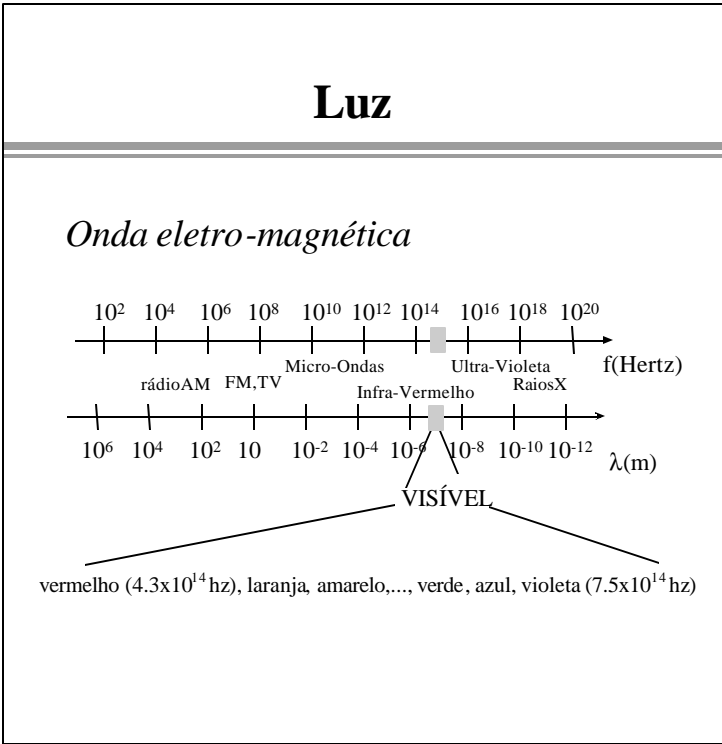


Luz e Cor



Comprimento de Onda

$c = \lambda f$

$\lambda = c / f$

Cor	λ
Violeta	380-440 $m\mu$
Azul	440-490 $m\mu$
Verde	490-565 $m\mu$
Amarelo	565-590 $m\mu$
Laranja	590-630 $m\mu$
Vermelho	630-780 $m\mu$

$1 m\mu = 10^{-9} m$

Reflexão e Refração

$\text{sen } r = \frac{n_2}{n_1} \text{sen } i$

lei de Snell (1621)

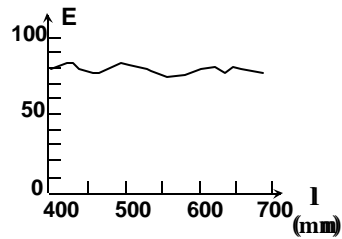
$n_1 = \frac{\text{velocidade da luz no vácuo}}{\text{velocidade da luz no material } i}$

luz branca (acromática) tem todos os comprimentos de onda

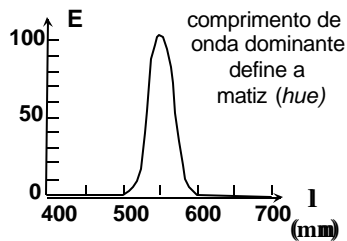
Newton

Fontes luminosas

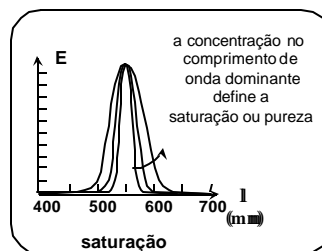
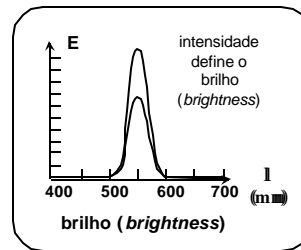
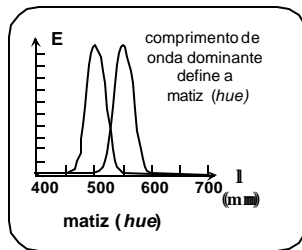
fonte luminosa branca



fonte luminosa colorida



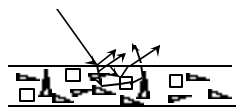
Características das fontes luminosas



cores pastéis são menos saturadas ou menos puras

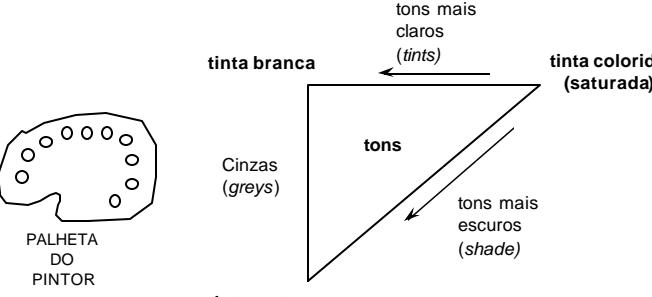
Processos de formação de cores

por pigmentação



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

índices de refração distinto do material base



tinta branca ← tons mais claros (tints) tinta colorida (saturada)

tons

tons mais escuros (shade)

