

Unidade III - Fundamentos e Sistemas de Cores



IME 04-10842
Computação Gráfica
Professor Guilherme Mota
Professor Gilson Costa

Por que estudar cores em CG?

Geri's Game (Pixar) was produced with the goal to "take human and cloth animation to new heights"



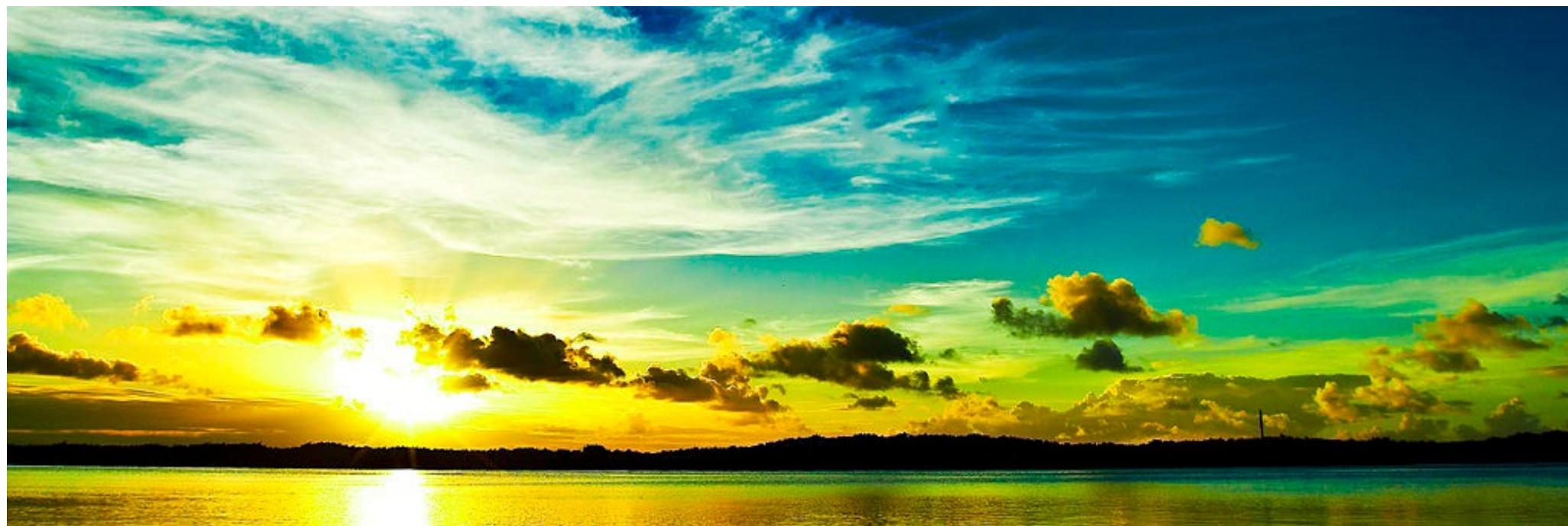
Won an Academy Award for Best Animated Short Film in 1998.

Por que estudar cores em CG?

- Uma imagem (e.g., uma fotografia) fica determinada pela variação da cor nos diversos pontos de sua superfície ou suporte.
- O estudo da cor desempenha um papel importante no estudos das imagens.

O que são cores?

Luz + Sistema Visual

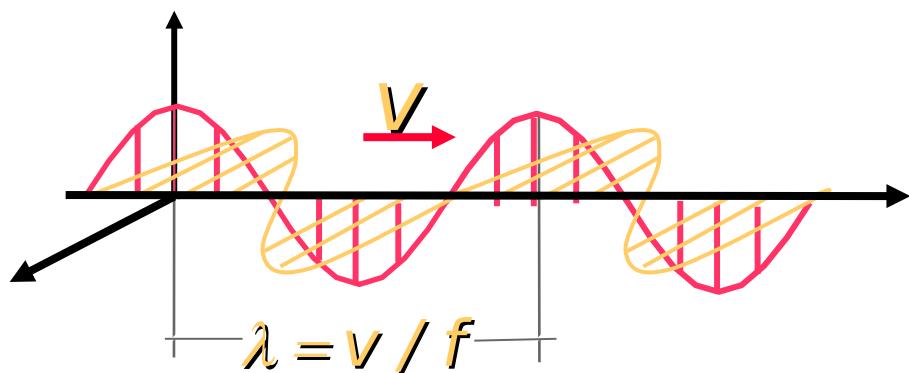


Fenômeno Psicofísico

Física da Luz

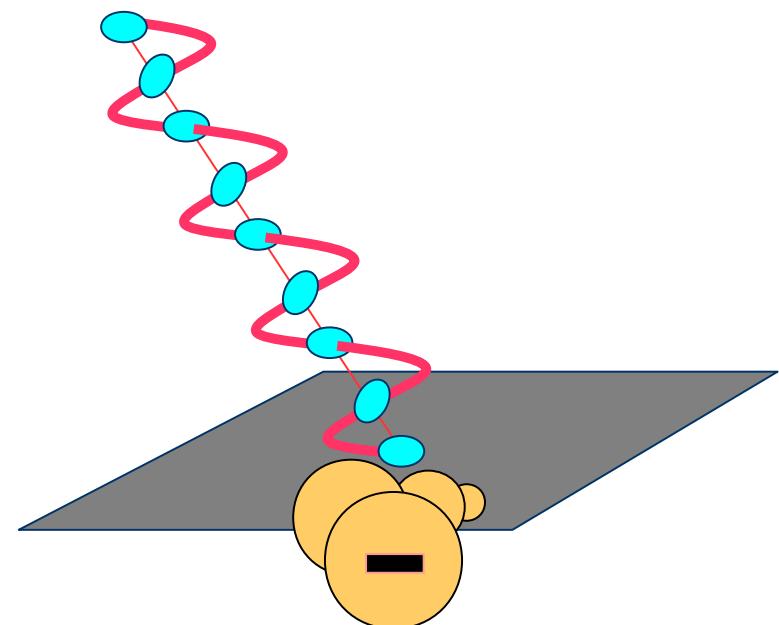
Natureza dual da luz

ONDA ELETROMAGNÉTICA



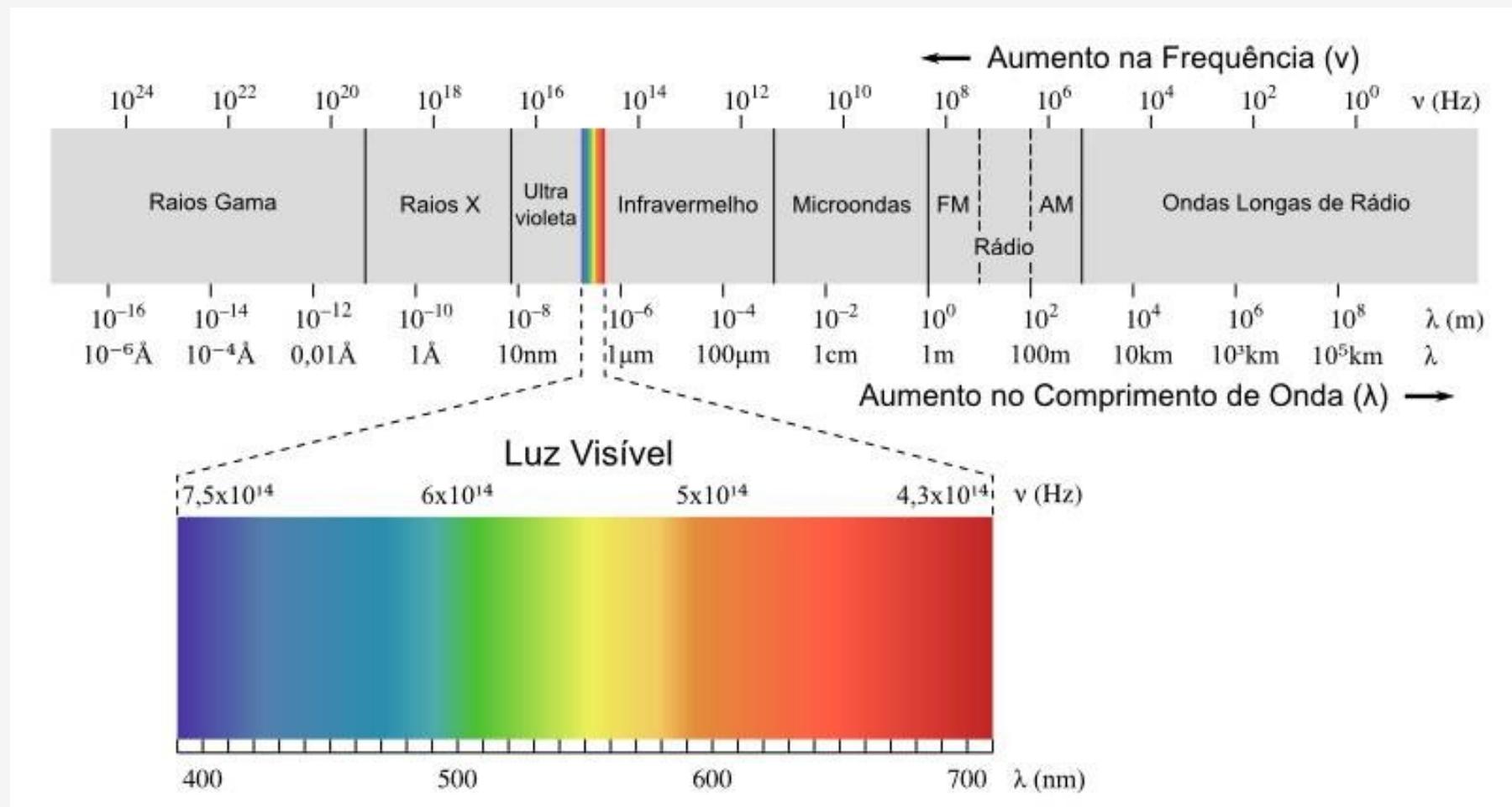
$$c = \lambda f$$

PARTÍCULA



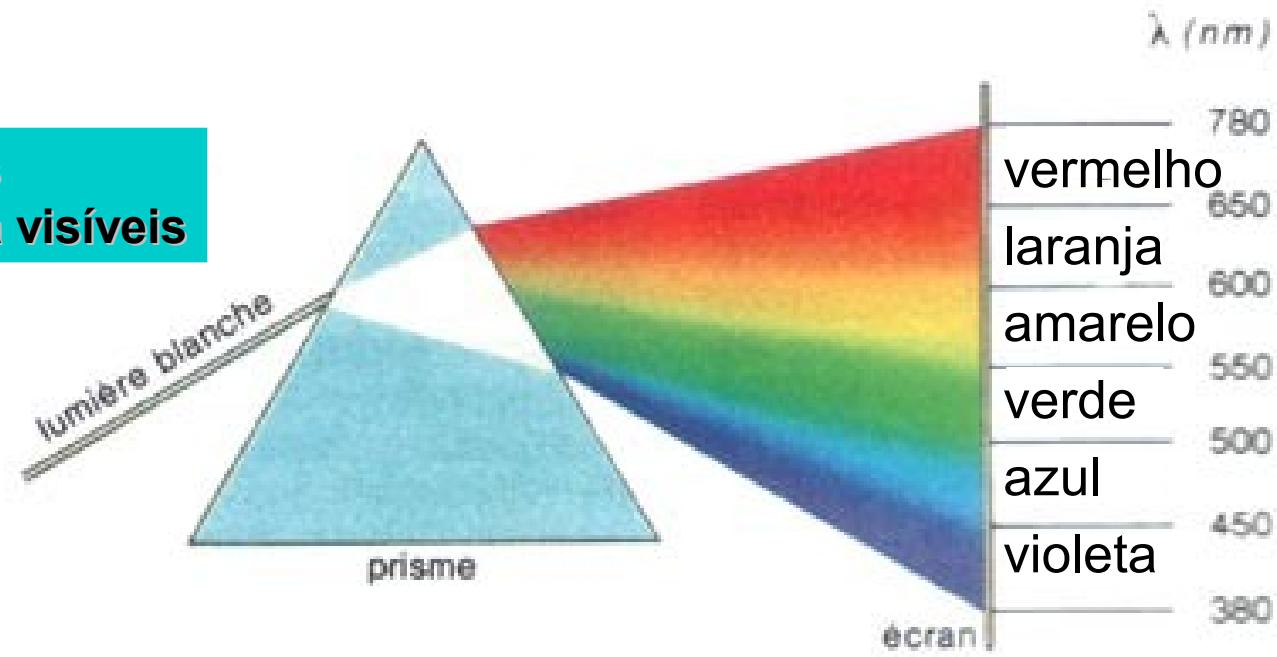
c = Velocidade da Luz $\approx 3.0 \times 10^8$ m/s

Espectro Eletromagnético



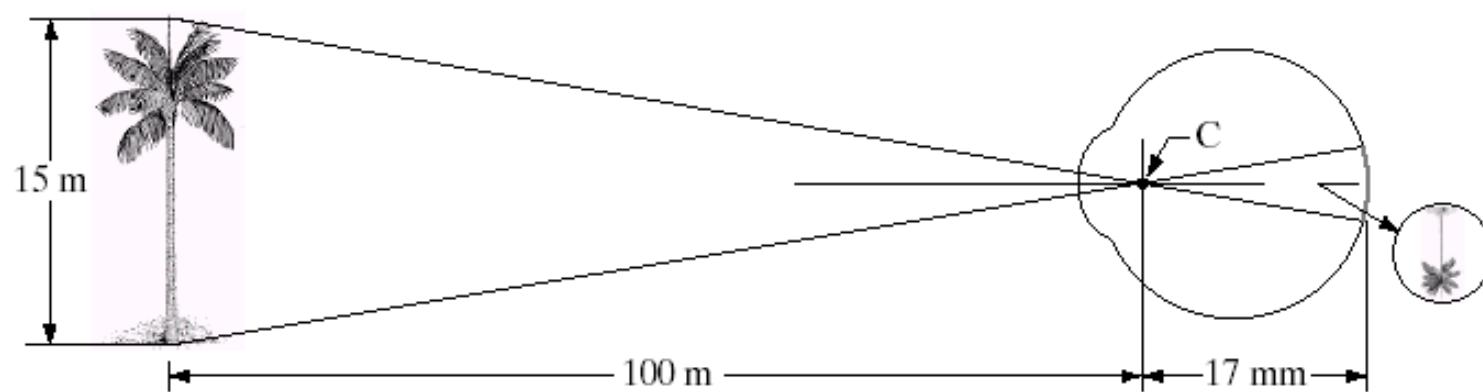
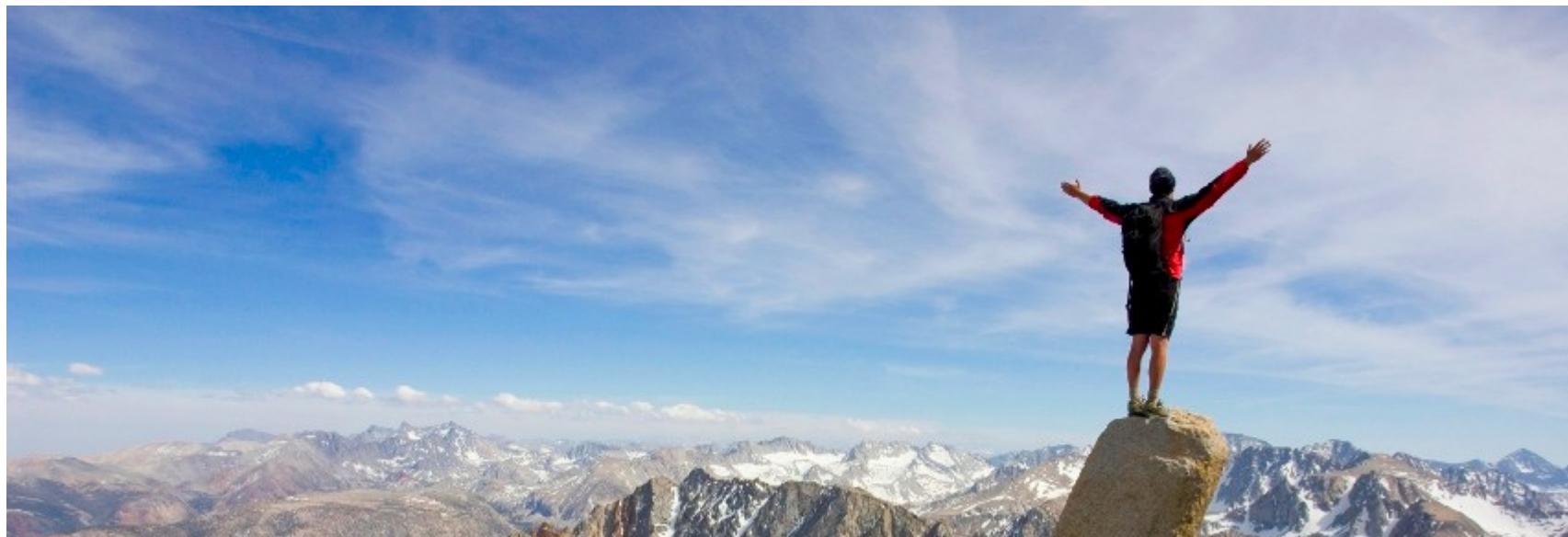
Natureza da luz

A luz branca possui todos os comprimentos de onda visíveis



Cor	λ (1 nm = 10^{-9} m)
Violeta	380-440 nm
Azul	440-490 nm
Verde	490-565 nm
Amarelo	565-590 nm
Laranja	590-630 nm
Vermelho	630-780 nm

Percepção das cores

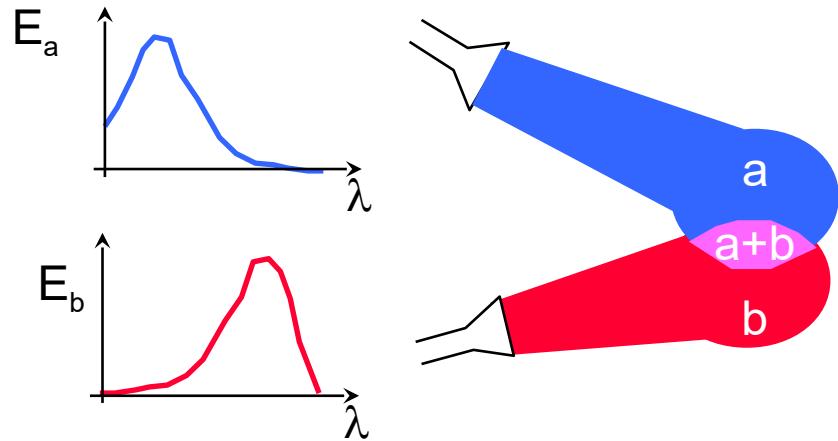


Formação de cores

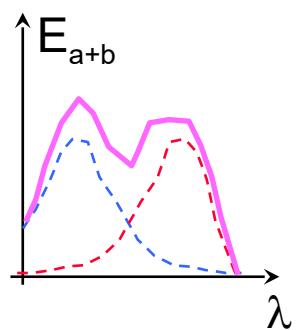
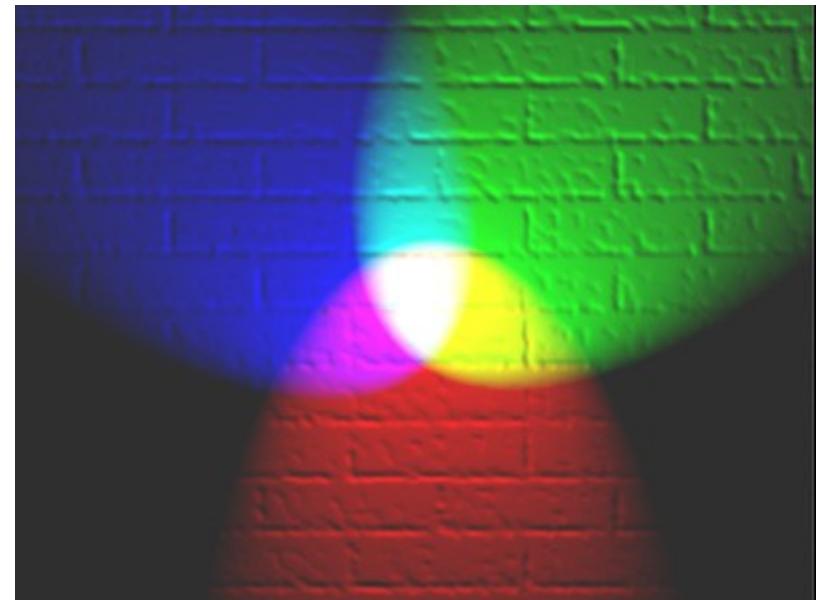
Processos de formação de cores

- As cores que percebemos surgem da interação entre fontes de luz e diversos tipos de materiais encontrados no mundo físico.
- Podem ser de 2 tipos:
 - Aditivo
 - Subtrativo

Processo aditivo

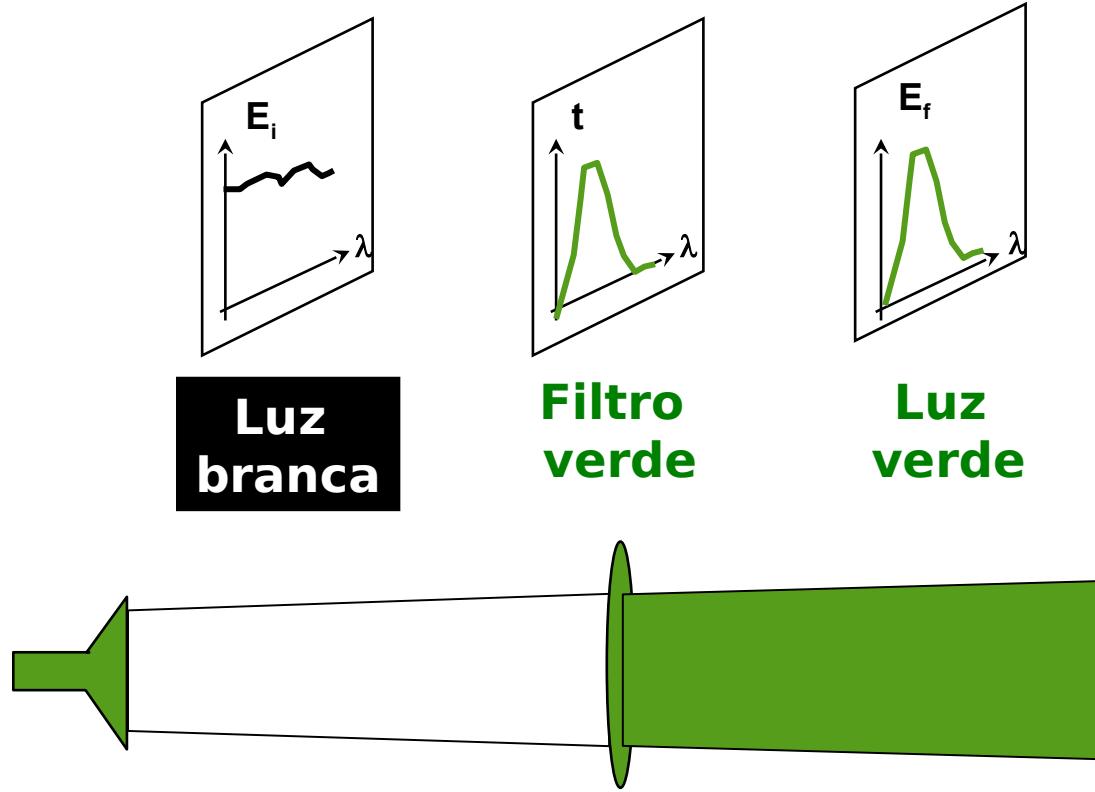


$$E_{a+b}(\lambda) = E_a(\lambda) + E_b(\lambda)$$



O olho não vê componentes!

