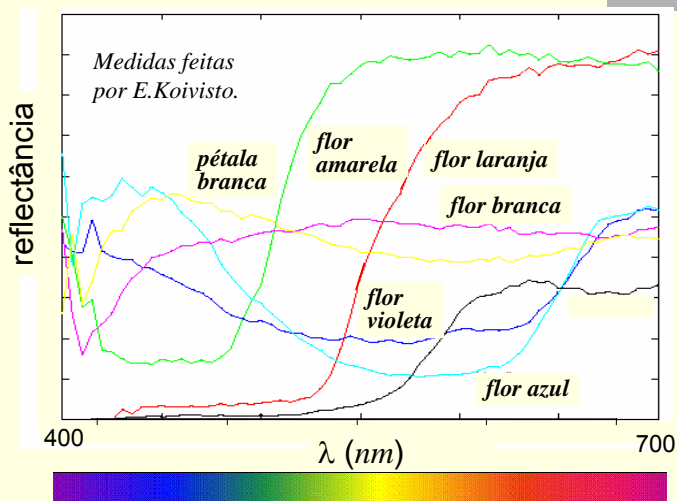


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

27

Reflectâncias espectrais de flores

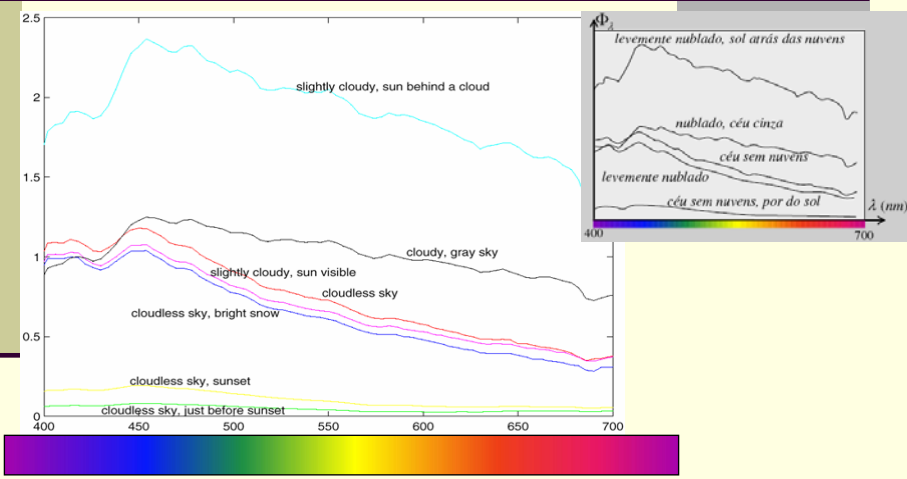


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

28

Medidas do espectro da luz solar



380 nm

made by J. Parkkinen and P. Silfsten.

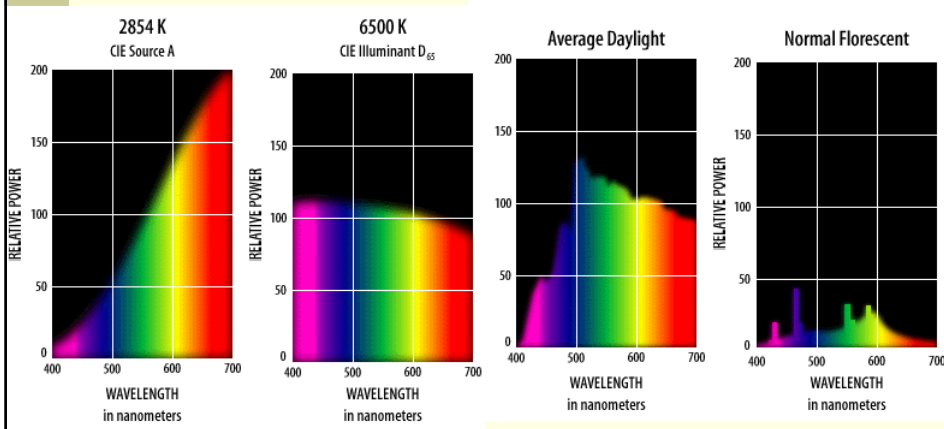
780 nm

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tegraf.puc-rio.br

29

Espectros de luz “branca”

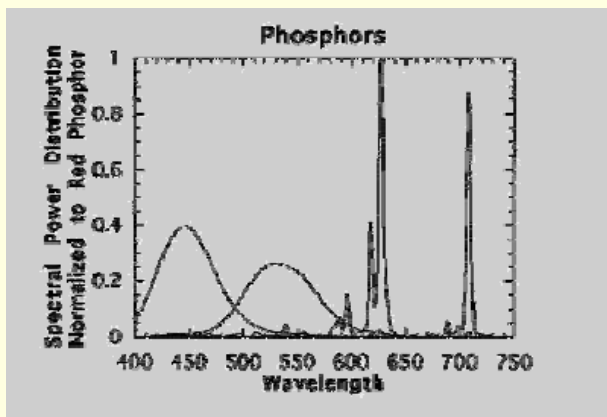


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tegraf.puc-rio.br

Idit Harari

Espectro dos fósforos dos monitores

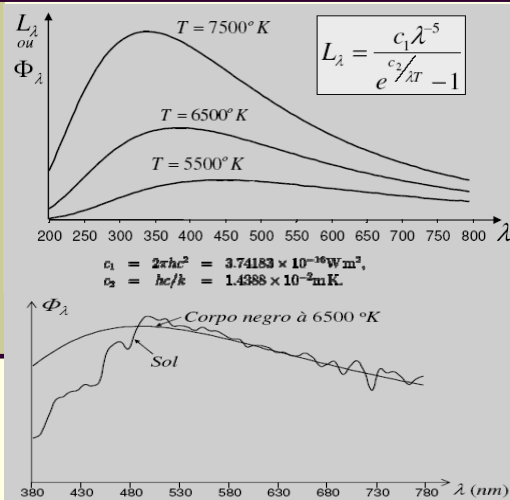


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

31

Corpo negro (blackbody)



Corpo negro – material que emite luz quando aquecido. O espectro de cores é determinado apenas pela temperatura do corpo.

Uma lâmpada incandescente e a chapa de um fogão elétrico apresentam um espectro de cores que são uma boa aproximação do espectro de cores de um corpo negro.

Espectro da Luz solar e de um corpo negro a 6500° K

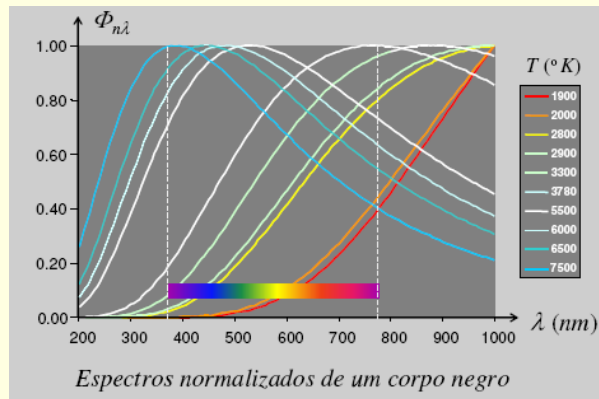
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

32

Corpo negro (blackbody)

Varição da distribuição espectral da radiação de um corpo negro em função da temperatura



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

33

Temperatura da cor

Qualquer fonte luminosa que tem as mesmas coordenadas de cromaticidade que a de um corpo negro pode ser descrita como tendo a temperatura de cor daquele corpo negro.



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

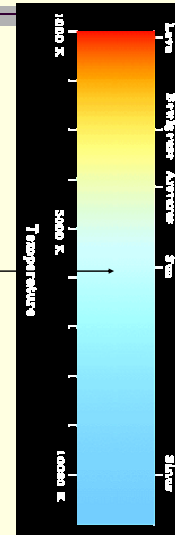
34

Temperatura da cor

http://webphysics.davidson.edu/alumni/MiLee/java/bb_mil.htm

Temperature	Typical Sources
1000K	Candles; oil lamps
2000K	Very early sunrise; low effect tungsten lamps
2500K	Household light bulbs
3000K	Studio lights, photo floods
4000K	Clear flashbulbs
5000K	Typical daylight; electronic flash
5500K	The sun at noon near Kodak's offices :-)
6000K	Bright sunshine with clear sky
7000K	Slightly overcast sky
8000K	Hazy sky
9000K	Open shade on clear day
10,000K	Heavily overcast sky
11,000K	Sunless blue skies
20,000+K	Open shade in mountains on a really clear day

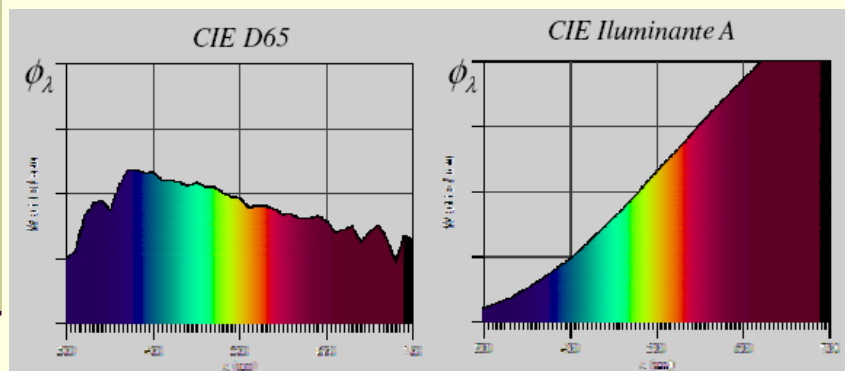
Monitor Ideal



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tegraf.puc-rio.br

Espectro CIE D65 e da lâmpada incandescente (illuminant A)

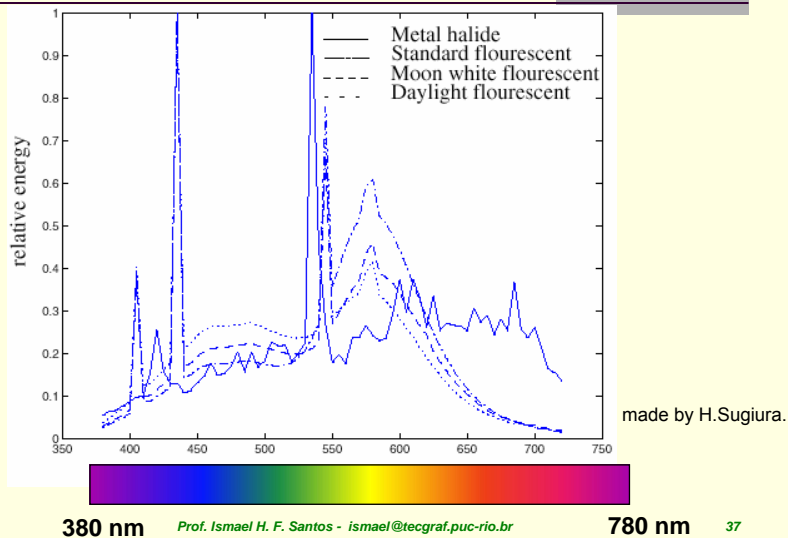


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tegraf.puc-rio.br

36

Espectro de quatro fontes luminosas artificiais



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

37

Modelo Matemático de Luz

- Universo matemático é o conjunto D de todas as funções de distribuição espectral.
- Função de **distribuição espectral** relaciona: comprimento de onda com uma grandeza radiométrica.

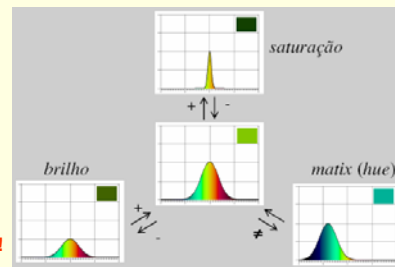
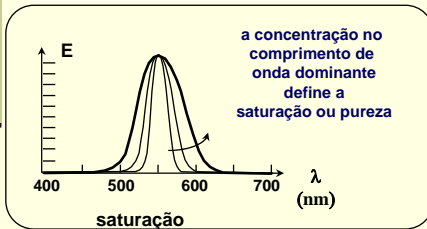
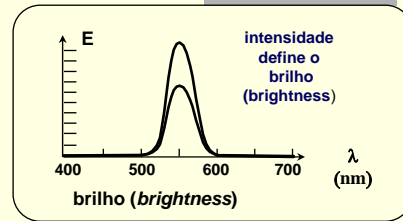
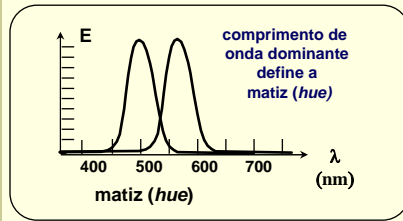
$$D = \left\{ f : U \subset \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+ \right\}$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

38

Características das fontes luminosas



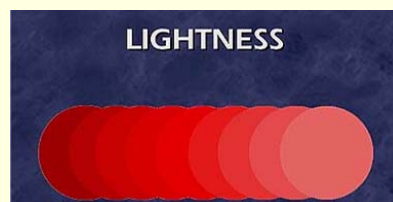
Cores pastéis são menos saturadas ou menos puras !

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

39

Características das fontes luminosas



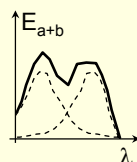
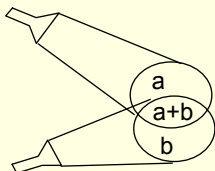
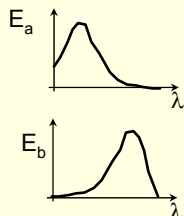
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

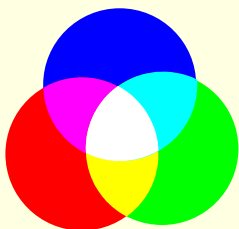
40

Processos aditivos de formação de cores

$$E_{a+b}(\lambda) = E_a(\lambda) + E_b(\lambda)$$



O olho não vê componentes!



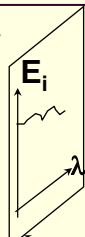
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

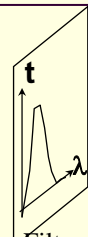
41

Processos subtrativos de formação de cores

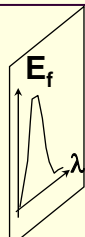
filtros



Luz
branca



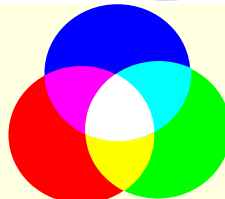
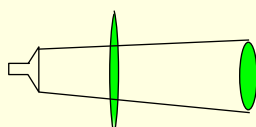
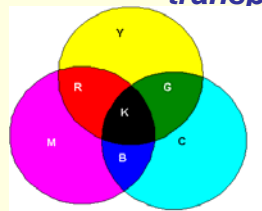
Filtro
verde



Luz
verde

$$E_f(\lambda) = t(\lambda)E_i(\lambda)$$

transparência



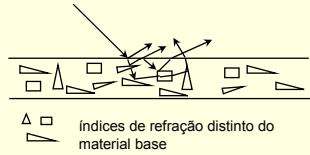
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

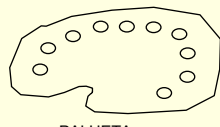
42

Processos de formação de cores: por pigmentos

por pigmentação



A sucessão de reflexão e refração determinam a natureza da luz refletida



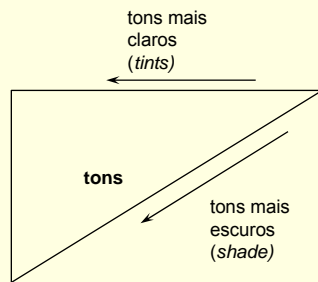
PALHETA DO PINTOR

April 05

tinta branca

Cinzas (greys)

tinta preta

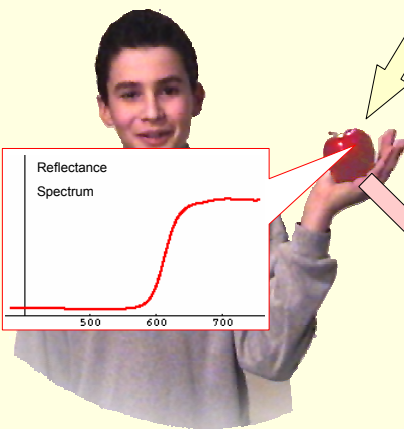
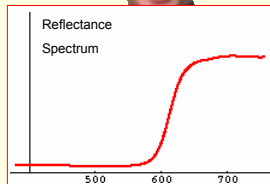
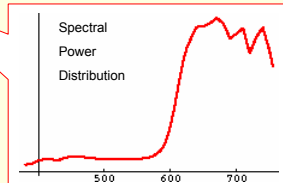
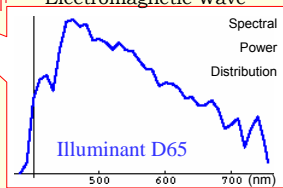
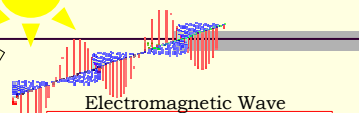
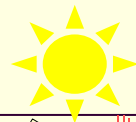


tinta colorida (saturada)

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

43

What is Color?



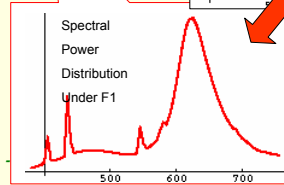
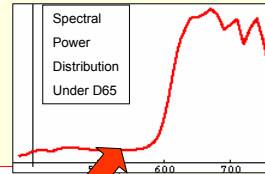
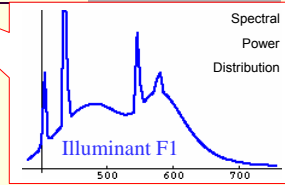
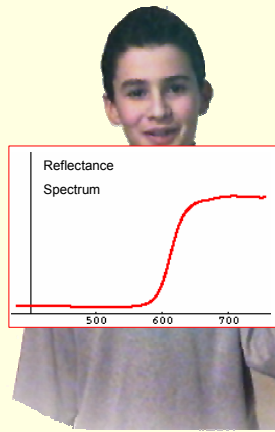
Frédo Durand and Barb Cutler MIT- EECS

- ismael@tecgraf.puc-rio.br

44

What is Color?

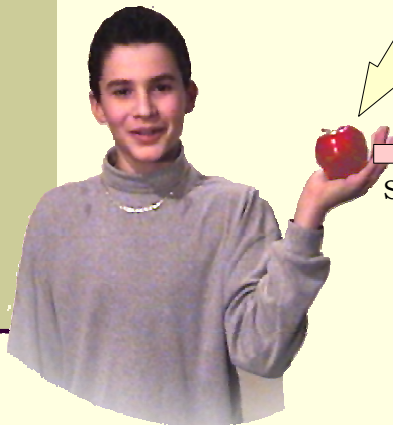
Neon Lamp



Frédo Durand and Barb Cutler MIT- EECS

45

What is Color?



Observer

Frédo Durand and Barb Cutler MIT- EECS

- ist

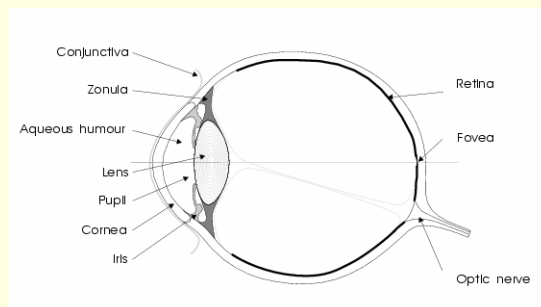
What is Color?

Spectral Sensibility of the L, M and S Cones

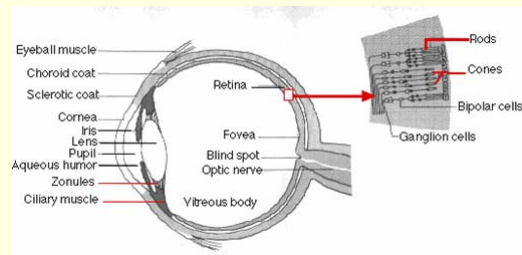
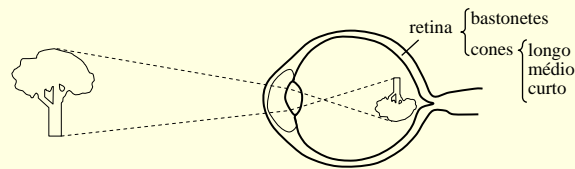
Distribution of Cones and Rods

Sistemas Físicos de Cor

- O olho é um sistema físico de processamento de cor (sistema refletivo).
 - Similar a uma câmera de vídeo.
 - Converte luz em impulsos nervosos.



Anatomia do olho humano



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

49

Percepção de Cor

- Diferente para cada espécie animal.
- Dentre os mamíferos, só o homem e o macaco enxergam cores.
- Aves têm uma visão muito mais acurada do que a nossa.

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

50

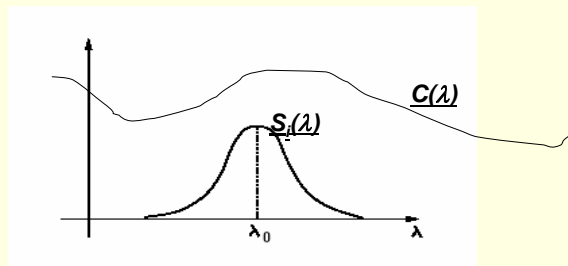
Representação

- Amostragem gera uma representação **finita** de uma função de distribuição espectral.
- Todo sistema refletivo possui um número **finito** de sensores, que fazem uma amostragem em n faixas do espectro.

Amostragem

$$C(\lambda) \rightarrow (c_1, c_2, \dots, c_n), \quad c_i = \int_0^{\infty} C(\lambda) s_i(\lambda) d\lambda$$

- $s_i(\lambda)$ é a função de resposta espectral do i -ésimo sensor.



