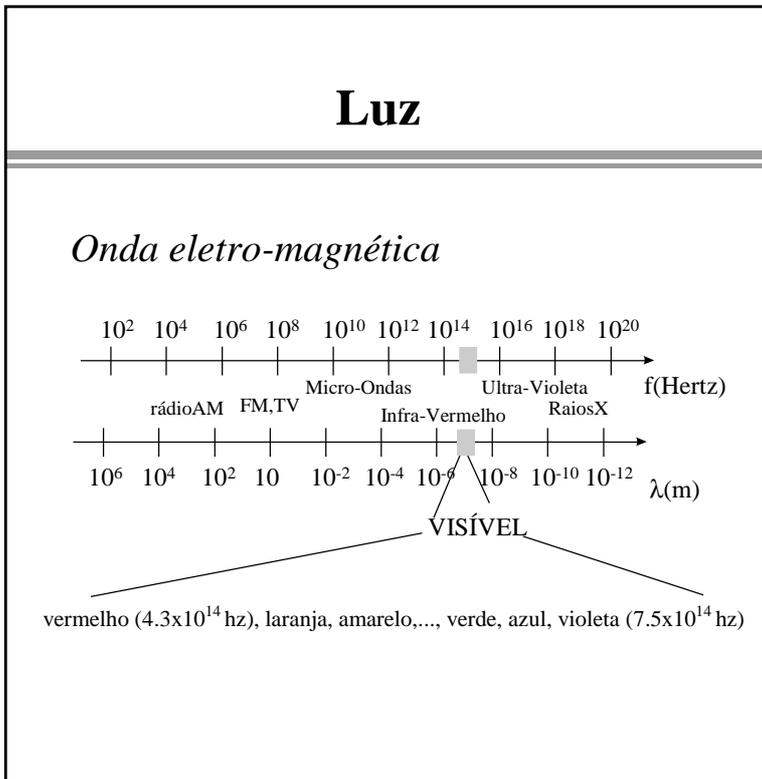


# Luz e Cor



## Comprimento de Onda

$c = \lambda f$

$\lambda = c / f$

Cor	$\lambda$
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<sup>-9</sup> m

## Reflexão e Refração

incidente      refletido

material 1

material 2

refratado

$$\text{sen } \theta_r = \frac{n_2}{n_1} \text{sen } \theta_i$$

*lei de Snell (1621)*

*Índice de refração*

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

Índice de refração

Comprimento de onda (nm)

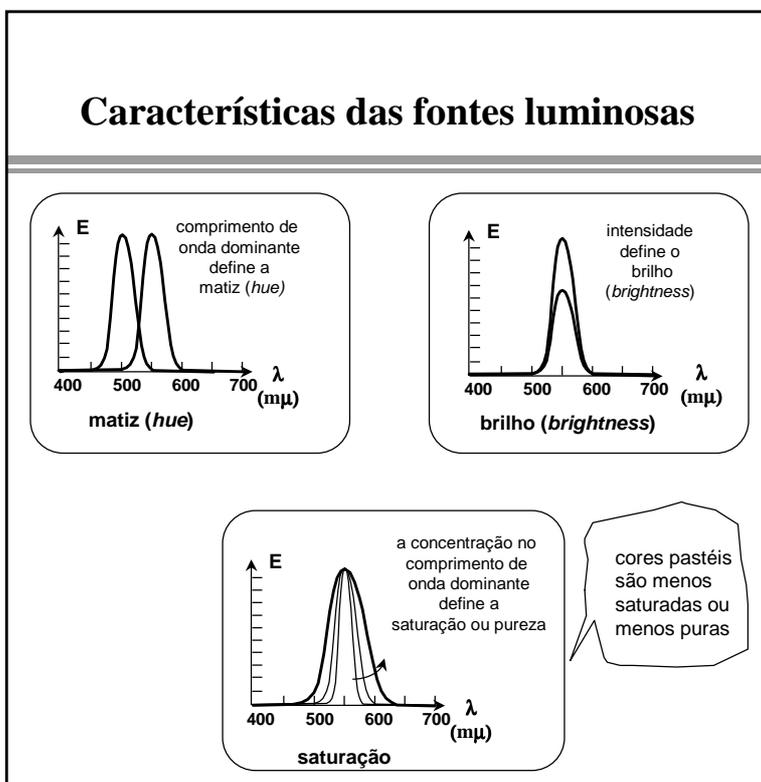
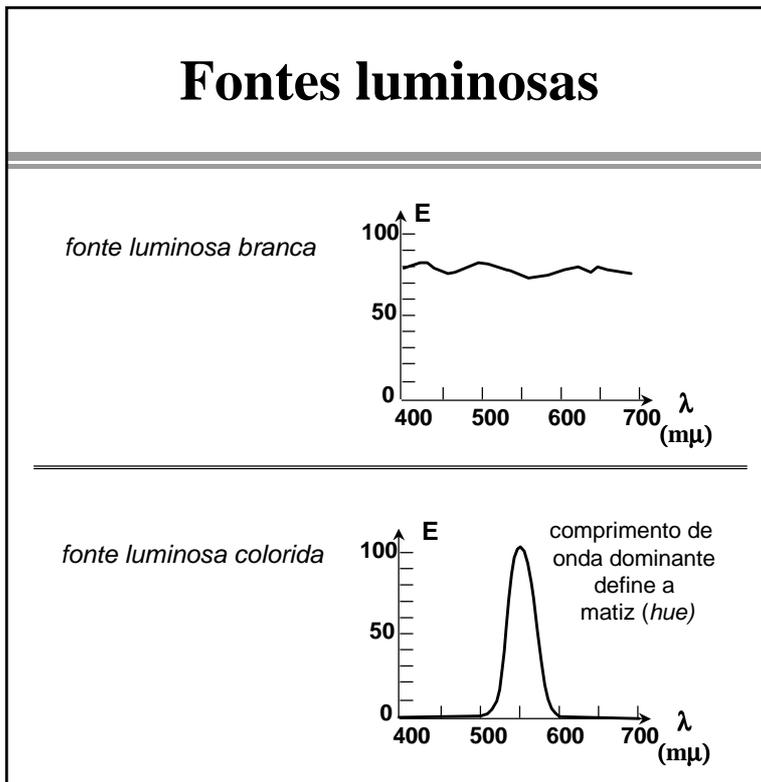
luz branca