Processo subtrativo



$t(\lambda) \rightarrow$ função transparência

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

Processo subtrativo

Pigmento amarelo



Pigmento azul



Pigmento vermelho



Tinta branca

Cinzas

Tinta preta

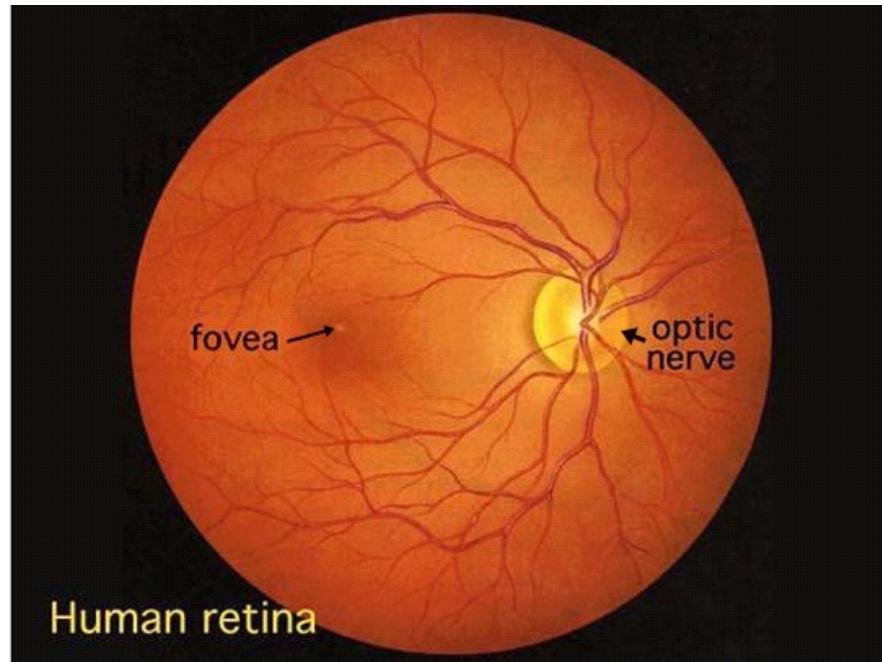
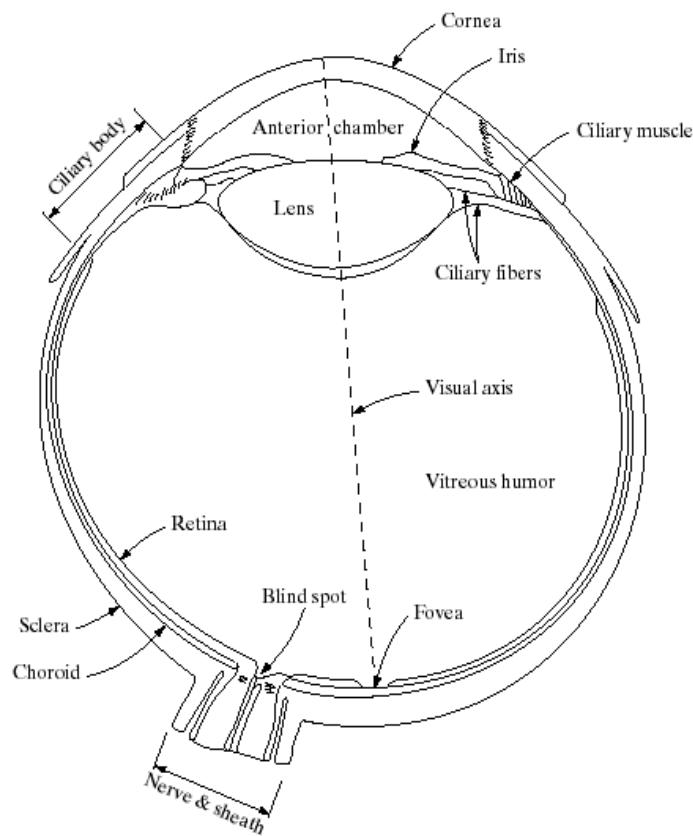
tons mais claros

tons mais escuros

Tinta colorida saturada

Percepção de cores

Representação no sistema visual humano

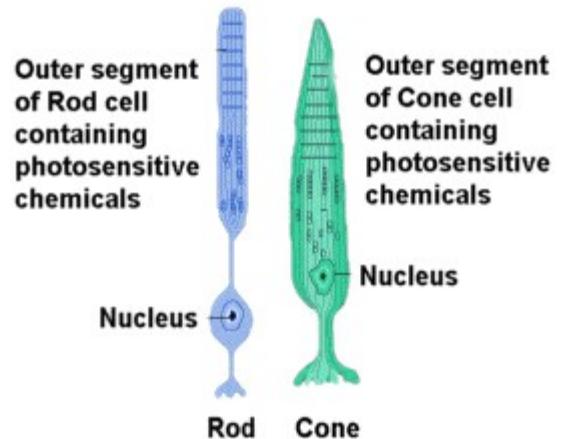


Diâmetro da Fovea: 1,5mm
Diâmetro do Olho: 20mm

Representação no sistema visual humano

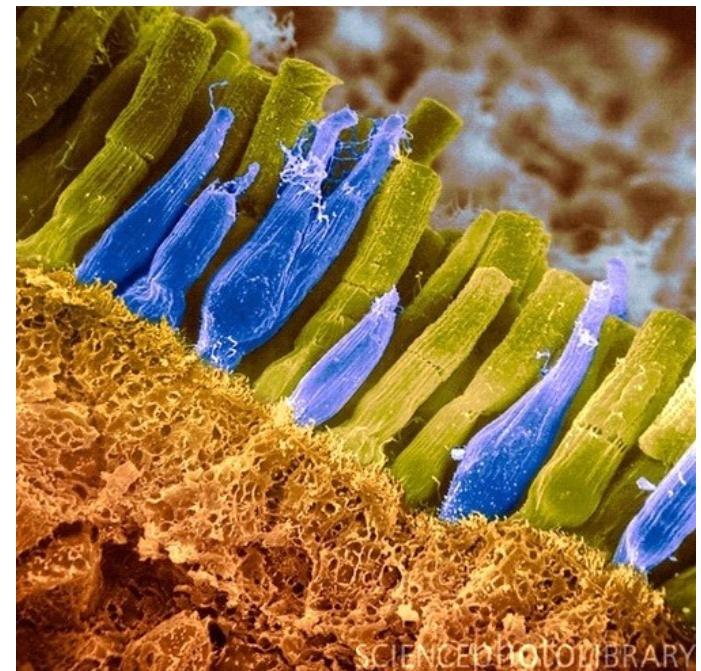
Cones

- Altamente sensível a cor
- Visão Fotópica: alta luminosidade
- 3 tipos: S (azul); M (verde); G (vermelho)
- 6-7 mio, principalmente na fóvea

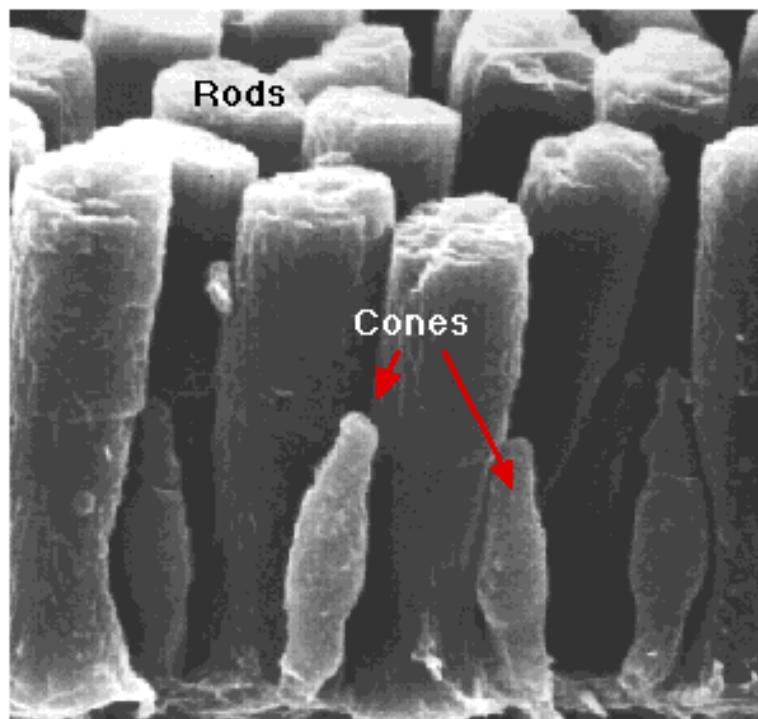
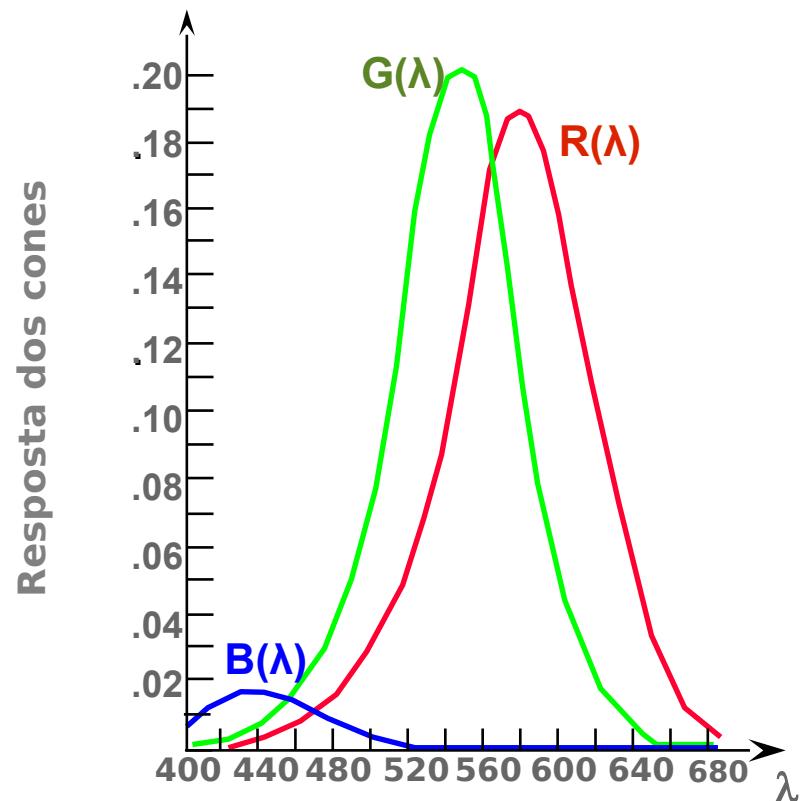


Bastonetes

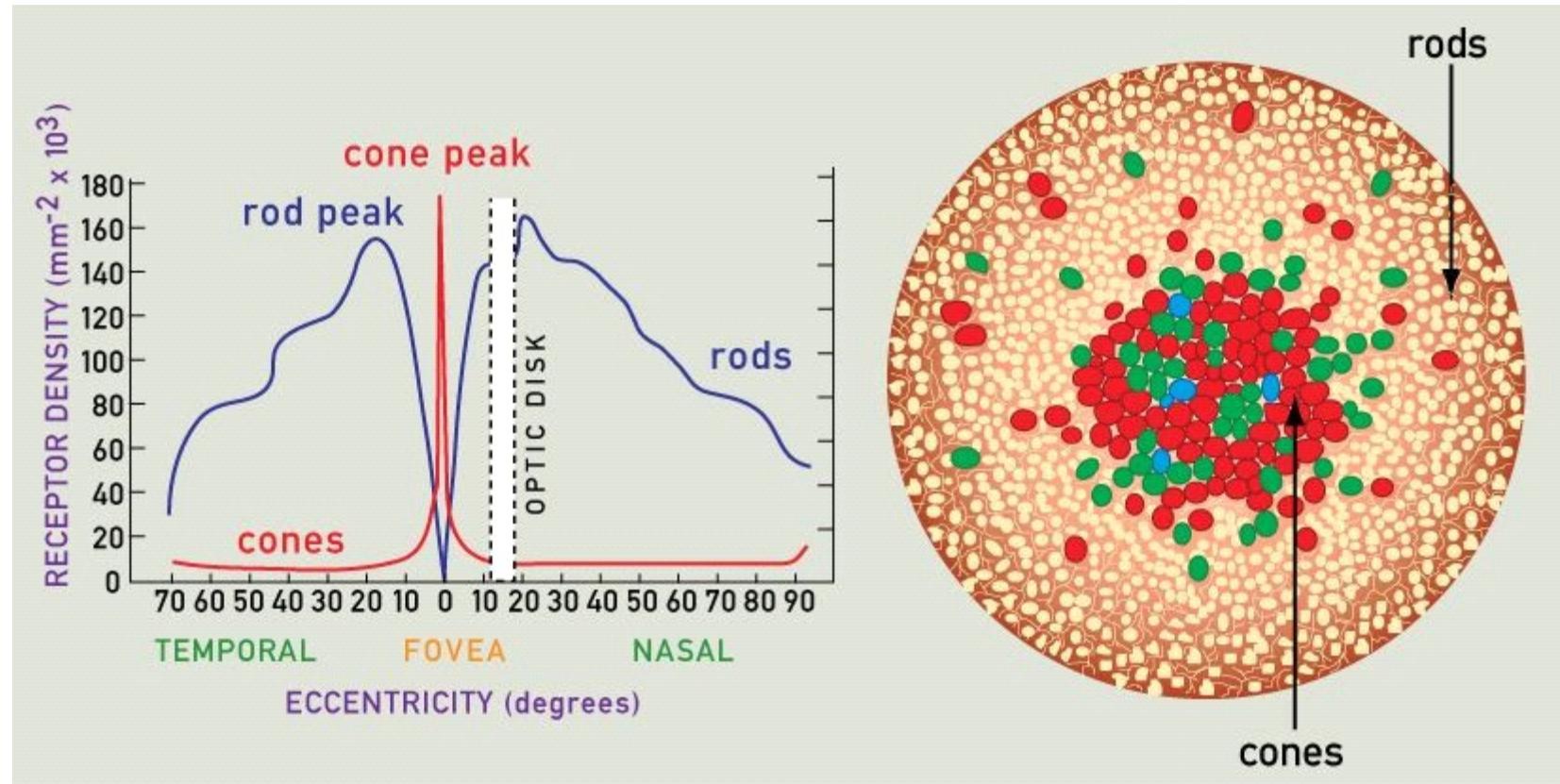
- Sensível a baixos níveis de iluminação
- Escotópica: baixa luminosidade
- 75 a 150 mio, ao longo da retina



Representação no sistema visual humano

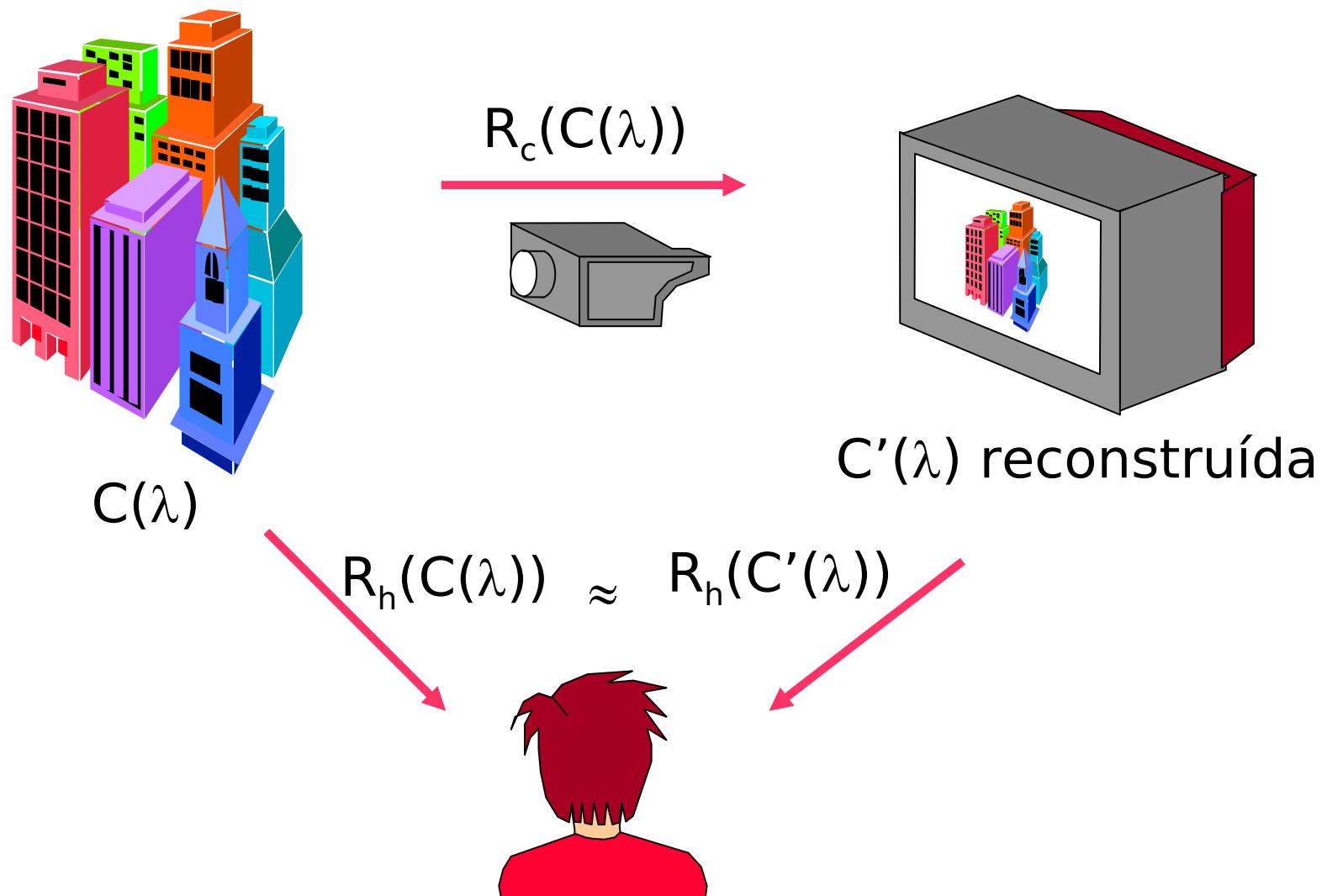


Representação no sistema visual humano



Densidade de cones na Fovea (150000/mm²): comparável com sensores artificiais.

Reconstrução perceptual



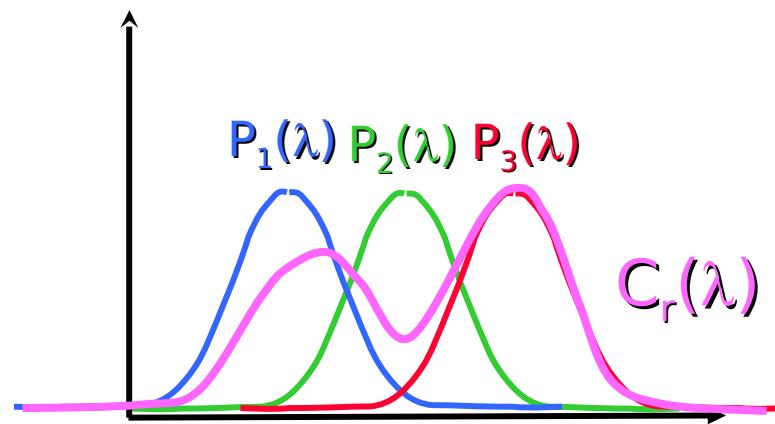
Representação de cores

Representação no espaço tricromático

- O sistema visual humano representa as cores do espaço espectral E em um espaço tricromático.
- Isto significa que três amostras (nas faixas correspondentes ao **vermelho**, **verde** e **azul**) são suficientes para os propósitos de reconstrução perceptual.