Sistema Visual Humano

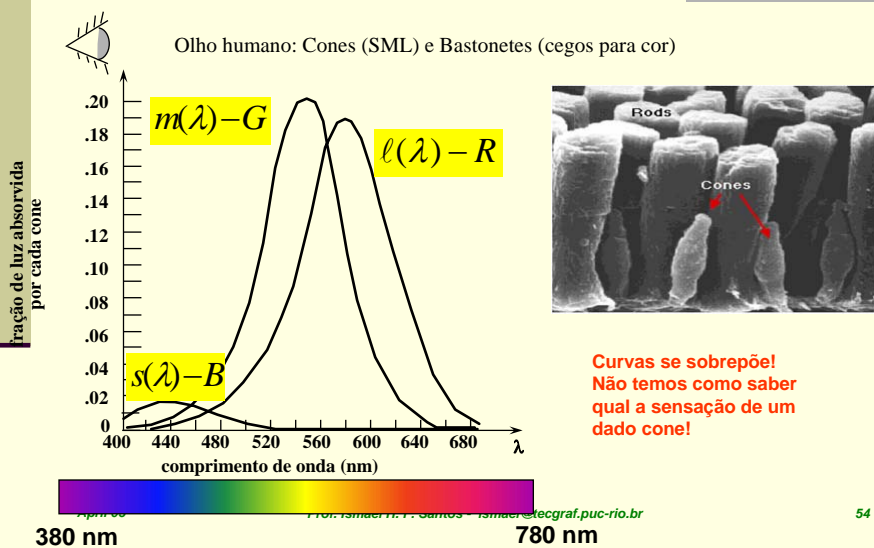
- Dois tipos de células receptoras com sensibilidades diferentes: cones e bastonetes.
 - Bastonetes → luz de baixa intensidade (sem cor).
 - Cones → luz de média e alta intensidade (com cor).
- Três tipos de cones que amostram: comprimento de onda curto (azul), médio (verde) e longo (vermelho).

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

53

Sensibilidade dos cones do olho humano



Eficiência Luminosa

- Brilho aparente varia com o comprimento de onda.
- Pico do brilho é diferente para níveis baixos (bastonetes), médios e altos (cones).
 - Máximo na faixa do verde.

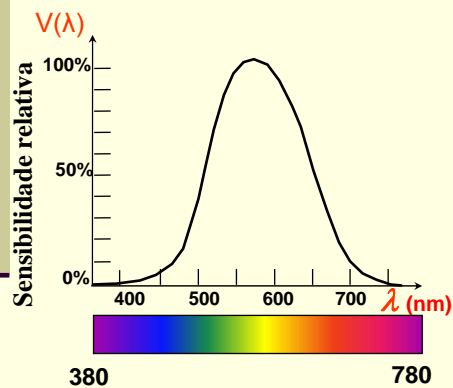
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

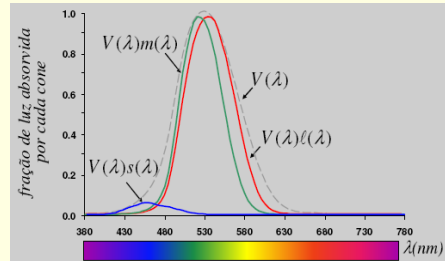
55

Sensibilidade do olho em função do comprimento de onda

Fração da luz absorvida pelo olho



Sensibilidade relativa dos cones

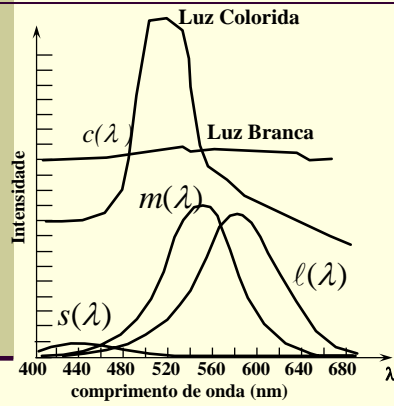


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

56

Percepção de cor



$$S = \int c(\lambda)s(\lambda)d\lambda$$

$$M = \int c(\lambda)m(\lambda)d\lambda$$

$$L = \int c(\lambda)l(\lambda)d\lambda$$

não é assim! mas...



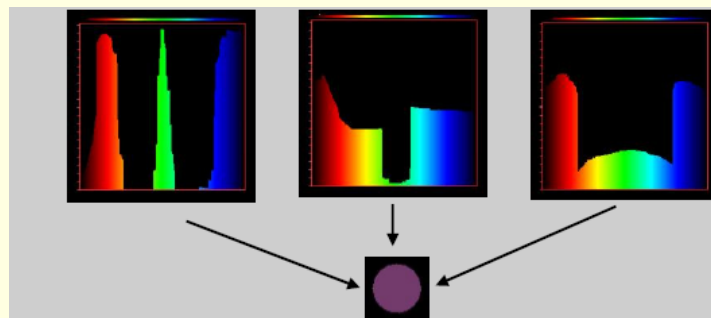
Tri-cromaticidade: qualquer espectro pode ser representado por três números sem perda de informação para os sistema visual humano

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

57

Princípios do metamerismo



Metamerismo: todos os espectros que produzem as mesmas respostas tri-cromáticas são indistinguíveis.

Spectra obtained using a simulation by Hughes, Bell and Doppelt (Brown University)

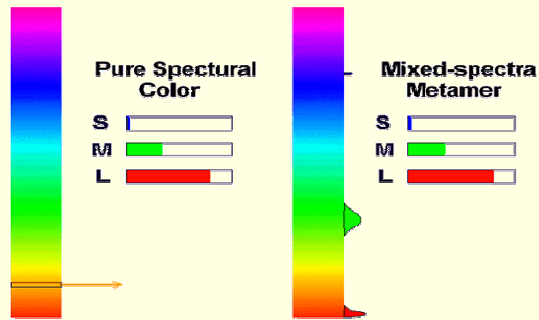
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

58

Metamerismo

- Two lights that appear the same visually. They might have different SPDs (spectral power distributions)

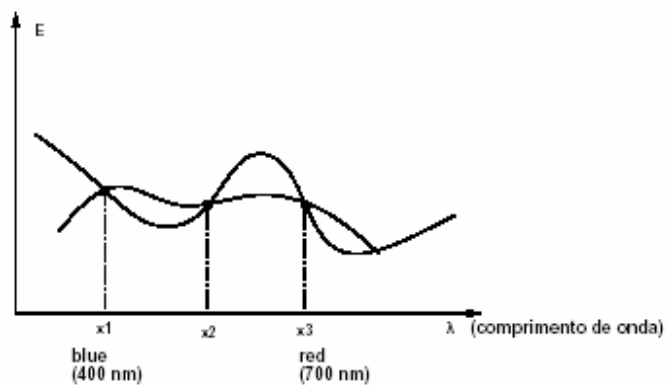


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

Idit Haran 59

Metamerismo

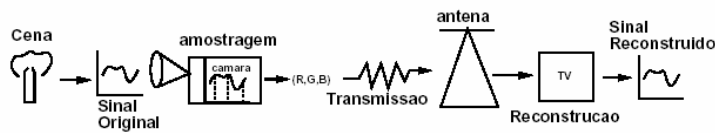


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

60

Amostragem e Reconstrução



- A cor reconstruída deve ser perceptualmente igual a cor original.
 - É possível devido ao **metamerismo**.
 - Cores metaméricas são perceptualmente idênticas.

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

61

Metamerismo e reprodução de cor em CG

The diagram compares 'Mundo Real' (Real World) and 'Espaço Virtual' (Virtual Space). In the real world, a scene is viewed through an eye icon. In the virtual space, the same scene is viewed through a monitor icon. The objective is to produce the same color sensation. Two graphs are shown: a spectral power distribution graph (top) and a color bar graph (bottom). The text states: 'olho só distingue 400 mil cores ($< 2^{19}$) \Rightarrow 19 bits deveriam ser suficientes'.

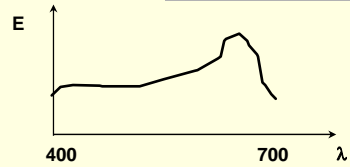
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

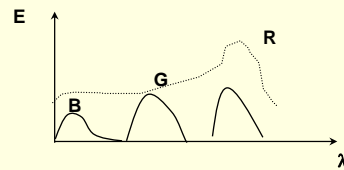
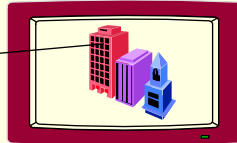
62

O problema de reprodução de cor em CG

Mundo Real



Espaço Virtual



- mesma sensação de cor => Metamerismo
- objetivo: produzir a mesma sensação de cor
- olho só distingue 400 mil cores ($< 2^{19}$) => 19 bits deveriam ser suficientes

63

Sistemas Emissivos

- Sistemas **emissivos** reconstroem cores a partir de emissores que formam uma base de primárias, P_k

$$C_r(\lambda) = \sum_{k=1}^n c_k P_k(\lambda).$$

Representação Discreta de Cor

- O espaço de todas as distribuições espectrais possui dimensão **infinita**.
- Representação **finita** requer um processo de amostragem.
 - Aproxima um espaço de dimensão infinita por um espaço de dimensão finita (há perda de informação).
- Pode-se utilizar um vetor de dimensão finita na representação discreta de cor.

$$R: f \in D \rightarrow (f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)) \in \mathcal{R}^n$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

65

Espaço Perceptual de Cor

- Representação define uma transformação linear.
 - De acordo com os experimentos de Young em 1807.

$$R(af_1 + bf_2) = aR(f_1) + bR(f_2)$$

- Espaço perceptual de cor é de dimensão 3.
- Representação discreta associa um conjunto de distribuições espectrais ao mesmo ponto do \mathbf{R}^3 (metamerismo).

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

66

Reconstrução de Cor

- **Dados**
 - Uma função de distribuição espectral $C(\lambda)$,
 - Um sistema emissivo com base P_k
 - E um sistema refletivo,
- Como calcular as componentes na base de primárias de forma a que a cor reconstruída seja perceptualmente equivalente a cor original?

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

67

Funções de Reconstrução de Cor

- Uma vez que se conheça a resposta espectral do sistema, prova-se que:

$$C_r(\lambda) = \sum_{k=1}^n c_k P_k(\lambda), c_k = \int_0^{\infty} C(\lambda) r_k(\lambda) d\lambda$$

$r_k(\lambda)$ são as funções de reconstrução de cor.

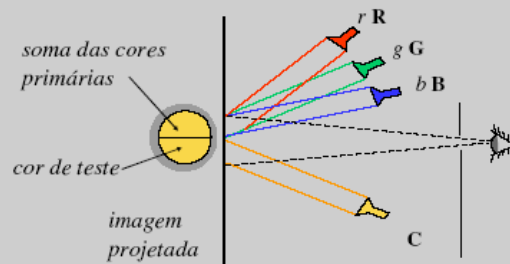
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

68

1ª Lei de Grassmann

A sensação de cor de qualquer espectro pode ser obtida da mistura de três cores primárias (tri-cromaticidade).



$$C = rR + gG + bB$$

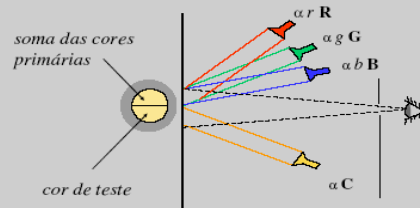
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

69

2ª e 3ª Lei de Grassmann

Se os espectros das luzes são intensificadas por um mesmo fator o metamerismo permanece



$$\alpha C = \alpha rR + \alpha gG + \alpha bB$$

Se:

$$C_1 = r_1 R + g_1 G + b_1 B$$

e

$$C_2 = r_2 R + g_2 G + b_2 B$$

então

$$C_1 + C_2 = (r_1 + r_2)R + (g_1 + g_2)G + (b_1 + b_2)B$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

70

Sistemas de Cor - Padrão CIE

- CIE – Commission Internationale de L'Eclairage (criada em 1913).
- Padrão CIE-RGB (1931) apresenta coordenadas negativas.
- Padrão CIE-XYZ foi criado para evitar coordenadas negativas.
 - Primárias não estão contidas no sólido de cor.
- Conversão CIE-RGB para CIE-XYZ é uma mera mudança de sistema de coordenadas.

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tegraf.puc-rio.br

71

Colorimetria e Sistemas de Cores

- **CIE (Commission Internationale de l'Eclairage)**
 - RGB
 - XYZ
 - xyY
 - Lu^*v^*
 - La^*b^*
- **Sistemas por exumeração**
 - Munsell
 - Pantone
- **Sistemas dependentes de dispositivos**
 - mRGB
 - CMY
 - CMYK
- **Sistemas para especificação interativa**
 - HSV
 - HLS

April 05

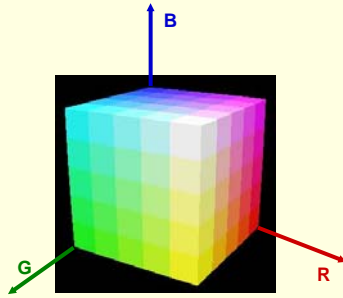
Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tegraf.puc-rio.br

72

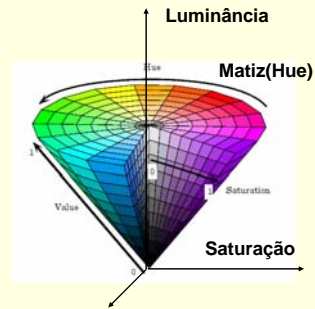
3D Color Spaces

- Tri-cromático sugere espaço 3D

Cartesiano



Polar

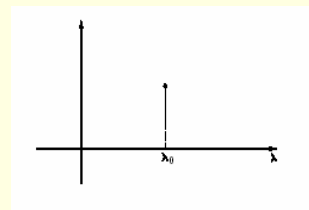
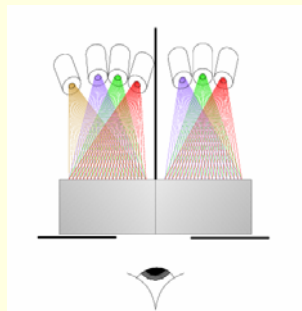


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

73

Resposta Espectral



cor espectral

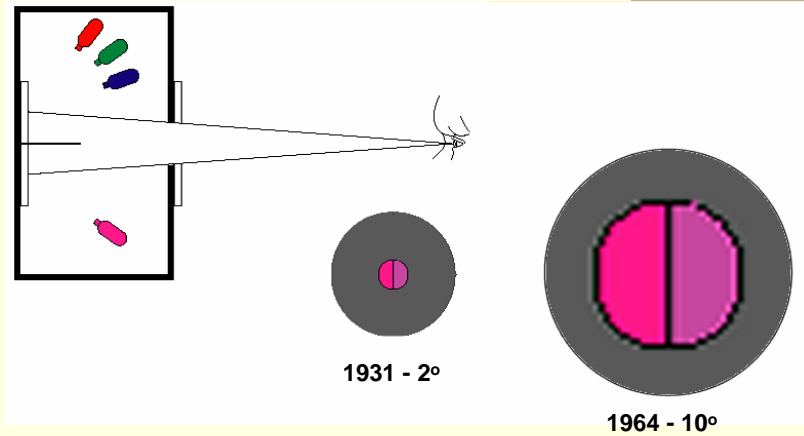
- Cor espectral desconhecida à esquerda.
- Três cores padrão de cada lado.
- Intensidade de cada cor padrão varia de forma independente.

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

74

CIE RGB

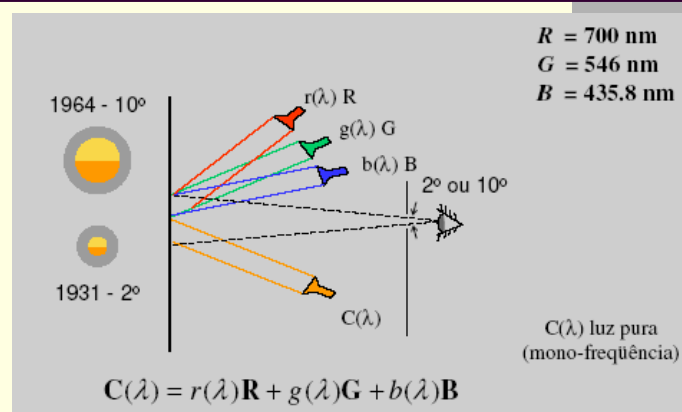


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

75

Representação perceptual da cor CIE RGB



Problema:

Não consegue se representar todas as cores visíveis (falta saturação)

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

76

colour Matching Experiment 1

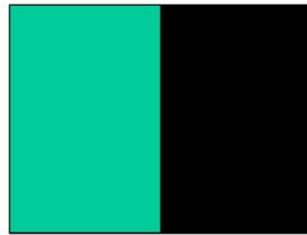


Image courtesy Bill Freeman

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

77

colour Matching Experiment 1

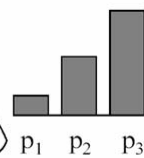


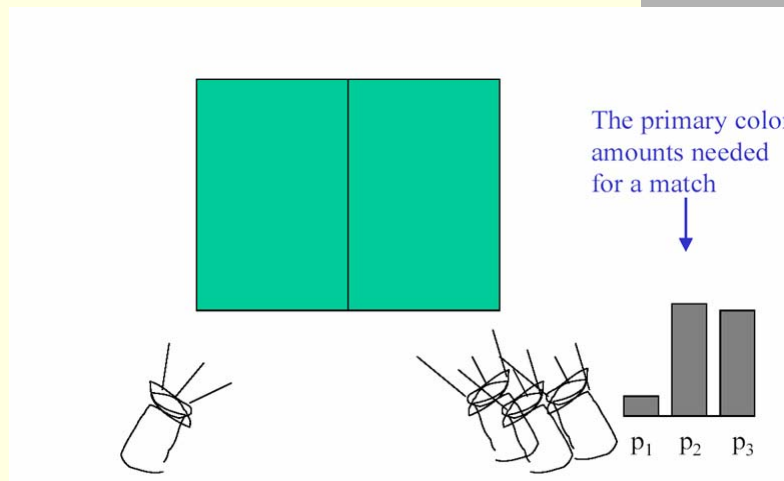
Image courtesy Bill Freeman

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

78

colour Matching Experiment 1



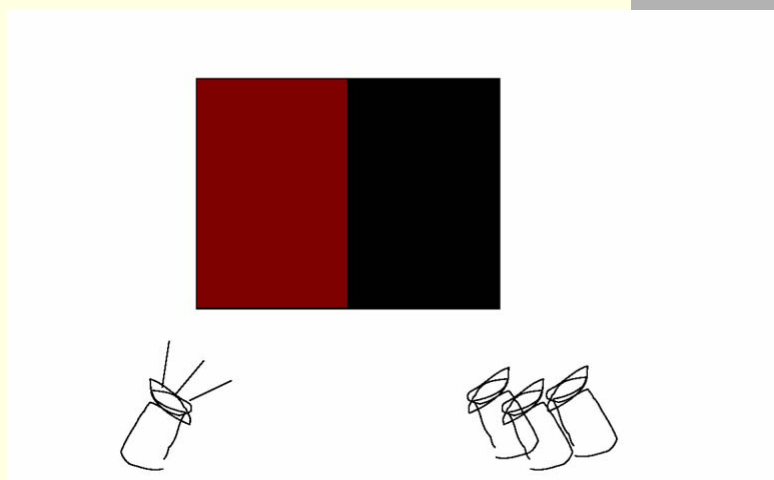
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

Image courtesy Bill Freeman

79

colour Matching Experiment 2



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

Image courtesy Bill Freeman

80

colour Matching Experiment 2

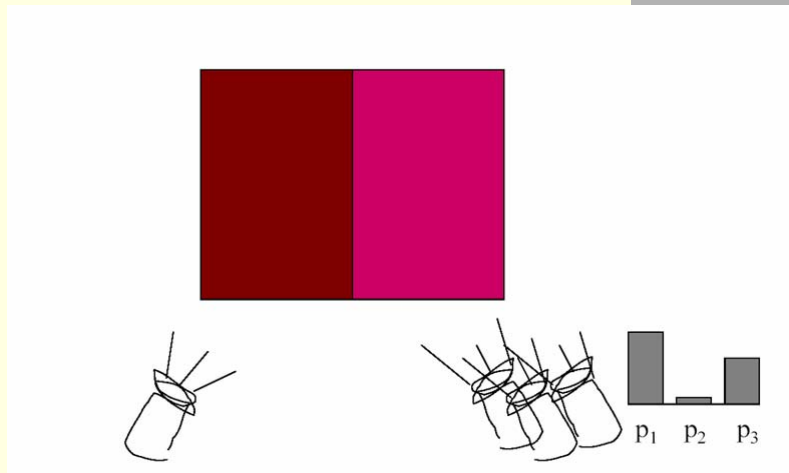


Image courtesy Bill Freeman

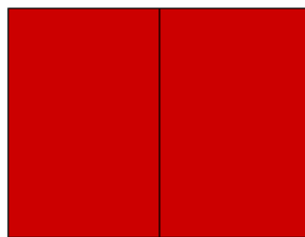
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

81

colour Matching Experiment 2

We say a “negative” amount of p_2 was needed to make the match, because we added it to the test color’s side.