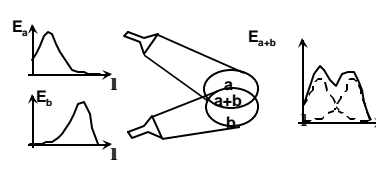
Cinzas (greys)

tinta preta

PALHETA DO PINTOR

Processos de formação de cores

aditivos

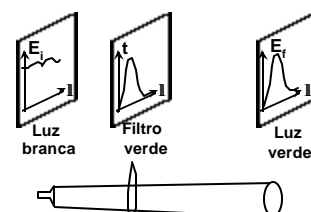


$E_{a+b}(\lambda) = E_a(\lambda) + E_b(\lambda)$

O olho não vê componentes!

subtrativos

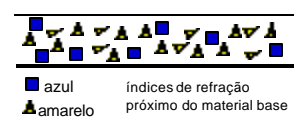
filtros ou corantes



Luz branca Filtro verde Luz verde

transparência

$E_r(\lambda) = t(\lambda) \cdot E_i(\lambda)$

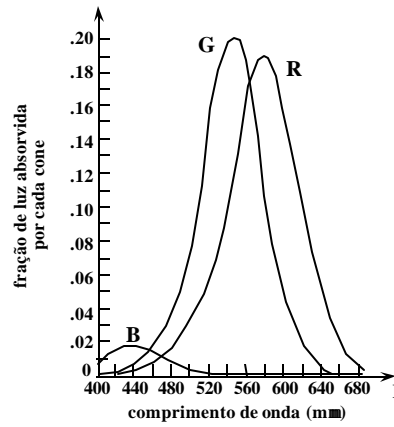


■ azul índices de refração próximo do material base
▲ amarelo

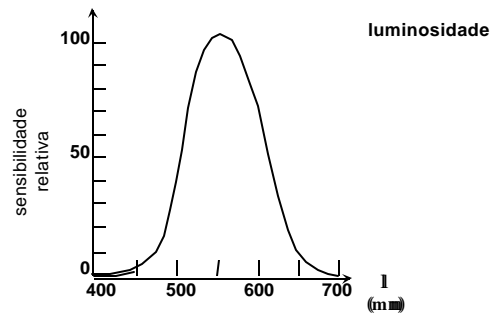
Espaço de cor do olho humano

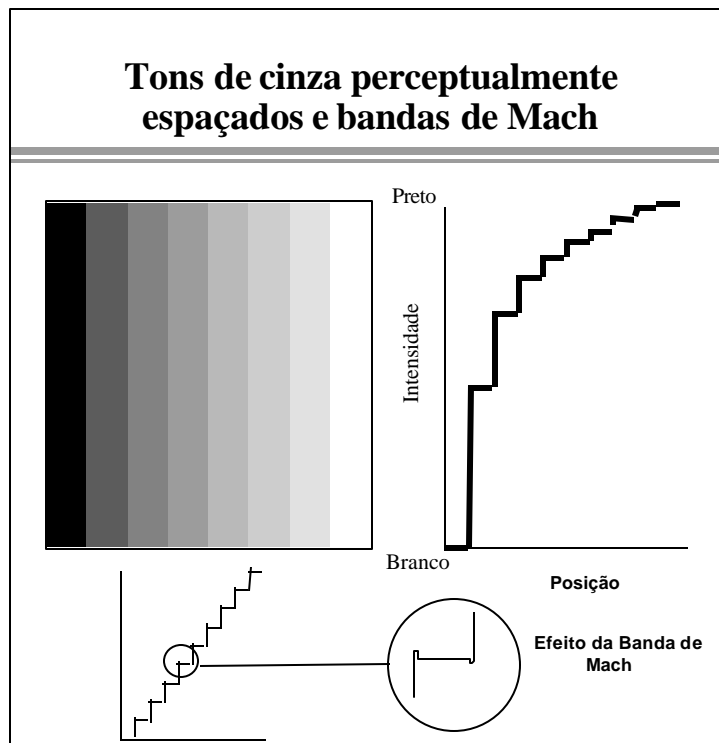
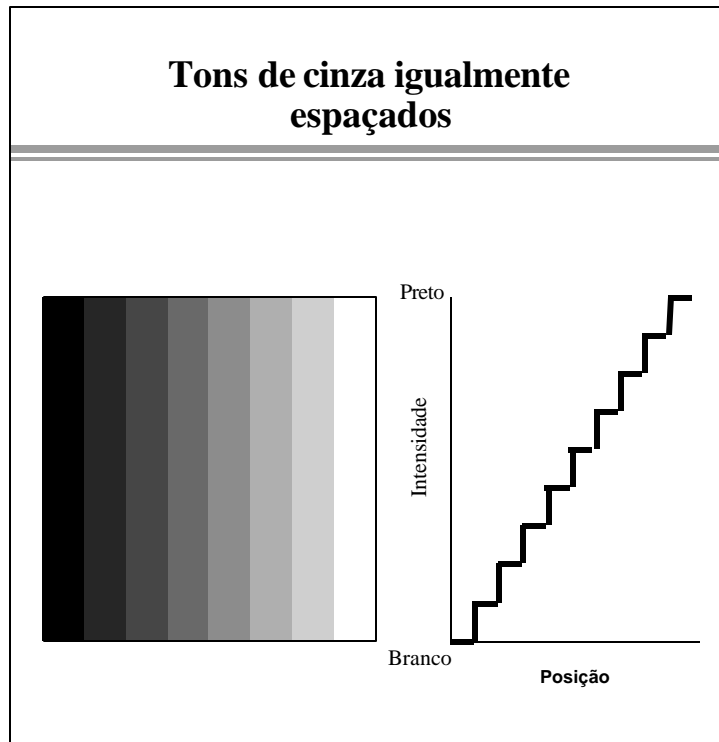