Sistemas emissores

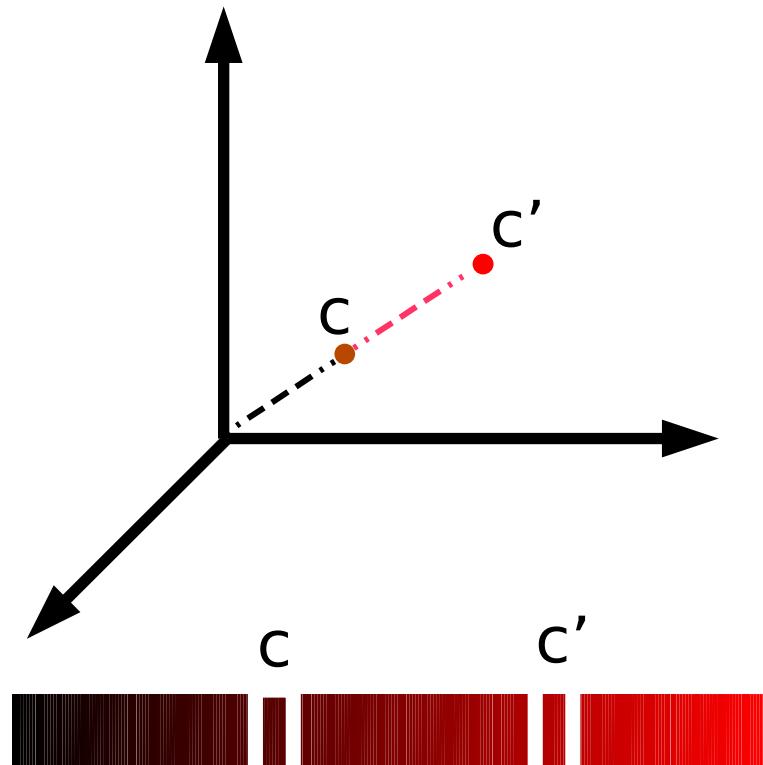
- Reconstruem cores.
- Possuem um conjunto de emissores P_k , $k=1\dots n$.
- Cada emissor está associado a uma cor primária com distribuição espectral $P_k(\lambda)$.
- O conjunto de cores que podem ser reconstruídas por um sistema emissor é denominado gamute.



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

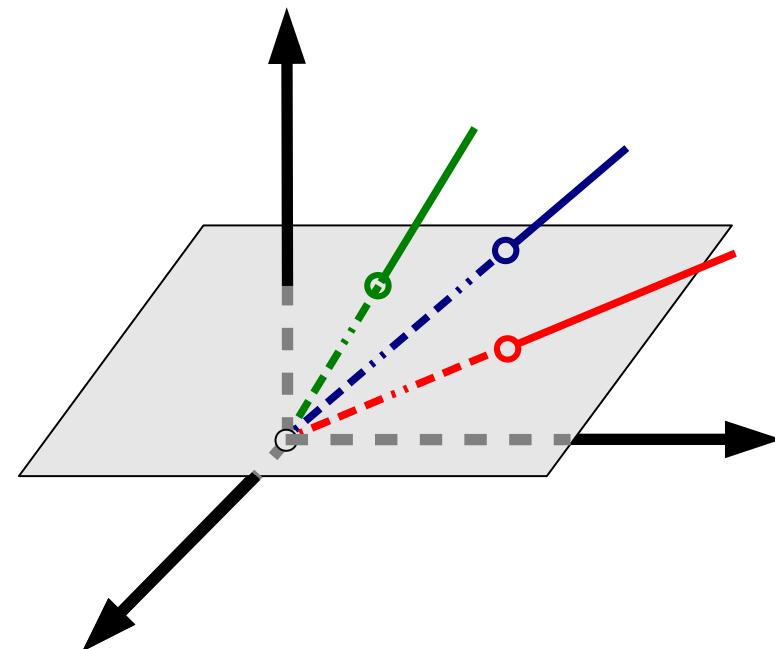
Geometria dos espaços de cores tricromáticos

- Variação da luminância

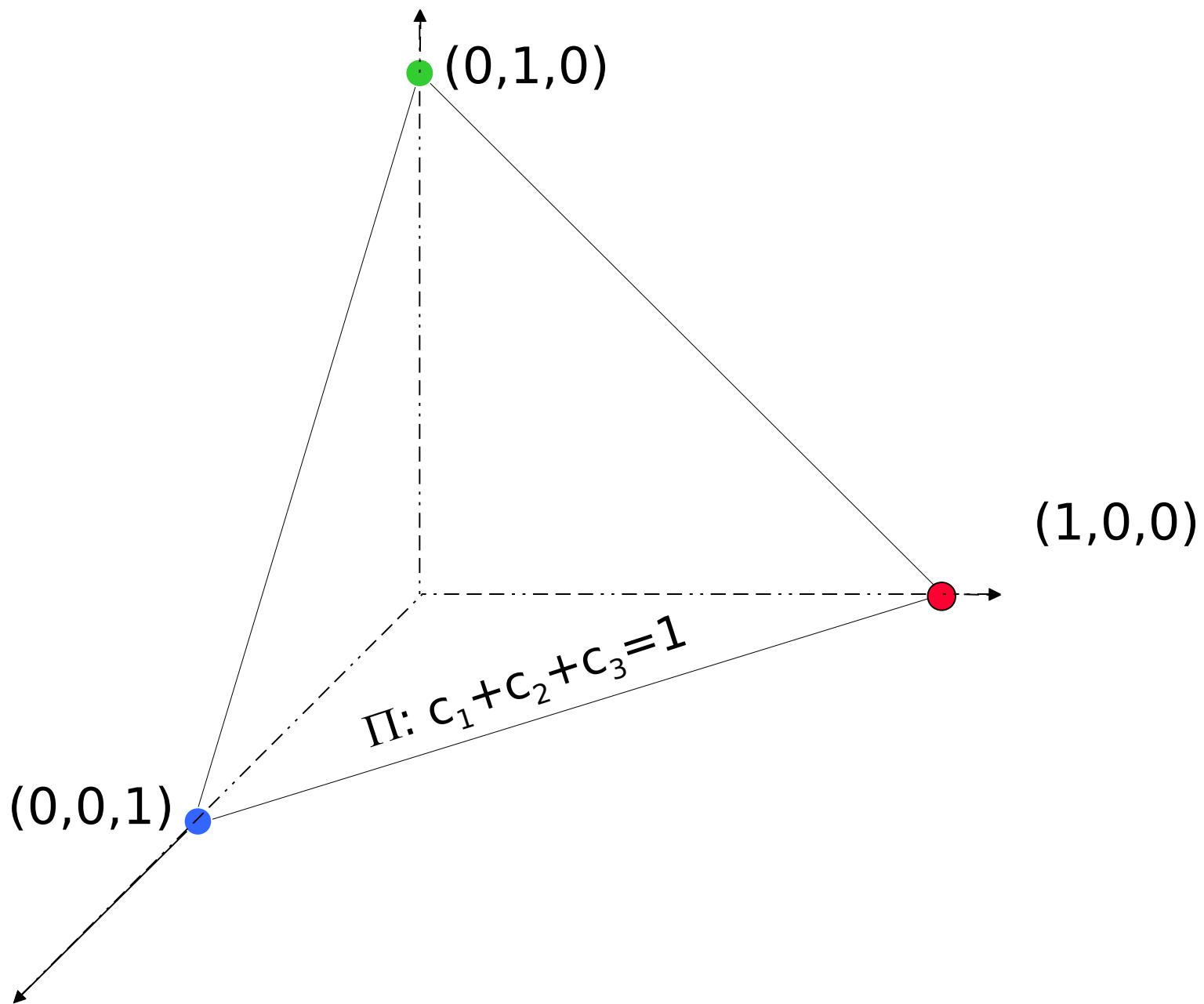


$$c' = t.c$$

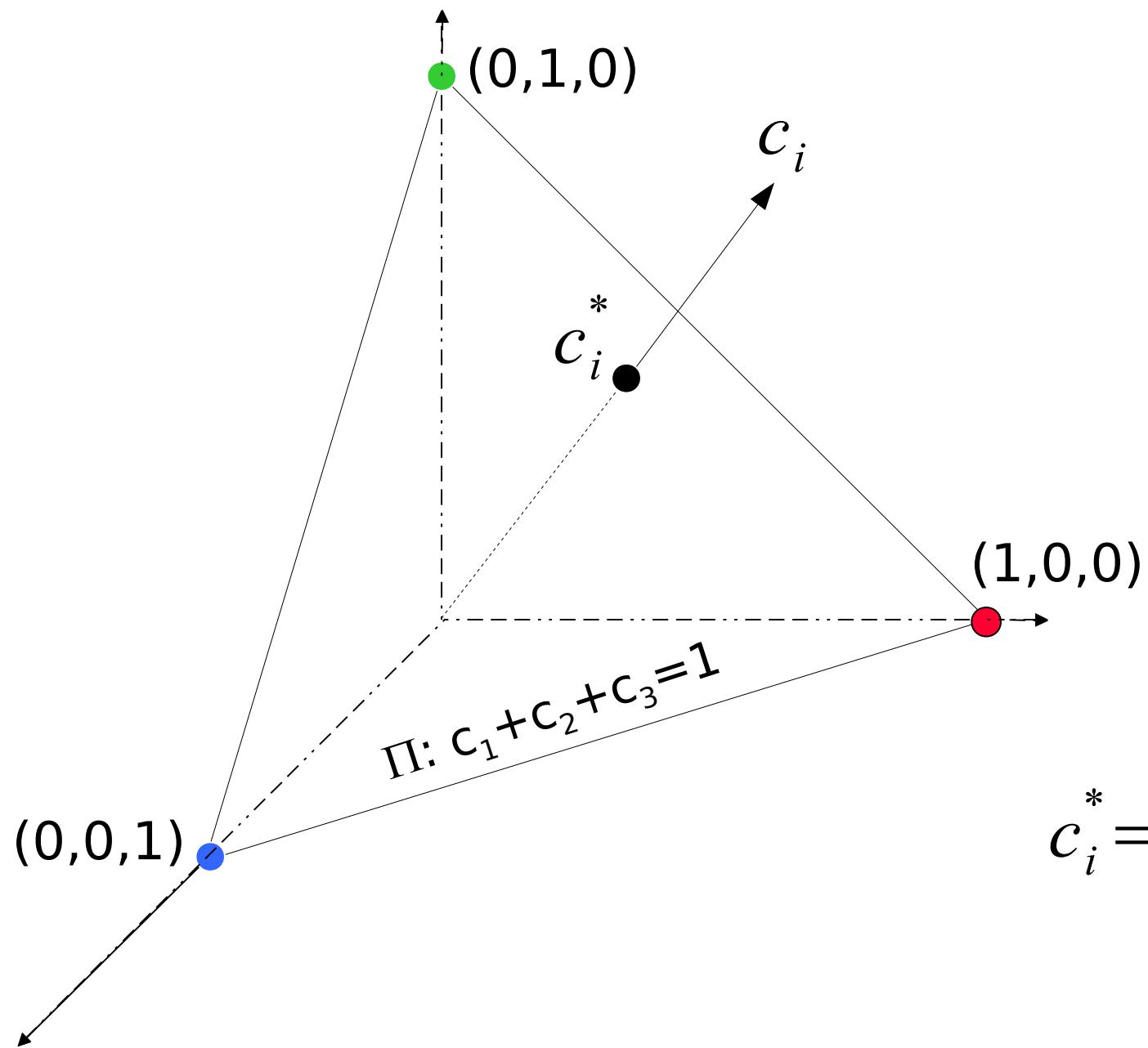
- Retas de croma



Triângulo de Maxwell



Coordenadas de cromaticidade



$$c_i^* = \frac{c_i}{c_1 + c_2 + c_3}$$

Sólidos de cor e diagrama de cromaticidade

- É um cone.
- É convexo.
- Cores espectrais (puras) estão na fronteira.

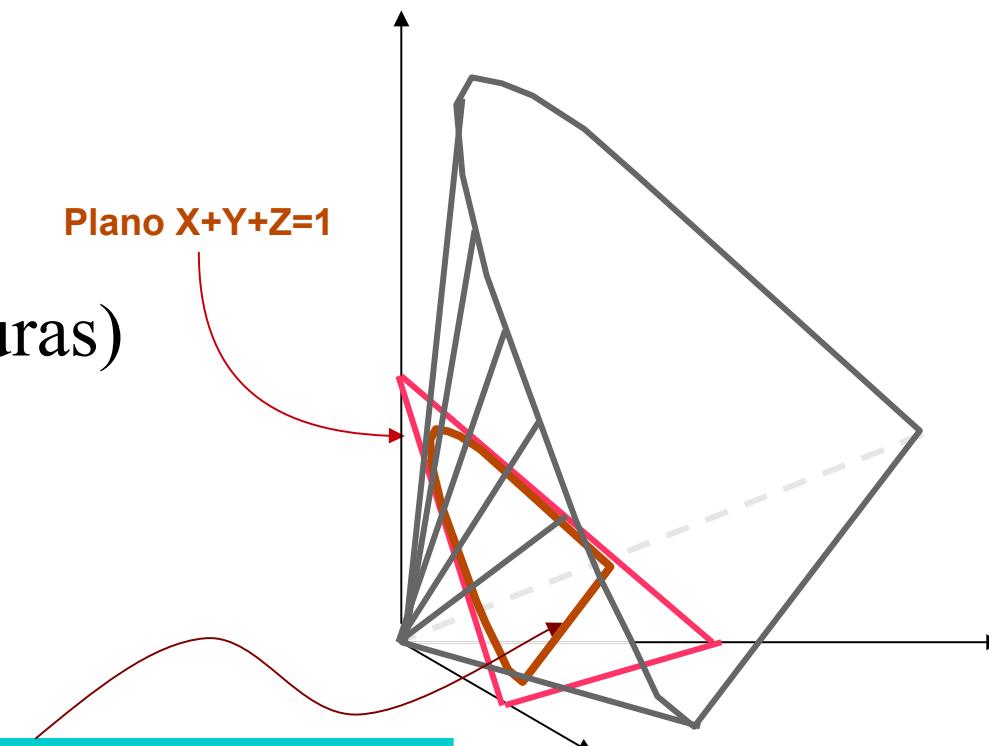
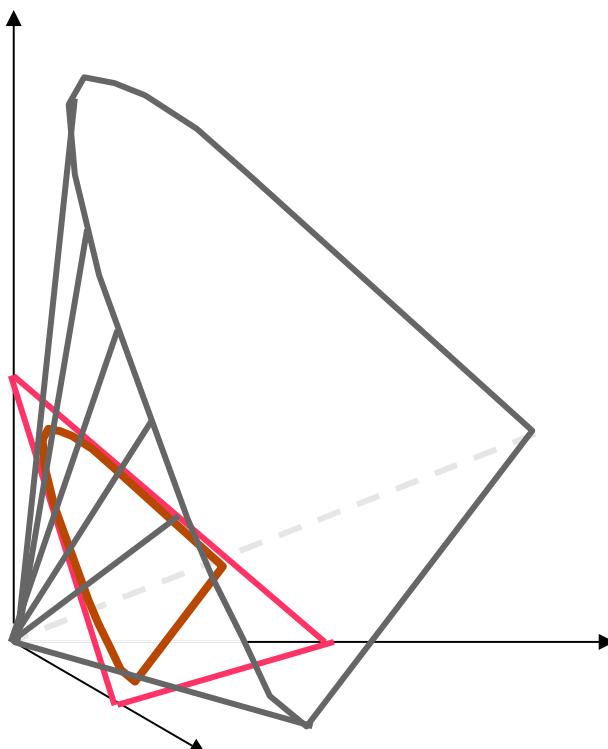


Diagrama de cromaticidade (projeção do sólido de cor sobre o Triângulo de Maxwell)

Sistemas de cor

- Sólido de cor + uma base = Sistema de cor



$$c = c_1 P_1(\lambda) + c_2 P_2(\lambda) + c_3 P_3(\lambda)$$

Sistemas do CIE

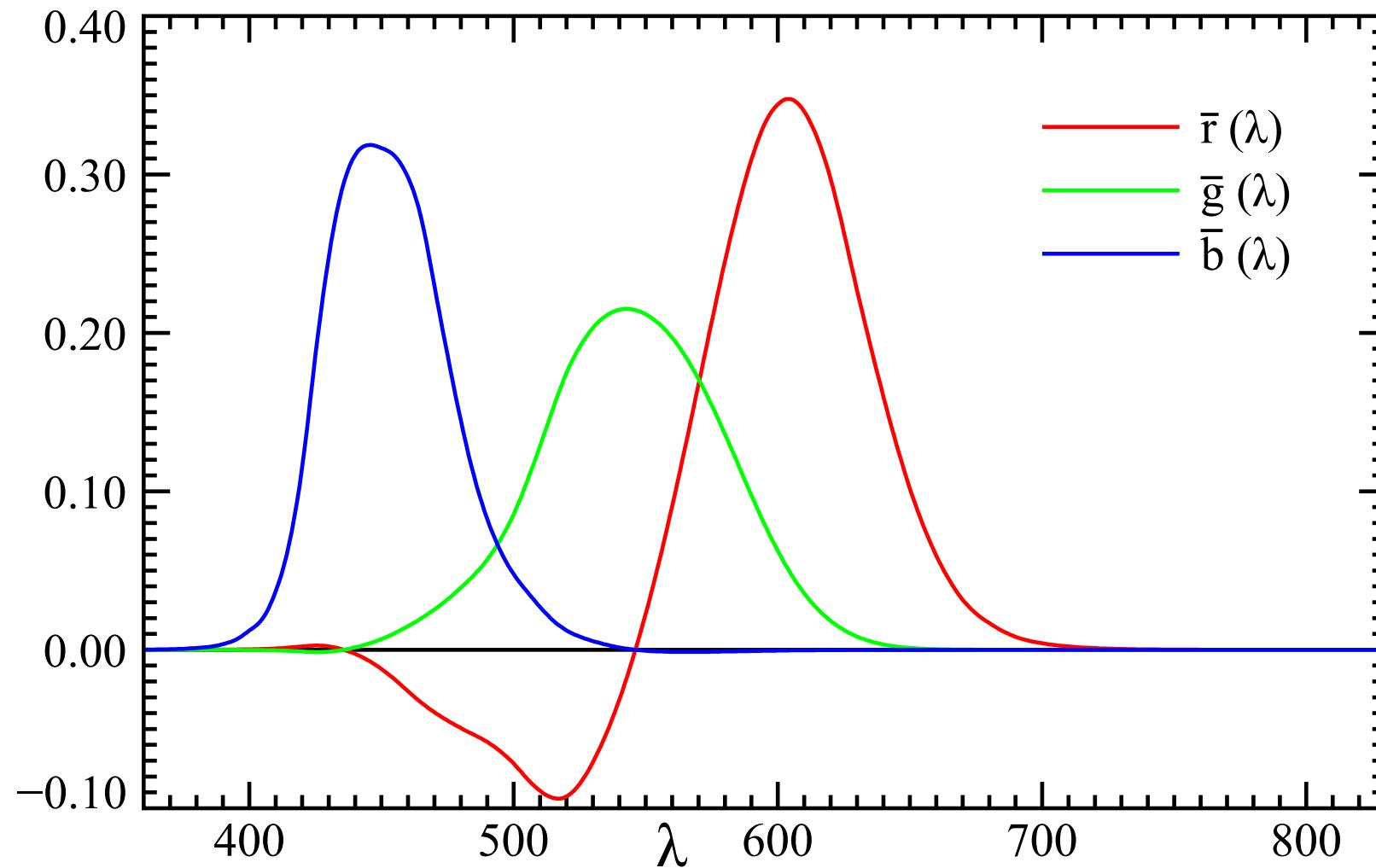
Sistemas de cor padrão

- Sistemas propostos para especificação de cor padronizada.
- Independentes de dispositivos físicos.
- Sistemas propostos pela CIE
(Comission Internationale de l'Eclairage)
 - Sistema CIE-RGB
 - Sistema CIE-XYZ

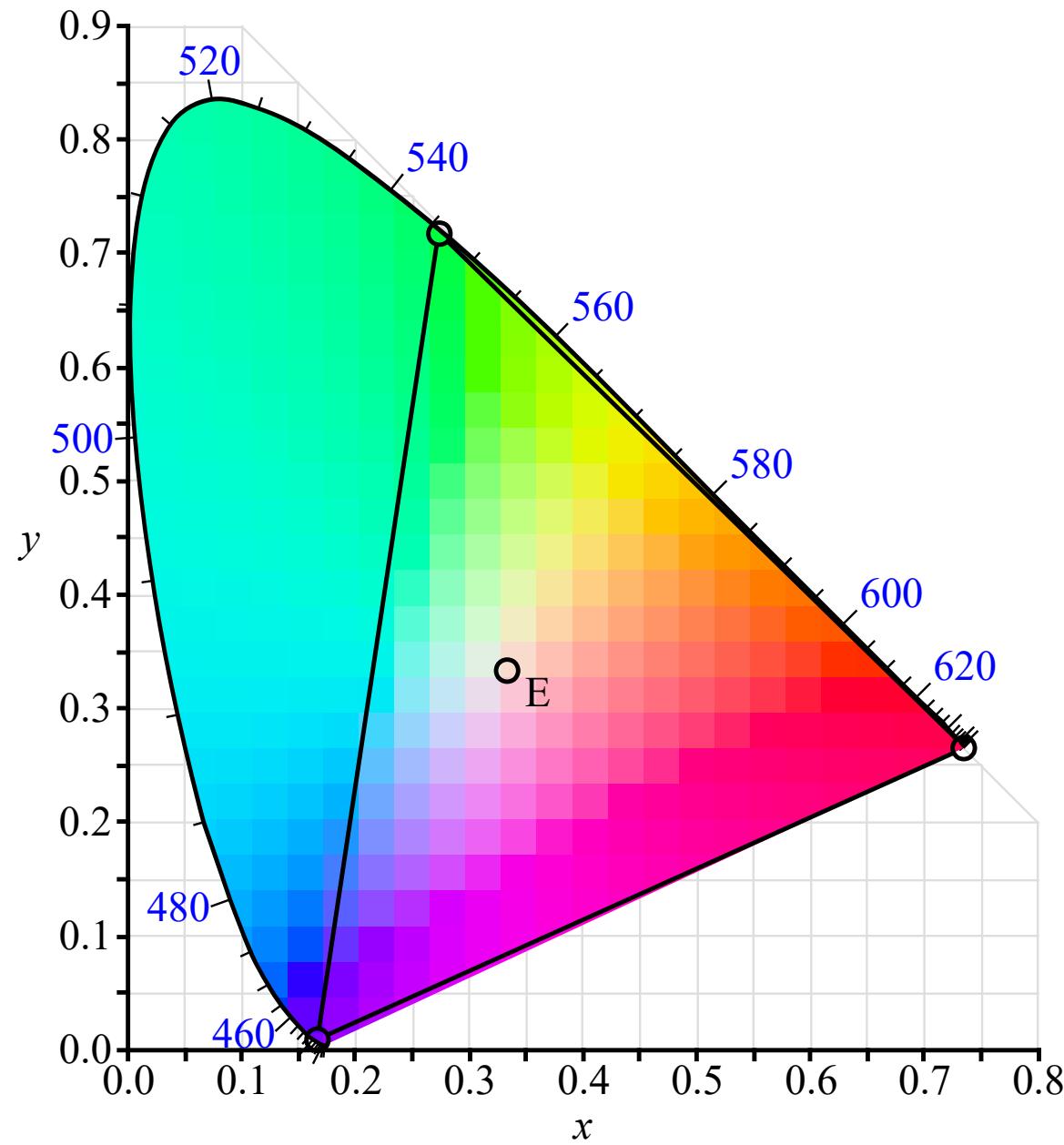
Sistema CIE-RGB

- Primeiro sistema padrão proposto.
- Utiliza uma representação de cor no espaço tricromático
- Base de primárias do sistema:
 - $R(\lambda)$ vermelho com comprimento de onda de 700 nm
 - $G(\lambda)$ verde com comprimento de onda de 546 nm
 - $B(\lambda)$ azul com comprimento de onda de 435.8 nm