The primary color amounts needed for a match:

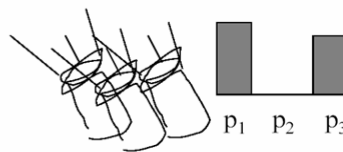
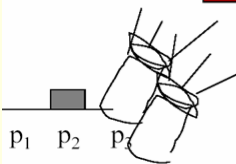
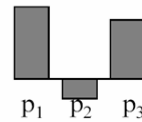


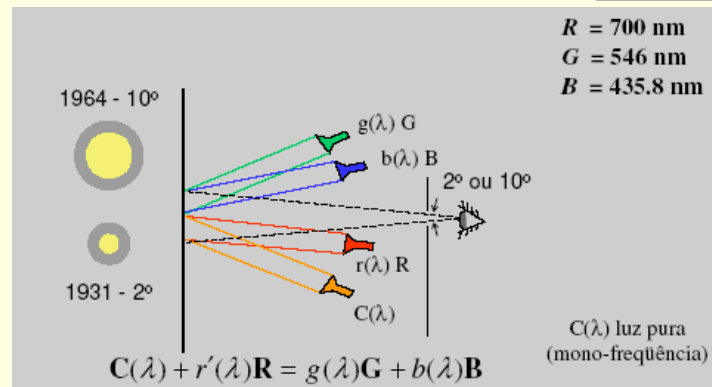
Image courtesy Bill Freeman

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

82

Artifício para “subtrair” uma componente



$$C(\lambda) = r(\lambda)R + g(\lambda)G + b(\lambda)B, \text{ onde } r(\lambda) = -r'(\lambda)$$

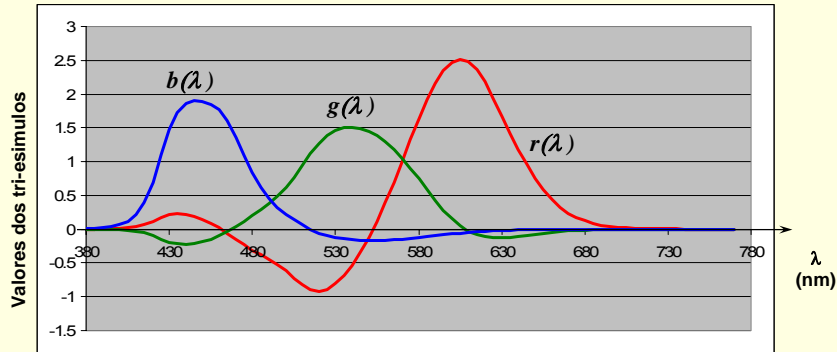
Intensidade Negativa?

- Podem haver cores que não são igualadas pelas três cores padrão apenas.
 - Nesse caso, adiciona-se uma cor padrão ao lado esquerdo também (correspondendo, matematicamente, a uma intensidade negativa).

Componentes das cores monocromáticas - CIE RGB -

$$C(\lambda) = r(\lambda) R + g(\lambda) G + b(\lambda) B$$

<http://cvision.ucsd.edu/>



Combinação de três cores (RGB) para reproduzir as cores espectrais

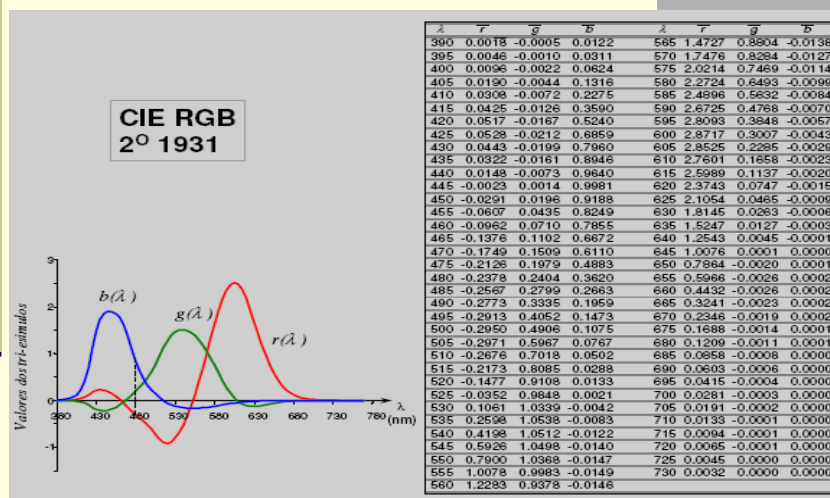
R = 700 nm
G = 546 nm
B = 435.8 nm

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

85

Componentes das cores monocromáticas - CIE RGB 2º 1931



**CIE RGB
2º 1931**

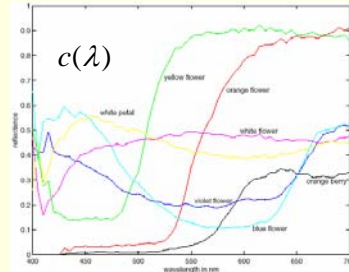
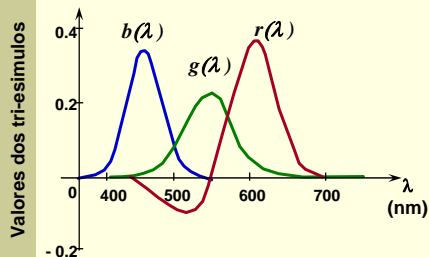
λ	r	g	b	λ	r	g	b
390	0.0018	-0.0005	0.0122	565	1.4727	0.8804	-0.0138
395	0.0046	-0.0010	0.0311	570	1.7476	0.8284	-0.0127
400	0.0096	-0.0022	0.0624	575	2.0214	0.7469	-0.0114
405	0.0190	-0.0044	0.1316	580	2.2724	0.6493	-0.0098
410	0.0308	-0.0072	0.2275	585	2.4896	0.5632	-0.0084
415	0.0425	-0.0126	0.3590	590	2.6725	0.4788	-0.0070
420	0.0517	-0.0167	0.5240	595	2.8093	0.3848	-0.0057
425	0.0528	-0.0212	0.6859	600	2.8717	0.3007	-0.0043
430	0.0443	-0.0199	0.7960	605	2.8525	0.2285	-0.0029
435	0.0322	-0.0161	0.8946	610	2.7601	0.1658	-0.0023
440	0.0148	-0.0073	0.9640	615	2.5989	0.1137	-0.0020
445	-0.0023	0.0014	0.9981	620	2.3743	0.0747	-0.0015
450	-0.0291	0.0196	0.9188	625	2.1054	0.0485	-0.0009
455	-0.0607	0.0435	0.8249	630	1.8145	0.0283	-0.0006
460	-0.0962	0.0710	0.7855	635	1.5247	0.0127	-0.0003
465	-0.1376	0.1102	0.6672	640	1.2543	0.0045	-0.0001
470	-0.1749	0.1509	0.6110	645	1.0078	0.0001	0.0000
475	-0.2126	0.1979	0.4883	650	0.7884	-0.0020	0.0001
480	-0.2378	0.2404	0.3620	655	0.5968	-0.0026	0.0002
485	-0.2567	0.2799	0.2863	660	0.4432	-0.0026	0.0002
490	-0.2773	0.3335	0.1959	665	0.3241	-0.0023	0.0002
495	-0.2913	0.4052	0.1473	670	0.2348	-0.0019	0.0002
500	-0.2950	0.4906	0.1075	675	0.1688	-0.0014	0.0001
505	-0.2971	0.5967	0.0767	680	0.1209	-0.0011	0.0001
510	-0.2878	0.7019	0.0502	685	0.0858	-0.0008	0.0000
515	-0.2173	0.8085	0.0288	690	0.0603	-0.0006	0.0000
520	-0.1477	0.9108	0.0133	695	0.0415	-0.0004	0.0000
525	-0.0352	0.9848	0.0021	700	0.0281	-0.0003	0.0000
530	0.1061	1.0339	-0.0042	705	0.0191	-0.0002	0.0000
535	0.2598	1.0538	-0.0083	710	0.0133	-0.0001	0.0000
540	0.4198	1.0512	-0.0122	715	0.0094	-0.0001	0.0000
545	0.5926	1.0498	-0.0140	720	0.0065	-0.0001	0.0000
550	0.7900	1.0368	-0.0147	725	0.0045	0.0000	0.0000
555	1.0078	0.9983	-0.0149	730	0.0032	0.0000	0.0000
560	1.2283	0.9378	-0.0146				

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

86

Componentes das cores monocromáticas - CIE RGB -



$$R = k \int c(\lambda) r(\lambda) d\lambda$$

$$G = k \int c(\lambda) g(\lambda) d\lambda$$

$$B = k \int c(\lambda) b(\lambda) d\lambda$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

87

Sólido de Cor

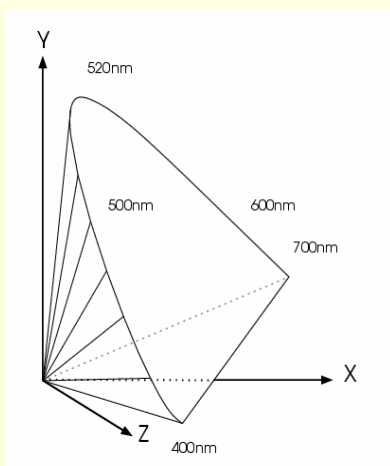
- Conjunto de todas as cores visíveis forma um cone convexo, chamado de sólido de cor.
 - Combinação convexa de duas distribuições espectrais é uma distribuição espectral.
 - Cada distribuição espectral corresponde a um único ponto no espaço de cor.
 - Aplicação de representação é linear.
 - Espaço de cor é o conjunto das retas que passam pela origem.

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

88

Sólido de Cor – CIE - RGB



Propriedades

$C(\lambda)$ é cor visível $\Rightarrow t C(\lambda)$ é cor visível.

$R(t C(\lambda)) = t R(C(\lambda))$.

$C1(\lambda)$ e $C2(\lambda)$ são cores visíveis $\Rightarrow (1-t) C1(\lambda) + t C2(\lambda)$, $t \in [0,1]$, é cor visível.

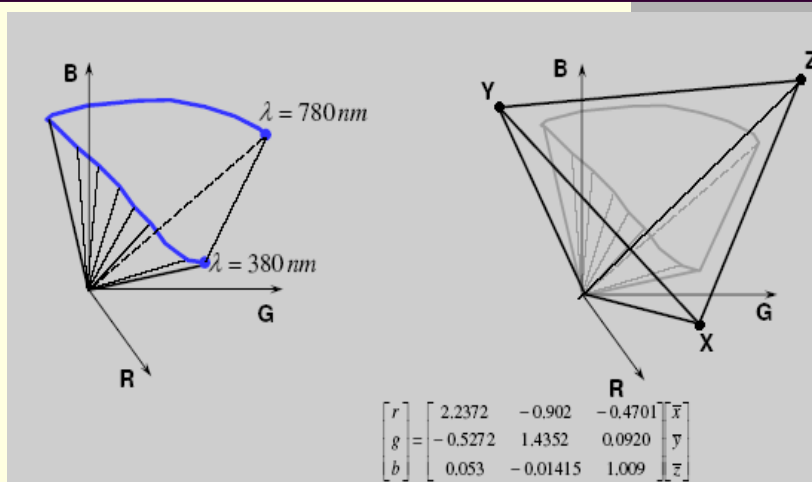
$R((1-t) C1(\lambda) + t C2(\lambda)) = (1-t) R(C1(\lambda)) + t R(C2(\lambda))$.

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

89

Mudança de Base do Espaço de Cor



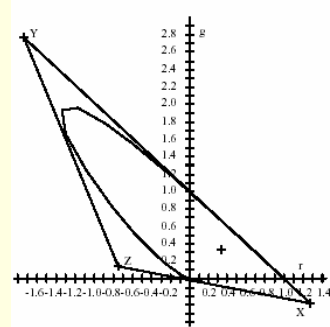
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

90

Criação do Sistema XYZ

- Duas cores primárias têm luminância zero.
- Informação de luminância na componente Y.
- Traça-se uma reta coincidente com o segmento quase retilíneo do diagrama de cromaticidade.
 - Interseção desta reta com a reta de luminância zero define a primária X.



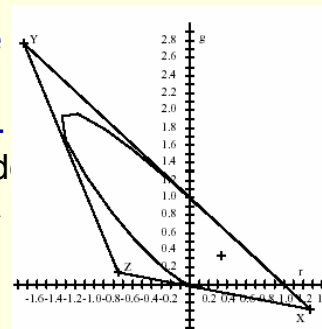
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

91

Construção Geométrica

- As duas outras primárias ficam definidas traçando-se uma outra reta tangente ao diagrama de cromaticidade.
 - Esta reta minimiza a área do triângulo formado pela reta de luminância zero, a reta anterior e esta reta.
 - Z está sobre a reta de luminância zero.



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

92

Conversão RGB-XYZ

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_r C_r & x_g C_g & x_b C_b \\ y_r C_r & y_g C_g & y_b C_b \\ (1-x_r-y_r)C_r & (1-x_g-y_g)C_g & (1-x_b-y_b)C_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} C_r R \\ C_g G \\ C_b B \end{pmatrix},$$

onde, $C_r = X_r + Y_r + Z_r$; $C_g = X_g + Y_g + Z_g$; $C_b = X_b + Y_b + Z_b$

- **Dispõem-se das coordenadas de cromaticidade xyz.**
 - C_r, C_g, C_b escalam apropriadamente os vetores da base.
- **É necessário que se conheçam as coordenadas tricromáticas de um ponto.**

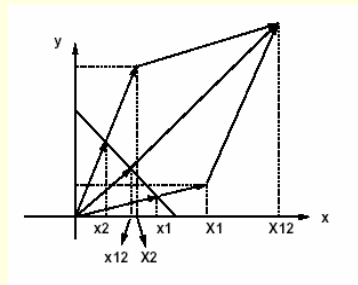
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

93

Branco Padrão

- Normalmente, usam-se as coordenadas tricromáticas (X_w, Y_w, Z_w) do branco padrão de referência: $(R_w, G_w, B_w) = (1, 1, 1)$.



$$\begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} C_r \\ C_g \\ C_b \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} C_r \\ C_g \\ C_b \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix}.$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

94

Mudança da base CIE RGB para CIE XYZ

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.237 & -0.902 & -0.470 \\ -0.527 & 1.43 & 0.092 \\ 0.053 & -0.014 & 1.009 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} R = 2.237X - 0.902Y - 0.47Z \\ G = -0.527X + 1.43Y - 0.092Z \\ B = 0.053X - 0.014Y + 1.009Z \end{array}$$

$$C(\lambda) = r(\lambda)R + g(\lambda)G + b(\lambda)B$$

$$C(\lambda) = r(\lambda)(2.37X - 0.902Y - 0.47Z) + \\ g(\lambda)(-0.527X + 1.43Y - 0.092Z) + \\ b(\lambda)(0.005X - 0.014Y + 1.009Z)$$

$$C(\lambda) = \bar{x}(\lambda)X + \bar{y}(\lambda)Y + \bar{z}(\lambda)Z$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

95

Mudança da base CIE RGB -> CIE XYZ

$$C(\lambda) = r(\lambda)(2.37X - 0.902Y - 0.47Z) + \\ g(\lambda)(-0.527X + 1.43Y - 0.092Z) + \\ b(\lambda)(0.005X - 0.014Y + 1.009Z)$$

$$C(\lambda) = (2.37r(\lambda) - 0.527g(\lambda) + 0.005b(\lambda))X + \\ (-0.902r(\lambda) + 1.43g(\lambda) - 0.014b(\lambda))Y + \\ (-0.47r(\lambda) - 0.092g(\lambda) + 1.009b(\lambda))Z$$

$$C(\lambda) = \bar{x}(\lambda)X + \bar{y}(\lambda)Y + \bar{z}(\lambda)Z$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

96

Conversão da base CIE RGB para CIE XYZ

$$C(\lambda) = r(\lambda) R + g(\lambda) G + b(\lambda) B$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.237 & -0.902 & -0.47 \\ -0.527 & 1.435 & 0.092 \\ 0.053 & -0.0141 & 1.009 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.490 & 0.310 & 0.200 \\ 0.177 & 0.813 & 0.011 \\ 0.000 & 0.010 & 0.990 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$C(\lambda) = \bar{x}(\lambda)X + \bar{y}(\lambda)Y + \bar{z}(\lambda)Z$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

97

Matriz de Conversão RGB -> XYZ

- Fazendo as contas usando $(X_w, Y_w, Z_w) = (R_w, G_w, B_w) = (1, 1, 1)$, obtém-se:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.489989 & 0.310008 & 0.200003 \\ 0.176962 & 0.812400 & 0.010638 \\ 0.000000 & 0.009999 & 0.990001 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.364666 & -0.896583 & -0.468083 \\ -0.515155 & 1.426409 & 0.088746 \\ 0.005203 & -0.014407 & 1.009204 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}.$$

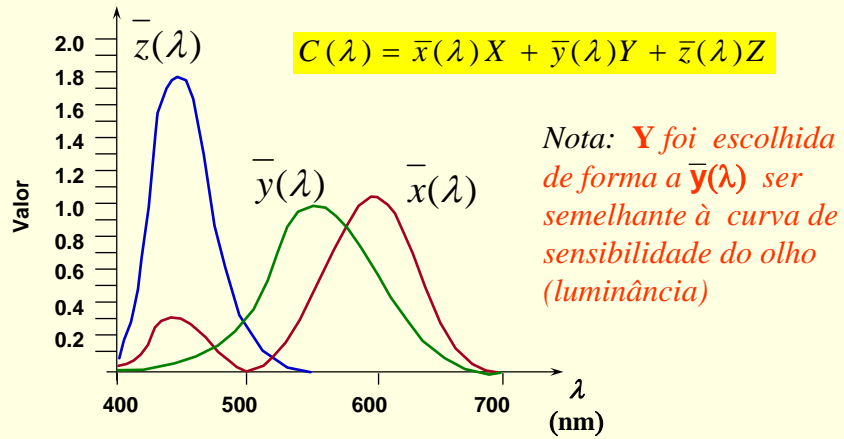
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

98

Componentes das cores monocromáticas - CIE XYZ -

Cores Básicas do CIE 1931

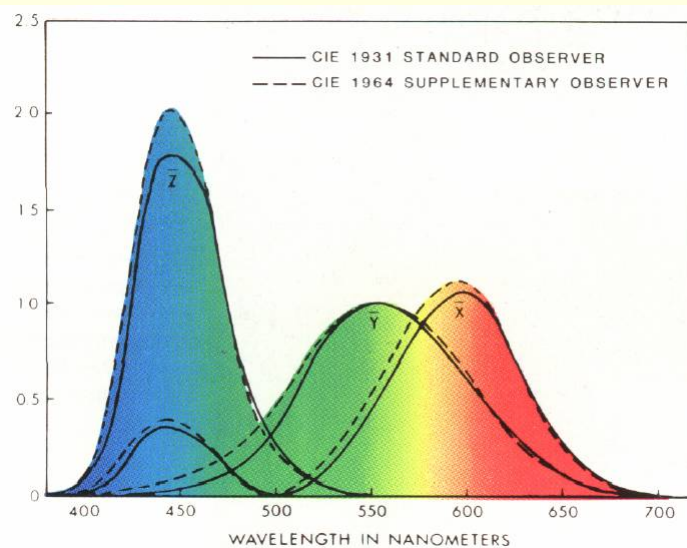


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

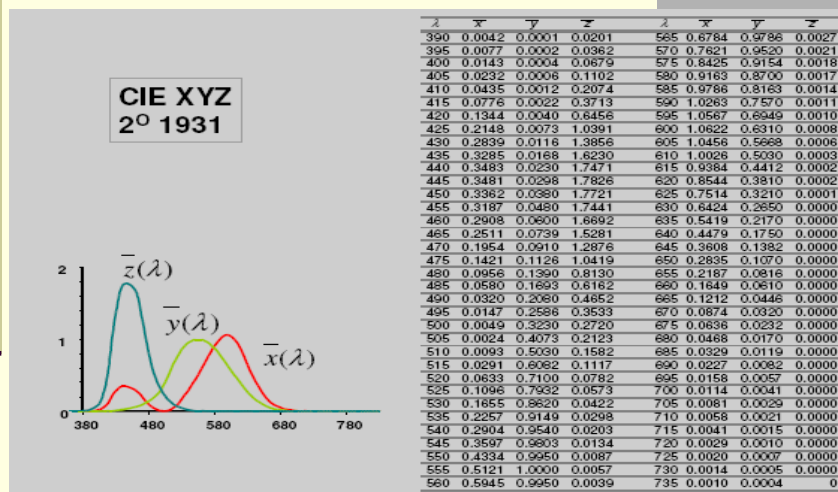
99

CIE XYZ (2° e 10°)



100

CIE XYZ 2º - 1931

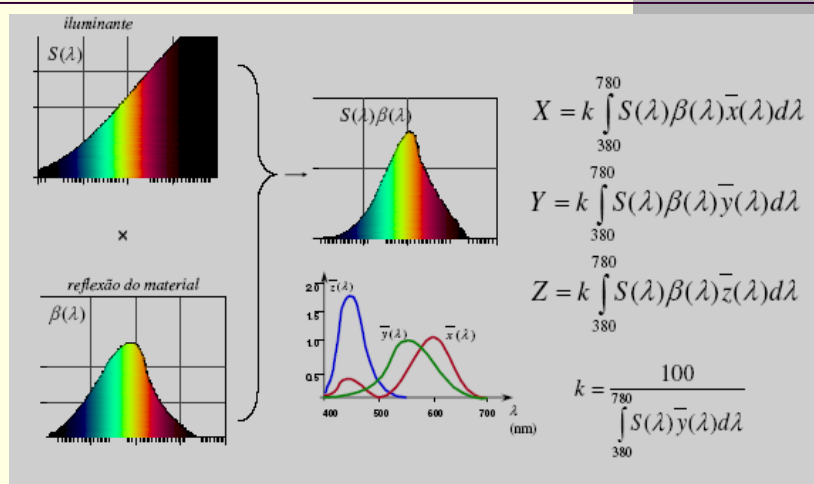


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

101

Cor de um objeto no CIE XYZ

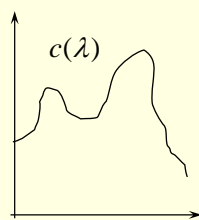
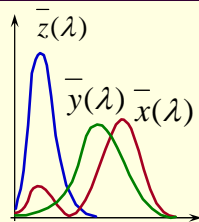


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

102

Cores visíveis representadas no CIE XYZ



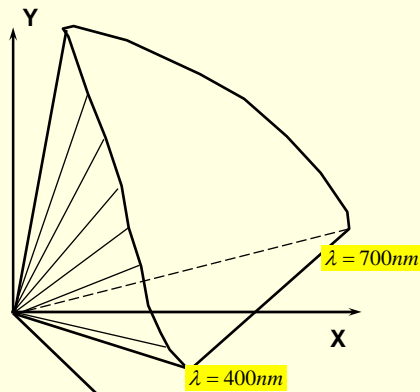
April 05

$$X = \frac{\int_{380}^{780} c(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} c_w(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

$$Y = \frac{\int_{380}^{780} c(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} c_w(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

$$Z = \frac{\int_{380}^{780} c(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} c_w(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br



103

Retirando a luminosidade ou brilho da definição da cor em CIE XYZ

- Um parenteses sobre luminosidade ou brilho

Valores típicos de luminosidade de um de uma superfície

Modo	Valores (<i>lux</i>)
Luz do dia (máximo)	100 000
Luz de dia sombrio	10 000
Interior próximo a janela	1 000
Minimo p/ trabalho	100
Lua cheia	0.2
Luz das estrelas	0.0003

... e o olho se acomoda!