prisma

vermelho  
alaranjado  
amarelo  
verde  
azul  
violeta

**luz branca (acromática) tem todos os comprimentos de onda**

*Newton*



## 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

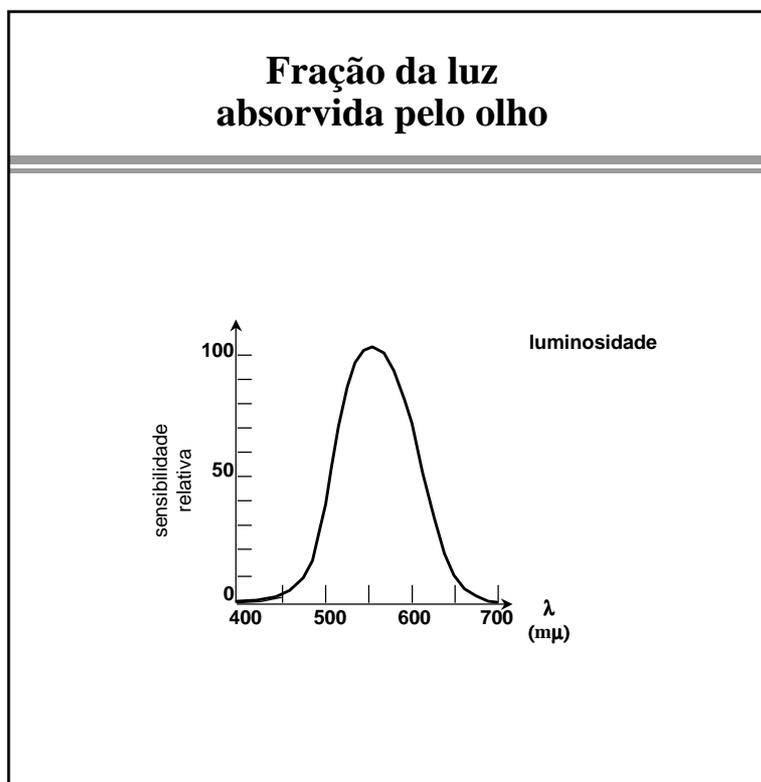
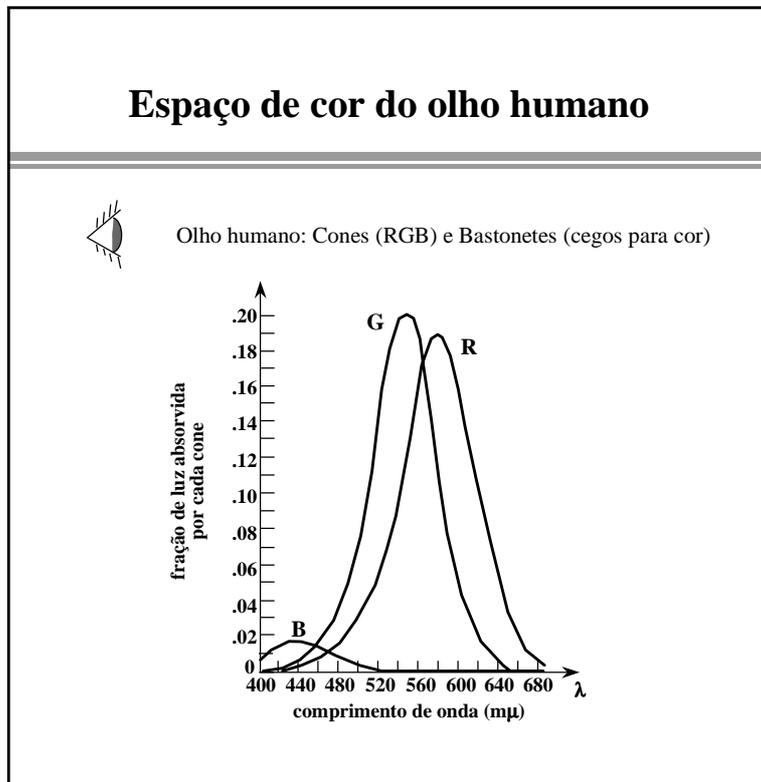
$E_f(\lambda) = t(\lambda) \cdot E_i(\lambda)$