Funções de reconstrução de cor (Sistema CIE-RGB)



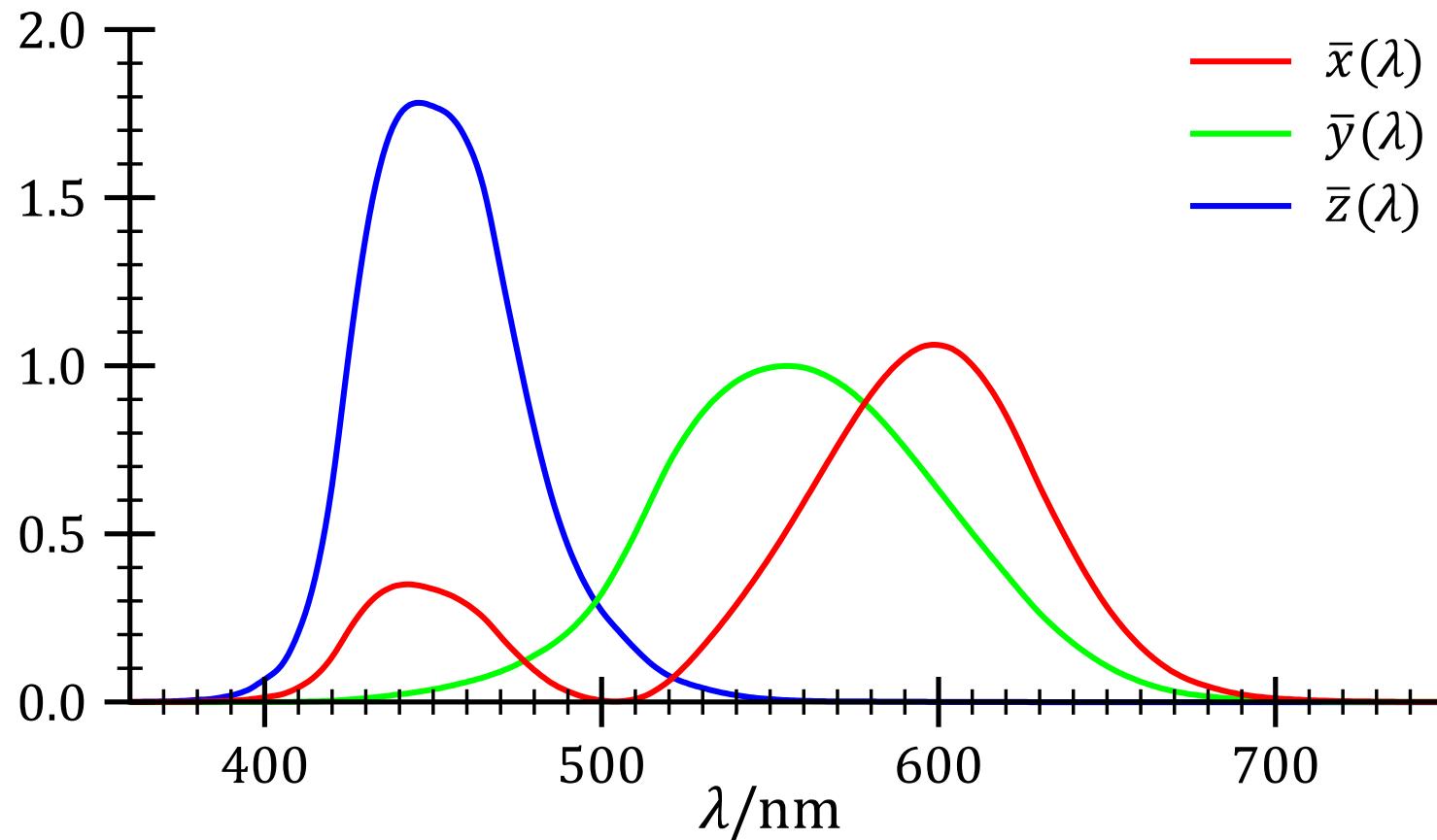
Sistema CIE-RGB



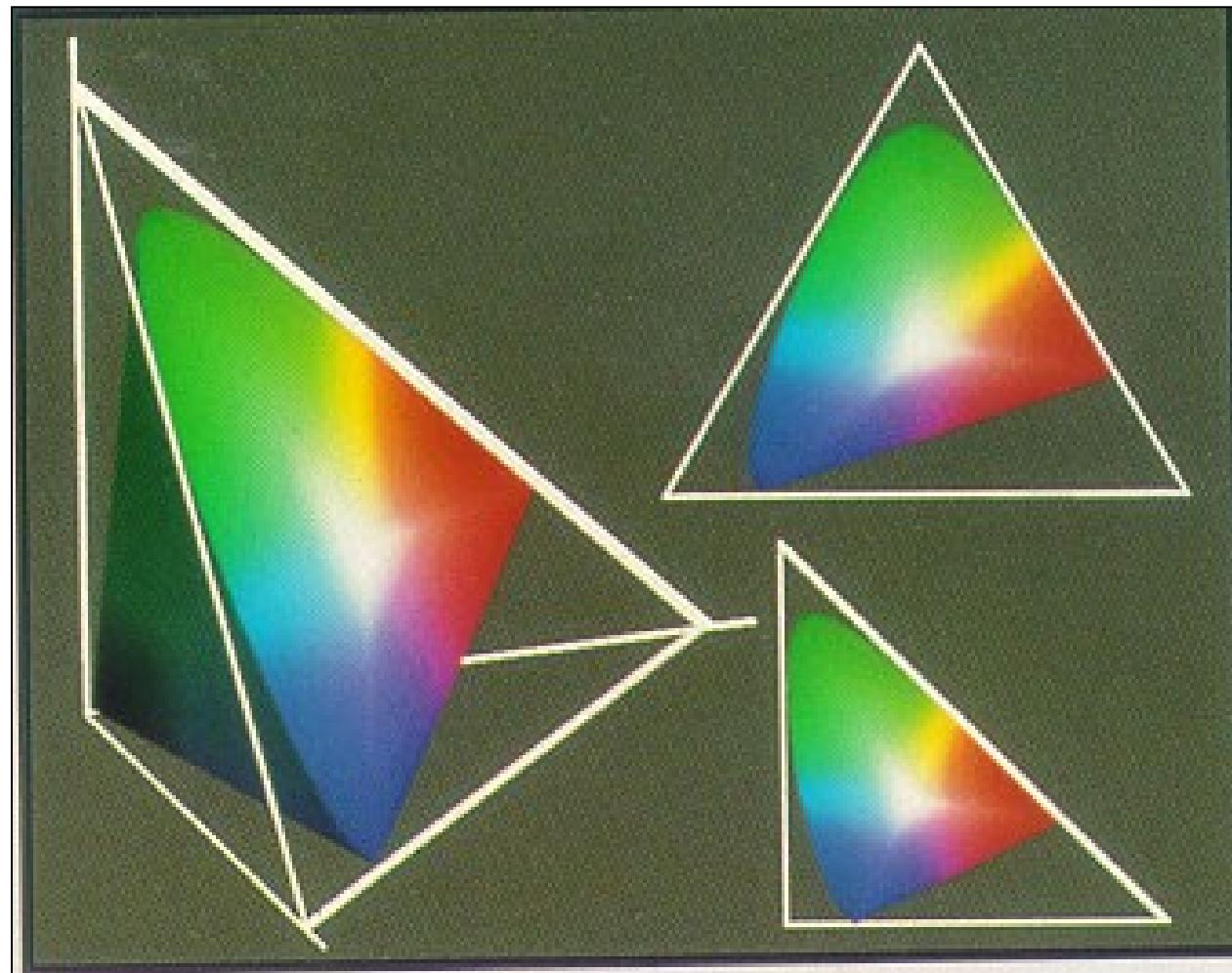
Sistema CIE-XYZ

- Sistema proposto capaz de reconstruir todas as cores visíveis.
- A base de primárias $\{X,Y,Z\}$ é formada por cores não visíveis que estão fora do sólido de cor.
- Deste modo todas as cores visíveis possuem coordenadas positivas.

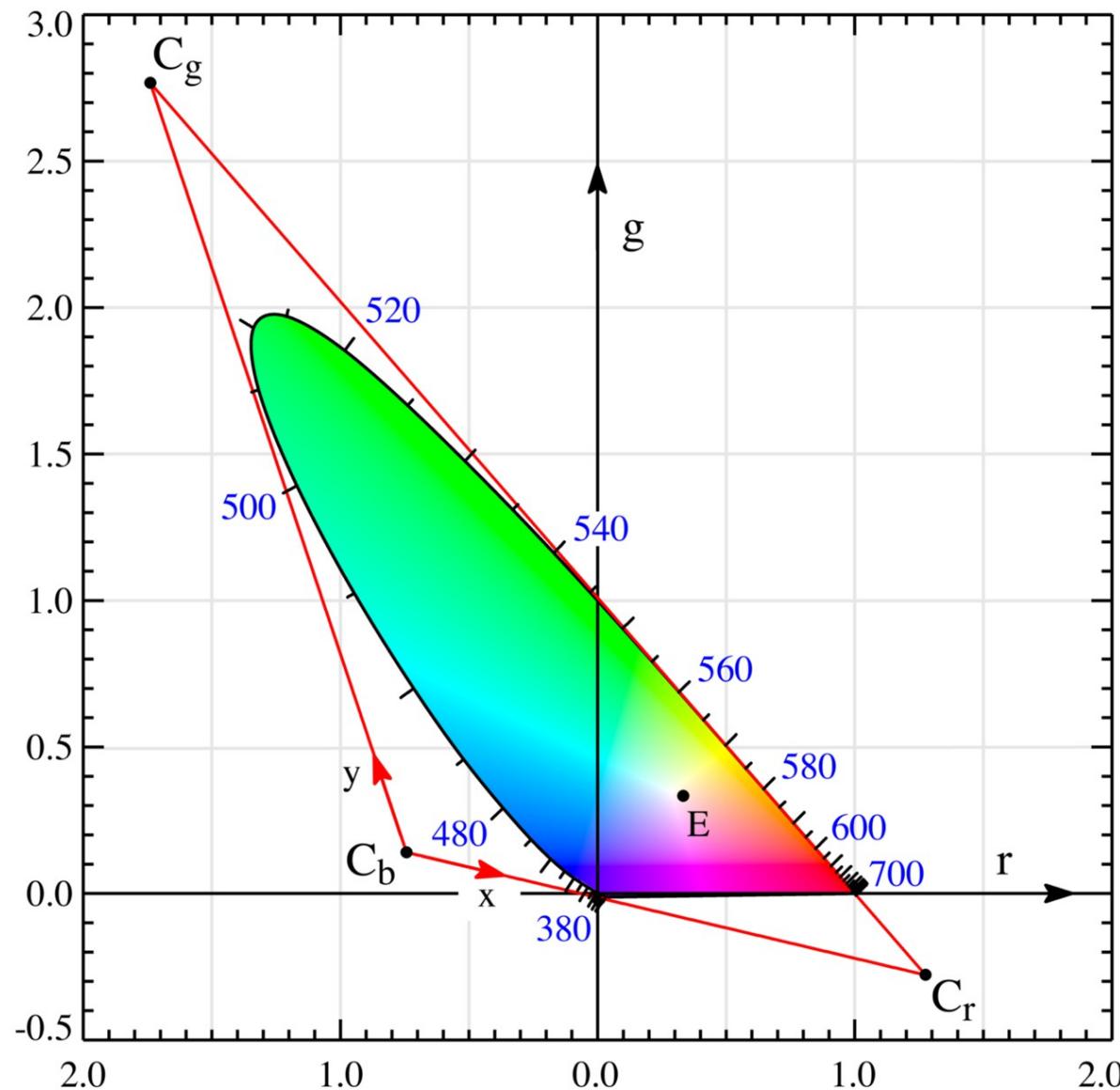
Funções de Reconstrução de Cor CIE-XYZ



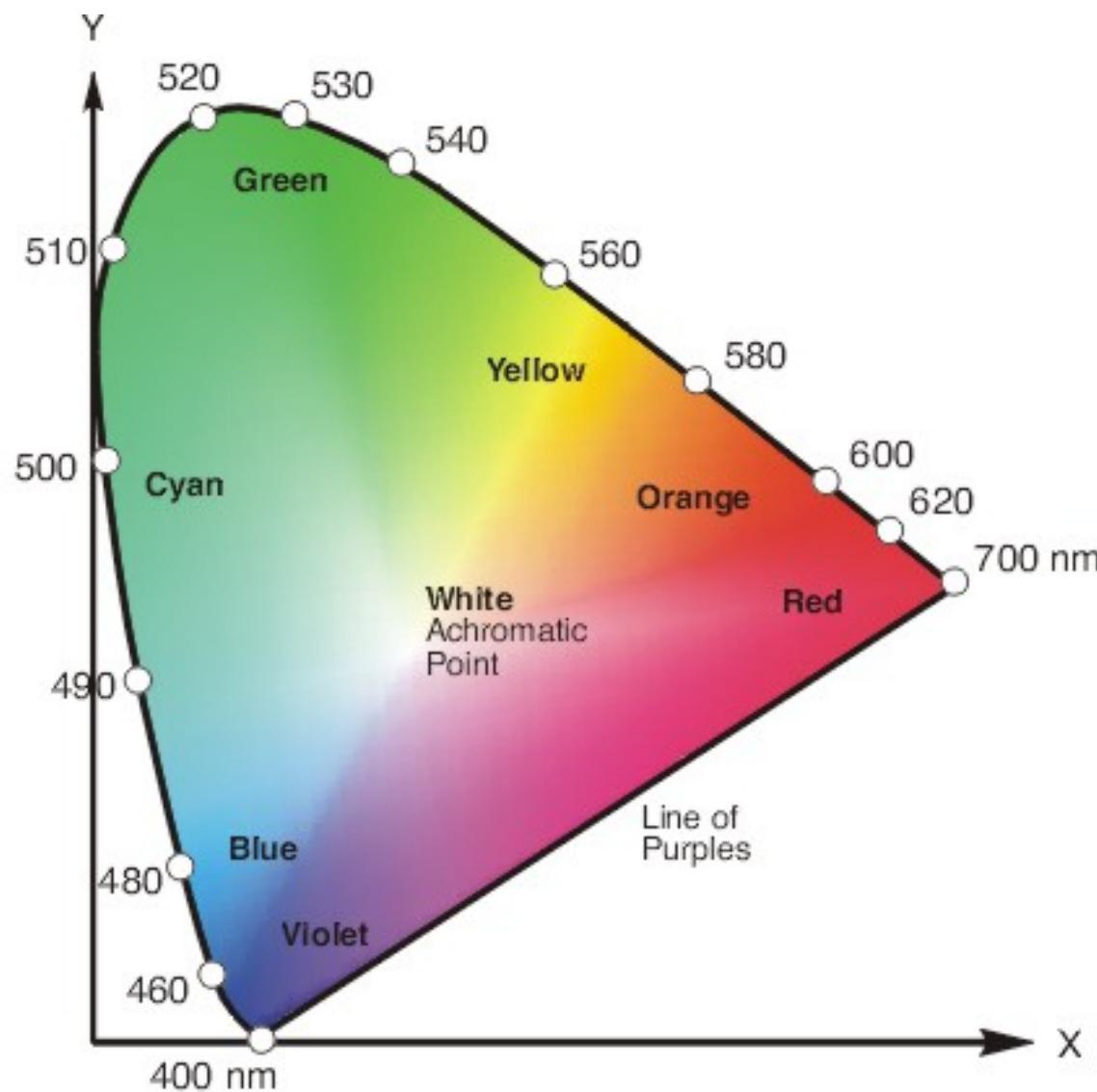
Sistema CIE-XYZ



Sistema CIE-RGB

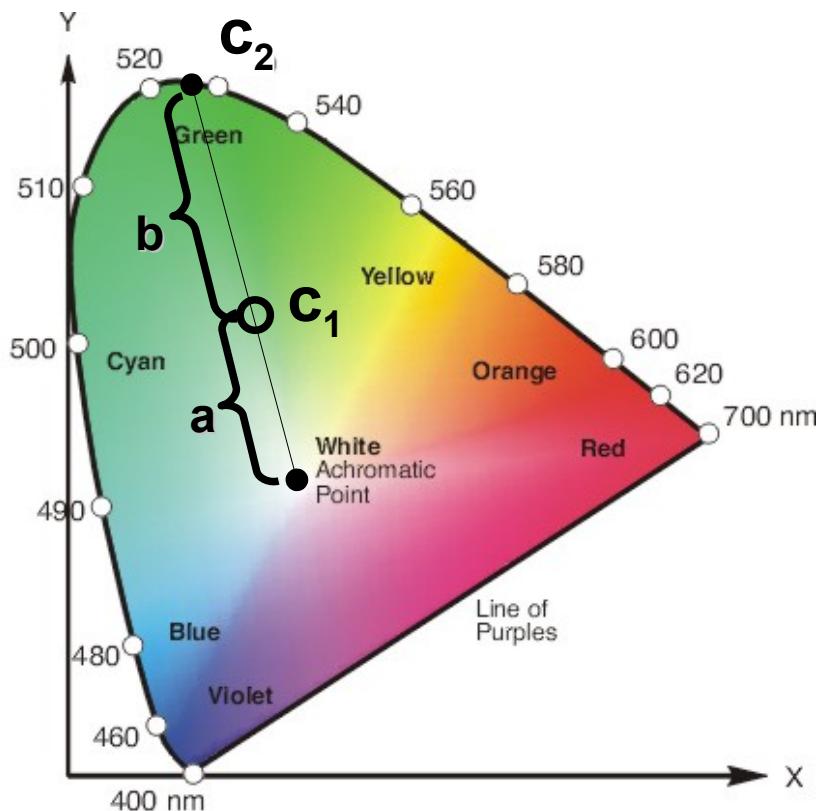


Sistema CIE-XYZ



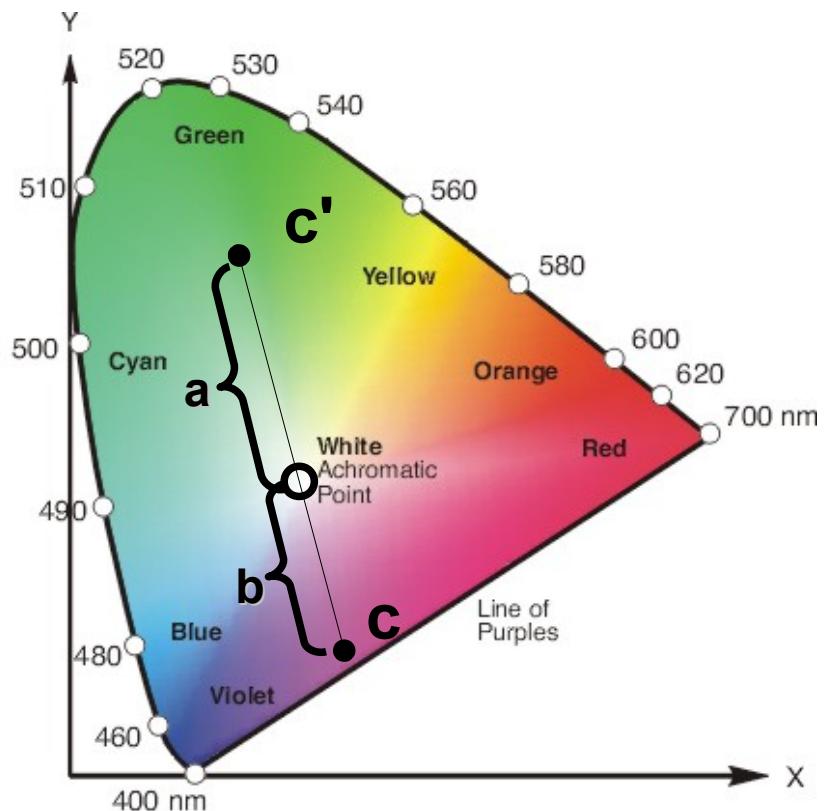
Conceitos de Cores no CIE-XYZ

- Saturação



$$\text{Saturação}(c_1) = \frac{a}{a+b}$$

- Complementaridade

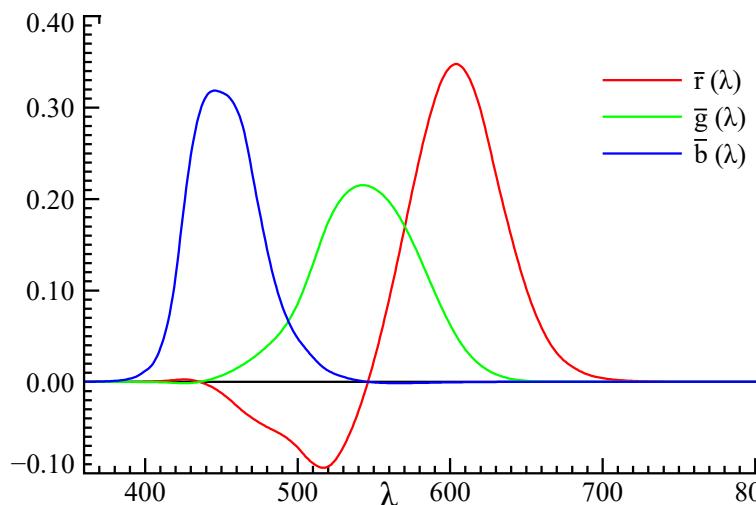
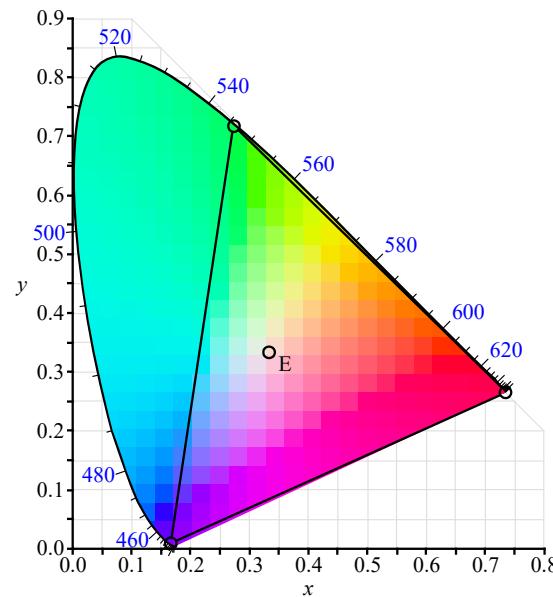


