

**Curso: Bacharelado em Ciência da Computação**

**Disciplina: Processamento de Imagens**

## **Conteúdo dos Slides:**

- Realce de Imagens
- Brilho e Contraste
- Histograma de Imagens
- Operações sobre Histograma

**Profa. Regina Célia Coelho - [rccoelho@unifesp.br](mailto:rccoelho@unifesp.br)**

# Realce de Imagens

- ◆ Técnicas de realce de imagens buscam acentuar ou melhorar a aparência de determinadas características da imagem, tornando-a mais adequada à aplicação em questão.
- ◆ O realce é necessário quando a imagem sofre um processo de degradação ou perda de qualidade em decorrência de:
  - Introdução de ruído;
  - Perda de contraste;
  - Borramento;
  - Distorção causada pelo equipamento de aquisição;
  - Condição inadequada de iluminação.

# Realce de Imagens (cont.)

## ► Principais abordagens:

- **Métodos do domínio espacial**: processamento na manipulação direta dos pixels das imagens;
  
- **Métodos no domínio de frequência**: processamento baseado na modificação da imagem com a aplicação de transformadas, como a de Fourier.

# Brilho e Contraste

- **Brilho:** associado à sensação visual da **intensidade luminosa** de uma fonte.
- A **habilidade do sistema visual humano para discriminar níveis distintos de brilho** é um aspecto **importante na apresentação de resultados** que envolvem imagens digitais.
- Evidências experimentais indicam que a **sensibilidade do sistema visual humano ao brilho possui resposta logarítmica** com relação à intensidade de luz incidente no olho.

## Brilho e Contraste (cont.)

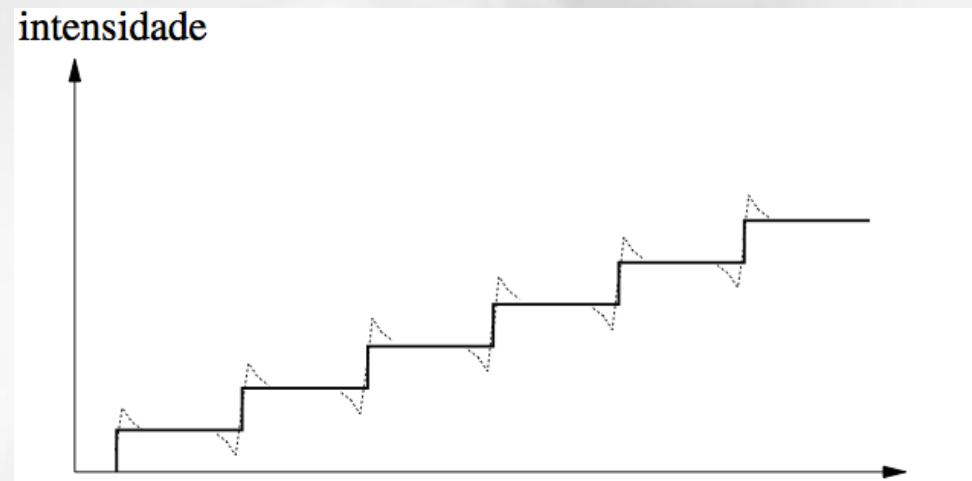
- O fato de que o **brilho percebido** pelo sistema visual humano **não corresponde a uma função linear** da intensidade pode ser demonstrado por alguns fenômenos.
- O **primeiro fenômeno**, conhecido por **bandas de Mach**, é baseado no princípio de que o sistema visual tende a **subestimar ou superestimar a intensidade** próxima às **transições** entre regiões de intensidades diferentes.

# Brilho e Contraste (cont.)

◆ Fenômeno descoberto pelo físico Ernst Mach (1838-1916).



(a) faixas com intensidades diferentes



(b) brilho percebido

- ◆ Embora a intensidade de cada faixa ou região da Fig.(a) seja constante, percebe-se um padrão de brilho alterado, particularmente quando próximo das bordas.
- ◆ A Fig.(b) mostra como o olho humano percebe uma transição abrupta de intensidade.
- ◆ As linhas sólidas representam as intensidades reais, enquanto as linhas tracejadas representam o brilho percebido pelo olho humano.