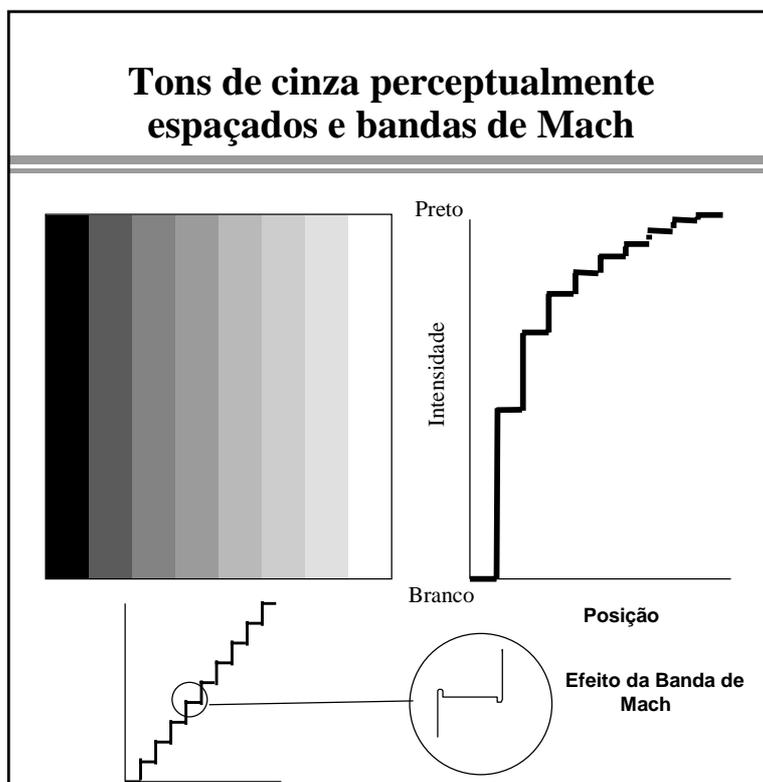
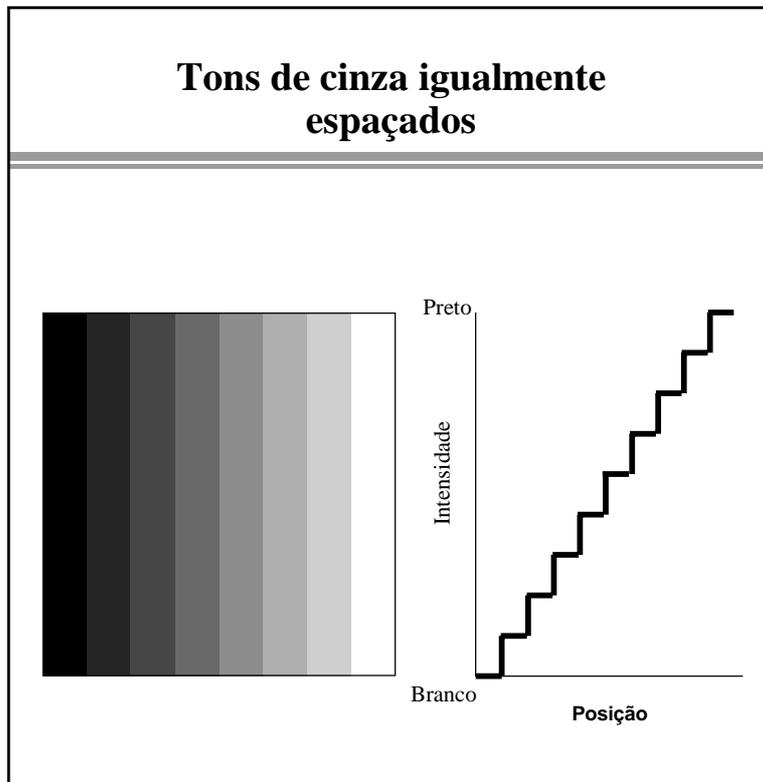
transparência