$$\frac{a}{a+b} \cdot c + \frac{b}{a+b} \cdot c' = \text{Branco}$$

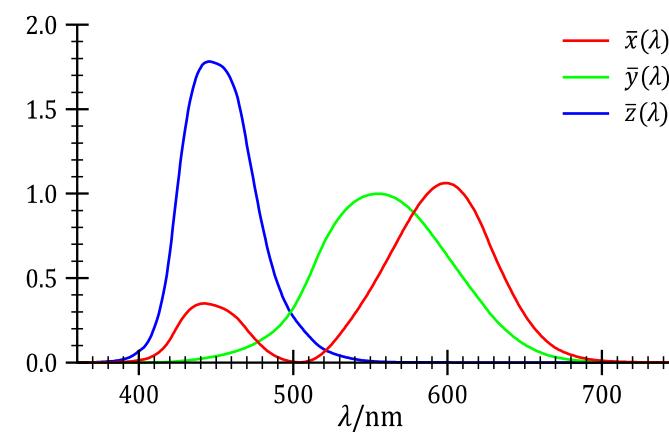
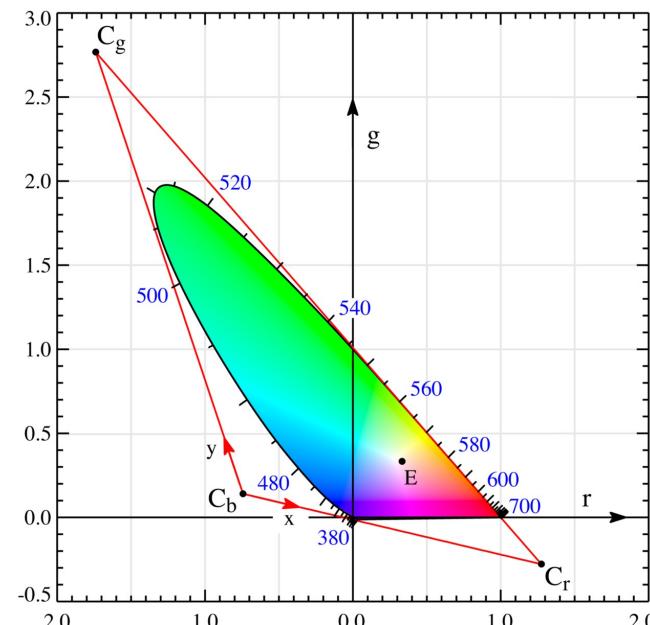
$$\alpha \cdot c + \beta \cdot c' = \text{Branco}$$

Comparação CIE-RGB e CIE-XYZ

- CIE-RGB



- CIE-XYZ



Conversão entre os sistemas CIE-RGB e CIE-XYZ

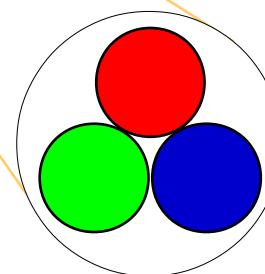
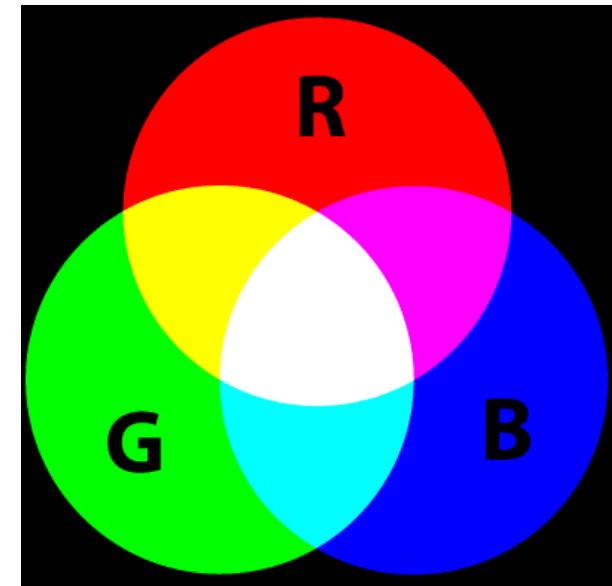
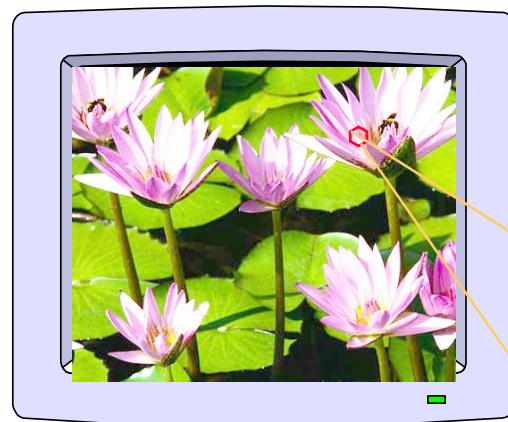
- É feita através de mudanças de coordenadas (determinada por uma mudança de base).
- A mudança entre as bases é determinada por uma transformação linear.

$$\begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.49 & 0.31 & 0.20 \\ 0.17 & 0.81 & 0.01 \\ 0.00 & 0.01 & 0.99 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix}$$

Sistemas dos dispositivos

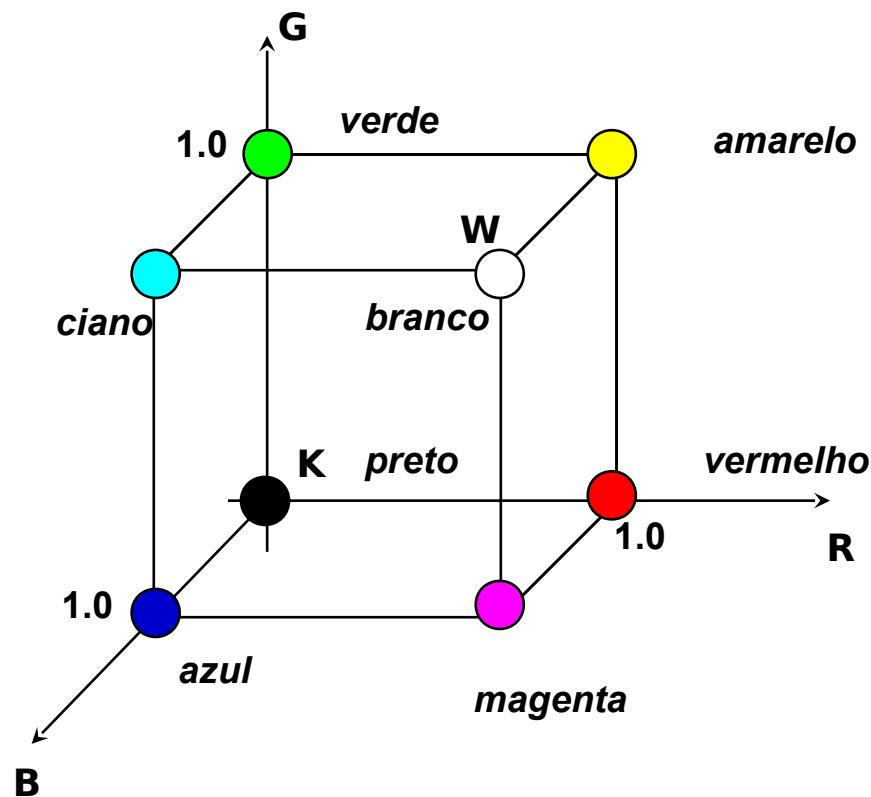
Sistema dos monitores - mRGB

Processo Aditivo

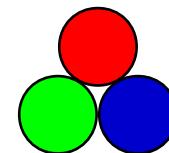


pixel

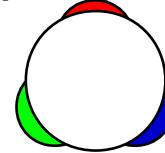
Sistema dos monitores - mRGB



processo aditivo



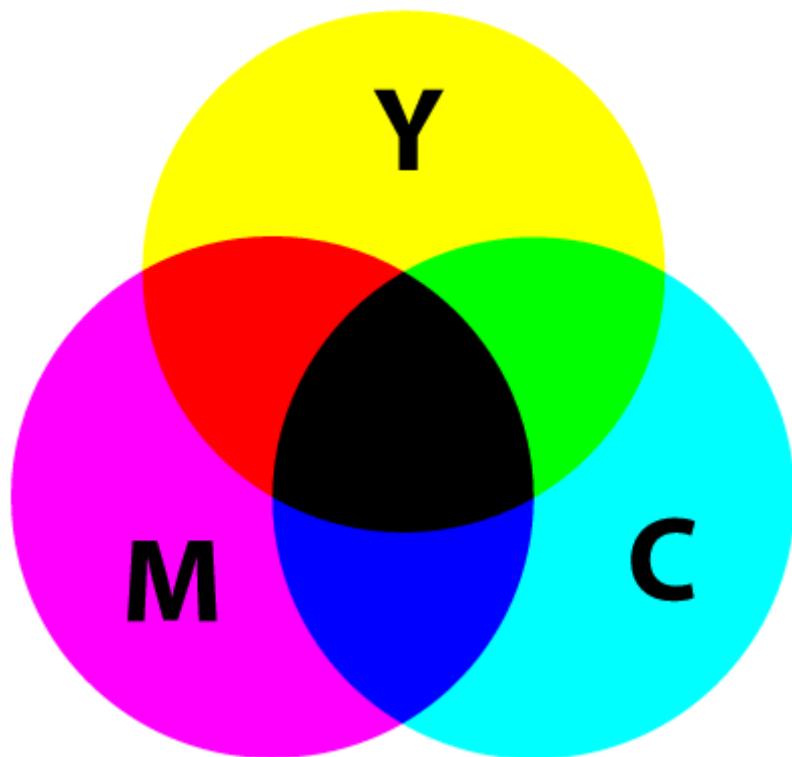
Reconstrução perceptual



É comum termos 1 byte para cada componente mapeando [0, 255] em [0,1]

Sistema das impressoras CMY

Processo Subtrativo



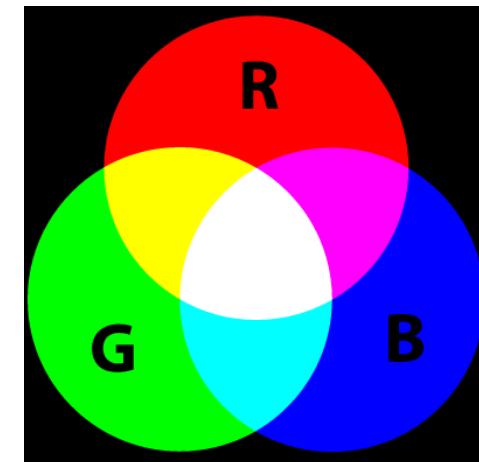
Conversões entre sistemas

- **RGB para CMY**

Ciano = 1 - Vermelho

Magenta = 1 - Verde

Amarelo = 1 - Azul

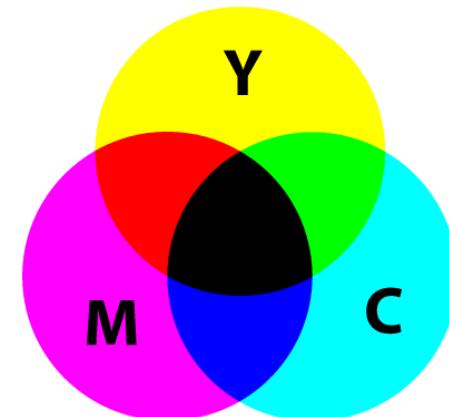


- **CMY para RGB**

Vermelho = 1 - Ciano

Verde = 1 - Magenta

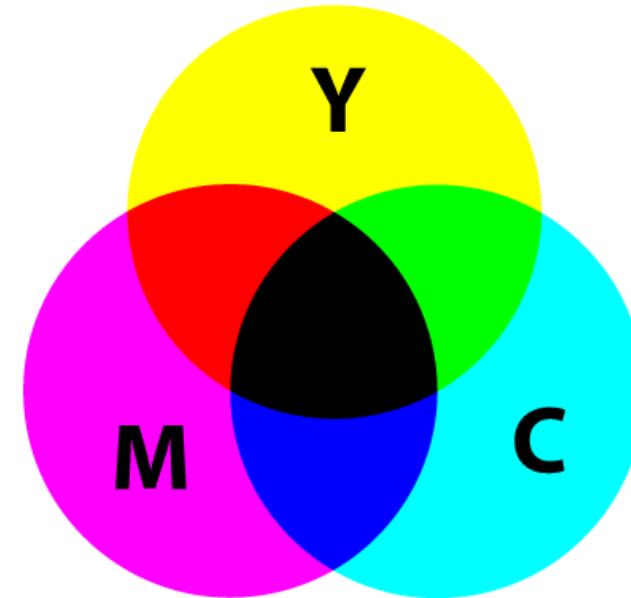
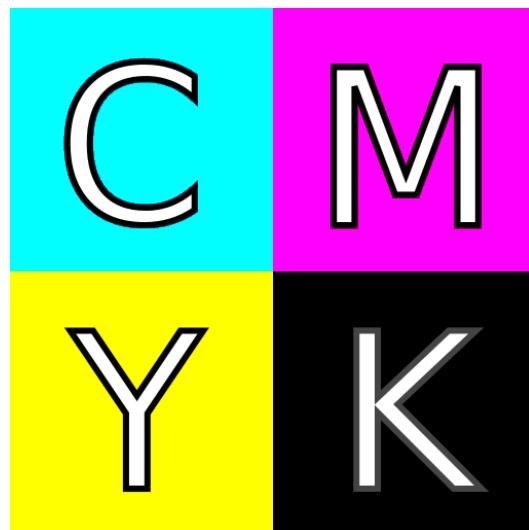
Azul = 1 - Amarelo



Sistema das impressoras CMYK

Processo Subtrativo

Para usar menos tinta, e produzir tons pretos mais profundos: cores não saturadas e escuras são produzidas usando de tinta preta em vez da combinação de ciano, magenta e amarelo.



Sistema das impressoras CMYK



K

C

M

Y



Conversões entre sistemas

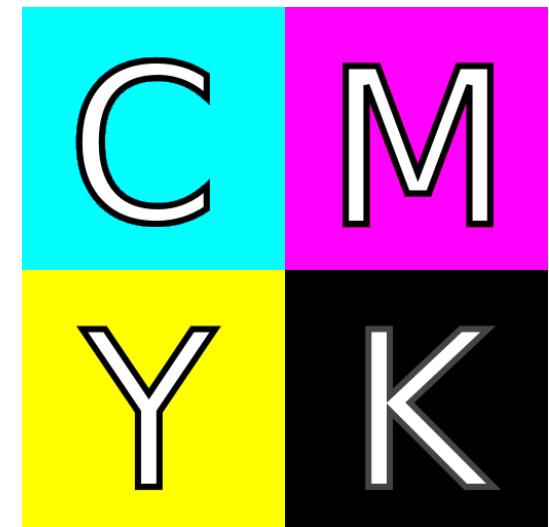
- **CMY para CMYK**

Preto = mínimo(Ciano, Magenta, Amarelo)

Ciano = $(\text{Ciano}-\text{Preto})/(1-\text{Preto})$

Magenta = $(\text{Magenta}-\text{Preto})/(1-\text{Preto})$

Amarelo = $(\text{Amarelo}-\text{Preto})/(1-\text{Preto})$

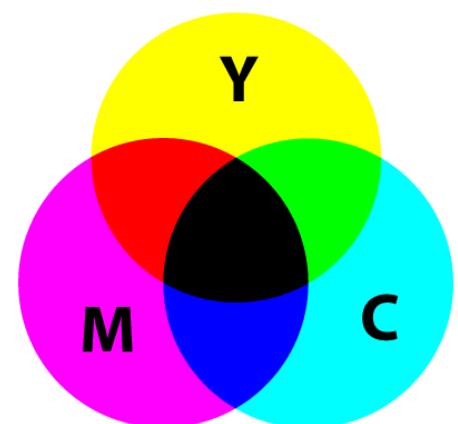


- **CMYK para CMY**

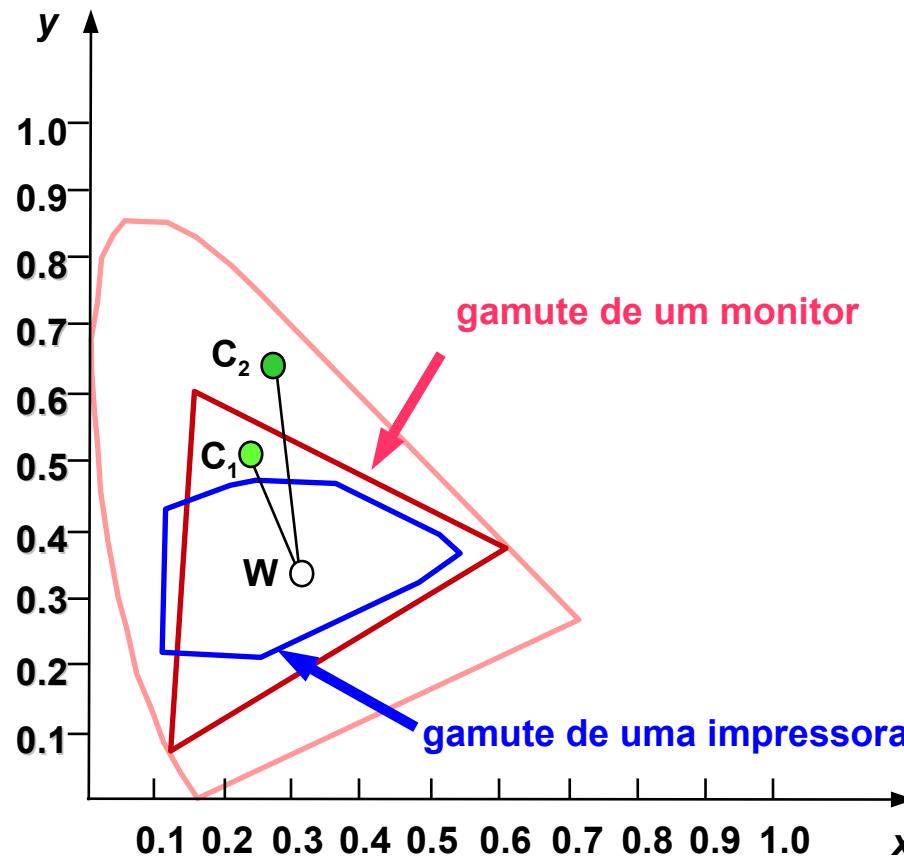
Ciano = $\min(1, \text{Ciano} \times (1-\text{Preto}) + \text{Preto})$

Magenta = $\min(1, \text{Magenta} \times (1-\text{Preto}) + \text{Preto})$

Amarelo = $\min(1, \text{Amarelo} \times (1-\text{Preto}) + \text{Preto})$



Gamute no diagrama de cromaticidade dos dispositivos



Sistemas de interface

Sistemas de interface

- Permitem uma especificação intuitiva de cores.
- São baseados em uma decomposição crominância-luminância.
- Utilizam o seguinte esquema:
 - Escolha da crominância.
 - Escolha da luminância (brilho).