## Brilho e Contraste (cont.)

- ◆ Outro fenômeno, conhecido como **contraste simultâneo**, está relacionado ao fato de que o brilho aparente de uma região depende fortemente da intensidade do fundo.
- ◆ Na figura a seguir, todos os quadrados centrais possuem exatamente a mesma intensidade, embora pareçam se tornar mais escuros à medida que as intensidades dos fundos se tornam mais claras.



## Brilho e Contraste (cont.)

- O **contraste** pode ser definido como **uma medida da variação relativa da luminância**, ou seja, da intensidade luminosa **por unidade de área**.
- Diversas **formulações** têm sido propostas para expressar o contraste.
- Segundo a **lei de Weber**, a **resposta do sistema visual humano depende significativamente de variações locais de luminância**, ao invés da luminância absoluta.

# Brilho e Contraste (cont.)

- Um experimento utilizado para determinar a habilidade do sistema visual para discriminar mudanças de luminância consiste em apresentar, a um observador, um objeto com luminância  $L_F = L + \Delta L$  em um fundo  $L_B = L$ .

## Brilho e Contraste (cont.)

- Uma questão de interesse é identificar qual a diferença  $\Delta L = L_F - L_B$  suficientemente necessária para o observador notar a mudança entre o objeto e o fundo.
- A lei de Weber estabelece que a intensidade adicional de estímulo (luminância) necessária para que o sistema visual humano possa observar uma alteração é proporcional à intensidade inicial, em uma relação constante.

## Brilho e Contraste (cont.)

- Essa relação, chamada de **contraste de Weber** ou **lei de Weber-Fechner**, é definida como:

$$C_w = \frac{\Delta L}{L}$$

- O **contraste mínimo** para um observador detectar uma mudança em intensidade permanece aproximadamente **constante** sobre um grande intervalo de intensidades (figura (b)), devido às capacidades de adaptação do sistema visual humano.

## Brilho e Contraste (cont.)

- ▶ Para esse intervalo, a relação de Weber é aproximadamente igual a 0.02 (ou 2%). Por exemplo, se uma pessoa sai de um ambiente iluminado e vai para outro, ela só perceberá variação da luminosidade se esta for superior a 2%.
- ▶ Fora desse intervalo, a habilidade em discriminar intensidades pelo sistema visual humano diminui.

## Brilho e Contraste (cont.)

- No caso de padrões periódicos (por ex., senoidais) com desvios simétricos variando de  $L_{min}$  a  $L_{max}$ , uma medida de contraste, proposta por Michelson (1927), é definida como:

$$C_M = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$

em que  $L_{min}$  e  $L_{max}$  correspondem à luminância (intensidade por unidade de área) mínima e máxima do padrão.

- As definições de contraste  $C_W$  e  $C_M$  não são equivalentes e não possuem o mesmo intervalo de valores.
- O contraste de Michelson pode variar de 0 a 1, enquanto o contraste de Weber pode variar de -1 a  $\infty$ .

## Brilho e Contraste (cont.)

- Embora essas medidas sejam bons preditores de contraste para padrões simples, elas falham quando os estímulos tornam-se mais complexos e cobrem um intervalo de frequência maior.
- Além disso, essas definições globais não são apropriadas para medir o contraste em imagens naturais, já que poucos pontos muito brilhantes ou muito escuros determinariam o contraste de toda a imagem, enquanto a percepção humana varia com a média local de luminância.

## Brilho e Contraste (cont.)

► Uma medida de contraste local foi definida por Beghdadi e Khellaf (1997). Dado um pixel  $f$  com coordenadas  $(x,y)$ , centrado em uma vizinhança  $w_f$ , o contraste no pixel é definido como:

$$C_f = \frac{|I(x, y) - \bar{I}(x, y)|}{\bar{I}(x, y)}$$

em que  $I(x, y)$  é o nível de cinza do pixel  $\bar{I}(x, y)$  é o nível de cinza médio dentro da vizinhança  $w_f$ .