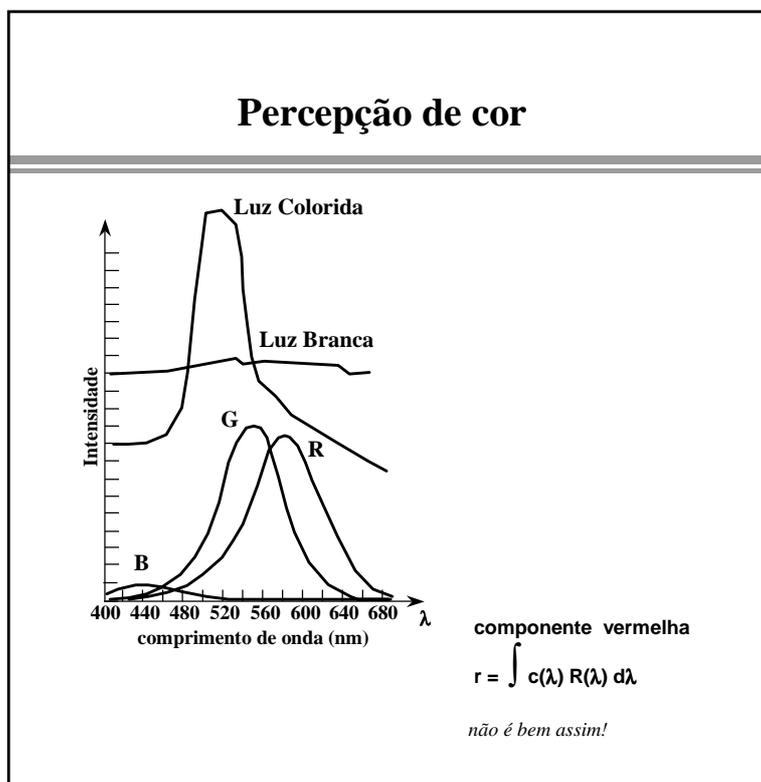
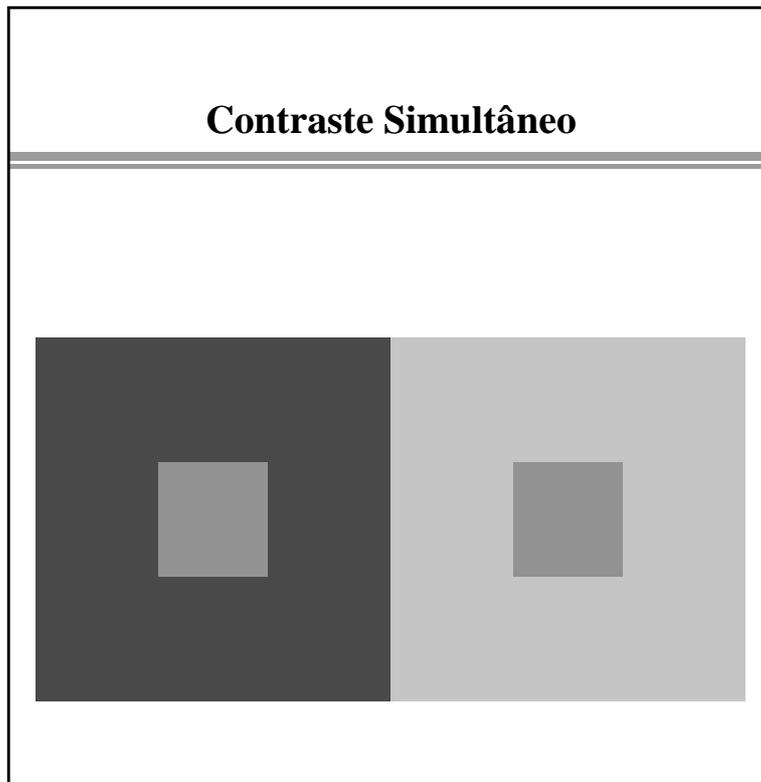
■ azul

▲ amarelo

índices de refração próximo do material base

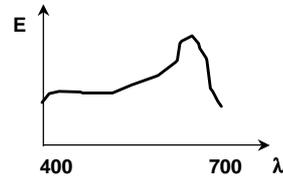
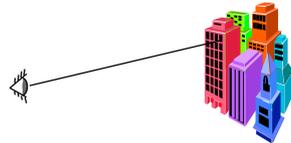




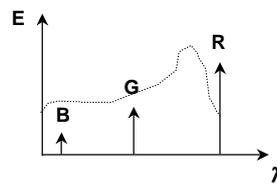
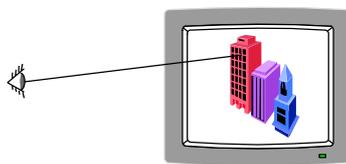


## O problema de reprodução de cor em CG

Mundo Real



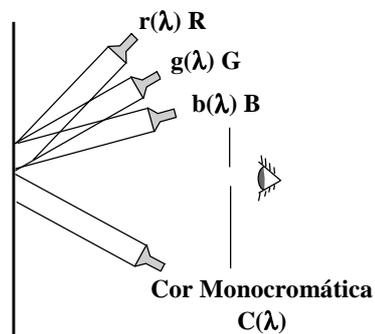
Espaço Virtual



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

## Representação perceptual da cor CIE RGB

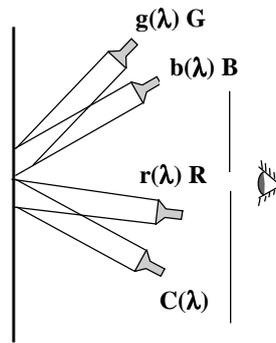
$R = 700 \text{ m}\mu$   
 $G = 546 \text{ m}\mu$   
 $B = 435.8 \text{ m}\mu$