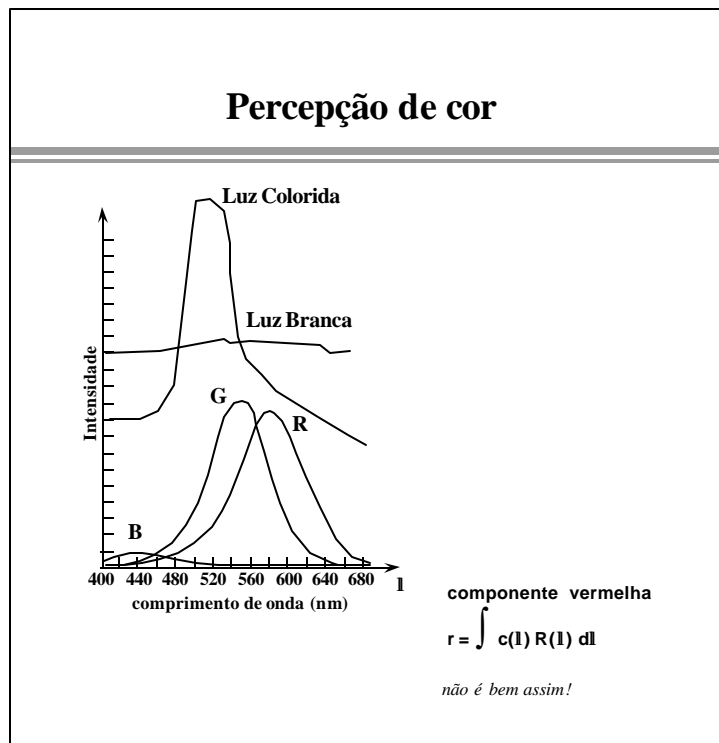
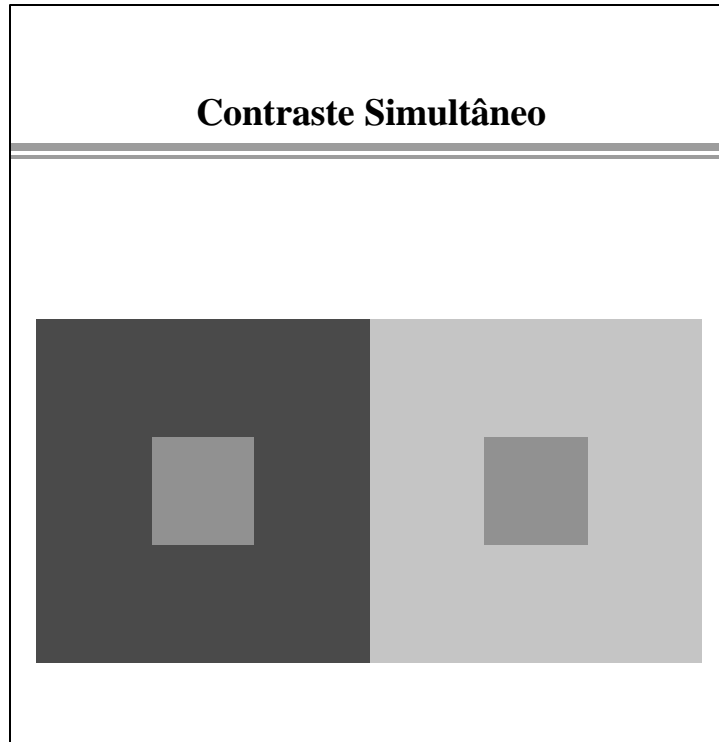
Olho humano: Cones (RGB) e Bastonetes (cegos para cor)