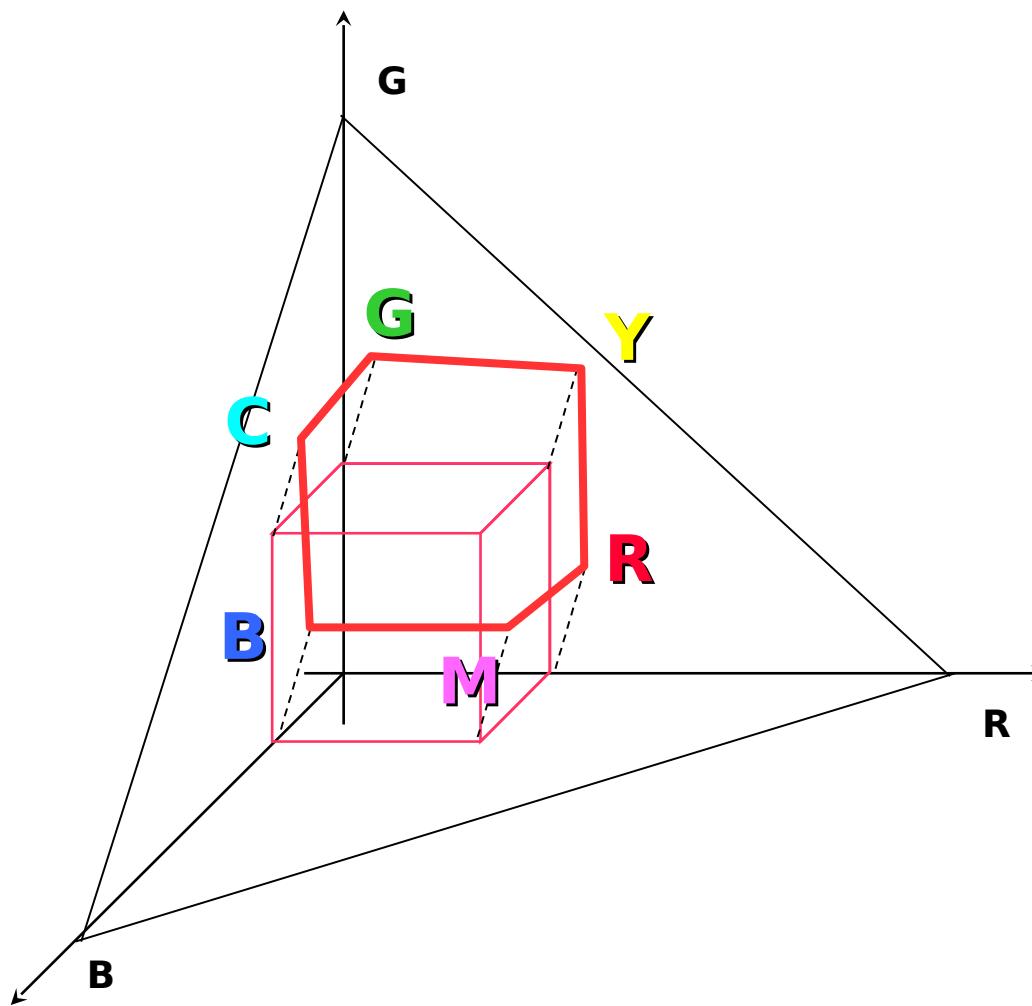
Sistemas de interface

- Escolha da crominância:
 - Escolha de um ponto no espaço de croma (bidimensional).
 - Primeiro o usuário escolhe a matiz.
 - Depois o usuário escolhe a saturação.

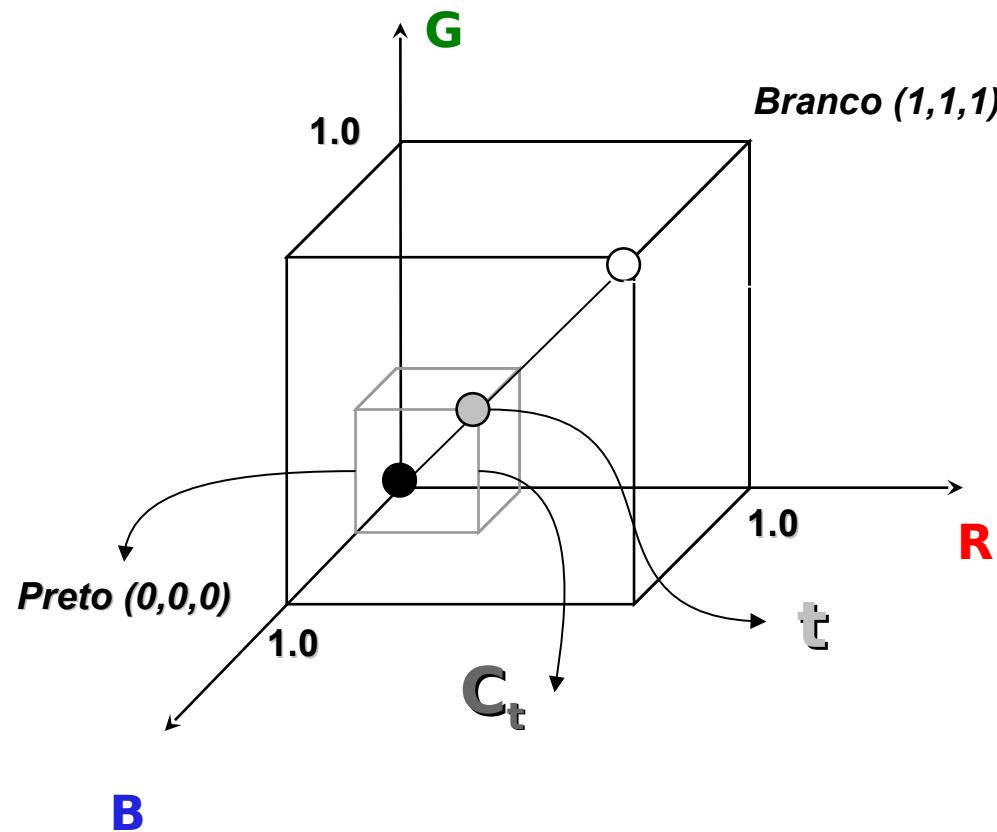
Sistema HSV

- Sistema criado para a especificação de cores em monitores.
- Introduz um sistema de coordenadas segundo o esquema luminância-crominância no sistema mRGB.
- Descreve uma cor através de 3 parâmetros:
 - Hue(matiz)
 - Saturation(saturação)
 - Value(valor), uma medida de brilho igual a $\max\{r,g,b\}$.

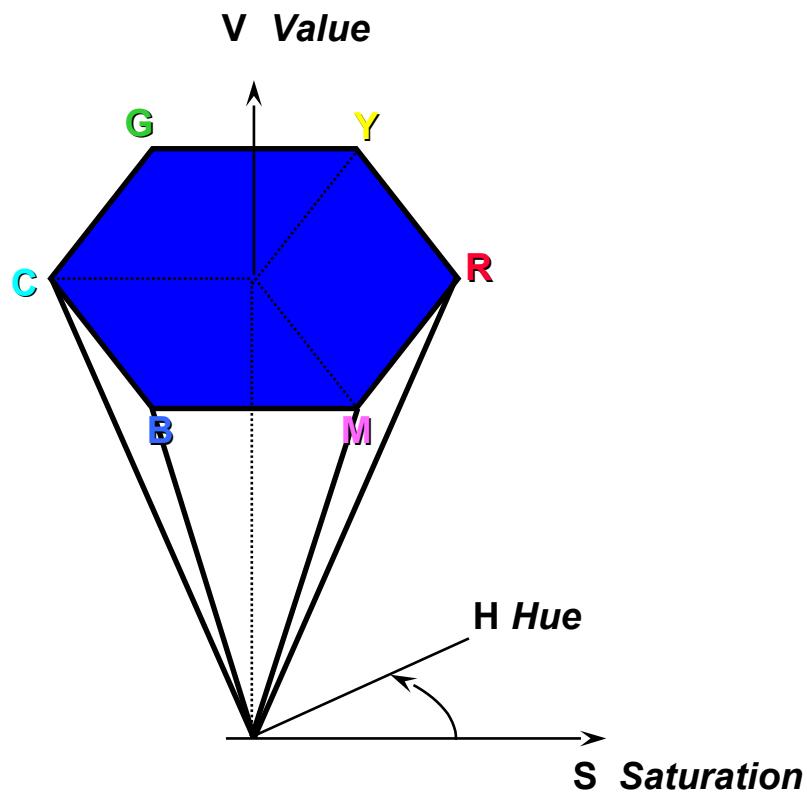
Sistema HSV



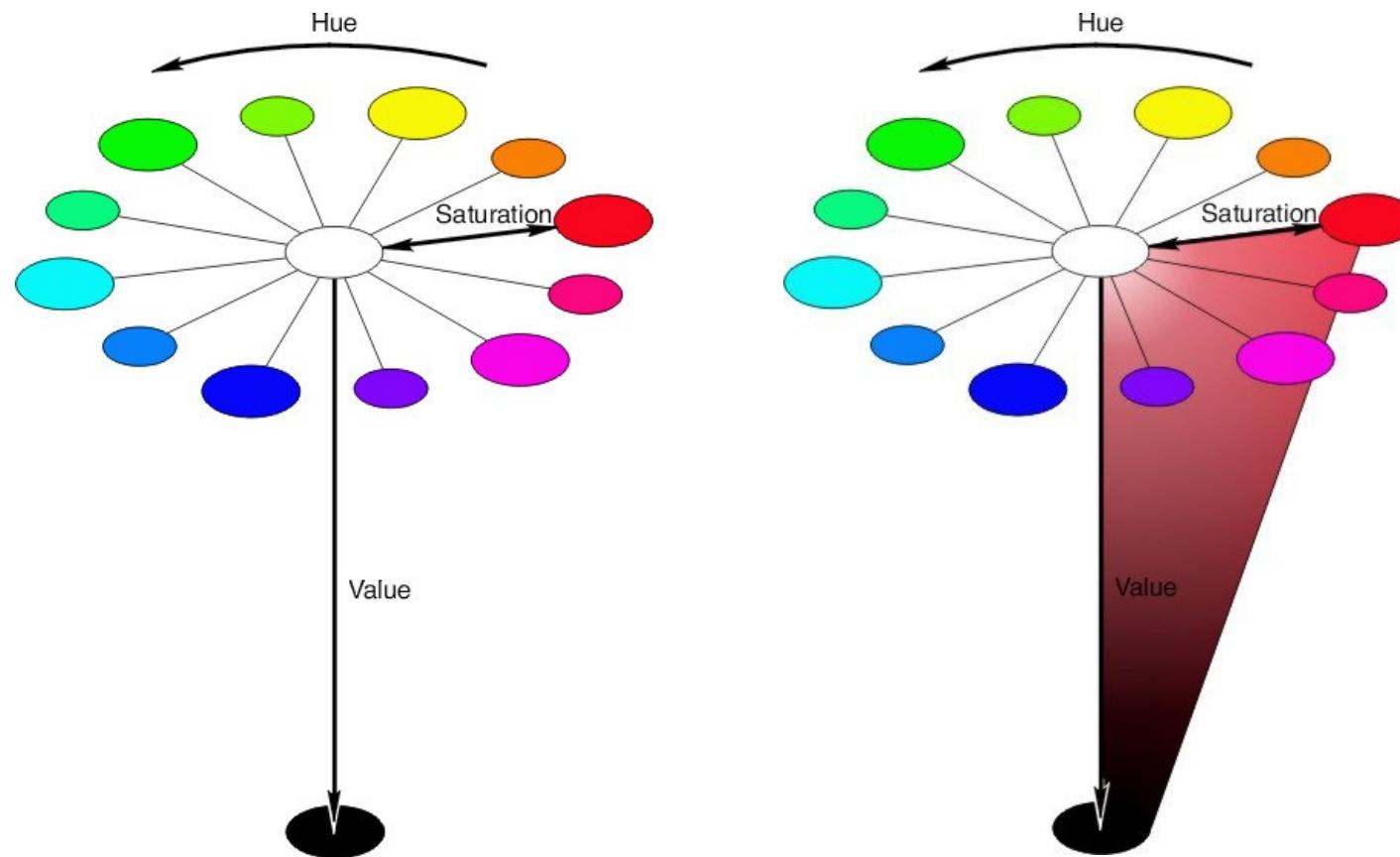
Sistema HSV



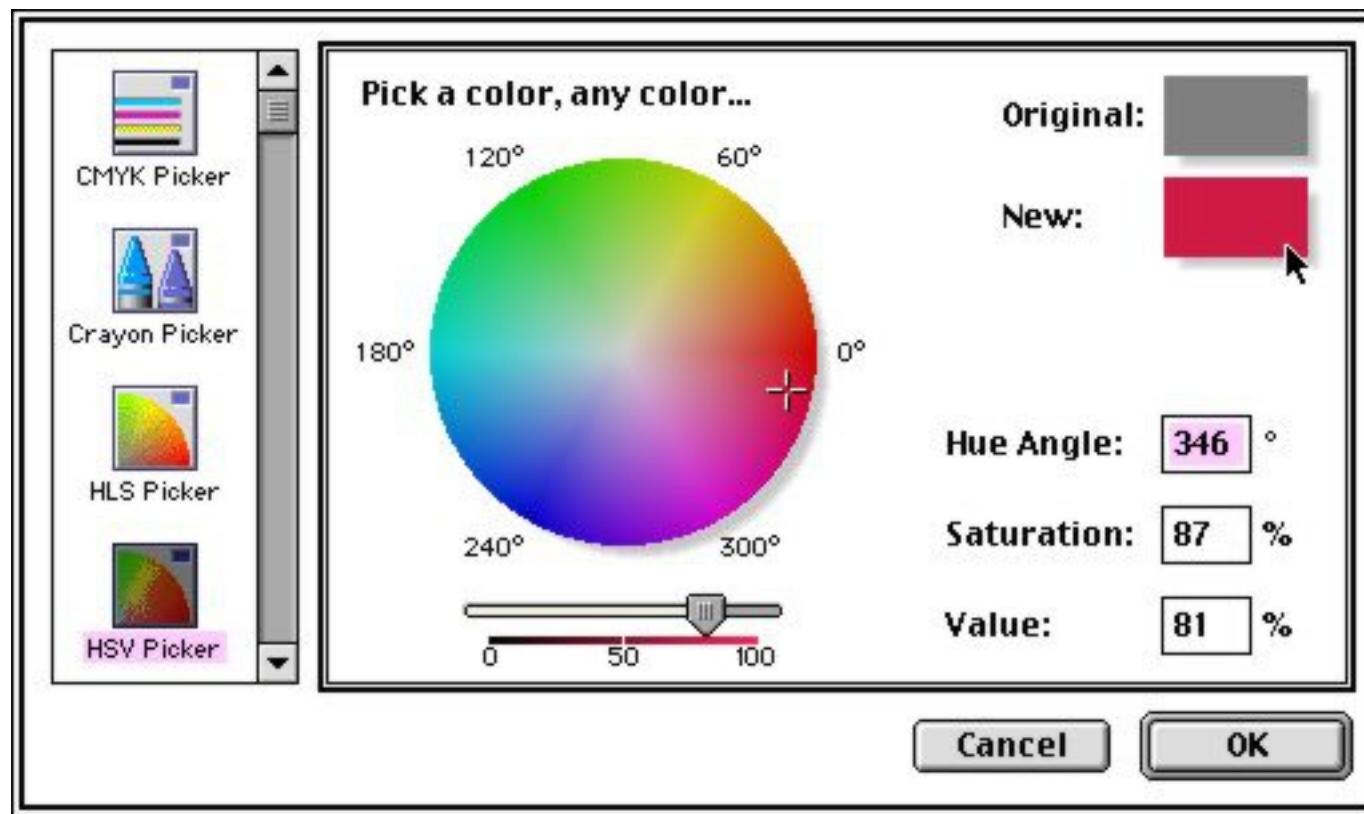
Sistema HSV



Sistema HSV



Sistema HSV



Manipulação de cores em imagens digitais

- Operações que alteram o conjunto de cores (gamute) presente na imagem.
- Operações devem ser feitas sobre cada uma das três bandas/canais/planos de cor da imagem.
- Operações mais comuns: operações pontuais; manipulação de histograma; filtragem/convolução.
- Corriqueiramente, operações são chamadas indistintamente de “filtros”.

Manipulação de cores em imagens digitais



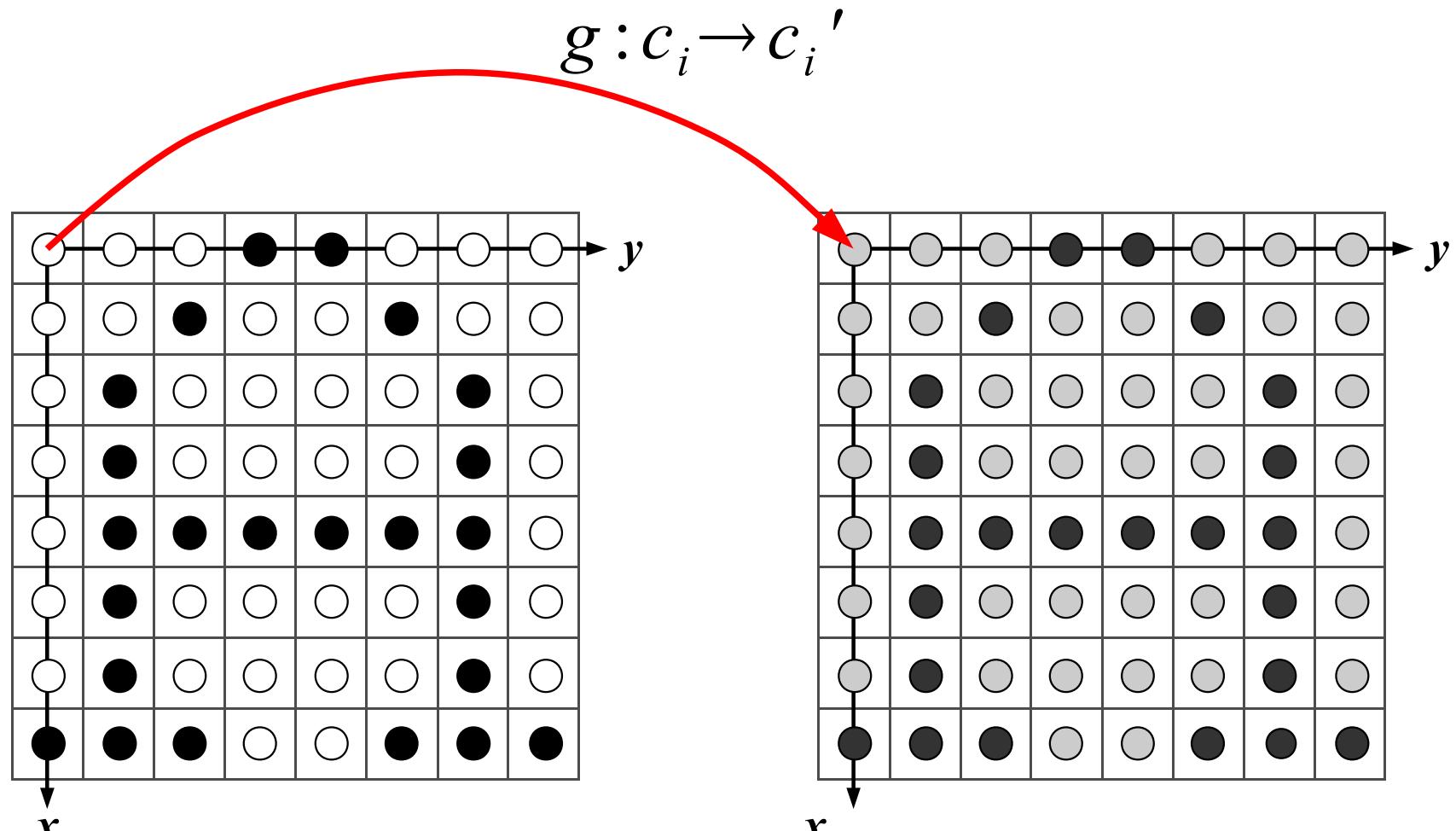
verde



vermelho

azul

Operações Pontuais: $c_i' = g(c_i)$



$$f : \{(x, y) \in U \subset \mathbb{R}^2\} \rightarrow C$$

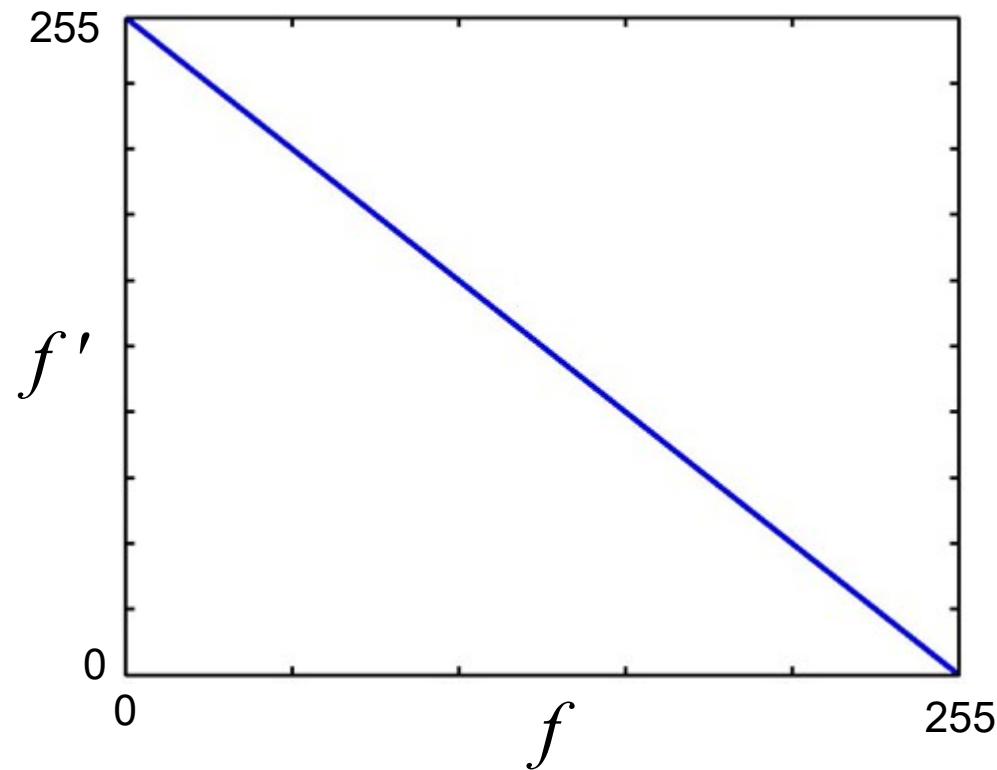
$$f' : \{(x, y) \in U \subset \mathbb{R}^2\} \rightarrow C'$$

$$g(f) \Leftrightarrow f'$$

Manipulação de cores em imagens digitais

- Negativo:

$$g(f) \Leftrightarrow f'$$



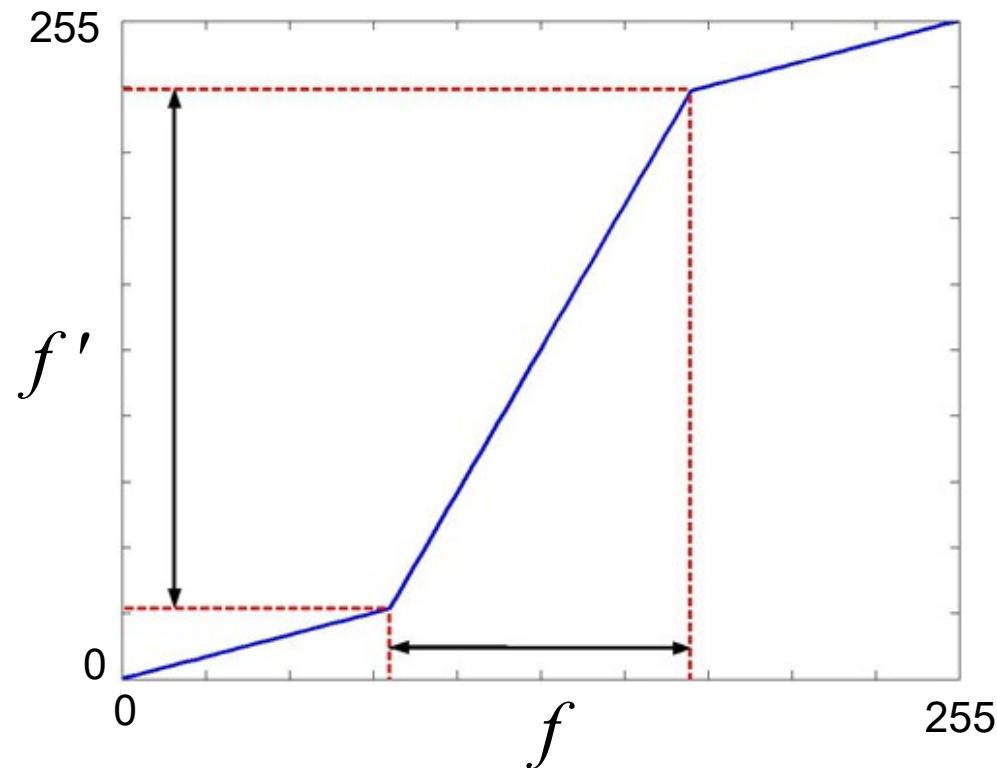
Manipulação de cores em imagens digitais