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

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

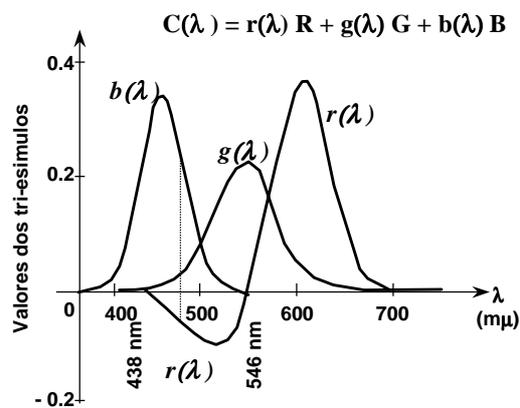
### Artifício para “subtrair” uma componente



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

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

### 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

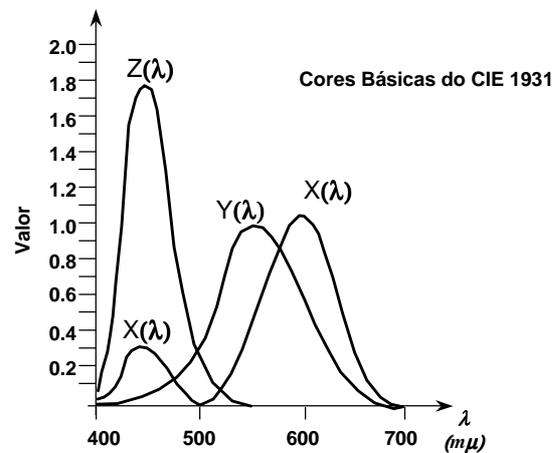
$$C(\lambda) = X(\lambda) X + Y(\lambda) Y + Z(\lambda) Z$$

onde

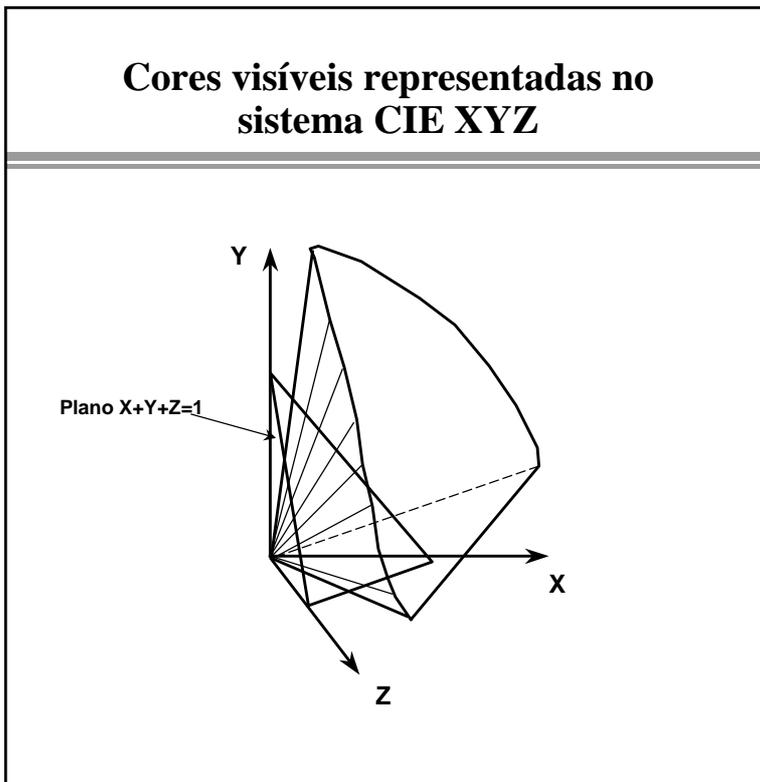
$$\begin{aligned} X(\lambda) &= 2.36470r(\lambda) - 0.89665g(\lambda) - 0.46808b(\lambda) \\ Y(\lambda) &= -0.51515r(\lambda) + 0.14264g(\lambda) + 0.08874b(\lambda) \\ Z(\lambda) &= 0.00520r(\lambda) - 0.01441g(\lambda) + 1.00921b(\lambda) \end{aligned}$$