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

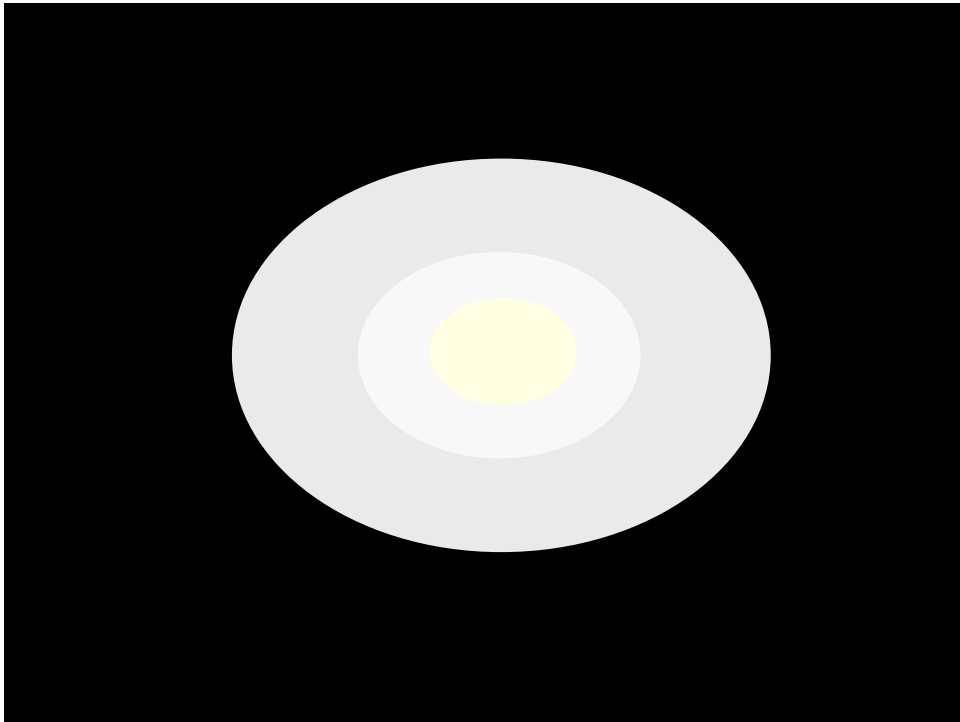


Diagrama de Cromaticidade

- Projeta-se radialmente o sólido de cor no plano de Maxwell: $x + y + z = 1$.
 - A interseção do sólido de cor com o plano de Maxwell é uma curva convexa.
 - Cores espectrais correspondem a pontos na fronteira do diagrama de cromaticidade.

Coordenadas de Cromaticidade

- Reta que passa pela origem e por uma cor C .
 - $\{p; p = tC, t \in \mathbb{R}\}$.
- Projeção $c = (c_r, c_g, c_b)$ no plano de Maxwell impõem $c_r + c_g + c_b = 1$.
- $t(C_r + C_g + C_b) = c_r + c_g + c_b = 1 \Rightarrow t = 1/(C_r + C_g + C_b)$
 $\Rightarrow c_i = C_i/(C_r + C_g + C_b)$.

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

107

Cálculo da Luminância

- Luminância é uma grandeza colorimétrica que corresponde aos termos perceptuais de **brilho** (emissores) ou **luminosidade** (refletores).
- Luminância é um funcional linear.

$$L: \zeta = \mathfrak{R}^3 \rightarrow \mathfrak{R}$$

$$L(C(\lambda)) = K(\lambda) \int_0^\infty C(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

$$L(C(\lambda)) = \langle L, c \rangle = \langle (0.177, 0.812, 0.016), (c_r, c_g, c_b) \rangle$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

108

Decomposição Crominância-Luminância

- Coordenadas de cromaticidade captam a noção da **matiz** de uma cor.
- Juntamente com a informação de intensidade ou luminância determinam unicamente uma cor.

Núcleo do Funcional de Luminância

- Todo vetor de um espaço vetorial pode ser escrito, de modo único, como soma direta de um vetor do núcleo de um funcional linear e de um vetor pertencente a um espaço complementar ao núcleo.

$$\ker(L) = \{c \in \mathfrak{R}^3 : L(c) = 0\}$$

$$c = \ker(L) \oplus \ell, c = c_c + c_l$$

Propriedade

- Dimensão do núcleo mais a dimensão da imagem de uma transformação linear é igual a dimensão do domínio da transformação.
 - Seja $L : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^m$. Então,
 - $\dim(\ker(L)) + \dim(\text{Im}(L)) = n$.
 - Logo, a dimensão do núcleo do operador de luminância é igual a 2.

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

111

Plano de Crominância

- Se duas cores tem a mesma luminância, então elas estão em um hiperplano afim, paralelo ao núcleo do operador de luminância.

$$L(c_1 - c_2) = 0 \Rightarrow c_1 - c_2 \in \ker(L)$$

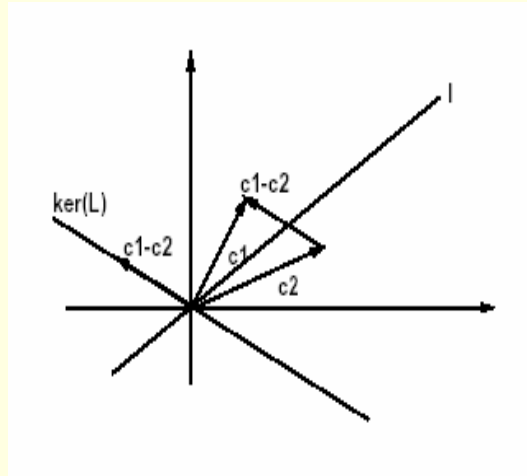
- Cada hiperplano afim paralelo ao núcleo do operador de luminância é chamado de um hiperplano de crominância (luminância constante).

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

112

Núcleo do Operador de Luminância

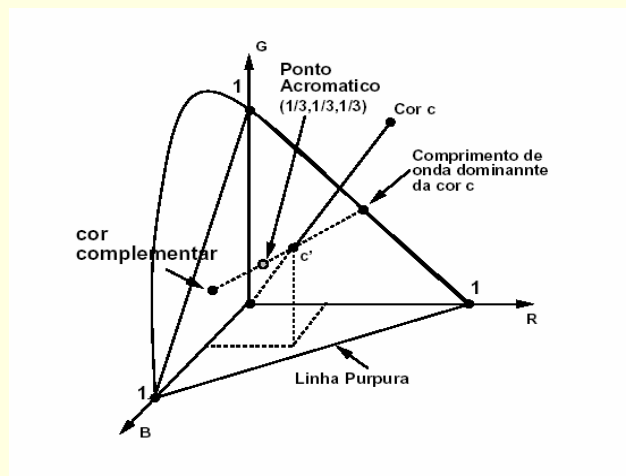


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

113

Cor Dominante e Complementar

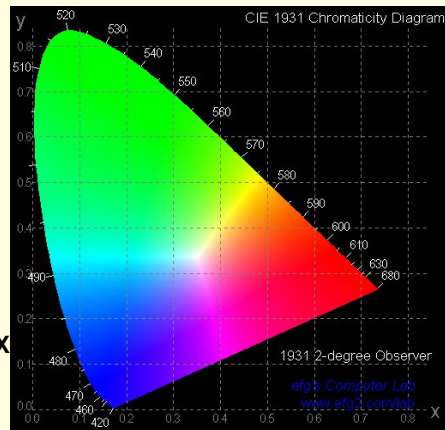
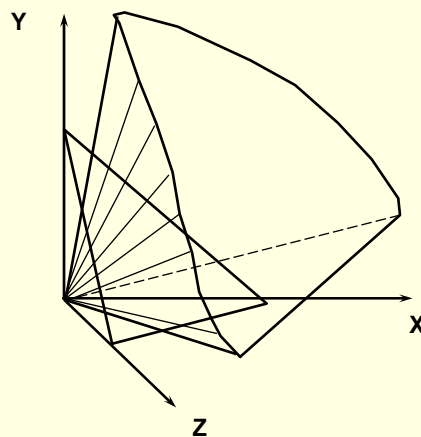


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

114

Cores visíveis representadas no CIE XYZ Diagrama de Cromaticidade



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

115

Sistema xyY

- O diagrama de cromaticidade retira a luminância.
 - Cores relacionadas com luminância não aparecem (marrom = vermelho-alaranjado com luminância muito baixa).
- Coordenadas xyY permitem que se faça uso do diagrama de cromaticidade na especificação de cores.

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

116

Sistema xyY

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}, z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

$$X = \frac{x}{y}Y, y = Y, Z = \frac{z}{y}Y \Rightarrow (X, Y, Z) = Y \left(\frac{x}{y}, 1, \frac{1-x-y}{y} \right)$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

117

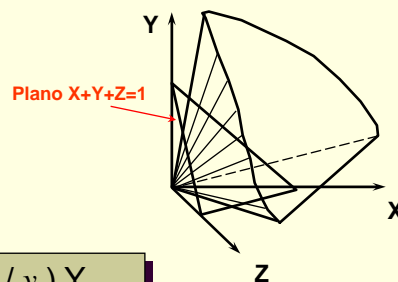
Retirando a luminosidade ou brilho da definição da cor em CIE XYZ

- Retirar o fator luminosidade ou brilho projetando no plano $X+Y+Z=1$

$$\begin{aligned} x &= X/(X+Y+Z) \\ y &= Y/(X+Y+Z) \\ z &= Z/(X+Y+Z) \end{aligned}$$

note que
 $x+y+z=1$

$$\begin{aligned} X &= (x/y) Y \\ Y &= Y \\ Z &= (1-x-y) Y / y \end{aligned}$$

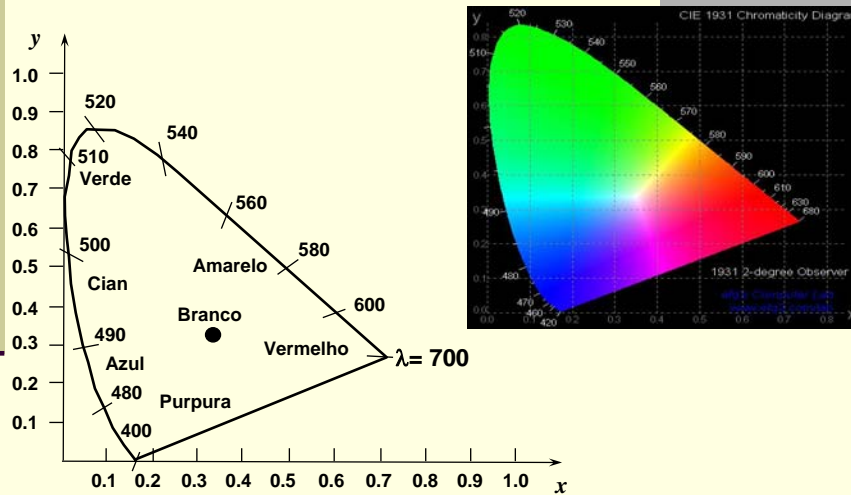


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

118

Cores visíveis representadas no sistema CIE xyY

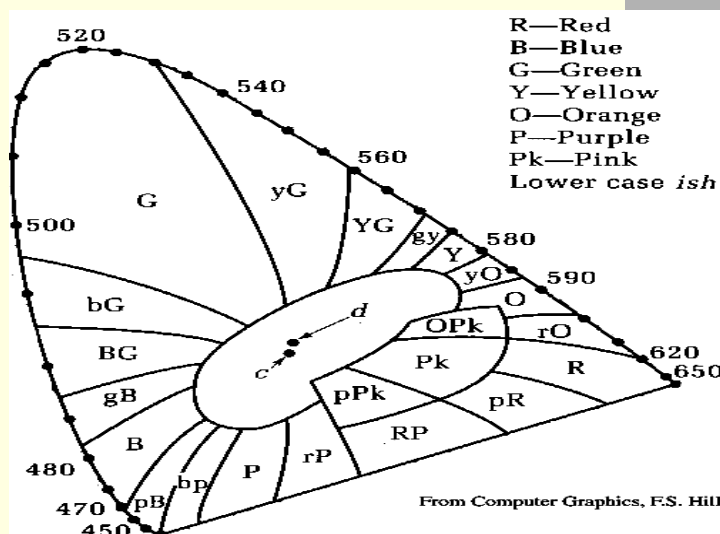


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

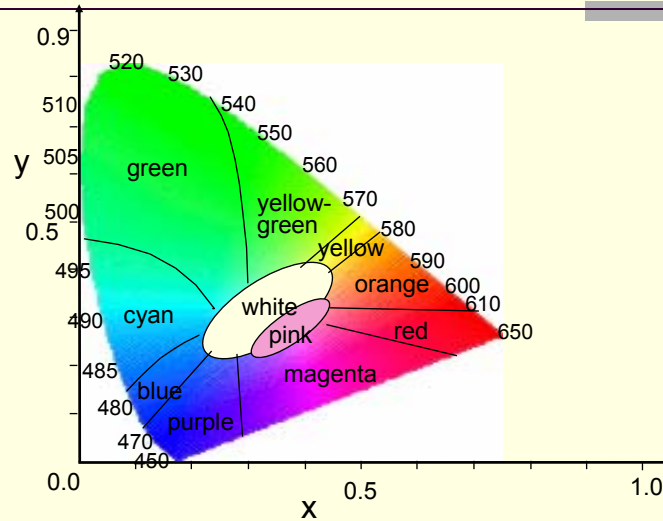
119

Nome das cores



120

Nome das cores

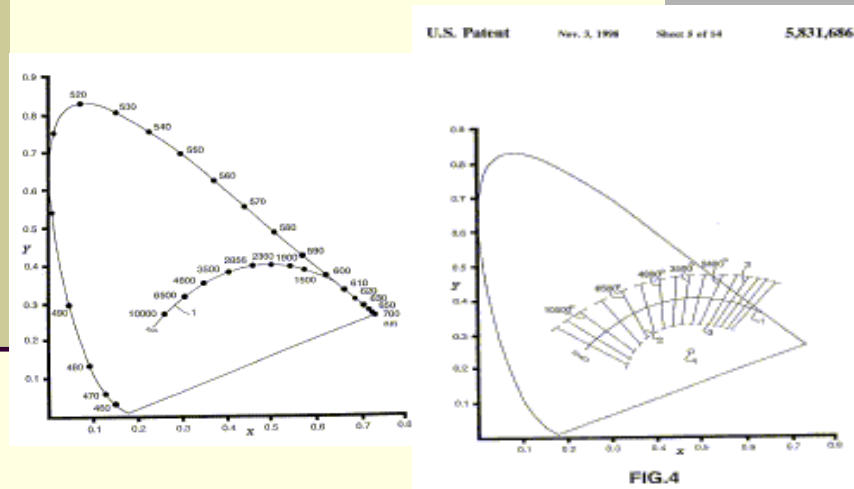


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

121

Planckian locus

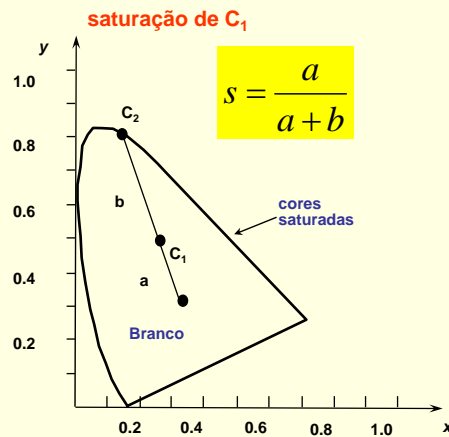


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

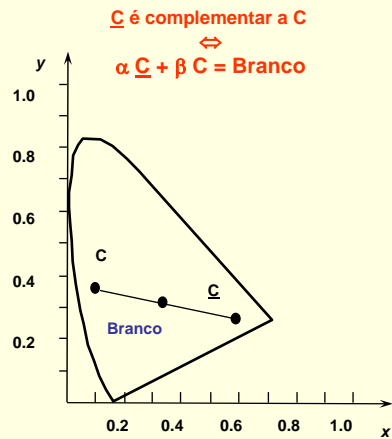
122

Saturação e cor complementar no diagrama de cromaticidade xy



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br



123



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

124



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

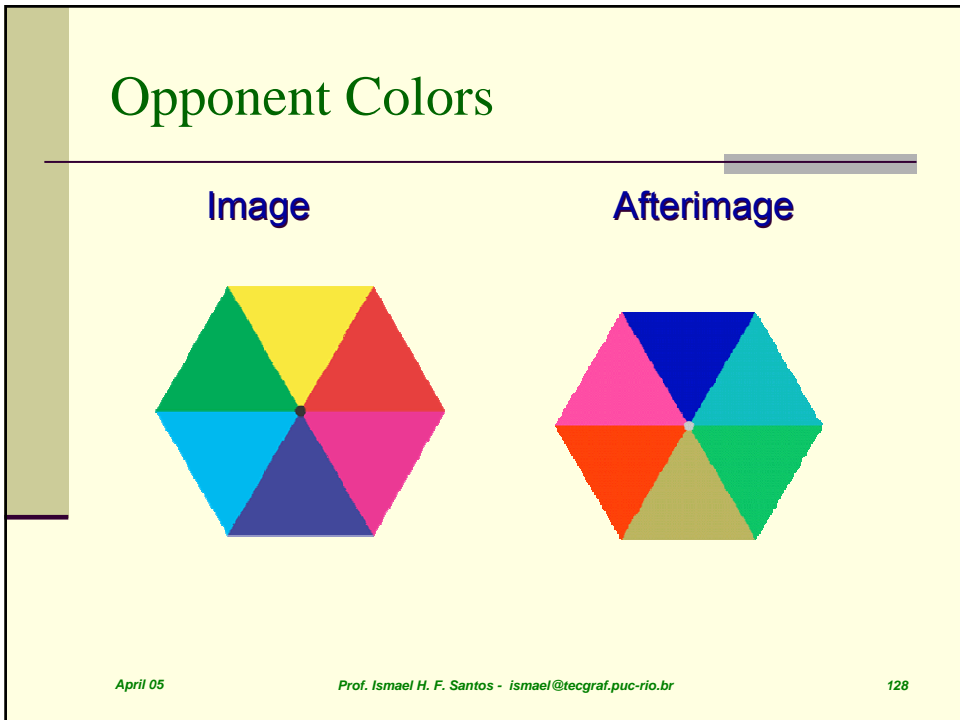
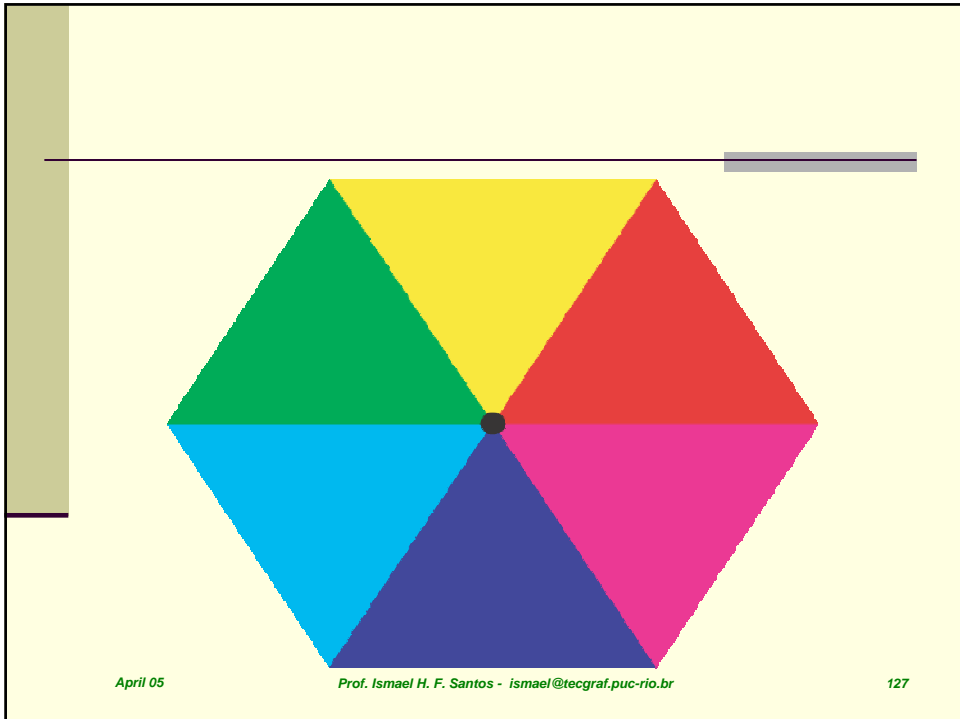
125