# Histograma - Introdução

- ◆ Histograma de uma imagem é um conjunto de números indicando o percentual de pixels naquela imagem que apresentam um determinado nível de cinza.
- ◆ Estes valores são normalmente representados por um gráfico de barras que fornece para cada nível de cinza o número (ou o percentual) de pixels correspondentes na imagem.

# Histograma

- O histograma revela a distribuição dos níveis de cinza da imagem.
- Pela visualização do histograma de uma imagem obtemos uma indicação de sua qualidade quanto ao nível de contraste e quanto ao seu brilho médio (por exemplo, se a imagem é predominantemente clara ou escura).
- É uma função discreta representada por um gráfico que fornece o número de *pixels* na imagem para cada nível de cinza  $g$ .

# Histograma (cont.)

- ◆ A modificação do histograma permite variar a distribuição dos níveis de intensidade tanto nas imagens com níveis de cinza como nas coloridas.
- ◆ A manipulação em histogramas pode ser utilizada para eliminar efeitos não desejados como sombras e reflexos, uma vez que pode aumentar o contraste.
- ◆ Útil para fazer realce e análise da imagem.

# Definição

- ◆ Seja uma imagem digital de  $M$  linhas e  $N$  colunas. O histograma  $H$  da imagem pode, analiticamente, ser definido por :

$$H(g) = n(g)$$

sendo  $n(g)$  a quantidade de vezes que o nível de cinza  $g$  aparece na imagem.

## Definição (cont.)

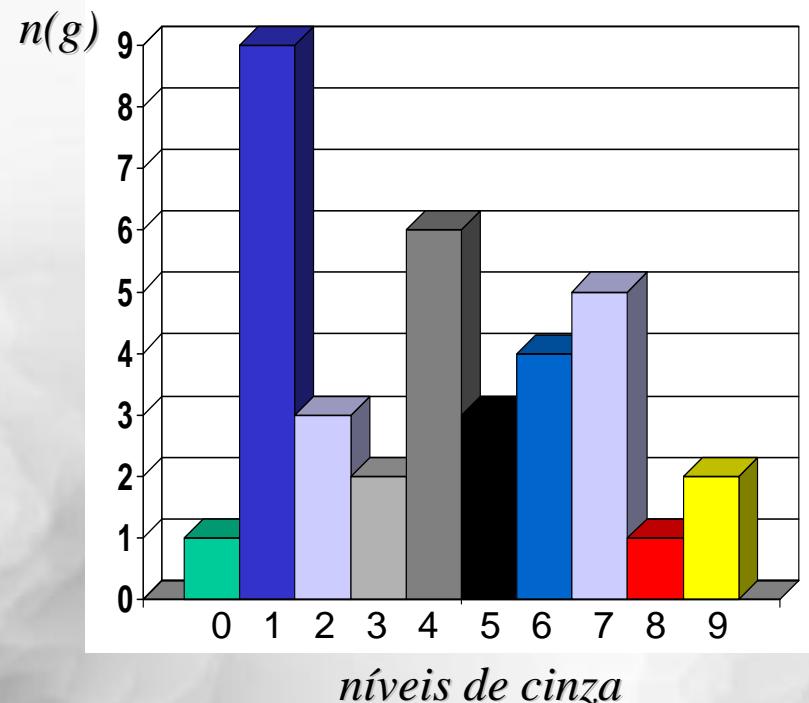
◆ Exemplo: faça o histograma da matriz:

$$\begin{bmatrix} 0 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 1 & 4 & 4 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 4 & 5 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 7 & 6 & 6 \\ 2 & 2 & 7 & 7 & 6 & 6 \\ 8 & 2 & 7 & 7 & 9 & 9 \end{bmatrix}$$

# Definição (cont.)

◆ Exemplo: faça o histograma da matriz:

$$\begin{bmatrix} 0 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 1 & 4 & 4 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 4 & 5 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 7 & 6 & 6 \\ 2 & 2 & 7 & 7 & 6 & 6 \\ 8 & 2 & 7 & 7 & 9 & 9 \end{bmatrix}$$