Fração da luz absorvida pelo olho

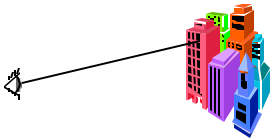


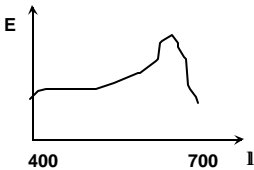




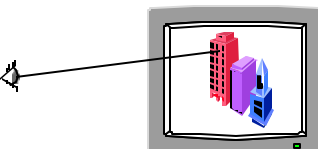
O problema de reprodução de cor em CG

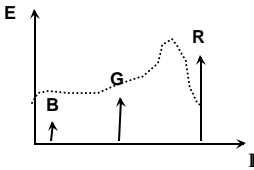
Mundo Real





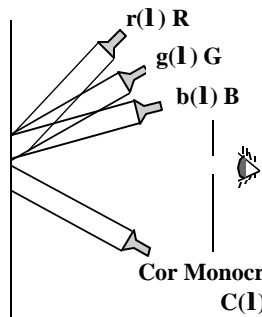
Espaço Virtual





- mesma sensação de cor ⇨ Metamerismo
- só distingue 400 mil cores ($< 2^{19}$) ⇨ 19 bits deveriam ser suficientes

Representação perceptual da cor CIE RGB



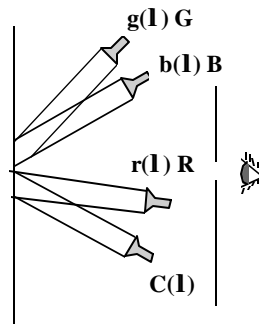
**Cor Monocromática
C(l)**

R = 700 mm
G = 546 mm
B = 435.8 mm

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

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

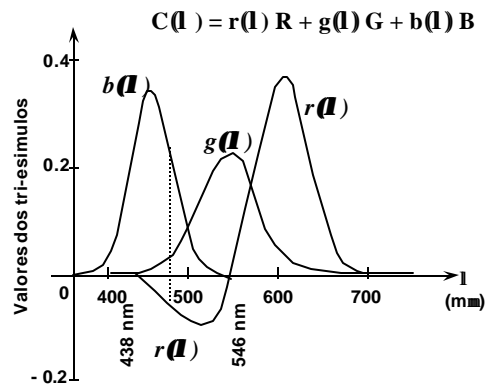
Artifício para “subtrair” uma componente



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

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

Componentes das cores monocromáticas - CIE RGB -



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

Conversão da base CIE RGB para CIE XYZ

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

Escolhendo-se XYZ tal que:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.36470 & -0.51515 & 0.00520 \\ -0.89665 & 0.14264 & -0.01441 \\ -0.46808 & 0.08874 & 1.00921 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

tem-se

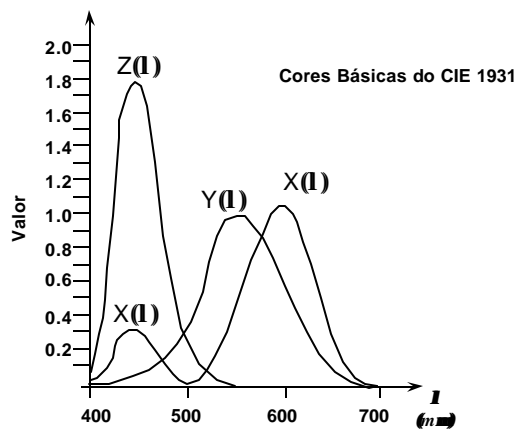
$$C(\lambda) = X(\lambda) X + Y(\lambda) Y + Z(\lambda) Z$$