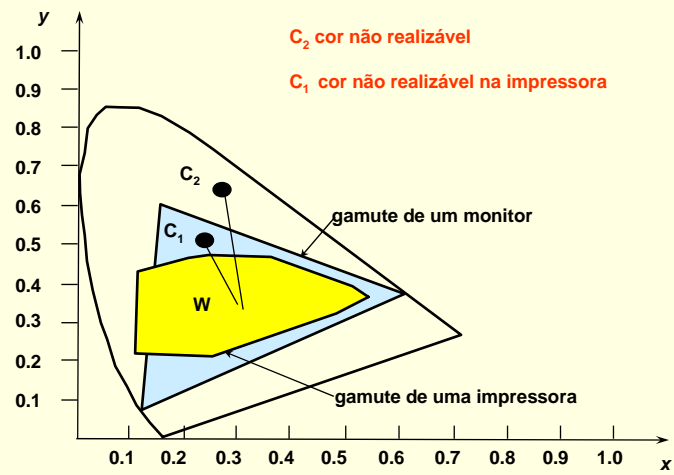
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

126



Gamute de cromaticidade de dispositivos

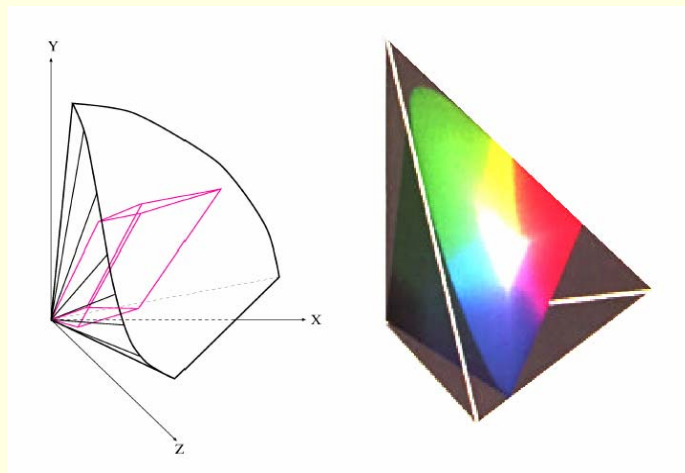


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

129

Gamute

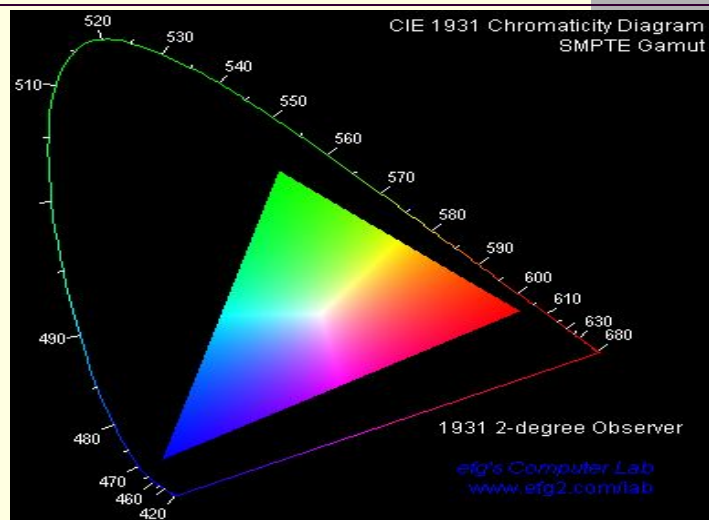


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

130

Gamut de cores de um monitor RGB

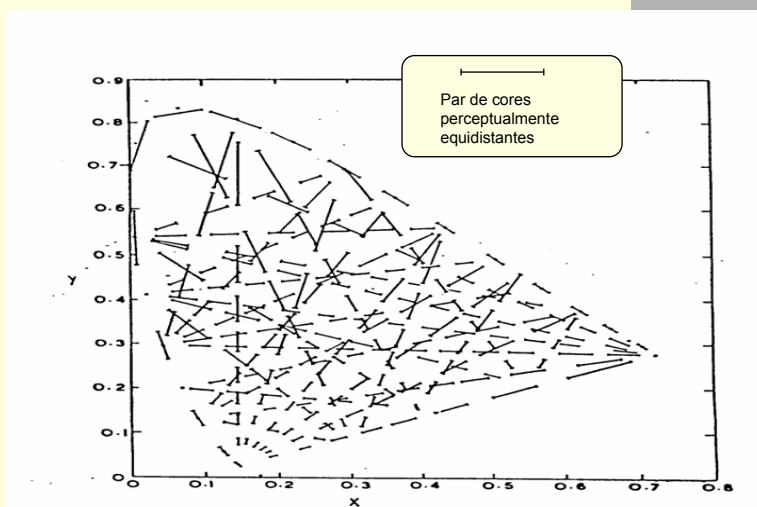


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

131

Cores perceptualmente equidistantes representadas no sistema CIE xyY



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

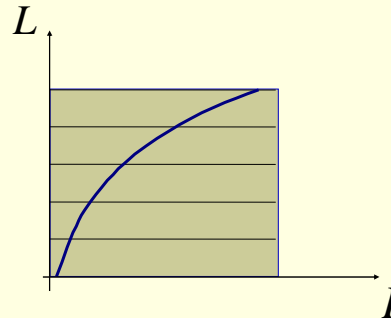
132

Weber's law

- The change in a stimulus that will be just noticeable (JND) is a constant ratio of the original stimulus.

$$\Delta L \propto \frac{\Delta I}{I}$$

$$L \propto \log(I)$$



E. H. Weber, in 1834

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

133

Correção Gama

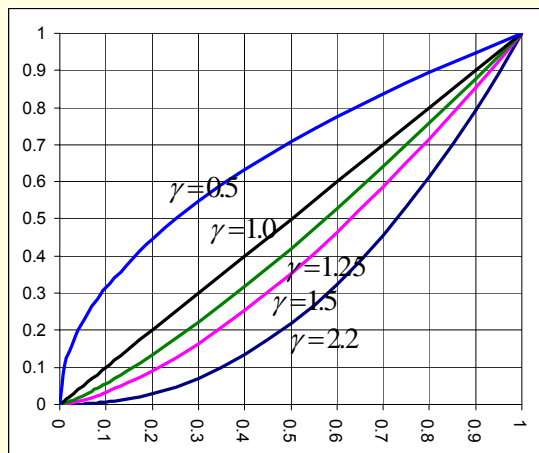
- Assume luminância proporcional à voltagem.
 - Mas não é !!
 - Luminância \propto a potência do feixe de elétrons.
- Luminância \propto Voltagem $^\gamma$.
 - γ entre 1.5 e 3.0 (depende do monitor).
 - Deve pré-compensar valores RGB.
- Alguns monitores fazem a correção gama por hardware, outros não.

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

134

Correção Gama



$$y = x^{\gamma_1}$$

$$g = y^{\gamma_2}$$

$$g = (x^{\gamma_1})^{\gamma_2}$$

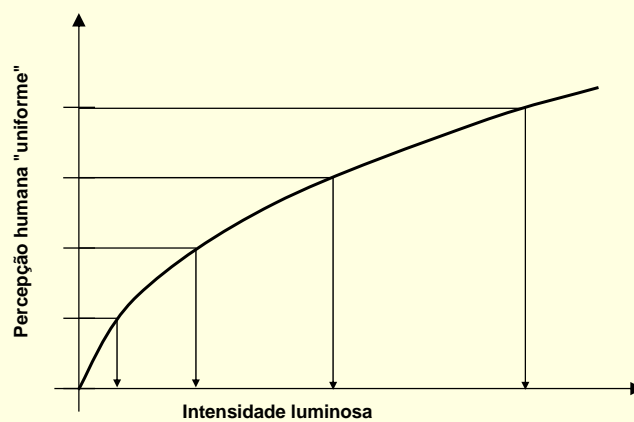
$$g = x^{\gamma_1 \gamma_2}$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

135

Correção Gama

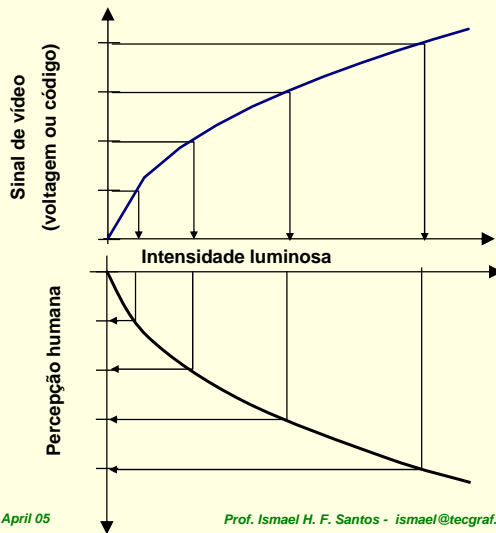


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

136

Correção Gama (a coincidência)



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

137

O sistema tem muitos Gamas!

input_exponent	the exponent of the image sensor.
encoding_exponent	the exponent of any transfer function performed by the process or device writing the datastream.
decoding_exponent	the exponent of any transfer function performed by the software reading the image datastream.
LUT_exponent	the exponent of the transfer function applied between the frame buffer and the display device (typically this is applied by a Look Up Table).
output_exponent	the exponent of the display device. For a CRT, this is typically a value close to 2.2.

<http://www.w3.org/TR/2003/REC-PNG-20031110/>

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

138

Gama de uma ponta a outra (end to end)

“Good end-to-end exponents are determined from experience. For example, for photographic prints it's about 1.0; for slides intended to be projected in a dark room it's about 1.5; for television it's about 1.14.”

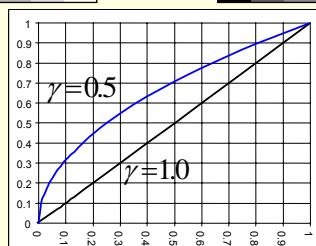
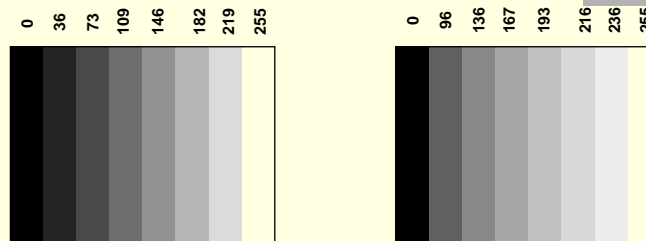
<http://www.libpng.org/pub/png/spec/1.2/PNG-GammaAppendix.html>

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

139

Que ajuste adotar?

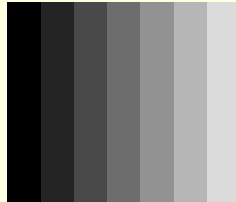


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

140

Tons de cinza igualmente espaçados

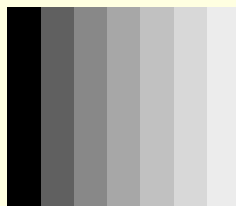


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

141

Tons de cinza corrigidos

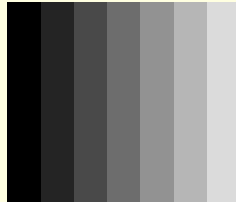


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

142

Tons de cinza igualmente espaçados

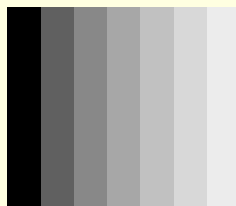


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

143

Tons de cinza corrigidos

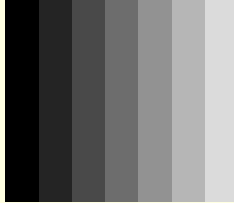


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

144

Tons de cinza igualmente espaçados

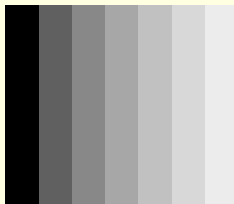


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

145

Tons de cinza corrigidos

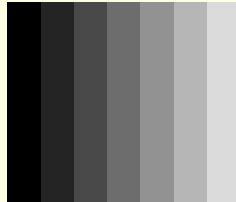


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

146

Tons de cinza igualmente espaçados

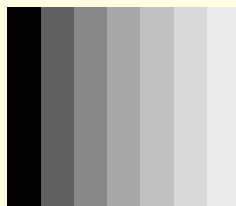


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

147

Tons de cinza corrigidos



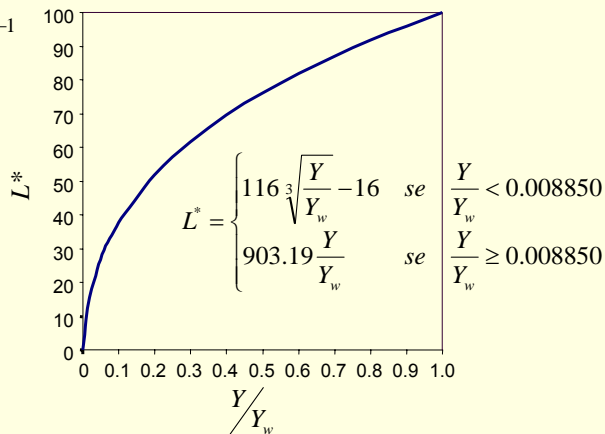
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

148

CIE L* Correção perceptual

$$\frac{dy}{dx} = \gamma x^{\gamma-1}$$



veja: <http://www.graphics.cornell.edu/~westin/gamma/gamma.html>

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

149

Sistemas de cor perceptualmente uniformes do CIE Luv e CIE Lab (1976)

Dados:

(X, Y, Z) = componentes da cor no espaço CIE XYZ
 (X_w, Y_w, Z_w) = componentes do branco de referência

Calcula-se:

$$u' = 4X / (X + 15Y + 3Z)$$

$$v' = 9Y / (X + 15Y + 3Z)$$

$$u_w = 4X_w / (X_w + 15Y_w + 3Z_w)$$

$$v_w = 9Y_w / (X_w + 15Y_w + 3Z_w)$$

$$L^* = 116 (Y/Y_w)^{1/3} - 16 \quad \text{se } Y/Y_w > 0.008850$$

ou

$$L^* = 903.19 (Y/Y_w) \quad \text{se } Y/Y_w \leq 0.008850$$

$$u^* = 13L^*(u' - u_w)$$

$$a^* = 500[(X/X_w)^{1/3} - (Y/Y_w)^{1/3}]$$

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

$$b^* = 200[(Y/Y_w)^{1/3} - (Z/Z_w)^{1/3}]$$

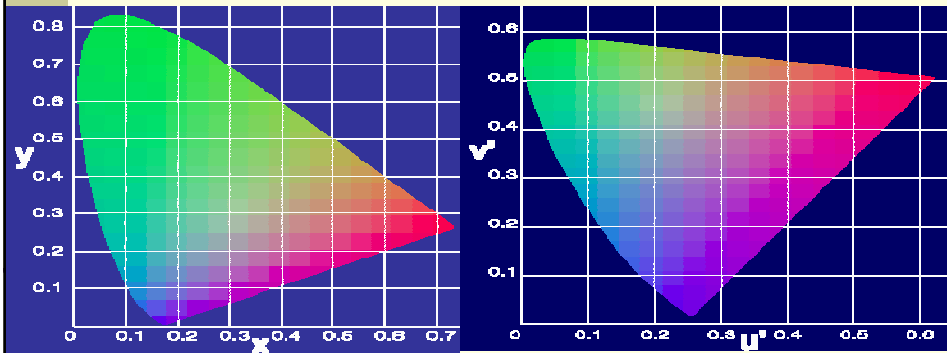
u^*, v^* (ou a^*, b^*) são as componentes de cromaticidade da cor
 L^* é a luminosidade corrigida para uma escala perceptualmente linear

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

150

CIE xyY → CIE LUV

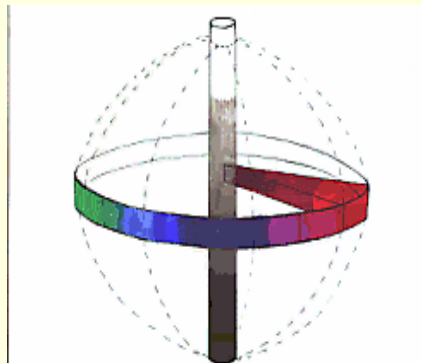


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

151

CIE LAB

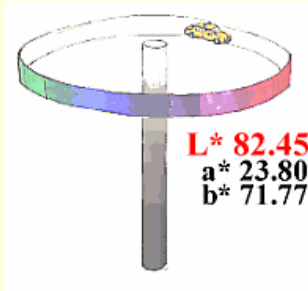


April 05

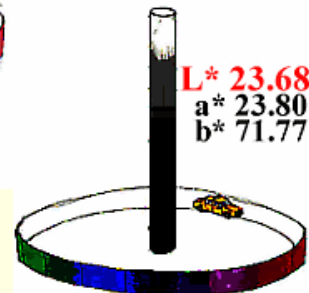
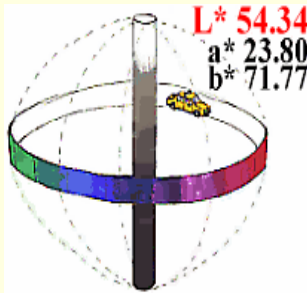
Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

152

CIE 1976 (L*a*b*) colour space, Lightness



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



L = Lightness
(black= 0 and white = 100)

April 05

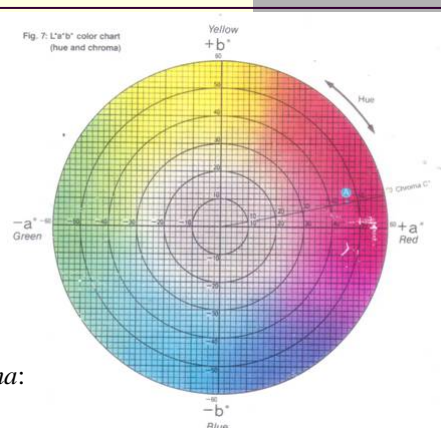
Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

153

CIE 1976 (L*a*b*) colour space, Hue and Chroma

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

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



Hue (Matiz):

$$h_{ab} = \arctan \left(\frac{b^*}{a^*} \right)$$

Chroma:

$$C_{ab} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

154

CIE 1976 a,b colour difference and CIELAB components

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \begin{cases} = 1 & \text{just noticeable difference} \\ < 5 & \text{small color differences} \end{cases}$$

$$\Delta H_{ab}^* = \text{variação de ângulo} \quad \text{ou}$$

$$\Delta H_{ab}^* = \sqrt{(\Delta E_{ab}^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2}$$

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2}$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

155

CIE 1994 colour difference

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

- k parametric factors, industry dependent
- S weighting functions, depend on location in colour space:

$$S_L = 1; \quad S_C = 1 + 0,045 C_{ab}^*; \quad S_H = 1 + 0,015 C_{ab}^*$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

156

Branco de referência

Observer	2° (CIE 1931)			10° (CIE 1964)		
Illuminant	X ₂	Y ₂	Z ₂	X ₁₀	Y ₁₀	Z ₁₀
A (Incandescent)	109.85	100	35.585	111.144	100	35.2
C	98.074	100	118.232	97.285	100	116.145
D50	96.422	100	82.521	96.72	100	81.427
D55	95.682	100	92.149	95.799	100	90.926
D65 (Daylight)	95.047	100	108.883	94.811	100	107.304
D75	94.972	100	122.638	94.416	100	120.641
F2 (Fluorescent)	99.187	100	67.395	103.28	100	69.026
F7	95.044	100	108.755	95.792	100	107.687
F11	100.966	100	64.37	103.866	100	65.627

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

157

Conversão Lab - XYZ

```
var_X = X / 95.047 //Observer = 2°, Illuminant = D65
var_Y = Y / 100.000
var_Z = Z / 108.883
```

```
if ( var_X > 0.008856 ) var_X = var_X ^ ( 1/3 )
else var_X = ( 7.787 * var_X ) + ( 16 / 116 )
if ( var_Y > 0.008856 ) var_Y = var_Y ^ ( 1/3 )
else var_Y = ( 7.787 * var_Y ) + ( 16 / 116 )
if ( var_Z > 0.008856 ) var_Z = var_Z ^ ( 1/3 )
else var_Z = ( 7.787 * var_Z ) + ( 16 / 116 )
```

```
CIE-L* = ( 116 * var_Y ) - 16
CIE-a* = 500 * ( var_X - var_Y )
CIE-b* = 200 * ( var_Y - var_Z )
var_Y = ( CIE-L* + 16 ) / 116
var_X = CIE-a* / 500 + var_Y
var_Z = var_Y - CIE-b* / 200
```

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

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

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

<http://www.easyrgb.com/math.php>

April 05

```
if ( var_Y^3 > 0.008856 ) var_Y = var_Y^3
else var_Y = ( var_Y - 16 / 116 ) / 7.787
if ( var_X^3 > 0.008856 ) var_X = var_X^3
else var_X = ( var_X - 16 / 116 ) / 7.787
if ( var_Z^3 > 0.008856 ) var_Z = var_Z^3
else var_Z = ( var_Z - 16 / 116 ) / 7.787
```

```
X = ref_X * var_X //ref_X = 95.047 Observer= 2°, Illuminant= D65
Y = ref_Y * var_Y //ref_Y = 100.000
Z = ref_Z * var_Z //ref_Z = 108.883
```

Sistemas de Cor

- Espaço de cor + sistema de coordenadas.
 1. Sistemas Padrão.
 2. Sistemas dos Dispositivos.
 3. Sistemas Computacionais.
 4. Sistemas de Interface.