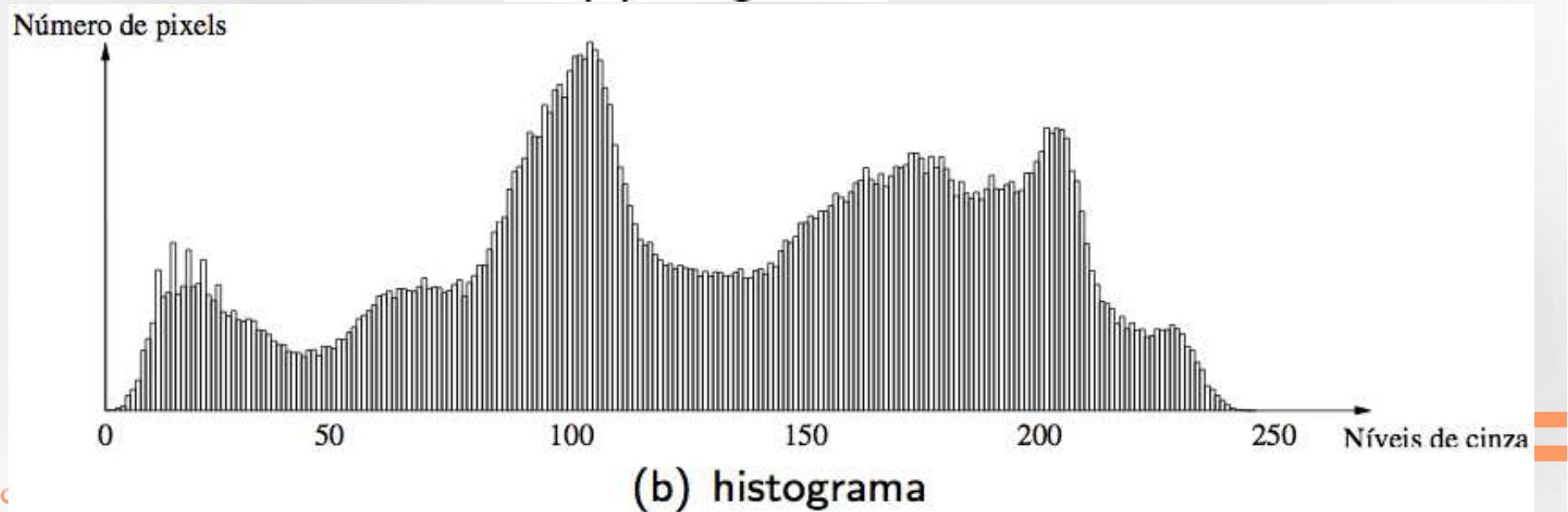


## Definição (cont.)

### Exemplo



(a) imagem



## Definição (cont.)

- O histograma também pode ser representado em termos de probabilidade, ou seja, indicando a probabilidade de cada nível de cinza aparecer na imagem.
- Assim, o cálculo do histograma fica da forma mostrada na equação abaixo:

$$H_p(g) = \frac{n(g)}{N \cdot M}$$

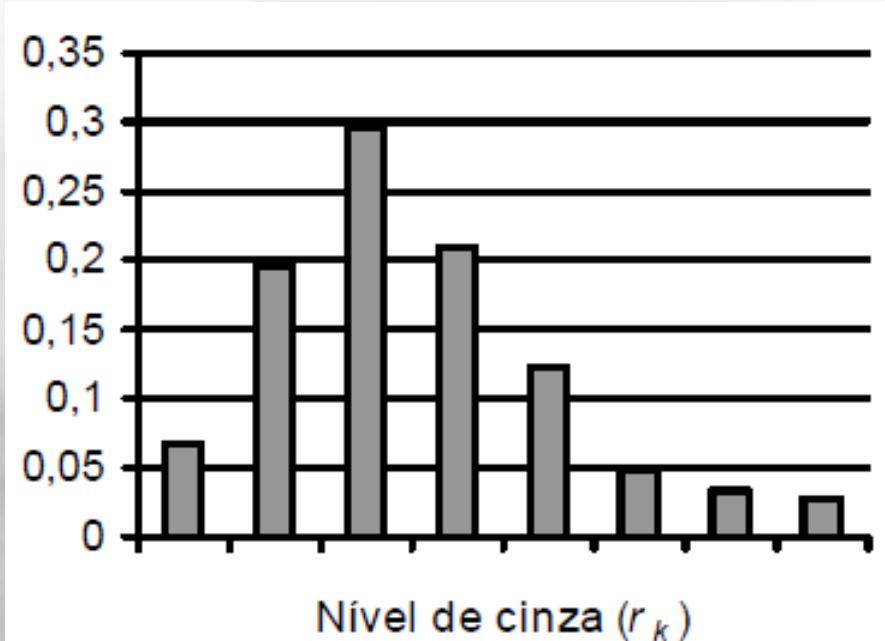
$H_p(g)$  representa a probabilidade de  $g$  aparecer.