Manipulação de cores em imagens digitais

- Realce de contraste:

$$g(f) \Leftrightarrow f'$$

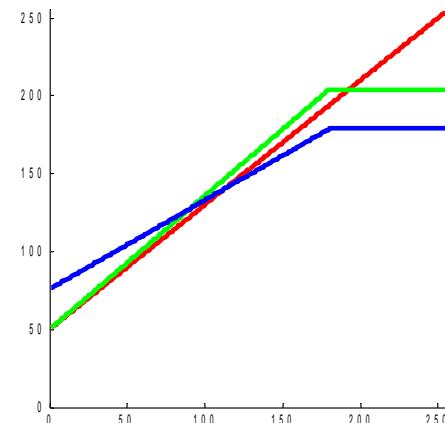


Manipulação de cores em imagens digitais

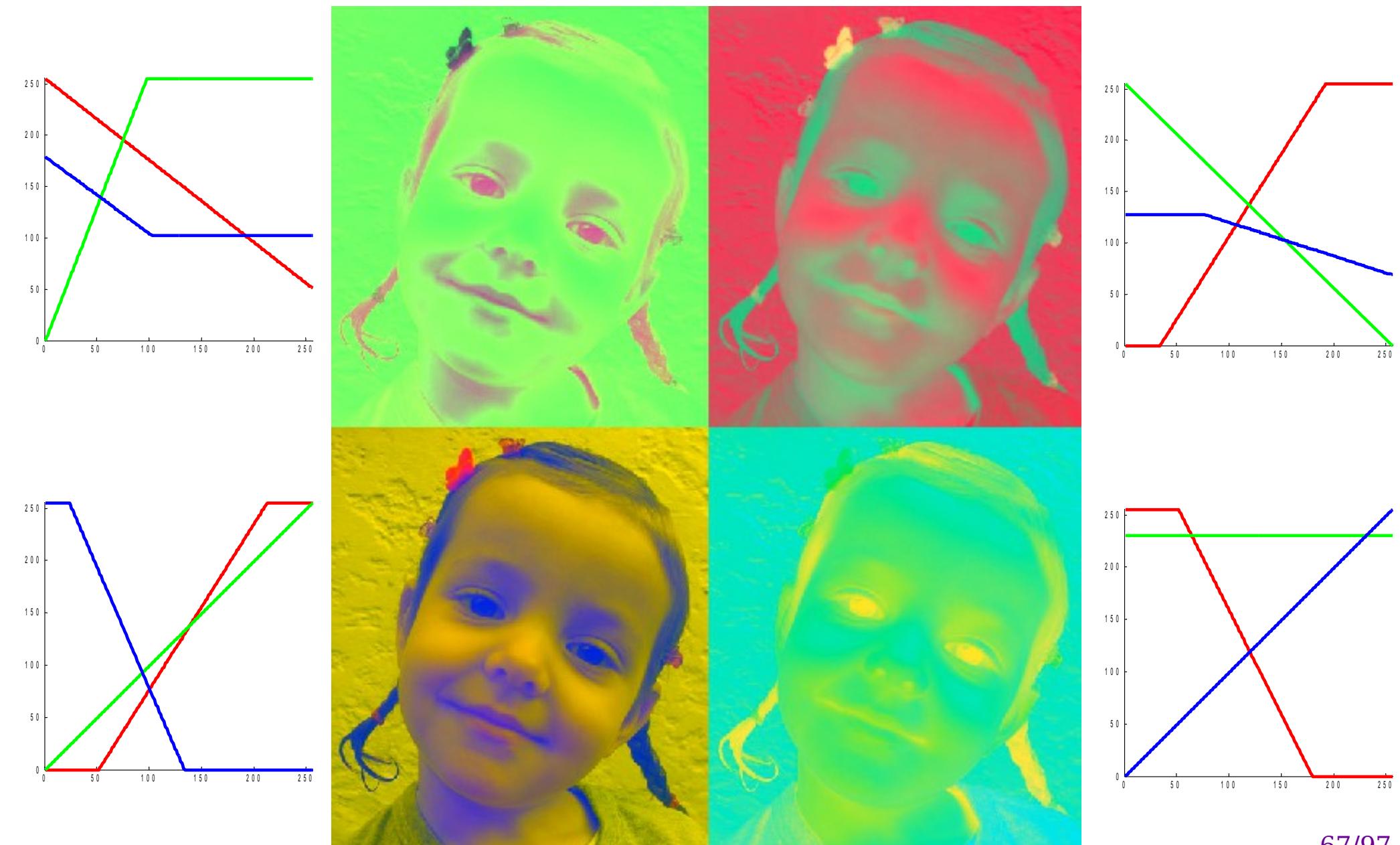
Original



Manipulada



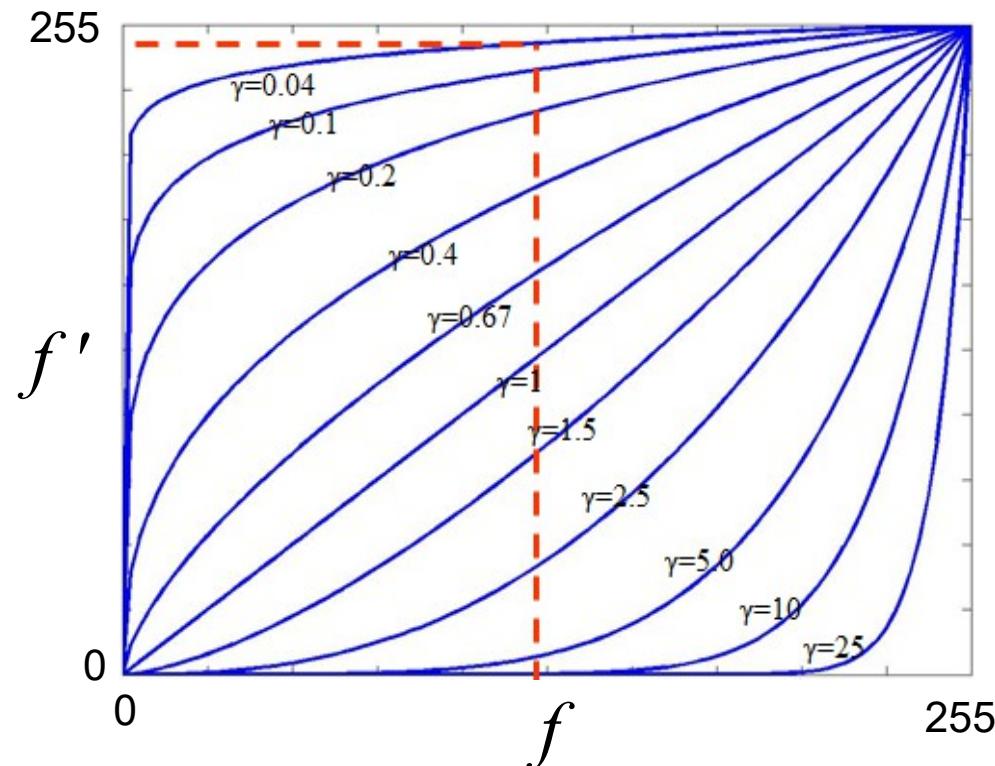
Manipulação de cores em imagens digitais



Manipulação de cores em imagens digitais

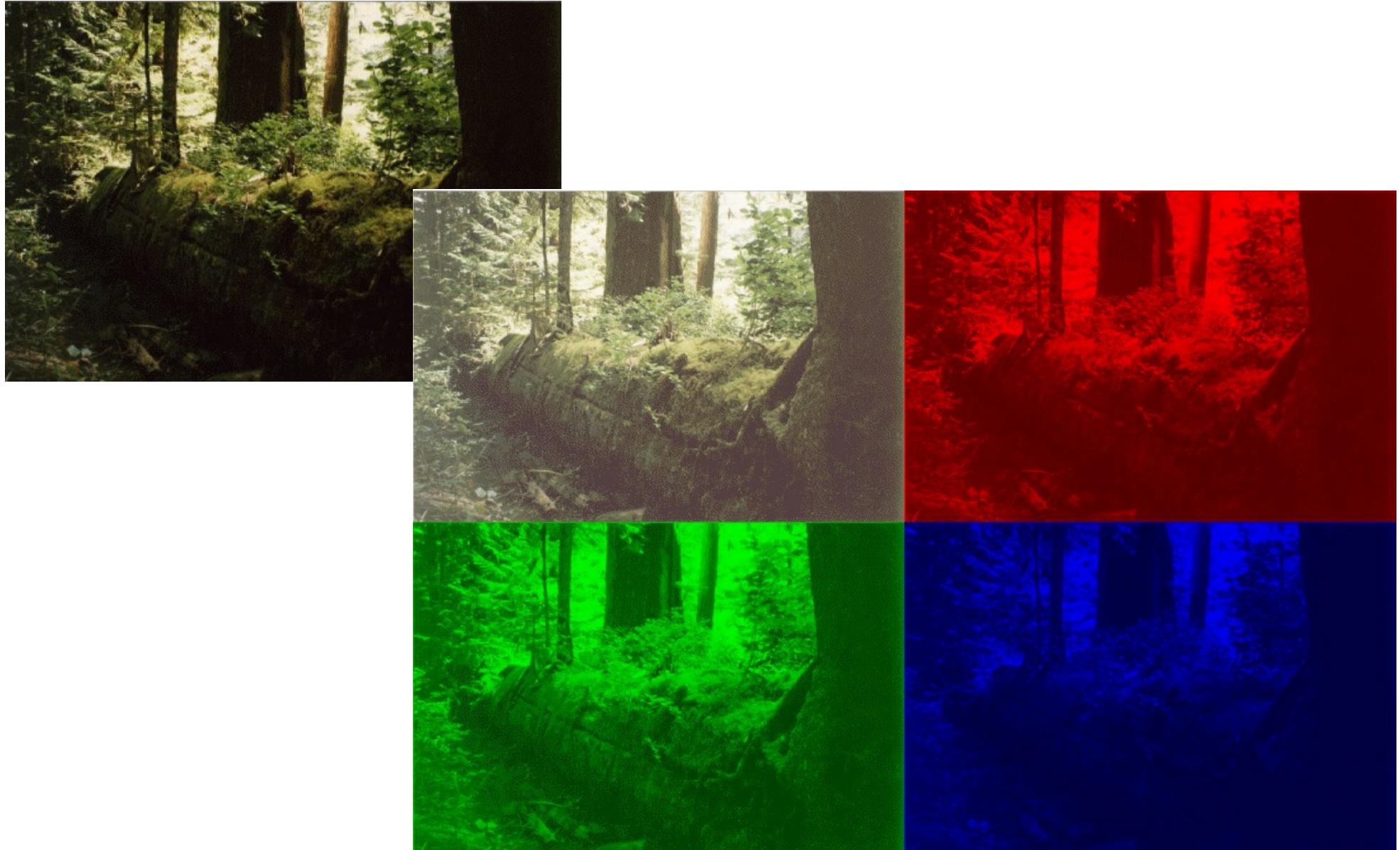
- Correção Gamma:

$$g(f) \Leftrightarrow f'$$



$$g: c_i \rightarrow c_i'; c_i' = c_i^\gamma \text{ para } \gamma = 0.4$$

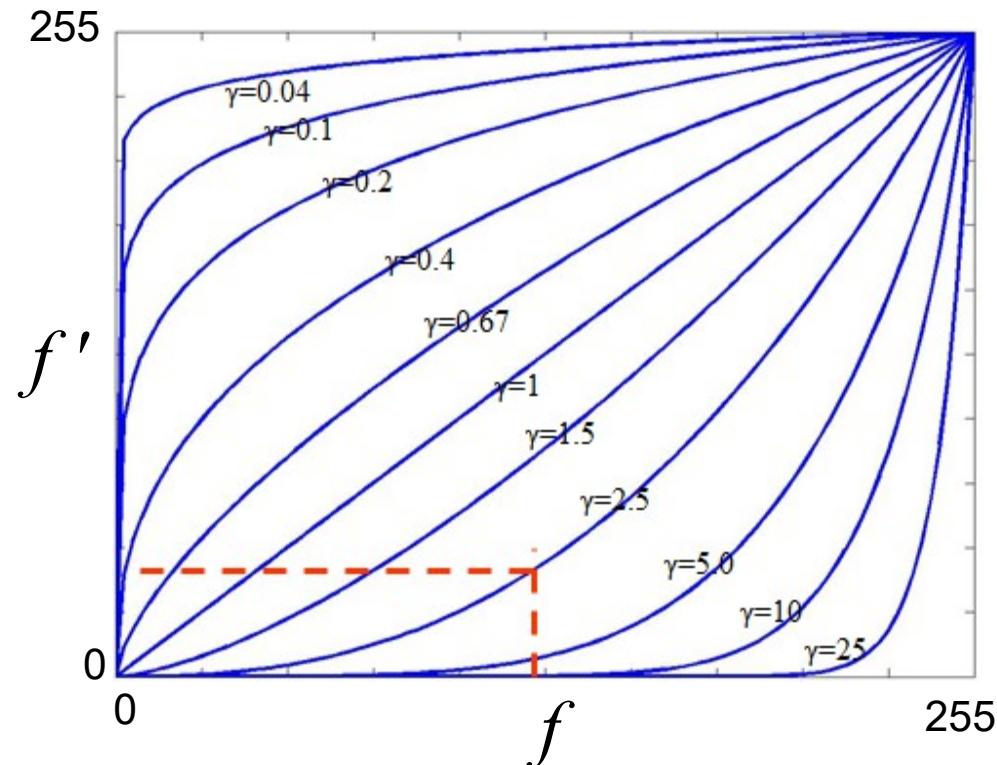
Manipulação de cores em imagens digitais



Manipulação de cores em imagens digitais

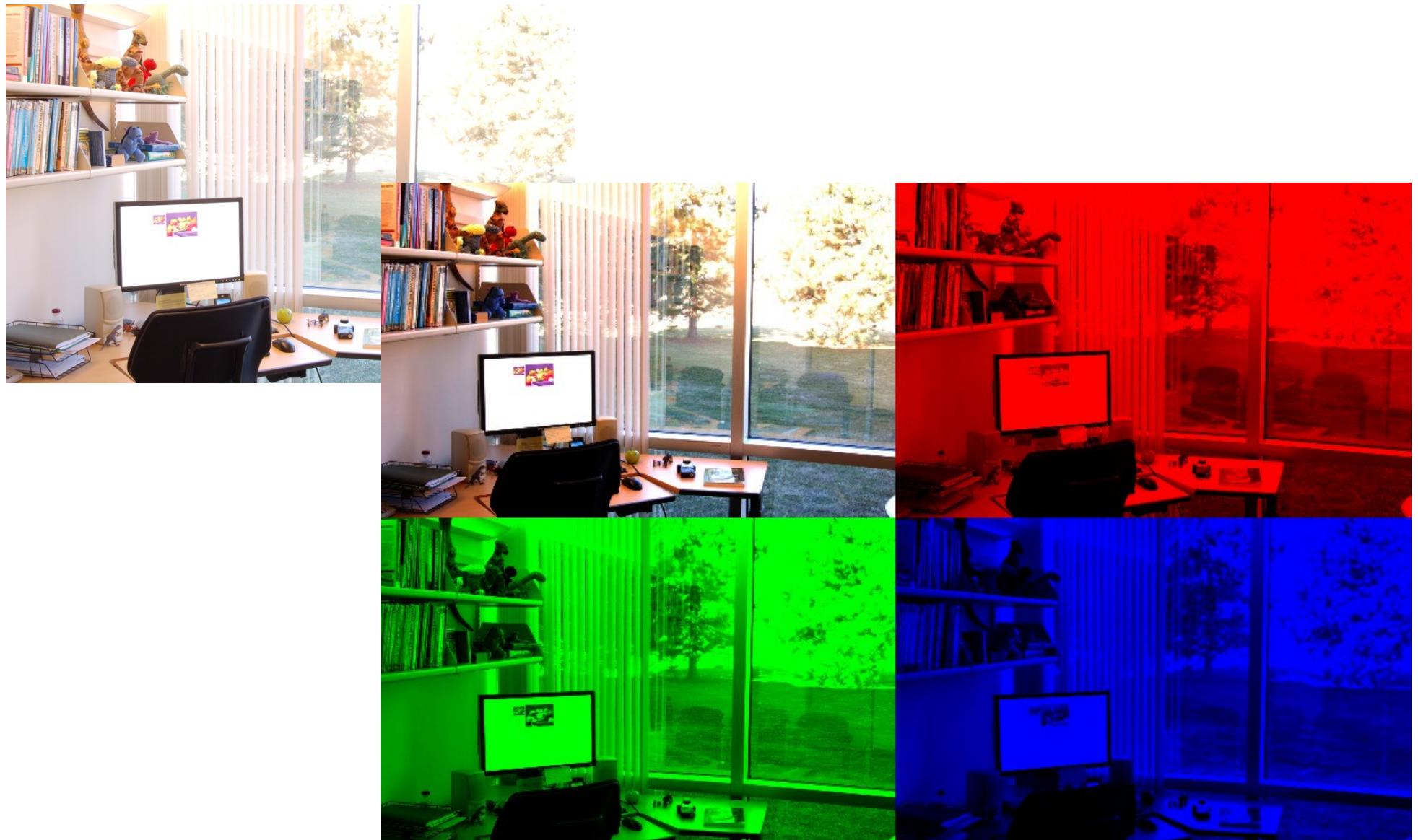
- Correção Gamma:

$$g(f) \Leftrightarrow f'$$



$$g: c_i \rightarrow c'_i; \quad c'_i = c_i^\gamma \text{ para } \gamma = 2.5$$

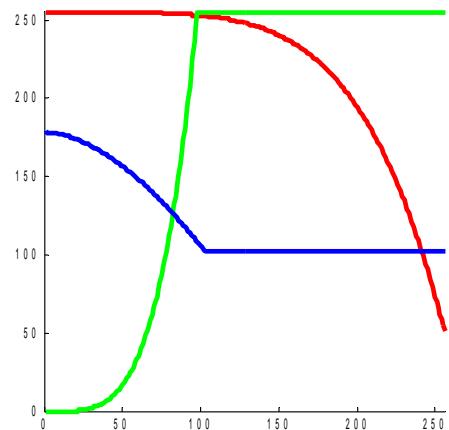
Manipulação de cores em imagens digitais



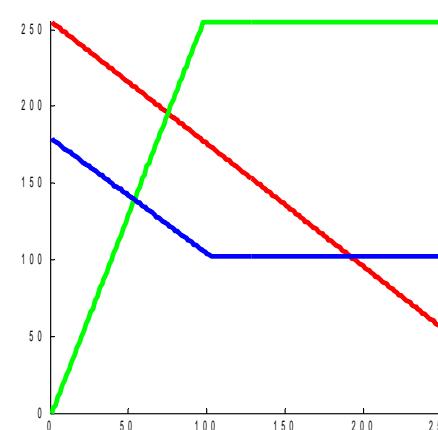
Manipulação de cores em imagens digitais