Sistemas Padrão

- Independentes de dispositivos físicos.
- CIE-RGB.
 - 700 $m\mu$ (Red), 546 $m\mu$ (Green), 435.8 $m\mu$ (Blue).
- CIE-CMY.
 - Ciano (azul piscina), Magenta (violeta), Amarelo.
- CIE-XYZ.

Sistemas dos Dispositivos

- Subconjunto do sólido de cor.
 - Contém todas as cores que podem ser geradas pelo dispositivo (combinação convexa da base de primárias do dispositivo).
- Forma de paralelepípedo e as faces são paralelogramos.
- Mudando-se as coordenadas ganha a forma de um **cubo**.

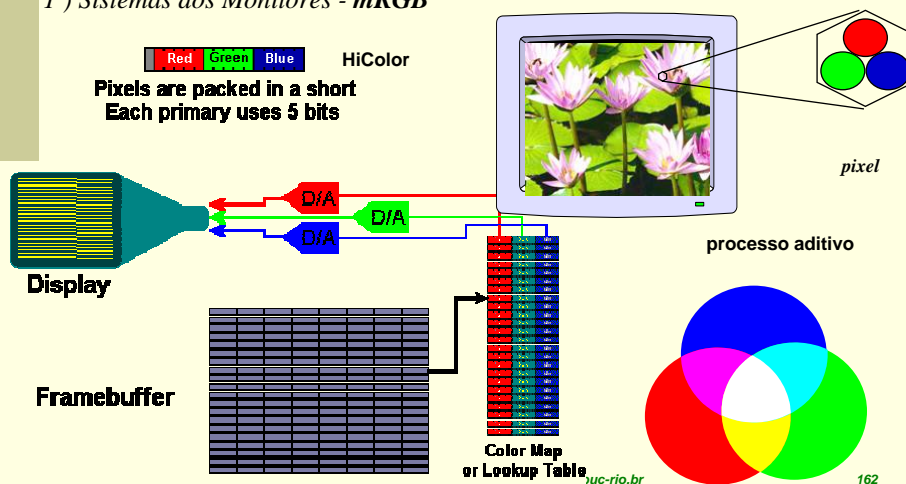
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

161

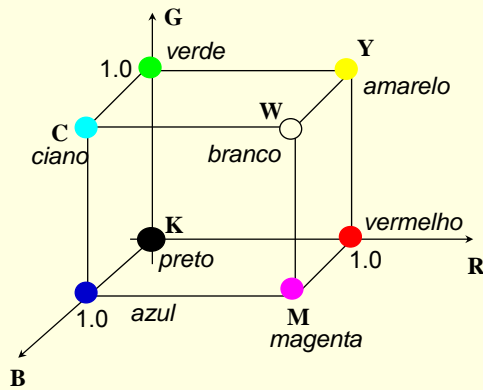
Sistemas Dispositivos - Monitores

1) Sistemas dos Monitores - mRGB

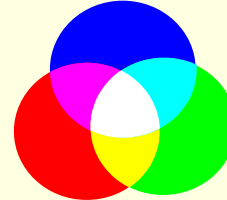


Sistemas de Cor dependentes de dispositivo - mRGB

1) Sistemas dos Monitores - mRGB



processo aditivo



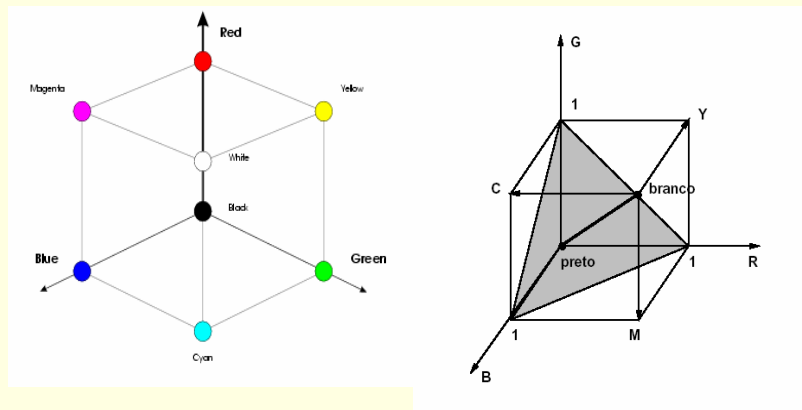
normalmente temos 1 byte para cada componente mapeando [0, 255] em [0,1]

April 05

Componentes somam como vetores

163

Cubo RGB



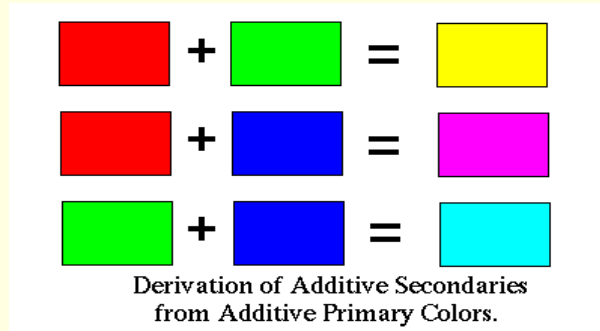
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

164

Sistemas de cor dependentes de dispositivo - mRGB

1) Sistemas dos Monitores - mRGB



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

165

Conversão do mRGB para CIE XYZ e vice-versa

Dados (R,G,B) determine (x,y)

1) O fabricante deve informar as coordenadas x,y dos fosforos do monitor

ex.

	R	G	B	white
x	0.64	0.30	0.15	0.3127
y	0.33	0.60	0.06	0.3290

ITU-R BT.709
International
Telecommunication Union

2) Determine a coordenada z = 1 - x - y

ex.

	R	G	B	white
z	0.03	0.10	0.79	0.3593

3) As coordenadas X,Y,Z são obtidas de:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} R + \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} G + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

O problema agora consiste em encontrar as componentes XYZ do R, G e B !!!

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

166

Conversão do mRGB para CIE XYZ (cont.)

$$x_R = X_R / (X_R + Y_R + Z_R), \text{ se } C_R = X_R + Y_R + Z_R \text{ então } X_R = x_R C_R$$

da mesma forma

$$\begin{aligned} Y_R &= y_R C_R \text{ e } Z_R = z_R C_R \text{ e} \\ X_G &= x_G C_G, Y_G = y_G C_G \text{ e } Z_G = z_G C_G \\ X_B &= x_B C_B, Y_B = y_B C_B \text{ e } Z_B = z_B C_B \end{aligned}$$

substituindo na matriz da equação

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R C_R & x_G C_G & x_B C_B \\ y_R C_R & y_G C_G & y_B C_B \\ z_R C_R & z_G C_G & z_B C_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

para determinar as componentes C_R, C_G e C_B usamos o fato de que $R=G=B=1$ é a cor branca.

$$\begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R C_R & x_G C_G & x_B C_B \\ y_R C_R & y_G C_G & y_B C_B \\ z_R C_R & z_G C_G & z_B C_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_R \\ C_G \\ C_B \end{bmatrix}$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

167

Conversão do mRGB para CIE XYZ (cont.)

Suponha que o a luminosidade do branco $Y_W = 1.00$, temos:

$$\begin{aligned} Y_W &= y_W C_W \Rightarrow C_W = Y_W / y_W = 1.0 / 0.3290 = 3.04 \\ X_W &= x_W C_W = 0.31 \times 3.04 = 0.9506 \\ Z_W &= z_W C_W = 0.3582 \times 3.04 = 1.089 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} 0.95 \\ 1.00 \\ 1.09 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.64 & 0.30 & 0.15 \\ 0.33 & 0.60 & 0.06 \\ 0.03 & 0.10 & 0.79 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_R \\ C_G \\ C_B \end{bmatrix} \quad \text{resolvendo} \quad \begin{bmatrix} C_R \\ C_G \\ C_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.644 \\ 1.192 \\ 1.203 \end{bmatrix}$$

Concluindo:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412 & 0.358 & 0.180 \\ 0.213 & 0.715 & 0.072 \\ 0.019 & 0.119 & 0.950 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

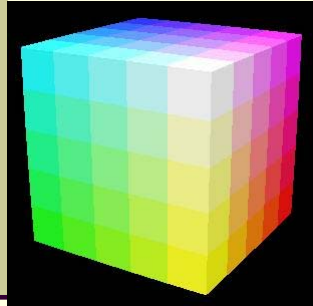
$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.240 & -1.537 & -0.499 \\ -0.969 & 1.876 & 0.042 \\ 0.056 & -0.204 & 1.057 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

168

RGB normalizado



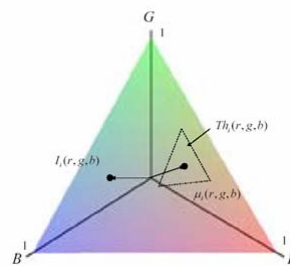
Cubo RGB

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

$$r = \frac{R}{\sqrt{R^2 + G^2 + B^2}}$$
$$g = \frac{G}{\sqrt{R^2 + G^2 + B^2}}$$
$$b = \frac{B}{\sqrt{R^2 + G^2 + B^2}}$$

$$r = \frac{R}{R + G + B}$$
$$g = \frac{G}{R + G + B}$$
$$b = \frac{B}{R + G + B}$$



sRGB - “A Standard Default Color Space for the Internet”

- Hewlett-Packard and Microsoft propose the addition of support for a standard color space, sRGB, within the Microsoft operating systems, HP products, the Internet, and all other interested vendors.
- The aim of this color space is to complement the current color management strategies by enabling a third method of handling color in the operating systems, device drivers and the Internet that utilizes a simple and robust device independent color definition.

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

170

ITU-R BT.709

CIE chromaticities for ITU-R BT.709 reference primaries and CIE standard illuminant

	Red	Green	Blue	D65
x	0.6400	0.3000	0.1500	0.3127
y	0.3300	0.6000	0.0600	0.3290
z	0.0300	0.1000	0.7900	0.3583

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

171

sRGB viewing environment Parameters

Condition	sRGB
Luminance level (typical CRT)	80 cd/m ²
Illuminant White	$x = 0.3127, y = 0.3291$ (D65)
Image surround	20% reflectance
Encoding Ambient Illuminance Level	64 lux
Encoding Ambient White Point	$x = 0.3457, y = 0.3585$ (D50)
Encoding Viewing Flare	1.0%
Typical Ambient Illuminance Level	200 lux
Typical Ambient White Point	$x = 0.3457, y = 0.3585$ (D50)
Typical Viewing Flare	5.0%

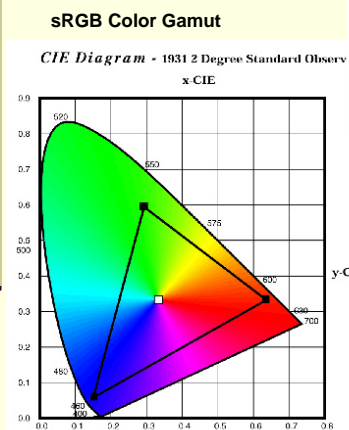
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

172

XYZ → sRGB: Passo 1 - Conversão

Converte utilizando ITU-R BT.709:



$$\begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

clip to [0...1]!

<http://www.microsoft.com/whdc/device/display/color/sRGB.msp>

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

173

XYZ → sRGB: Passo 2 – Correção Gamma

The sRGB tristimulus values are next transformed to nonlinear sR'G'B' values as follows:

If $R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} \leq 0.00304$

$$R'_{sRGB} = 12.92 \times R_{sRGB}$$

$$G'_{sRGB} = 12.92 \times G_{sRGB}$$

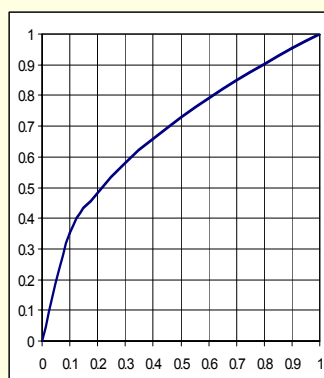
$$B'_{sRGB} = 12.92 \times B_{sRGB}$$

else if $R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} > 0.00304$

$$R'_{sRGB} = 1.055 \times R_{sRGB}^{(1.0/2.4)} - 0.055$$

$$G'_{sRGB} = 1.055 \times G_{sRGB}^{(1.0/2.4)} - 0.055$$

$$B'_{sRGB} = 1.055 \times B_{sRGB}^{(1.0/2.4)} - 0.055$$



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

174

XYZ → sRGB: Passo 3 – Digital Color (8 bits)

$$\begin{aligned}R_{8bit} &= ((WDC - KDC) \times R'_{sRGB}) + KDC \\G_{8bit} &= ((WDC - KDC) \times G'_{sRGB}) + KDC \\B_{8bit} &= ((WDC - KDC) \times B'_{sRGB}) + KDC\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}R_{8bit} &= ((255.0 - 0.0) \times R'_{sRGB}) + 0.0 \\G_{8bit} &= ((255.0 - 0.0) \times G'_{sRGB}) + 0.0 \\B_{8bit} &= ((255.0 - 0.0) \times B'_{sRGB}) + 0.0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}R_{8bit} &= 255.0 \times R'_{sRGB} \\G_{8bit} &= 255.0 \times G'_{sRGB} \\B_{8bit} &= 255.0 \times B'_{sRGB}\end{aligned}$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

175

XYZ → RGB

```
ref_X = 95.047 //Observer = 2°, Illuminant = D65
ref_Y = 100.000
ref_Z = 108.883
```

```
var_X = X / 100 //X = From 0 to ref_X
var_Y = Y / 100 //Y = From 0 to ref_Y
var_Z = Z / 100 //Z = From 0 to ref_Y
```

```
var_R = var_X * 3.2406 + var_Y * -1.5372 + var_Z * -0.4986
var_G = var_X * -0.9689 + var_Y * 1.8758 + var_Z * 0.0415
var_B = var_X * 0.0557 + var_Y * -0.2040 + var_Z * 1.0570
```

```
if ( var_R > 0.0031308 ) var_R = 1.055 * ( var_R ^ ( 1 / 2.4 ) ) - 0.055
else var_R = 12.92 * var_R
if ( var_G > 0.0031308 ) var_G = 1.055 * ( var_G ^ ( 1 / 2.4 ) ) - 0.055
else var_G = 12.92 * var_G
if ( var_B > 0.0031308 ) var_B = 1.055 * ( var_B ^ ( 1 / 2.4 ) ) - 0.055
else var_B = 12.92 * var_B
```

```
R = var_R * 255
G = var_G * 255
B = var_B * 255
```

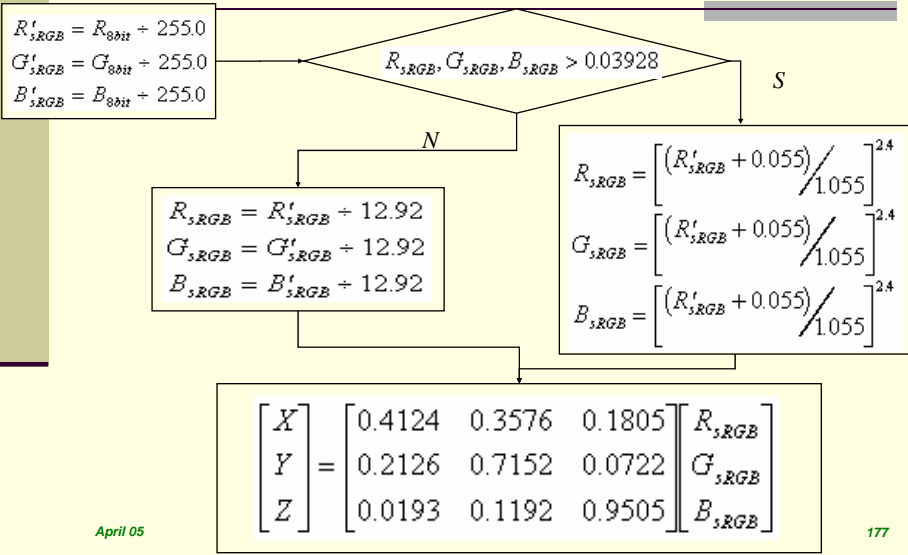
<http://www.easyrgb.com/>

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

176

sRGB → XYZ



XYZ ← RGB

```

var_R = ( R / 255 )    //R = From 0 to 255
var_G = ( G / 255 )    //G = From 0 to 255
var_B = ( B / 255 )    //B = From 0 to 255

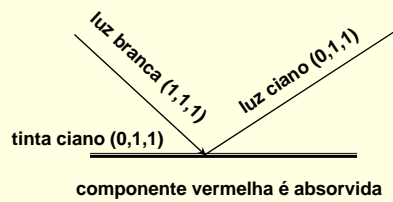
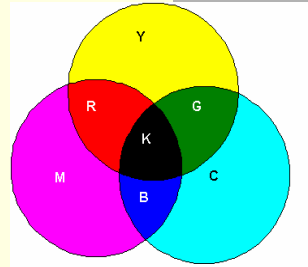
if ( var_R > 0.04045 ) var_R = ( ( var_R + 0.055 ) / 1.055 ) ^ 2.4
else var_R = var_R / 12.92
if ( var_G > 0.04045 ) var_G = ( ( var_G + 0.055 ) / 1.055 ) ^ 2.4
else var_G = var_G / 12.92
if ( var_B > 0.04045 ) var_B = ( ( var_B + 0.055 ) / 1.055 ) ^ 2.4
else var_B = var_B / 12.92

var_R = var_R * 100
var_G = var_G * 100
var_B = var_B * 100

//Observer = 2°, Illuminant = D65
X = var_R * 0.4124 + var_G * 0.3576 + var_B * 0.1805
Y = var_R * 0.2126 + var_G * 0.7152 + var_B * 0.0722
Z = var_R * 0.0193 + var_G * 0.1192 + var_B * 0.9505
    
```

Sistema CMY

- Sistema das Impressoras.
 - CMY ou CMYK.
- Processo predominantemente subtrativo.



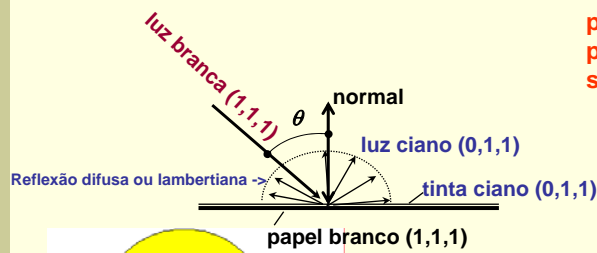
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

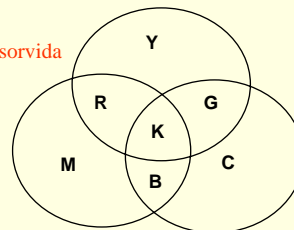
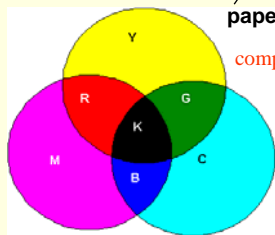
179

Sistemas de cor dependentes de dispositivo - CMY

II) Sistemas das Impressoras - CMY ou CMYK



processo predominantemente subtrativo



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

180

$$R=M+Y$$

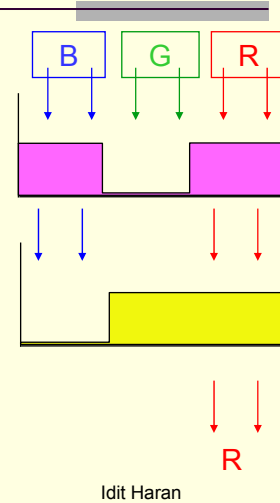
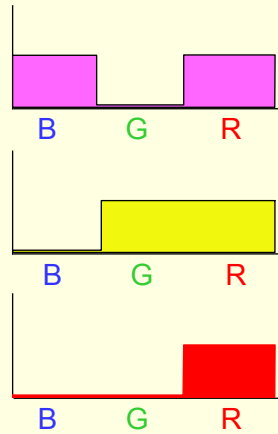
magenta

+

yellow

=

red



Idit Haran

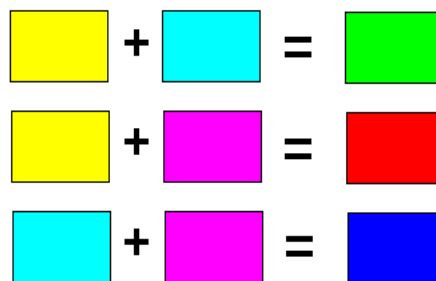
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

181

Sistemas de cor dependentes de dispositivo - CMY

II) Sistemas das Impressoras -CMY ou CMYK



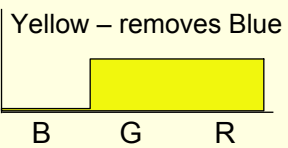
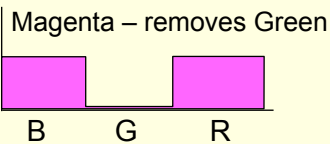
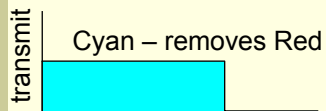
Subtractive Primaries Mixing Chart

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

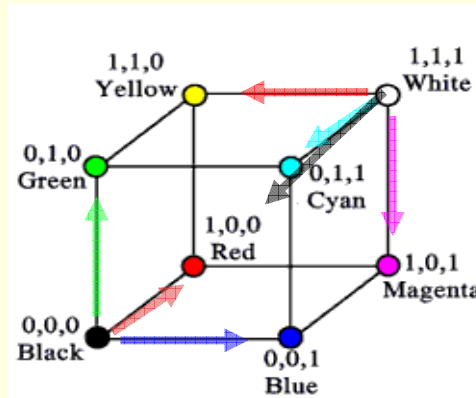
182

CMYK Color Model



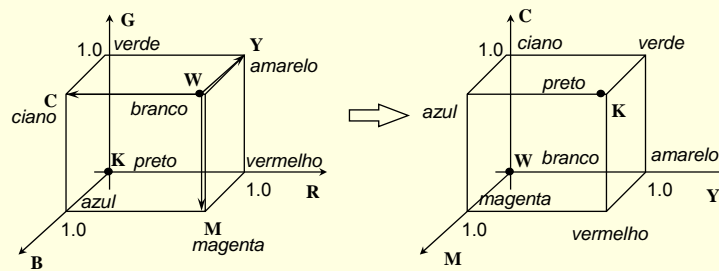
Black – removes all

CMYK = Cyan, Magenta, Yellow, black



April 05 Prof. Ismael H. F. S.