# Definição (cont.)

- Uma imagem possui um único histograma, mas a recíproca geralmente não é verdadeira.
- Várias medidas estatísticas podem ser obtidas a partir do histograma de uma imagem, como: valores mínimos e máximo, valor médio, variância e desvio padrão dos níveis de cinza da imagem.

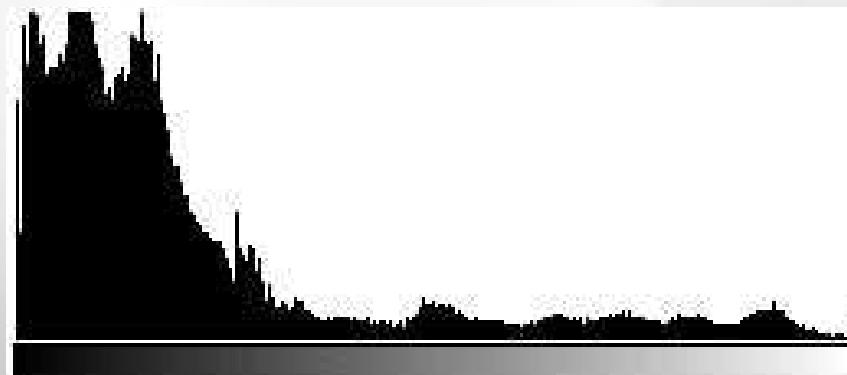
# Exemplo

Nível de cinza ( $r_k$ )	$n_k$	$p_r(r_k)$
0	1120	0,068
1/7	3214	0,196
2/7	4850	0,296
3/7	3425	0,209
4/7	1995	0,122
5/7	784	0,048
6/7	541	0,033
1	455	0,028
Total	16384	1



## *Definição (cont.)*

- ◆ O histograma fornece uma descrição global da aparência de uma imagem.



## *Definição (cont.)*

- ◆ O histograma fornece uma descrição global da aparência de uma imagem.

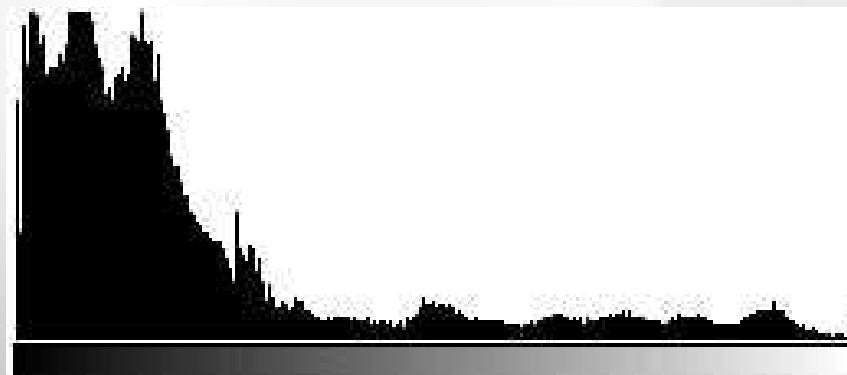
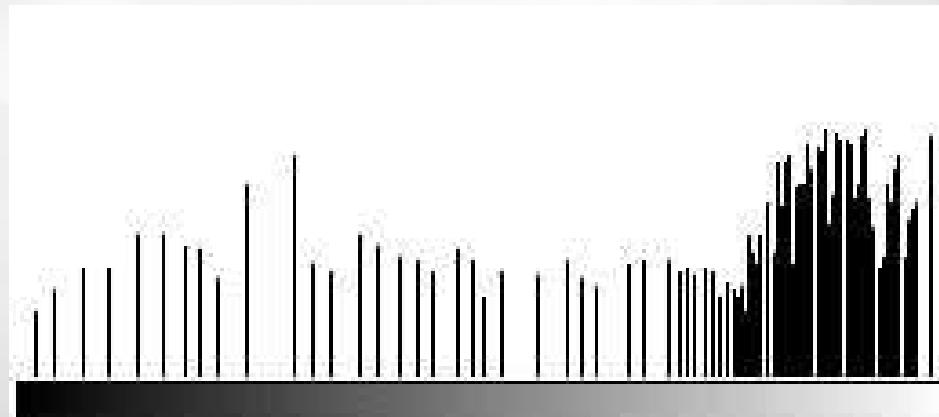