## 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*

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

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

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

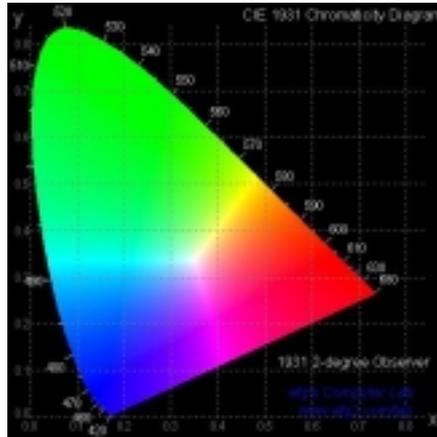
$$X = (x / y) Y$$

$$Y = Y$$

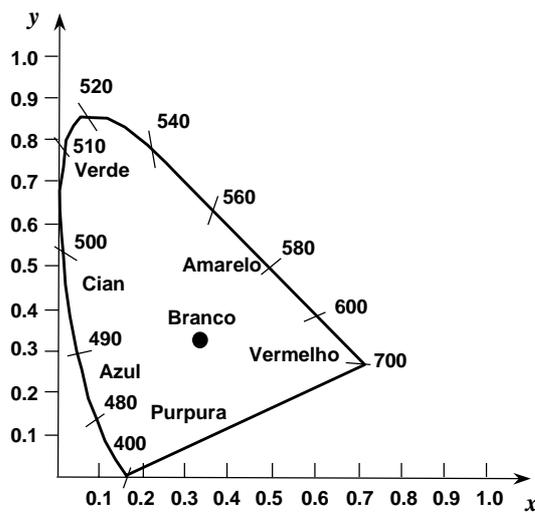
$$Z = (1-x-y) Y / y$$

*note que*  
 $x+y+z = 1$

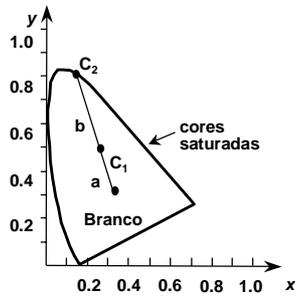
### Cores visíveis representadas no sistema CIE xyY



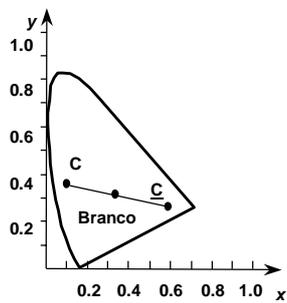
### Cores visíveis representadas no sistema CIE xyY



### Saturação e cor complementar no diagrama de cromaticidade xy

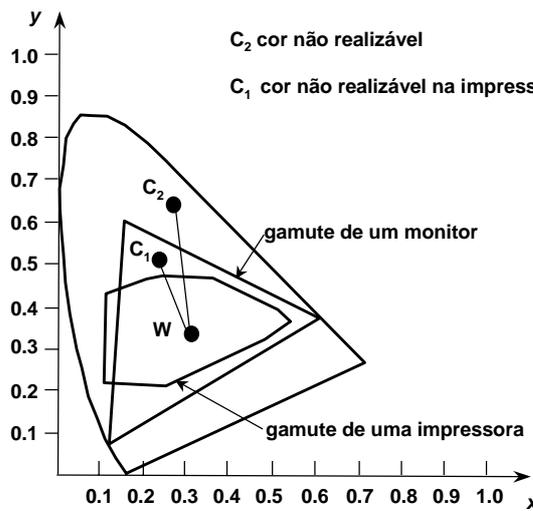


$$\text{saturação de } C_1 = \frac{a}{a + b}$$



$$\begin{aligned} \underline{C} \text{ é complementar a } C \\ \Leftrightarrow \\ \alpha \underline{C} + \beta C = \text{Branco} \end{aligned}$$

### Gamute de cromaticidade de dispositivos

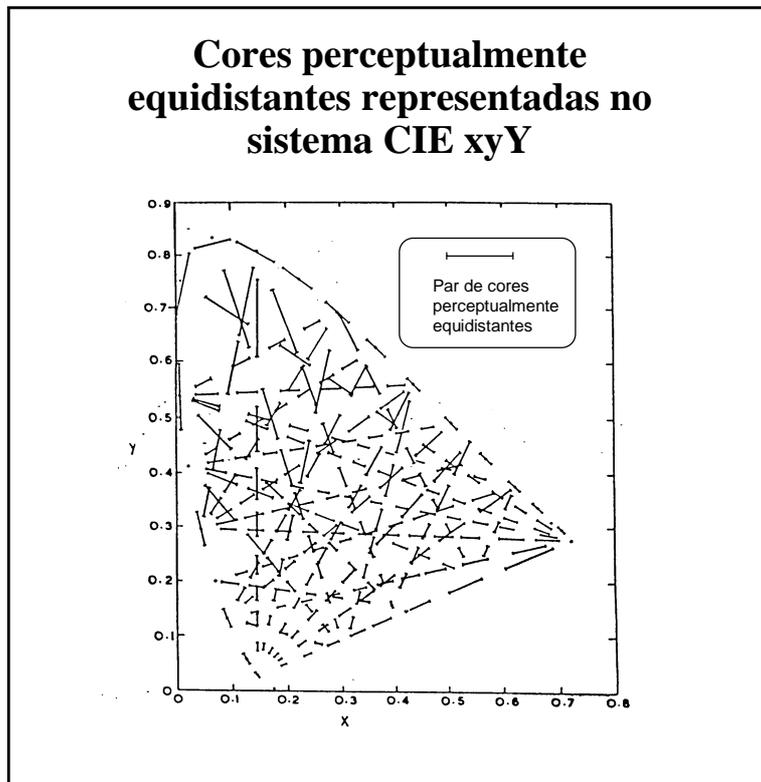


$C_2$  cor não realizável

$C_1$  cor não realizável na impressora

gamute de um monitor

gamute de uma impressora



### 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:**

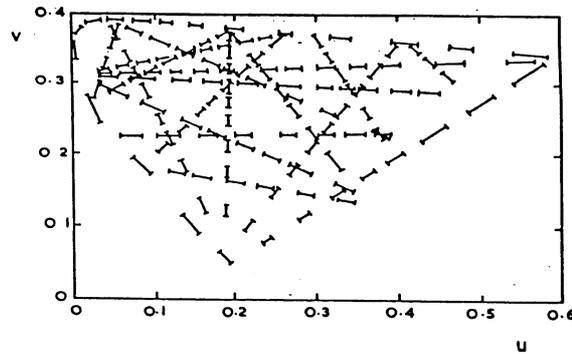
$$u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z} \quad u_w = \frac{4X_w}{X_w+15Y_w+3Z_w}$$