Conversão RGB para CMY e vice-versa



(r,g,b)

$$\begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

(c,m,y)

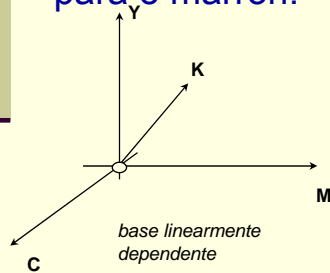
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

184

Sistemas de cor dependentes de dispositivo - CMYK

- O sistema CMYK usa o preto (black) porque o pigmento (carbono) é mais barato;
- A superposição de ciano, magenta e amarelo para produzir preto gera um tom meio puxado para o marron.



$$K := \alpha \min(C, M, Y)$$

$$\alpha \in [0, 1]$$

$$C := C - K$$

$$M := M - K$$

$$Y := Y - K$$

April 05

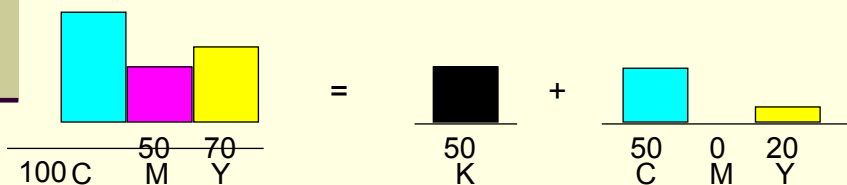
Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

185

CMY + Black

$$C + M + Y = K \text{ (black)}$$

- Using three inks for black is expensive
- C+M+Y = dark brown not black
- Black instead of C+M+Y is crisper with more contrast



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

186

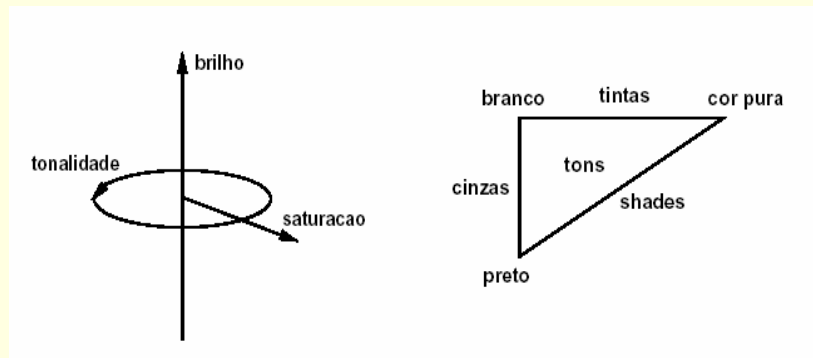
Sistemas de Interface

- Oferecem uma **interface** adequada a especificação de cores por um usuário comum.
- Em geral, especificam cores através de três parâmetros: matiz, saturação e luminância.

Tipos de Sistema de Interface

- Baseados em **coordenadas**: HSV, HSL.
- Baseados em **amostras**: Pantone, Munsell.

Paradigmas de Cor



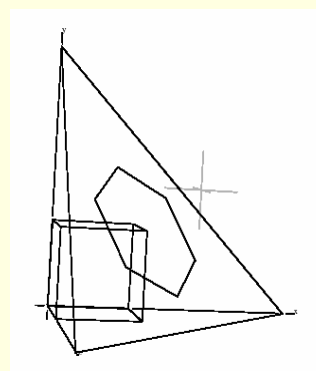
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

189

Sistema HSV

- Criado por Alvy Ray Smith.
- Projeta o cubo RGB ortogonalmente sobre o plano: $x + y + z = 3$.
- Conversão para RGB não é uma transformação linear.

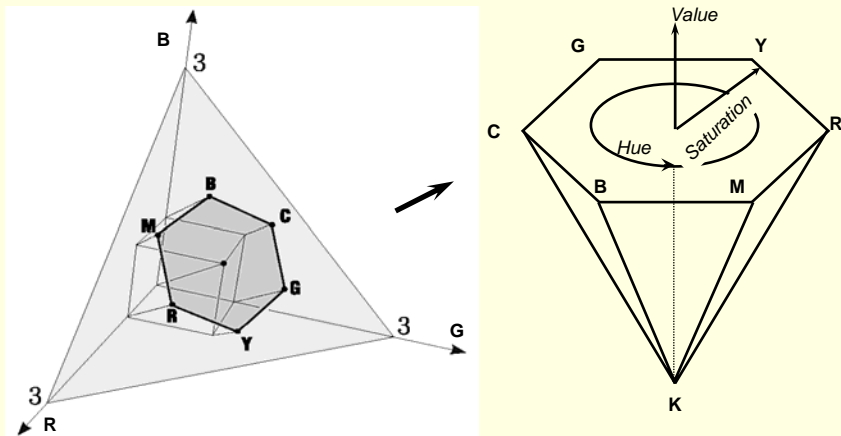


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

190

Sistemas de cor mais indicados para interface com usuário - HSV

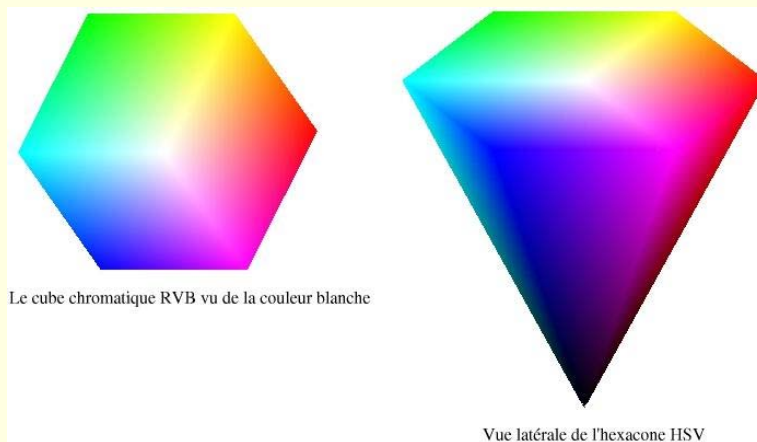


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

191

HSV



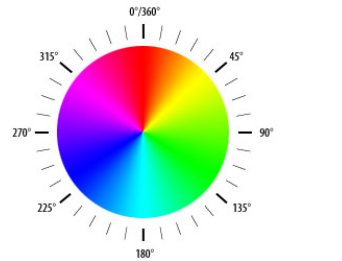
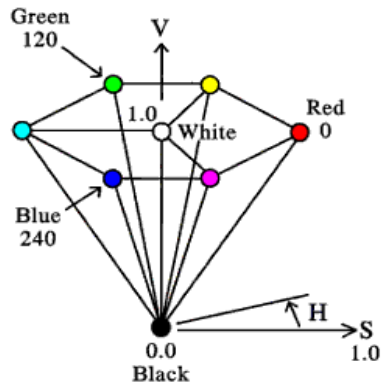
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

192

HSV/HSB Color Space

HSV = Hue Saturation Value
 HSB = Hue Saturation Brightness



Saturation Scale



Brightness Scale

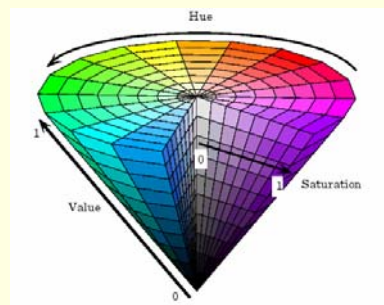


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

193

HSV

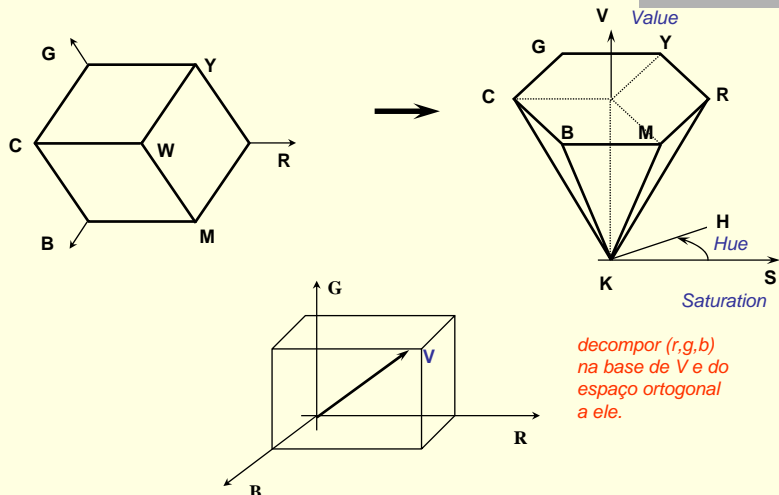


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

194

Sistemas de cor mais indicados para interface com usuário - HSV

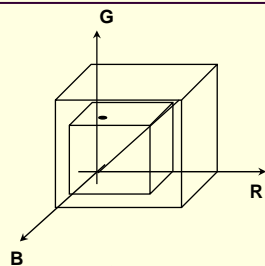


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

195

Transformação RGB para HSV e vice-versa

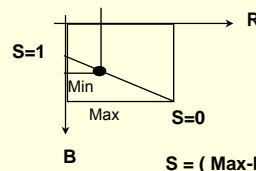
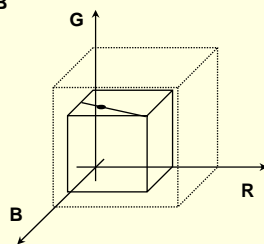


$$\text{Max} = \max(R, G, B)$$

$$\text{Min} = \min(R, G, B)$$

no caso G e B, respectivamente

$$V = \text{Max}$$



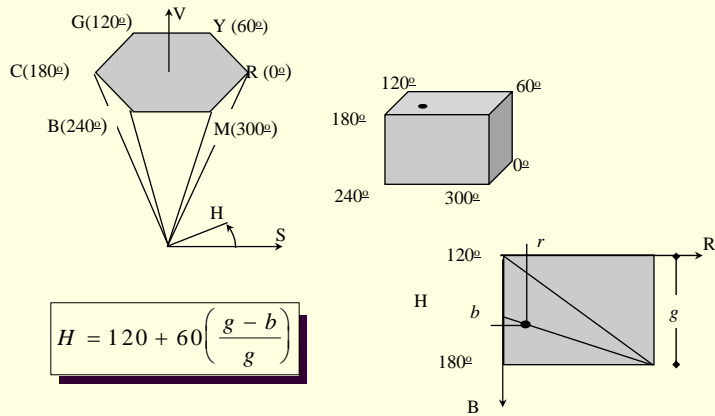
$$S = (\text{Max} - \text{Min}) / \text{Max}$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

196

Conversão RGB para HSV - cálculo de H



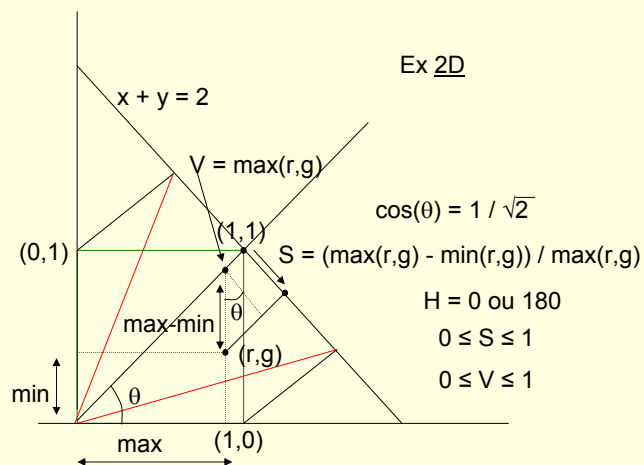
$$H = 120 + 60 \left(\frac{g - b}{g} \right)$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

197

Conversão RGB-HSV



Ex 2D

$$\cos(\theta) = 1 / \sqrt{2}$$

$$H = 0 \text{ ou } 180$$

$$0 \leq S \leq 1$$

$$0 \leq V \leq 1$$

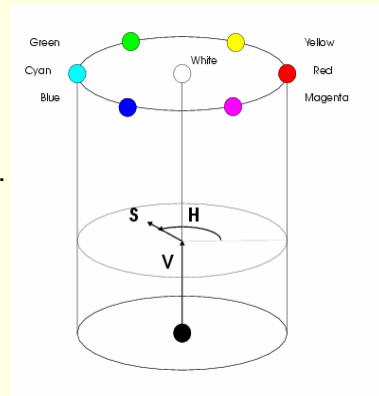
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

198

Sistema HSL

- Sistema
 - H (Hue)
 - S (Saturation)
 - L (Lightness)
 - Patenteado pela Tektronix.
- Baseado no HSV.

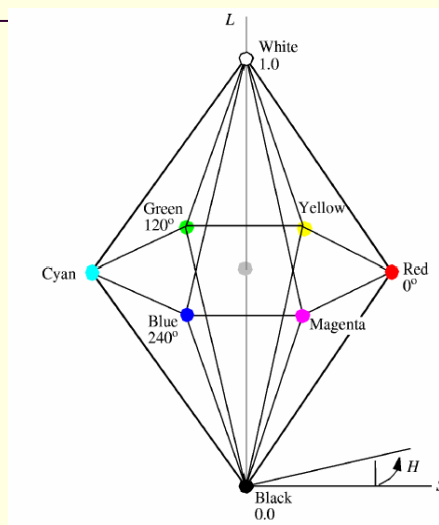


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

199

Sistema HSL



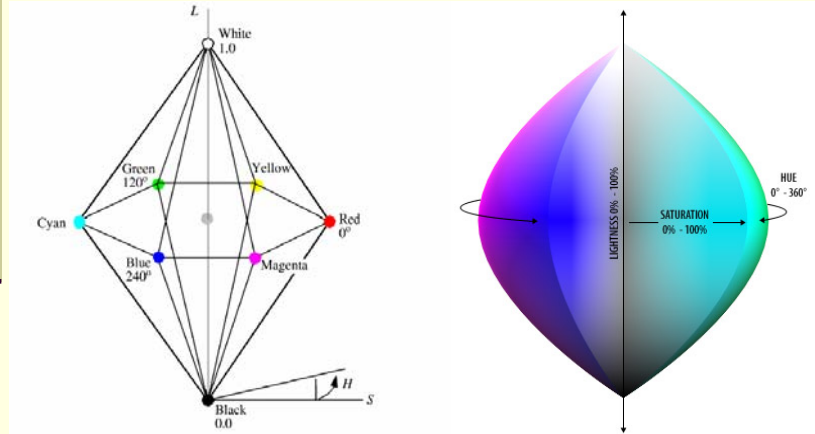
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

200

HLS Color Space

HLS = Hue Lightness Saturation

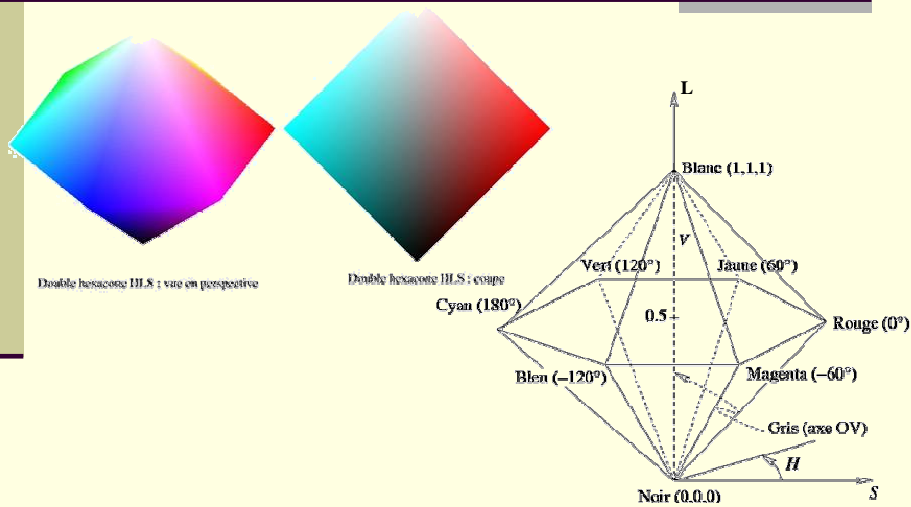


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

201

HLS

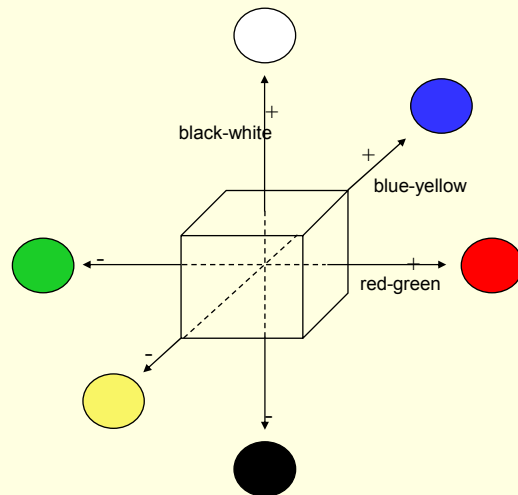


April 05

Pierre Courtellemont, Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

202

Opponent Color Spaces



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

203

Sistemas Baseados em Amostras

- Amostram matizes, saturação e luminância.
- Sistema de Munsell (1915).
 - Obedece o critério da uniformidade perceptual.
- Sistema Pantone (1960).
 - Criado pela indústria gráfica.
 - Usado no processo de impressão em papel.

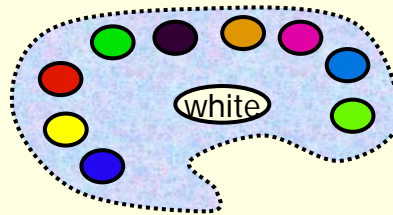
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

204

The Artist Point of View

- **Hue** - The color we see (red, green, purple)
- **Saturation** - How far is the color from gray (pink is less saturated than red, sky blue is less saturated than royal blue)
- **Brightness/Lightness (Luminance)** - How bright is the color



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

205

Munsell Color System

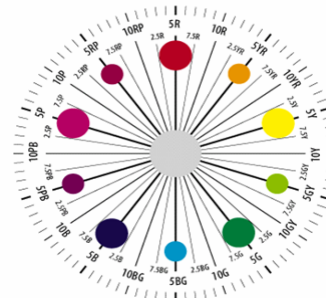
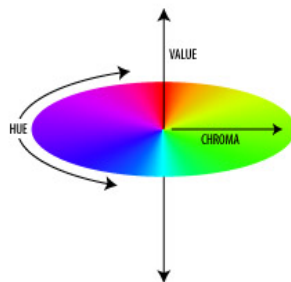
Equal perceptual steps in Hue Saturation Value.