- Ajuste de Contraste + Correção Gamma:

$$g_2(f) = (g_1(f))^\gamma = f'$$



g_2



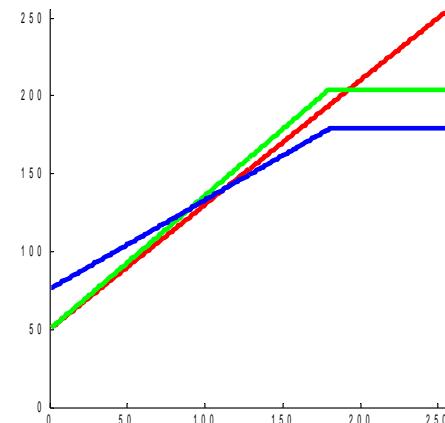
g_1

Manipulação de cores em imagens digitais

Original



Manipulada

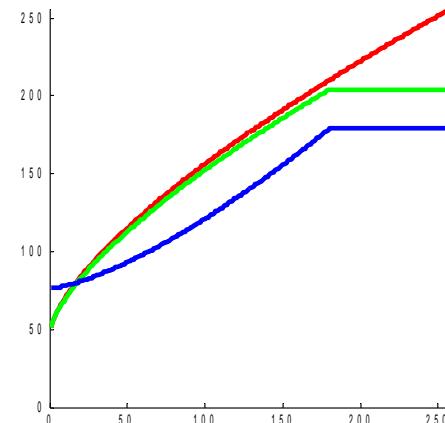


Manipulação de cores em imagens digitais

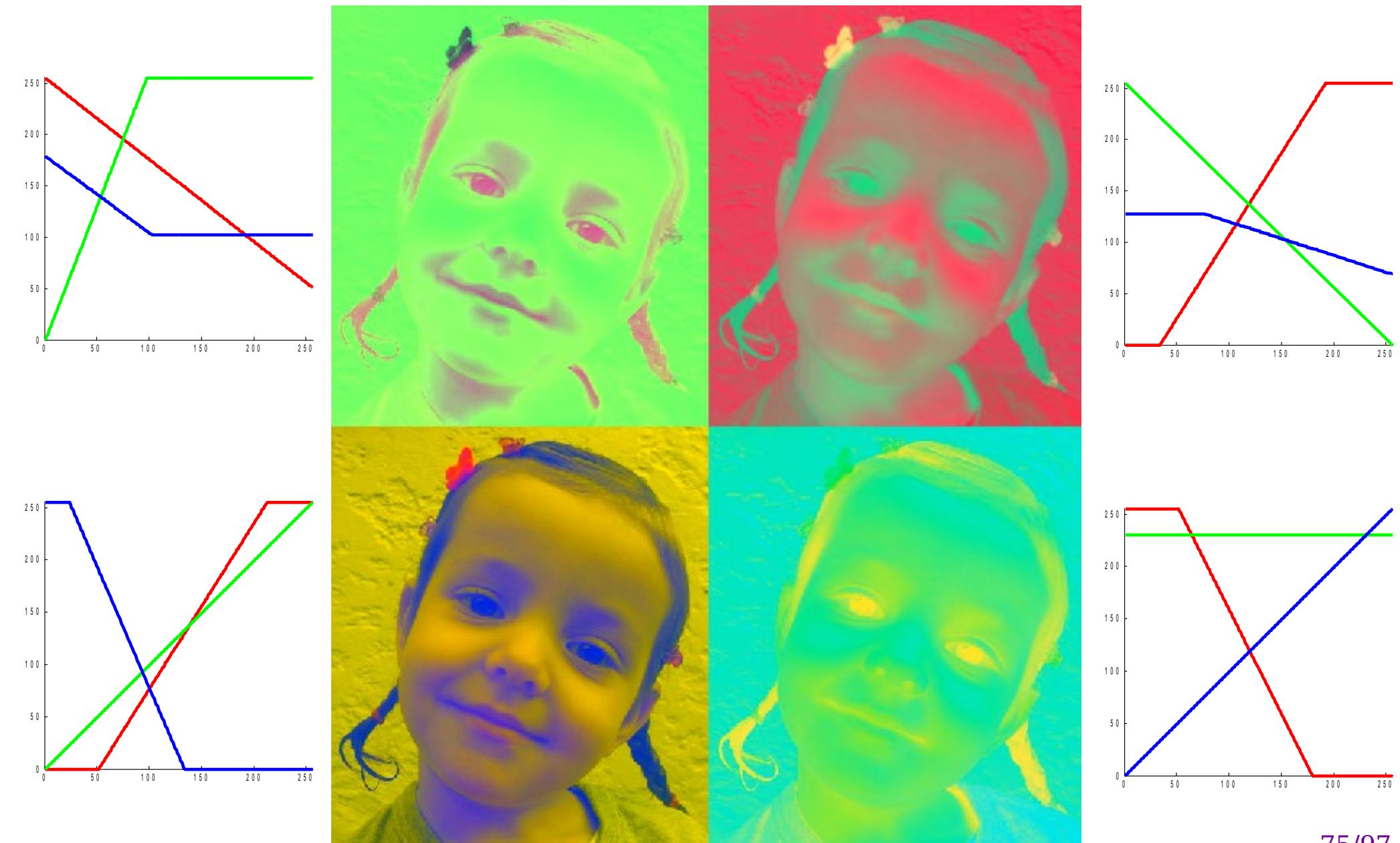
Original



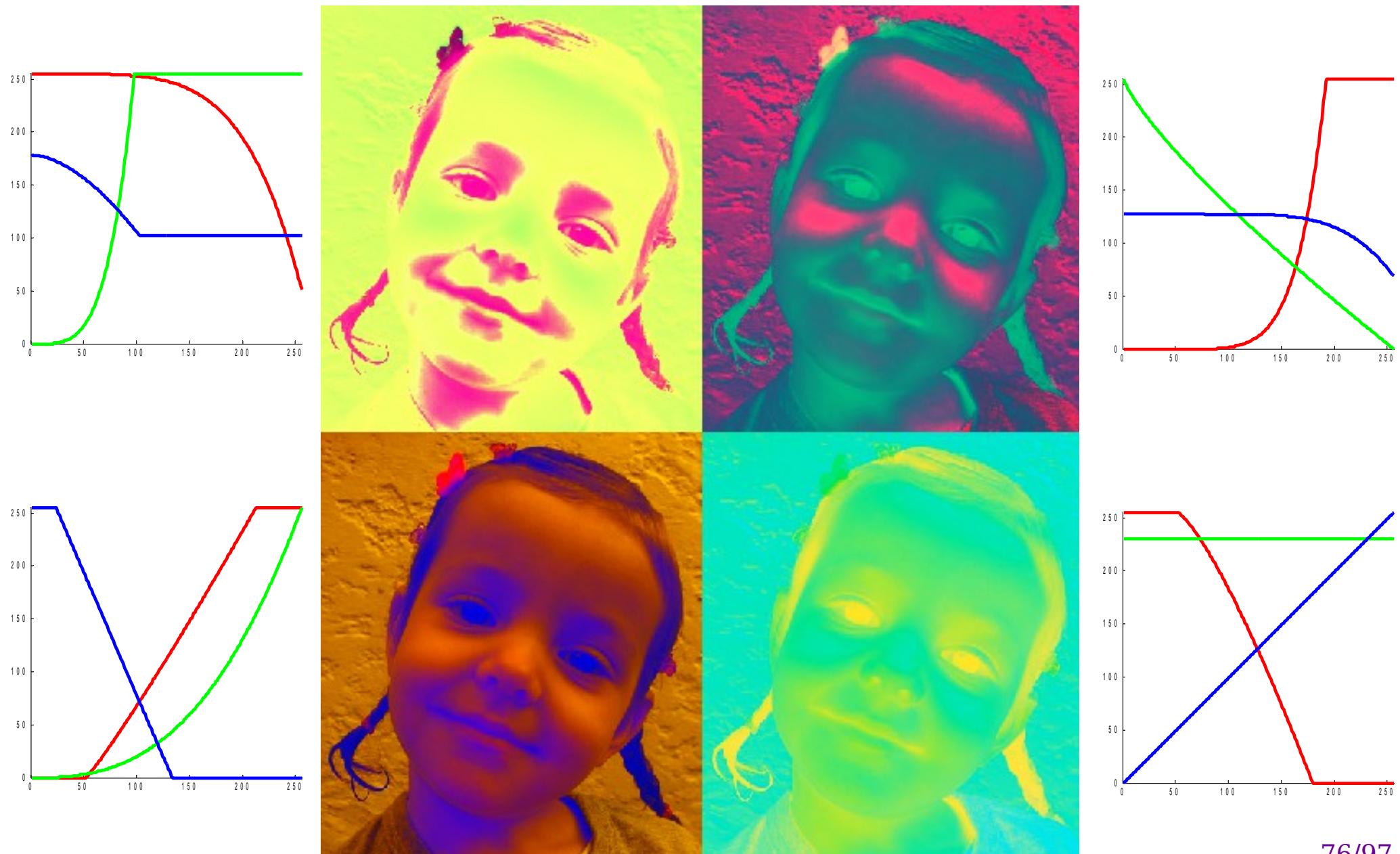
Manipulada



Manipulação de cores em imagens digitais



Manipulação de cores em imagens digitais



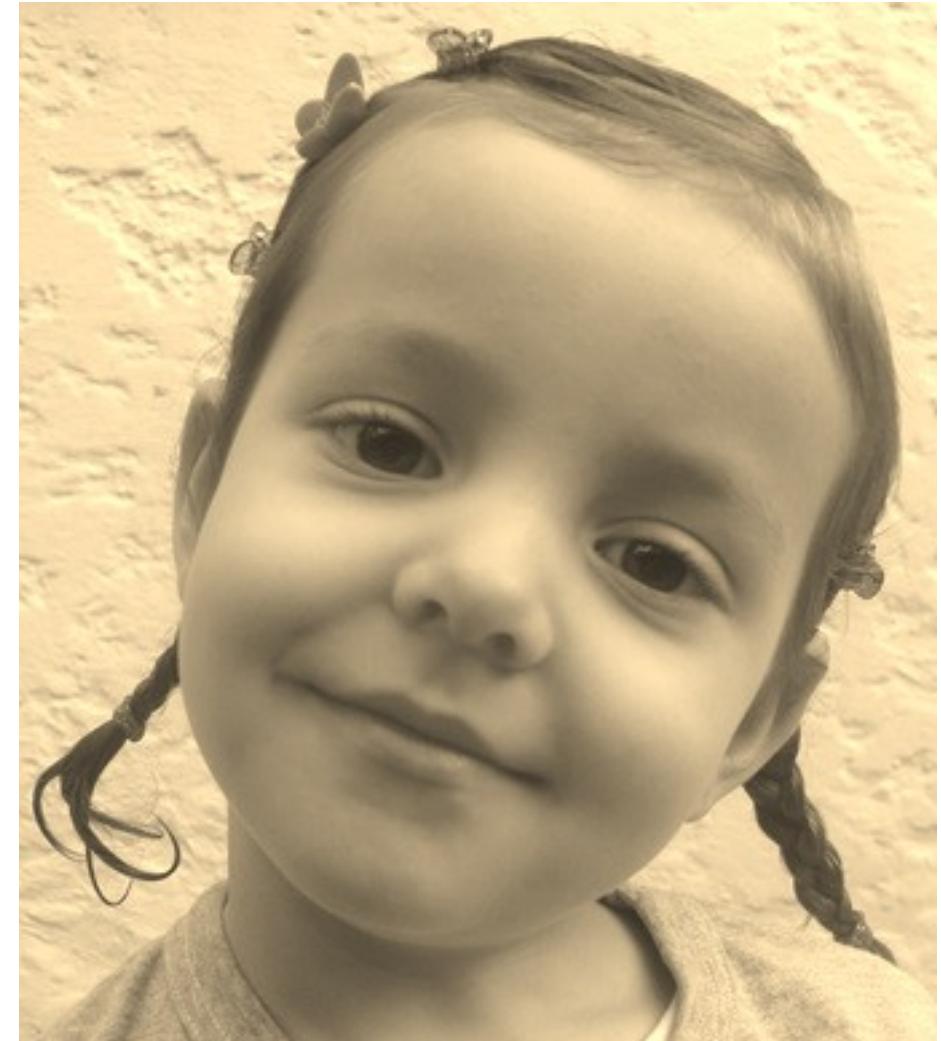
Manipulação de cores em imagens digitais

- Combinação Linear: (Sepia)

$$g(f) \Leftrightarrow f'$$

$$\begin{vmatrix} f'_r \\ f'_g \\ f'_b \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.393 & 0.769 & 0.189 \\ 0.349 & 0.686 & 0.168 \\ 0.272 & 0.534 & 0.131 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} f_r \\ f_g \\ f_b \end{vmatrix}$$

Manipulação de cores em imagens digitais



Filtros Espaciais

- Operação: máscara posicionada sobre cada pixel da imagem de entrada.

$$g(f) \Leftrightarrow f'$$

36	36	36	36	36
36	36	45	45	54
36	36	45	54	54
36	45	54	54	63
36	45	54	63	63

$$f(x,y)$$

\otimes

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

$$w(s,t)$$

?	?	?	?	?
?	38	41	45	?
?	41	46	52	?
?	43	50	56	?
?	?	?	?	?

$$f'(x,y) = g(x,y)$$

$$g(x,y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s,t) f(x+s, y+t)$$

Filtros Espaciais

- Operação: máscara posicionada sobre cada pixel da imagem de entrada.

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t)$$

1/9

1	1	1
1	1	1
1	1	1

máscara de
média 3x3

1/88

1	7	1
7	54	7
1	7	1

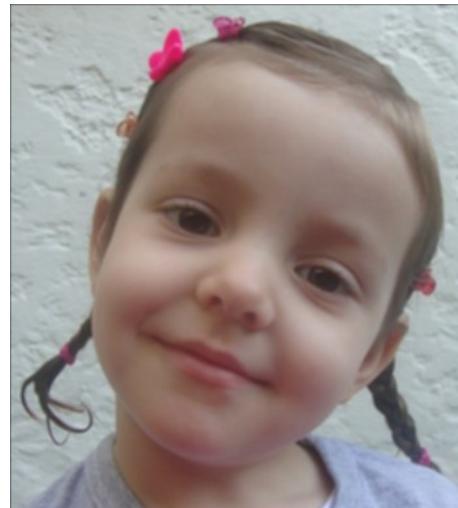
máscara
gaussiana 3x3

Filtros Espaciais

original



média 3x3



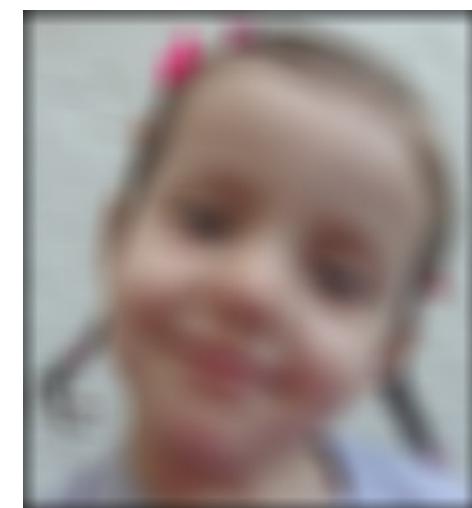
média 5x5



média 7x7



média 15x15



média 25x25

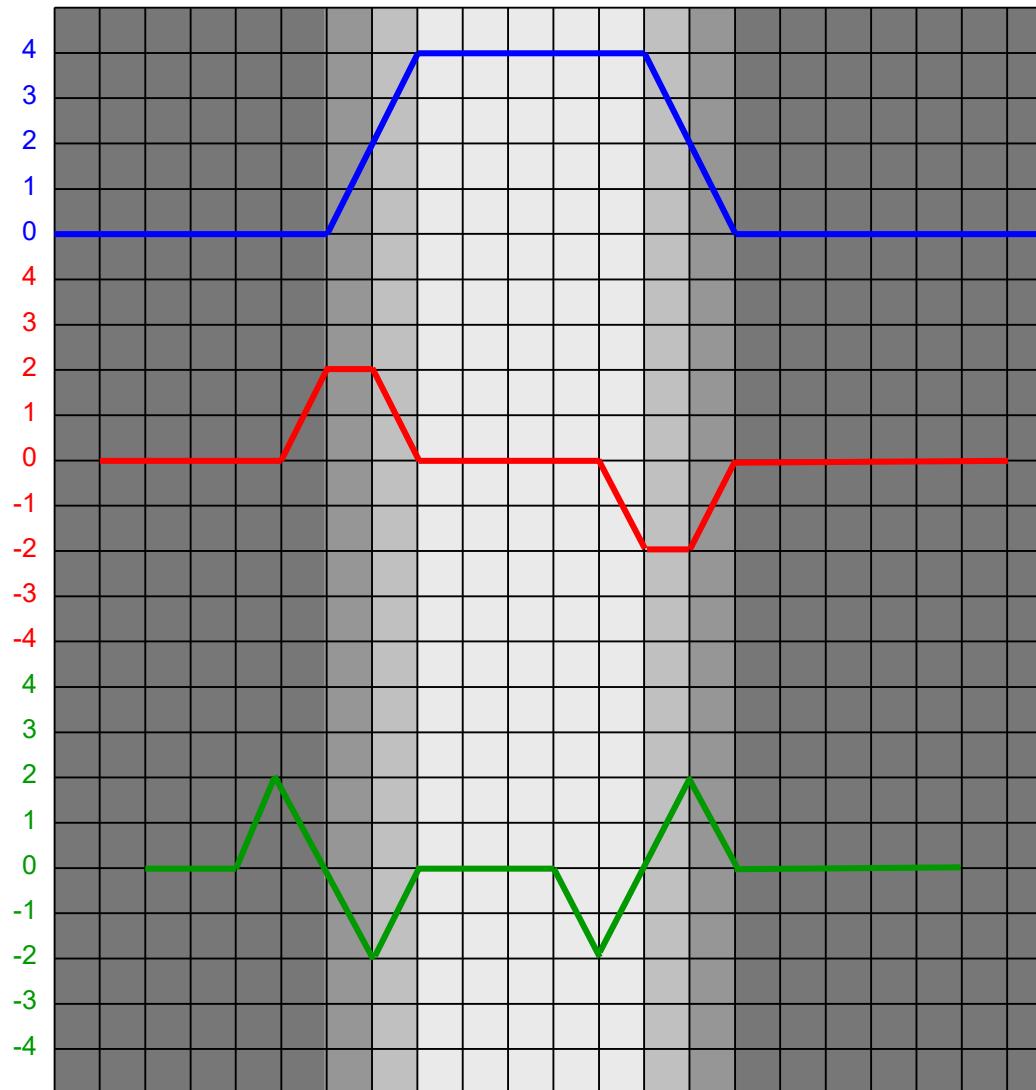
Filtros Espaciais

- Derivadas da imagem digital:
 - Primeira derivada: Gradiente
 - Segunda derivada: Laplaciano

Filtros Espaciais

$$\frac{\partial f}{\partial x}$$

0	-1	1
---	----	---



Valor dos pixels
em linha horizontal

Primeira derivada

Segunda derivada

Filtros Espaciais

- Primeira derivada:

Gradiente:

$$\nabla \mathbf{f} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}$$

Magnitude: $\nabla f = \text{mag}(\nabla \mathbf{f}) = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \approx |G_x| + |G_y|$

Direção:

$$\alpha(x, y) = \text{tag}^{-1}\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$$

Filtros Espaciais

- Máscaras para o Gradiente:

$$\frac{\partial f}{\partial y}$$

1	0
0	-1

Roberts

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

Prewitt

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

Sobel

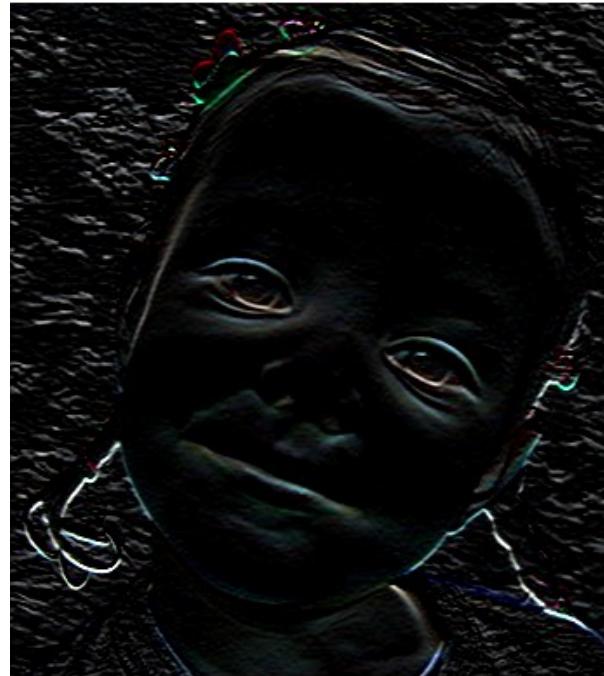
$$\frac{\partial f}{\partial x}$$

0	1
-1	0

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

Filtros Espaciais



-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

$$\nabla f \approx |G_x| + |G_y|$$

Filtros Espaciais

- Segunda derivada: Laplaciano

$$\nabla^2 \mathbf{f} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x+1, y) + f(x-1, y) - 2f(x, y)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2f(x, y)$$

$$\nabla^2 f = f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y)$$

Filtros Espaciais

- Segunda derivada: Laplaciano

$$\nabla^2 \mathbf{f} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

$$\nabla^2 f = f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y)$$

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

Filtros Espaciais

- Segunda derivada: Laplaciano

$$\nabla^2 \mathbf{f} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

1	1	1
1	-8	1
1	1	1

1	4	1
4	-20	4
1	4	1

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

-1	-4	-1
-4	20	-4
-1	-4	-1

Filtros Espaciais



0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0



-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

Filtros Espaciais

- Filtro de aguçamento (sharpening)

$$g(x, y) = \begin{cases} f(x, y) - C \nabla^2 f(x, y) \\ f(x, y) + C \nabla^2 f(x, y) \end{cases} \text{ ou}$$

0	-C	0
-C	$4C+1$	-C
0	-C	0

-C	-C	-C
-C	$8C+1$	-C
-C	-C	-C

Filtros Espaciais



Filtros Espaciais



Filtros Espaciais



Filtros Espaciais

- Filtro de aguçamento (unsharp): subtrai da imagem uma versão suavizada dela mesma.

$$f_s(x, y) = f(x, y) - \bar{f}(x, y)$$

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} - \frac{1}{9} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1/9 & -1/9 & -1/9 \\ \hline -1/9 & 8/9 & -1/9 \\ \hline -1/9 & -1/9 & -1/9 \\ \hline \end{array}$$

Filtros Espaciais



Filtros Espaciais



Fim