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

$L^* = 116 (Y/Y_w)^{1/3} - 16$ 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

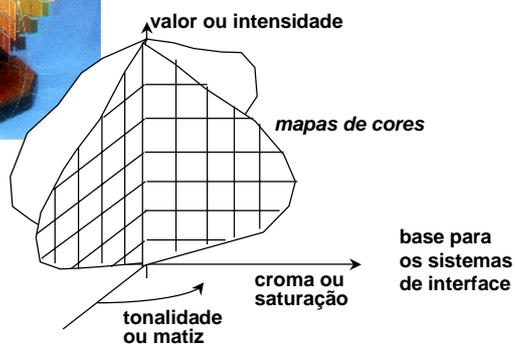


### Sistemas de cores por enumeração

#### Munsell



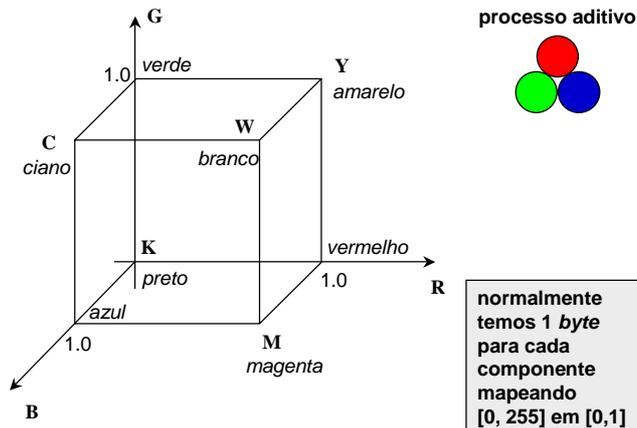
Albert H. Munsell - artista plástico (1905)



#### 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  
 $X_G = x_G C_G, Y_G = y_G C_G$  e  $Z_G = z_G C_G$   
 $X_B = x_B C_B, Y_B = y_B C_B$  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 componentes  $C_R, C_G$  e  $C_B$  usamos o fato de que  $R=G=B=1$  é a cor branca.

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

## Conversão do mRGB para CIE XYZ (cont.)

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

$$Y_W = y_W C_W \Rightarrow C_W = Y_W / y_W = 1.0 / 0.3290 = 3.04$$

$$X_W = x_W C_W = 0.31 \times 3.04 = 0.9506$$

$$Z_W = z_W C_W = 0.3582 \times 3.1645 = 1.089$$

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

Concluindo:

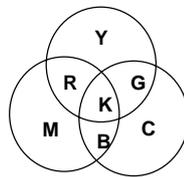
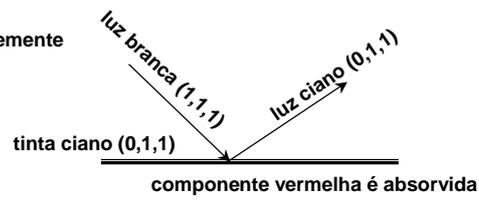
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412 & 0.358 & 0.180 \\ 0.213 & 0.715 & 0.072 \\ 0.019 & 0.119 & 0.950 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

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

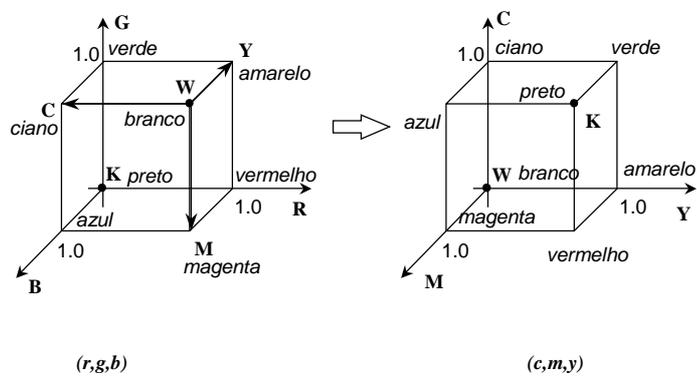
## Sistemas de cor dependentes de dispositivo - CMY