onde

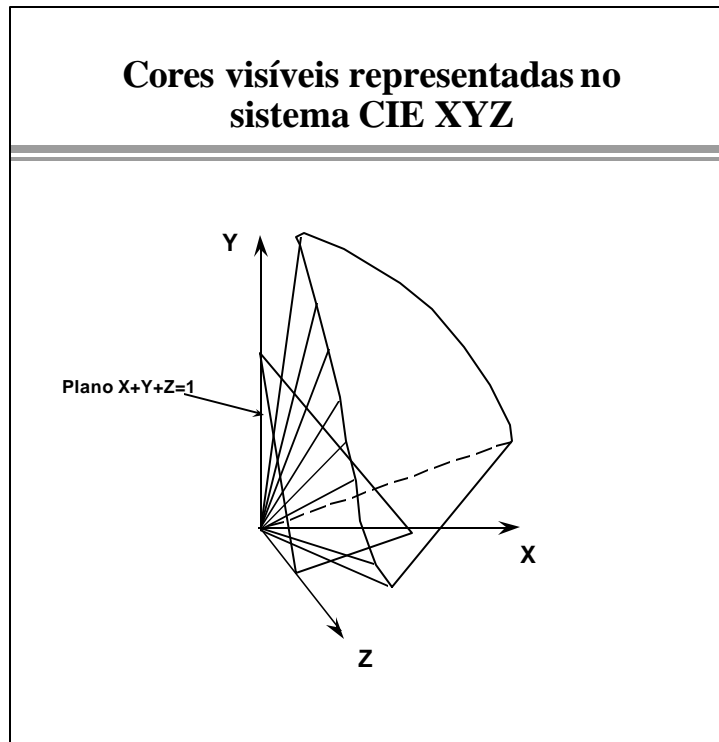
$$\begin{aligned} X(\lambda) &= 2.36470r(\lambda) - 0.89665g(\lambda) - 0.46808b(\lambda) \\ Y(\lambda) &= -0.51515r(\lambda) + 0.14264g(\lambda) + 0.08874b(\lambda) \\ Z(\lambda) &= 0.00520r(\lambda) - 0.01441g(\lambda) + 1.00921b(\lambda) \end{aligned}$$

Componentes das cores monocromáticas - CIE XYZ -

$$C(\lambda) = X(\lambda) X + Y(\lambda) Y + Z(\lambda) Z$$



Nota: Y foi escolhida de forma a Y(λ) ser semelhante à curva de sensibilidade do olho (luminância)



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

- *Um parenteses sobre luminosidade ou brilho*

Valores típicos de iluminamento de uma superfície	
Modo	Valores (lux)
Luz do dia (máximo)	100 000
Luz de dia sombrio	10 000
Interior próximo a janela	1 000
Mínimo p/ trabalho	100
Lua cheia	0,2
Luz das estrelas	0,000 3

... e o olho se acomoda!

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

$$x = X/(X+Y+Z)$$

$$y = Y/(X+Y+Z)$$

$$z = Z/(X+Y+Z)$$

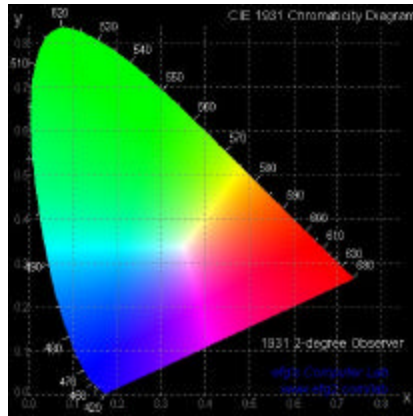
$$X = (x / y) Y$$

$$Y = Y$$

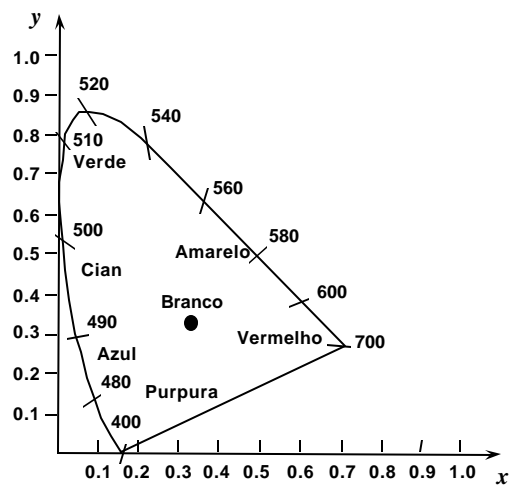
$$Z = (1-x-y) Y / y$$

note que
 $x+y+z = 1$

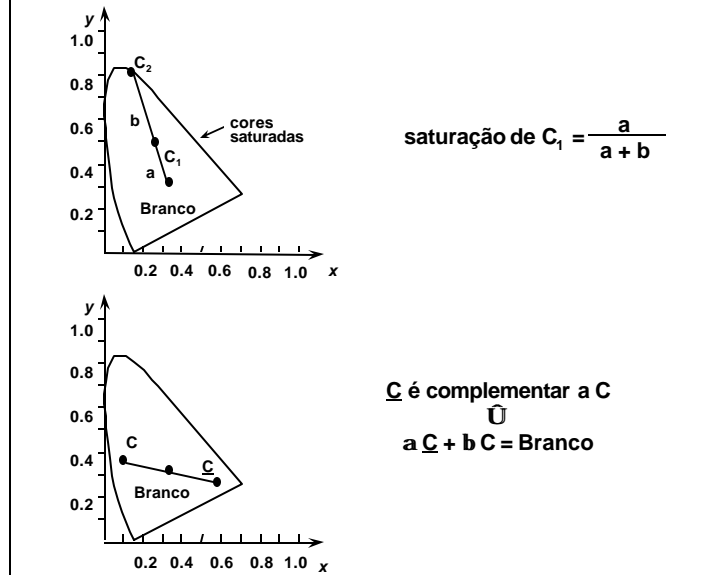
Cores visíveis representadas no sistema CIE xyY