Hue: R, YR, Y, GY, G, BG, B, PB, P, RP
(each subdivided into 10)

Value: 0 ... 10 (dark ... pure white)

Chroma: 0 ... 20 (neutral ... saturated)

Example:
5YR 8/4

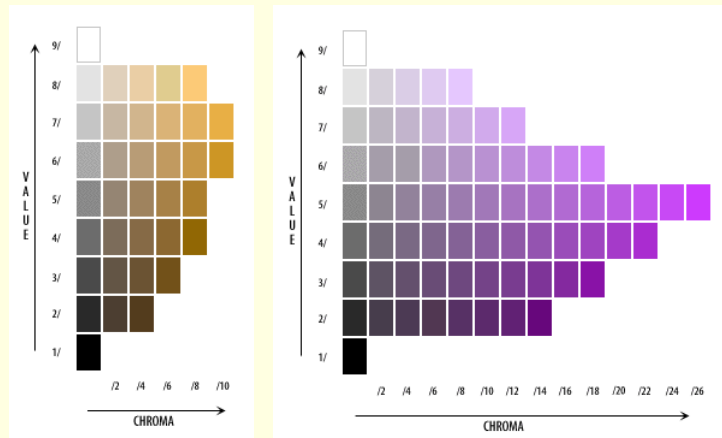


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

206

Munsell Book of Colors

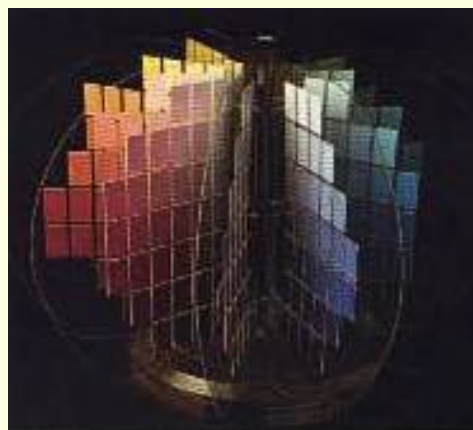


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

207

Munsell Book of Colors



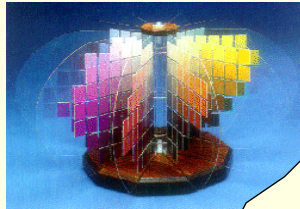
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

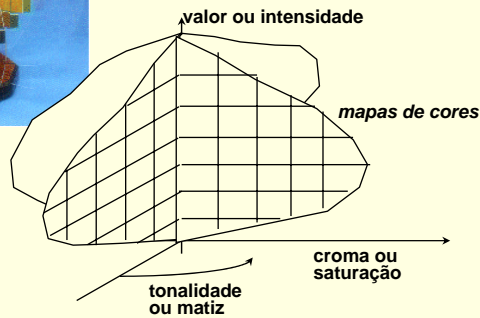
208

Sistemas de cores por enumeração

Munsell



Albert H. Munsell - artista plástico (1905)



base para os sistemas de interface

Pantone (início dos 60's)

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

209

YIQ Color Model (NTSC)

- **YIQ** is the color model used for color TV in America (NTSC= National Television Systems Committee)
- **Y** is luminance, **I** & **Q** are color (I=red/green,Q=blue/yellow)
 - Note: **Y** is the same as CIE's **Y**
 - Result: backwards compatibility with B/W TV!
- Convert from RGB to YIQ:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.30 & 0.59 & 0.11 \\ 0.60 & -0.28 & -0.32 \\ 0.21 & -0.52 & 0.31 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

210

YIQ Color Model

- The YIQ model exploits properties of our visual system, which allows to assign different bandwidth for each of the primaries (4 MHz to Y, 1.5 to I and 0.6 to Q)

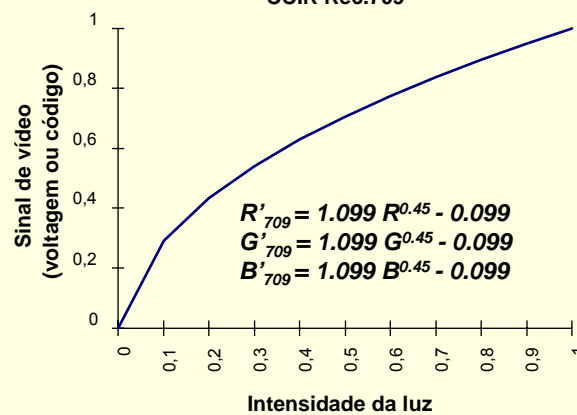
April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

211

Codificação de Vídeo

Função de Transferência
CCIR Rec.709



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

212

Sistema YUV – PAL (Y' , $B'-Y'$, $R'-Y'$)

$$Y'_{601} = 0.2999 R' + 0.587 G' + 0.114 B'$$

$$V' = R' - Y' \quad U' = B' - Y'$$

$$U' = B' - Y'_{601} = B' - (0.2999 R' + 0.587 G' + 0.114 B')$$

$$V' = R' - Y'_{601} = R' - (0.2999 R' + 0.587 G' + 0.114 B')$$

Componente
luma de vídeo

Componente
de diferença
de cor

$$\begin{bmatrix} Y' \\ B' - Y' \\ R' - Y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.299 & -0.587 & 0.886 \\ 0.701 & -0.587 & 0.114 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}$$

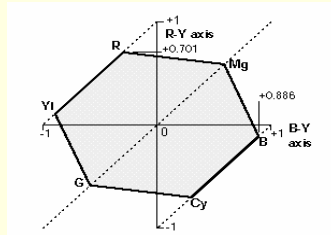
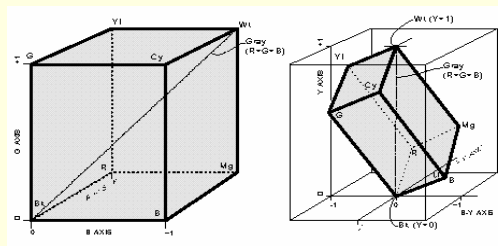
Motivação:
As componentes de diferença de cor podem ser sub-amostradas!

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

213

Cubo RGB no espaço (Y' , $B'-Y'$, $R'-Y'$)



April 05

rio.br

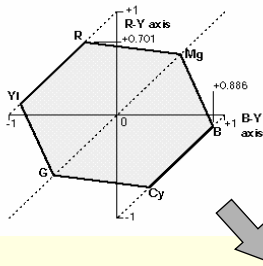
214

Conversão para vídeo

$$P_b = \frac{0.5}{1-0.114}(B'-Y')$$

$$P_r = \frac{0.5}{1-0.299}(R'-Y')$$

vídeos analógicos (BetaCam e M-II)

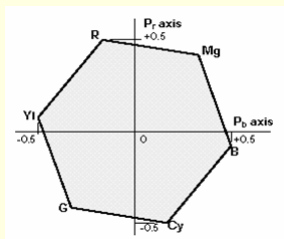


$$Y'_{8b} = 16 + 235Y'$$

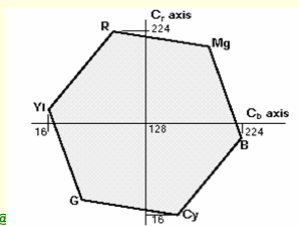
$$C_{b,8b} = 128 + 112\left(\frac{0.5}{1-0.114}(B'-Y')\right)$$

$$C_{r,8b} = 128 + 112\left(\frac{0.5}{1-0.299}(R'-Y')\right)$$

vídeos digitais com 8 bits/componente (JPEG, MPEG)



f. Ismael H. F. Santos - ismael@



215

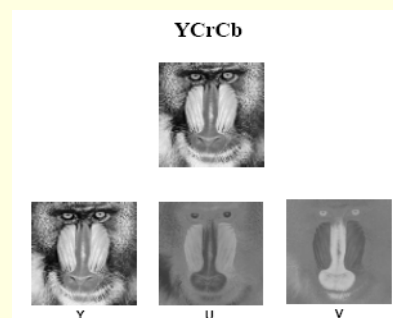
Uma fórmula para conversão para vídeo

RGB to YCrCb

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cr \\ Cb \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.30 & 0.59 & 0.11 & 0.00 \\ 0.50 & -0.42 & -0.38 & 128.00 \\ -0.17 & -0.33 & 0.50 & 128.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ 1 \end{bmatrix}$$

YCrCb to RGB

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.40 & 0.00 & -179.20 \\ 1.00 & -0.71 & -0.34 & 135.42 \\ 1.00 & 0.00 & 1.77 & -227.07 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ Cr \\ Cb \\ 1 \end{bmatrix}$$



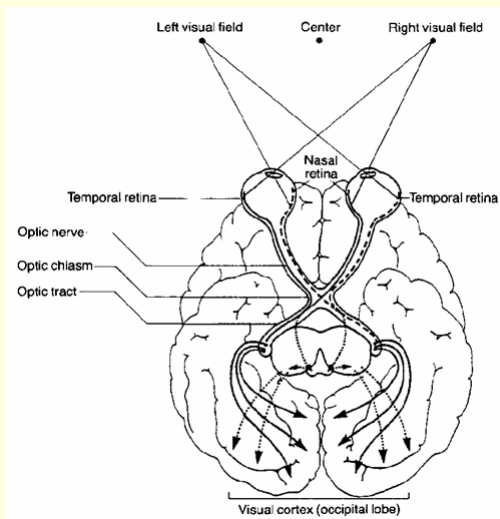
<http://www.efg2.com/Lab/Library/Color/Science.htm>

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

216

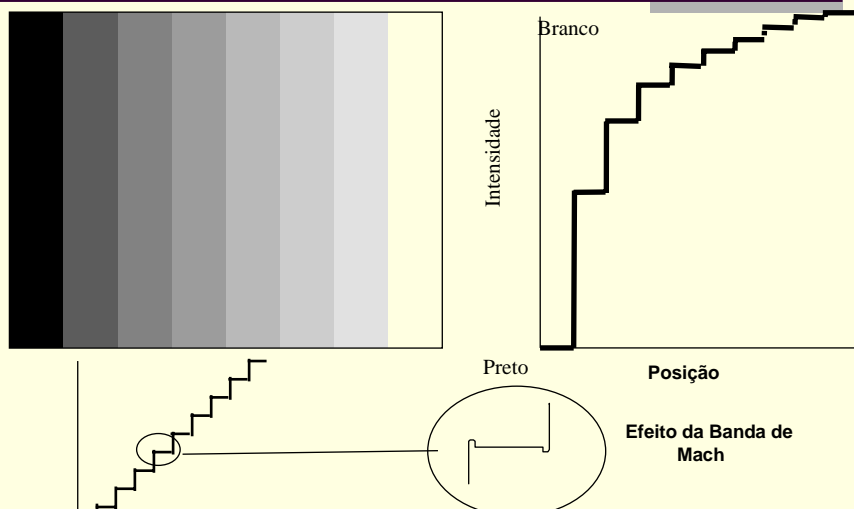
Aparencia de cor



April 05

217

Banda de Mach

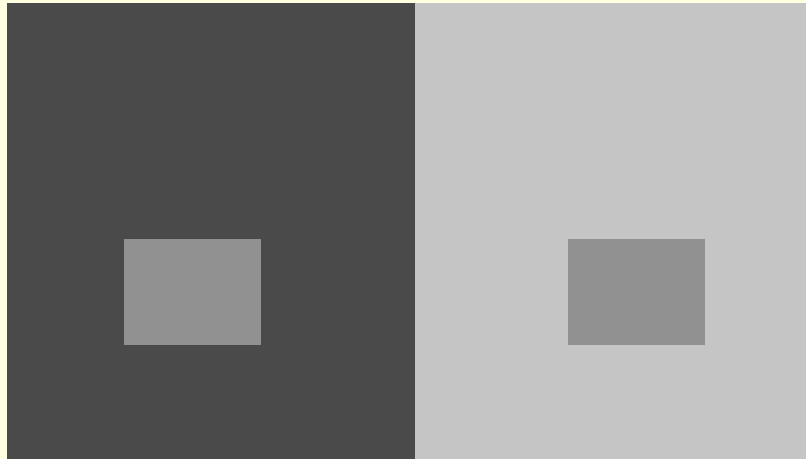


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

218

Contraste Simultâneo

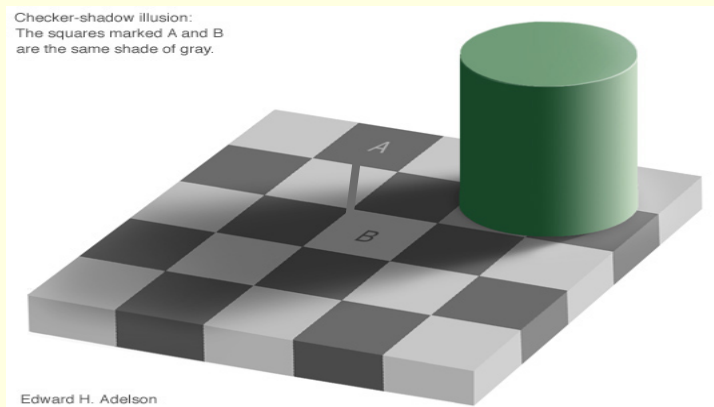


April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

219

Contraste



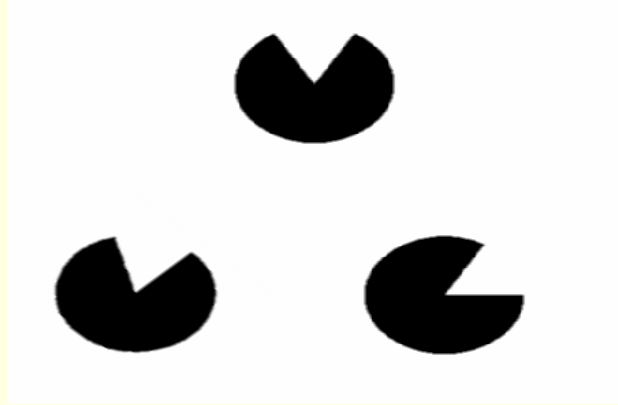
Edward H. Adelson

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

220

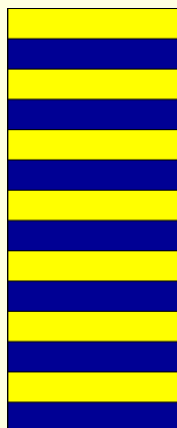
Conclusões do cérebro



April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

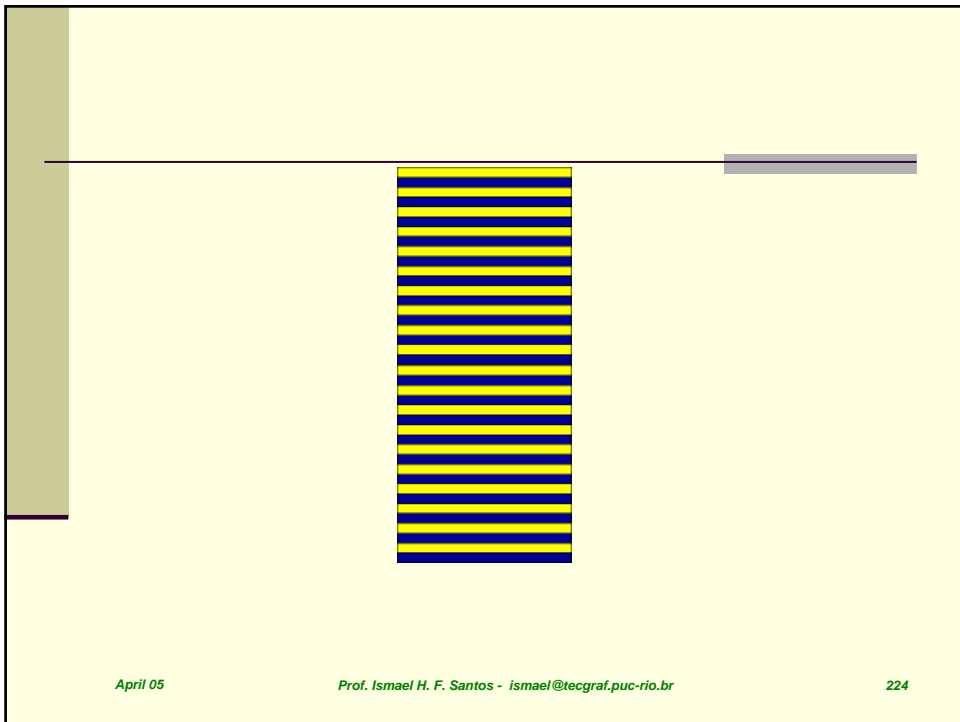
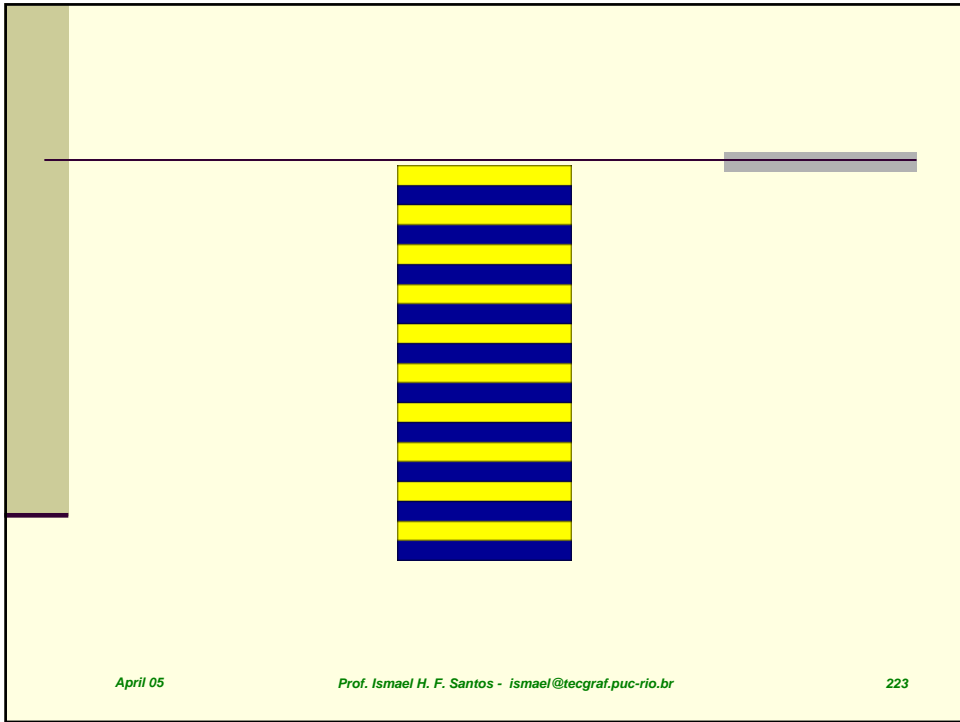
221

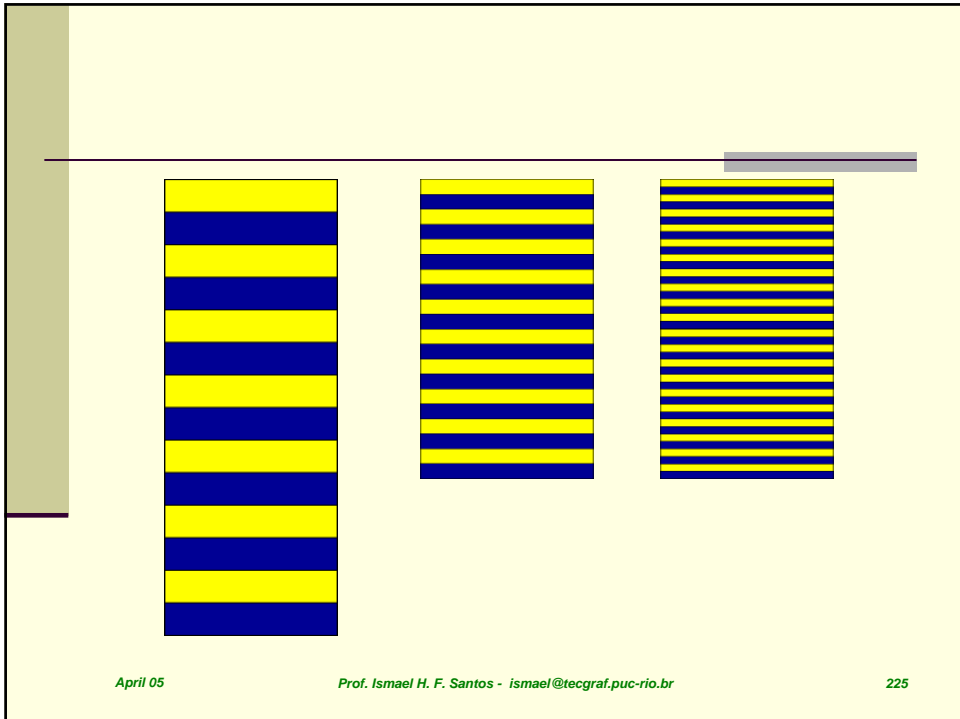


April 05

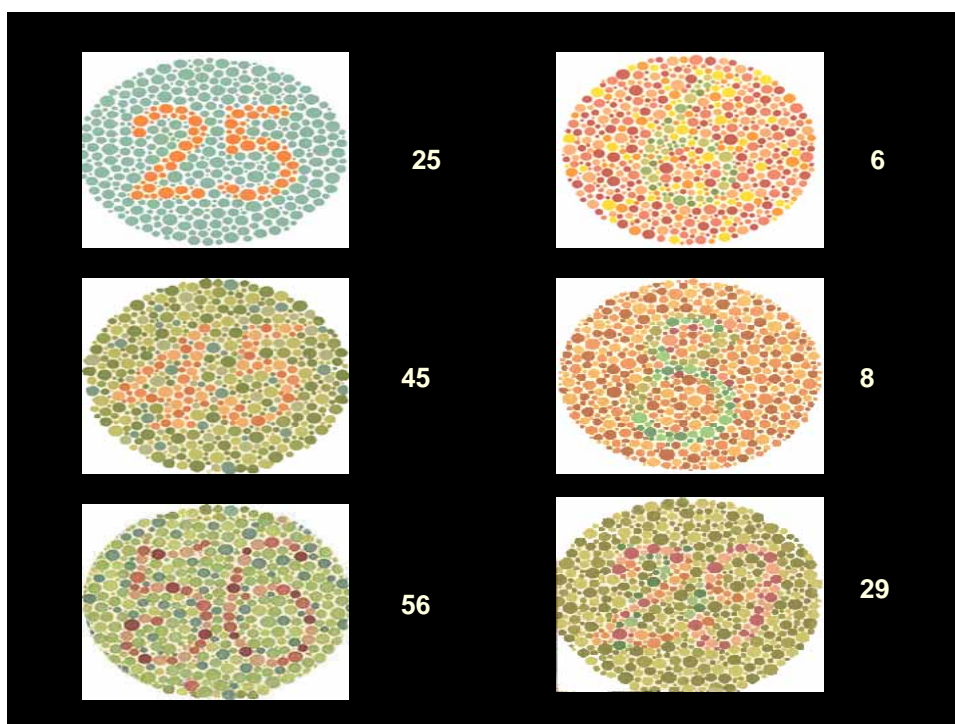
Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

222





XXXXXX	GREEN	GREEN
XXXXXX	BLUE	BLUE
XXXXXX	YELLOW	YELLOW
XXXXXX	PURPLE	PURPLE
XXXXXX	ORANGE	ORANGE
XXXXXX	RED	RED
XXXXXX	WHITE	WHITE
XXXXXX	PURPLE	PURPLE
XXXXXX	ORANGE	ORANGE
XXXXXX	BLUE	BLUE
XXXXXX	RED	RED
XXXXXX	GREEN	GREEN
XXXXXX	WHITE	WHITE
XXXXXX	YELLOW	YELLOW
XXXXXX	PURPLE	PURPLE
XXXXXX	RED	RED
XXXXXX	GREEN	GREEN
XXXXXX	BLUE	BLUE



Referências

- <http://cvision.ucsd.edu/>
- <http://www.poynton.com/Poynton-color.html>
- <http://www.efg2.com/Lab/>
- <http://www.easyrgb.com/>
- <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/cmfs.htm>

FIM

April 05

Prof. Ismael H. F. Santos - ismael@tecgraf.puc-rio.br

229