### II) Sistemas das Impressoras -CMY ou CMYK

processo predominantemente subtrativo



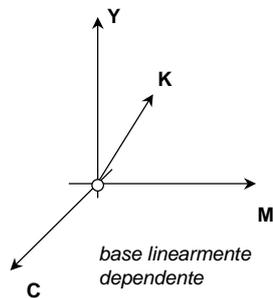
## Conversão RGB para CMY e vice-versa



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

## 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.



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

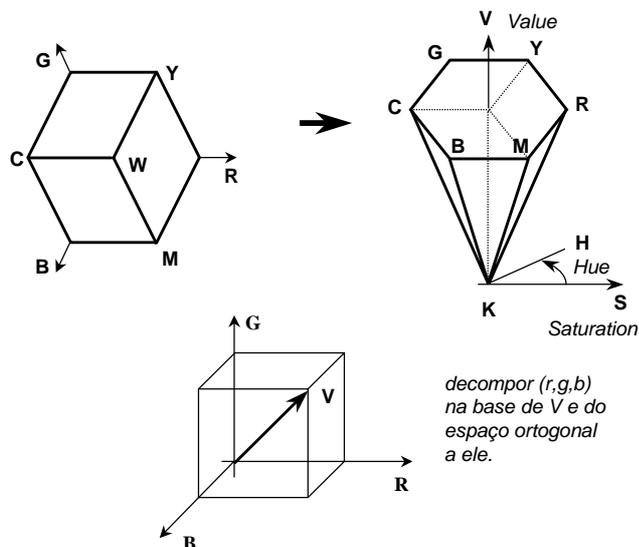
$$\alpha \in [0,1]$$

$$C := C - K$$

$$M := M - K$$

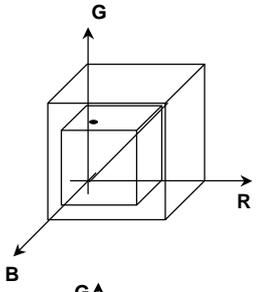
$$Y := Y - K$$

## Sistemas de cor mais indicados para interface com usuário - HSV



### Transformação RGB para HSV e vice-versa

---

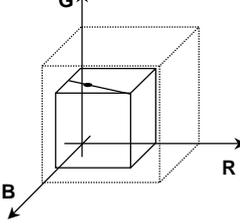


**G**  
**B**  
**R**

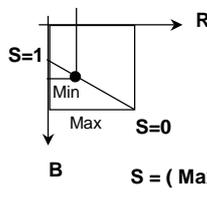
**Max = max(R,G,B)**  
**Min = min(R,G,B)**

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

**V = Max**



**G**  
**B**  
**R**

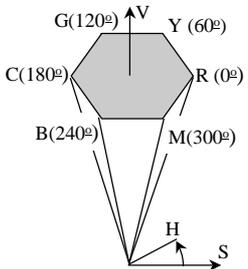


**S=1**  
**Min**  
**Max**  
**S=0**

**B**  
**S = ( Max-Min ) / Max**

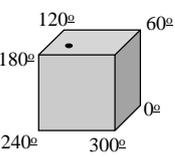
### Conversão RGB para HSV cálculo de H

---

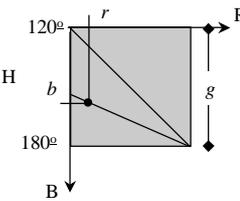


**G(120°)** **Y(60°)**  
**C(180°)** **R(0°)**  
**B(240°)** **M(300°)**

**H**  
**S**

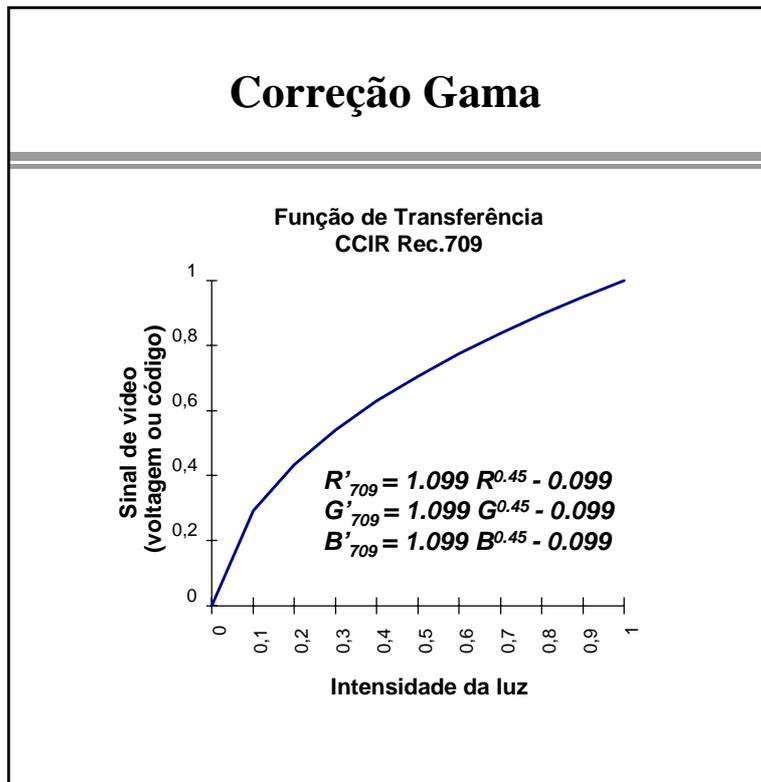


**120°** **60°**  
**180°** **0°**  
**240°** **300°**



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

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



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

---

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

Componente  
luma de vídeo

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

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

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!