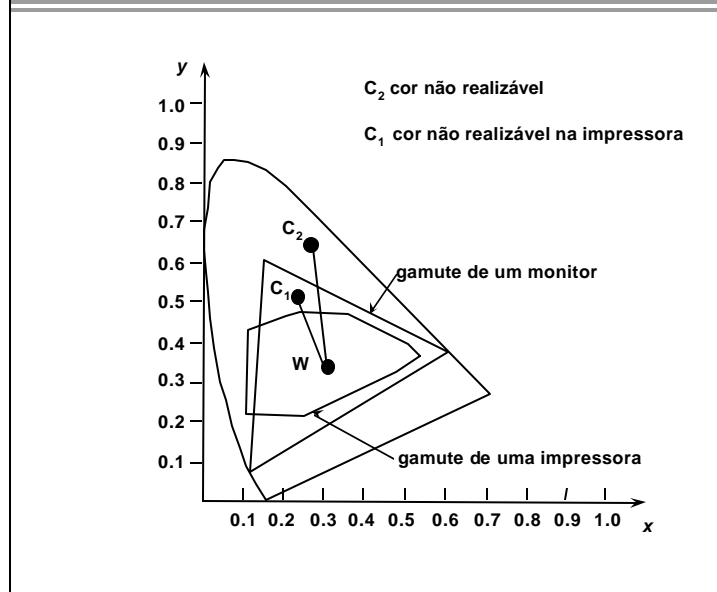
Cores visíveis representadas no sistema CIE xyY

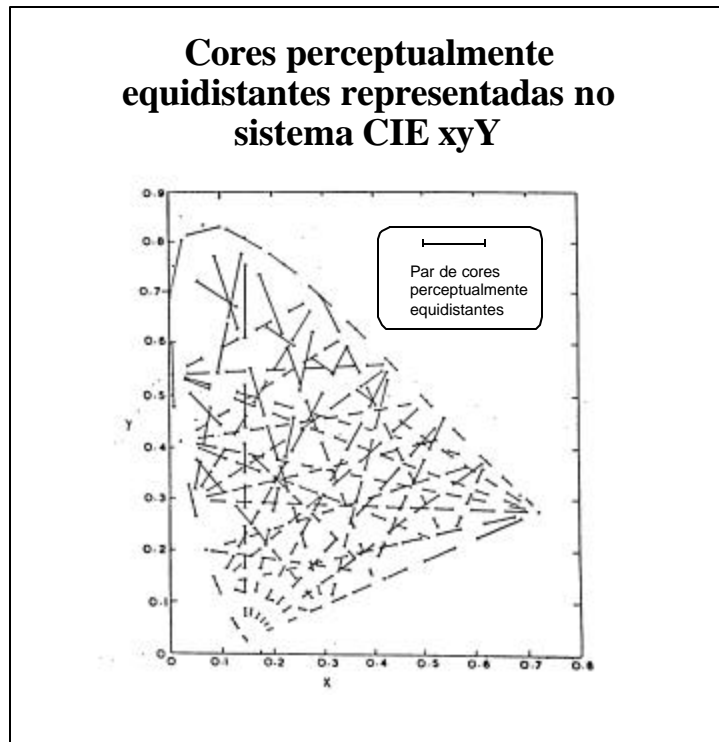


Saturação e cor complementar no diagrama de cromaticidade xy



Gamute de cromaticidade de dispositivos





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:

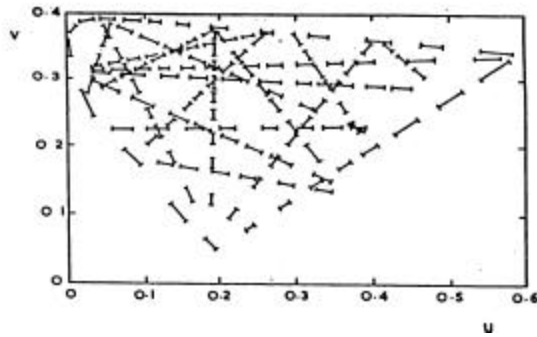
$$u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z} \quad u_w = \frac{4X_w}{X_w+15Y_w+3Z_w}$$

$$v' = \frac{9Y}{X+15Y+3Z} \quad v_w = \frac{9Y_w}{X_w+15Y_w+3Z_w}$$

$L^* = 116 (Y/Y_w)^{1/3} - 16$ se $Y/Y_w > 0.008850$ ou $L^* = 903.19(Y/Y_w)$ se $Y/Y_w \leq 0.008850$	
$u^* = 13L^*(u' - u_w)$	$a^* = 500[(X/X_w)^{1/3} - (Y/Y_w)^{1/3}]$
$v^* = 13L^*(v' - v_w)$	$b^* = 200[(Y/Y_w)^{1/3} - (Z/Z_w)^{1/3}]$

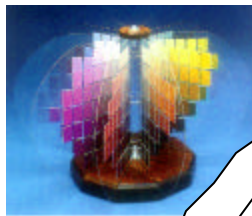
u^*, v^* (ou a^*, b^*) são as componentes de cromaticidade da cor
 L^* é a luminosidade corrigida para uma escala perceptualmente linear

Cores perceptualmente equidistantes representadas no sistema CIE LUV

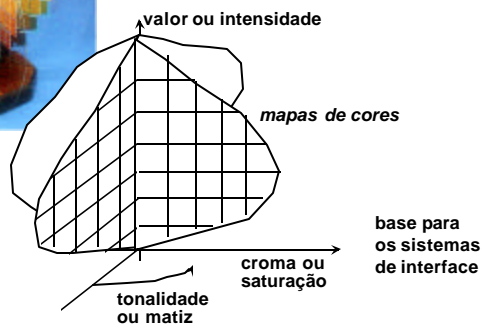


Sistemas de cores por enumeração

Munsell



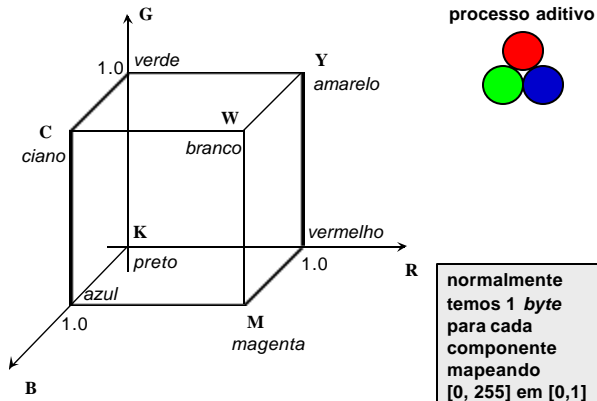
Albert H. Munsell - artista plástico (1905)



Pantone (início dos 60's)

Sistemas de cor dependentes de dispositivo - mRGB

I) Sistemas dos Monitores - mRGB



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

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

ex.

	R	G	B	white
z	0.04	0.12	0.787	0.3582

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

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 $Y_R = y_R C_R$ e $Z_R = z_R C_R$ e

$$X_G = x_G C_G, Y_G = y_G C_G \text{ e } Z_G = z_G C_G$$

$$X_B = x_B C_B, Y_B = y_B C_B \text{ e } Z_B = z_B C_B$$

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

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R C_R & x_G C_G & x_B C_B \\ y_R C_R & y_G C_G & y_B C_B \\ z_R C_R & z_G C_G & z_B C_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_R \\ C_G \\ C_B \end{bmatrix}$$

Conversão do mRGB para CIE XYZ (cont.)

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

$$Y_w = y_w C_w \quad \mathbf{P} C_w = Y_w / y_w = 1.0 / 0.3290 = 3.04$$

$$X_w = x_w C_w = 0.31 \times 3.04 = 0.9506$$

$$Z_w = z_w C_w = 0.3582 \times 3.04 = 1.089$$

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

Concluindo:

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

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.240 & -1.537 & -0.499 \\ -0.969 & 1.876 & 0.042 \\ 0.056 & -0.200 & 1.057 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Sistemas de cor dependentes de dispositivo - CMY

II) Sistemas das Impressoras -CMY ou CMYK

processo predominantemente subtrativo

componente vermelha é absorvida

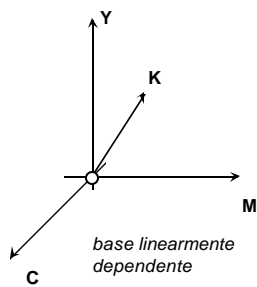
Conversão RGB para CMY e vice-versa

(r,g,b) (c,m,y)

$$(c,m,y) = (1-r, 1-g, 1-b)$$

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.



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

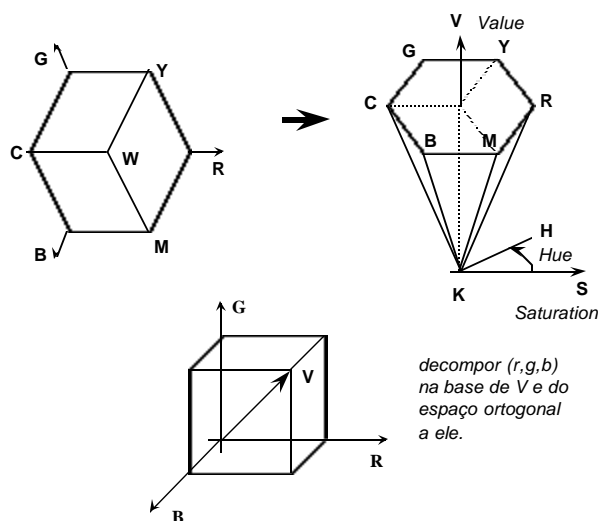
$$a \in [0,1]$$

$$C := C - K$$

$$M := M - K$$

$$Y := Y - K$$

Sistemas de cor mais indicados para interface com usuário - HSV



Transformação RGB para HSV e vice-versa

G
R
B

Max = max(R,G,B)
Min = min(R,G,B)

no caso **G** e **B**,
respectivamente

V = Max

G
R
B

S = 1
S = 0

S = (Max - Min) / Max

Conversão RGB para HSV cálculo de H

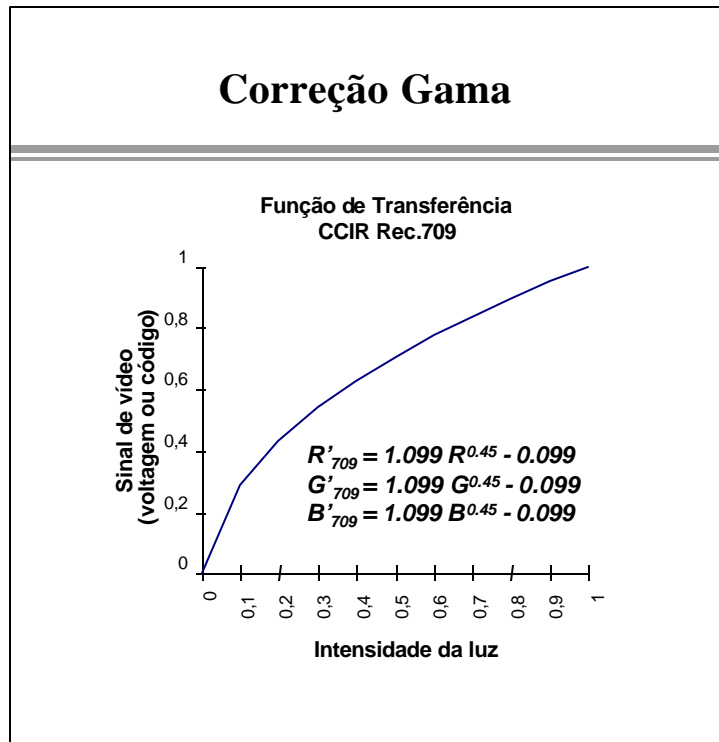
G(120°) **Y(60°)**
C(180°) **R(0°)**
B(240°) **M(300°)**

H
S

120° **60°**
180° **0°**
240° **300°**

120° **r** **R**
H **b** **180°**
B **g**

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



Sistema (Y', B'-Y', R'-Y')

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

Componente
luma de vídeo

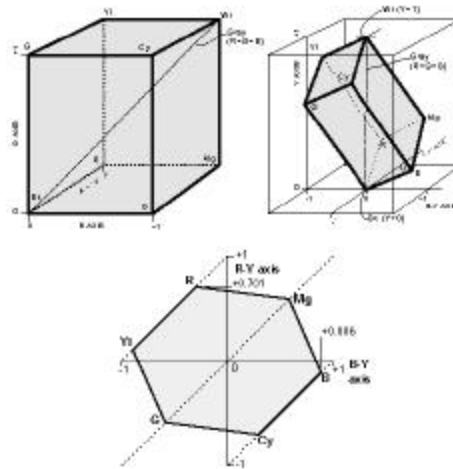
$$\begin{aligned} B'-Y'_{601} &= B' - (0.2999 R' + 0.587 G' + 0.114 B') \\ R'-Y'_{601} &= R' - (0.2999 R' + 0.587 G' + 0.114 B') \end{aligned}$$

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!

Cubo RGB no espaço (Y', B'-Y', R'-Y')



Conversão para vídeo