imagem escura

# *Definição (cont.)*



# *Definição (cont.)*

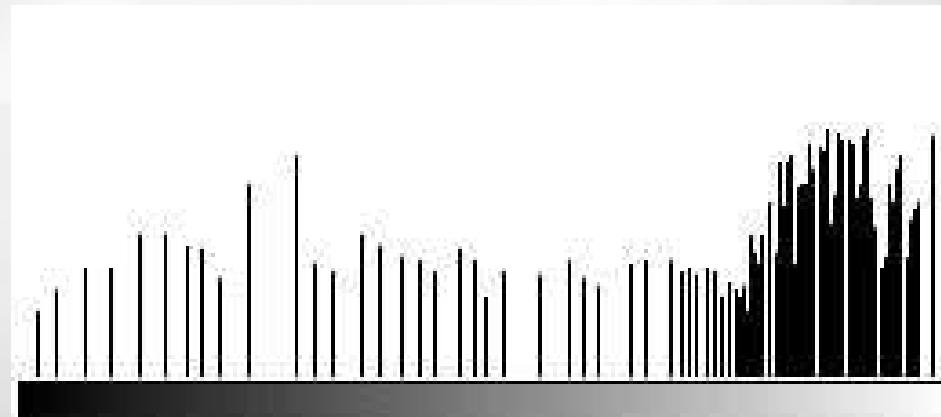
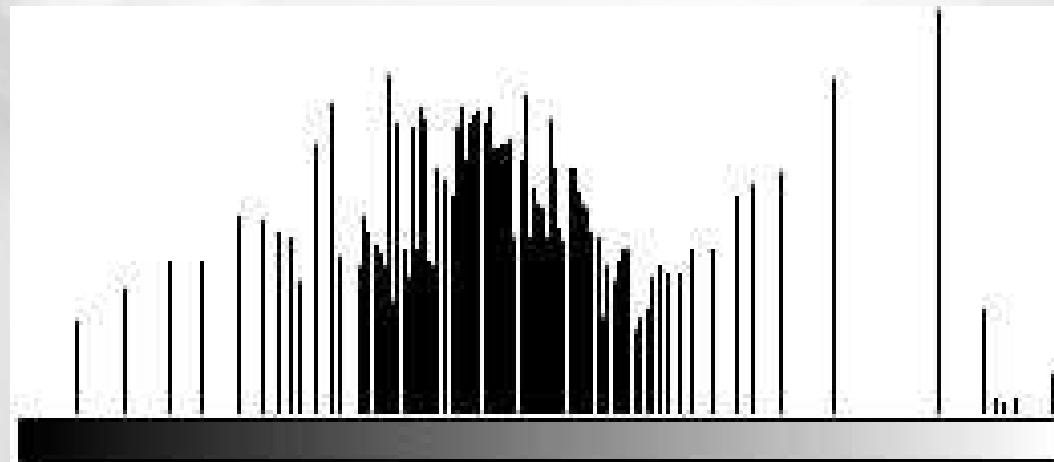


imagem clara

# *Definição (cont.)*



# *Definição (cont.)*

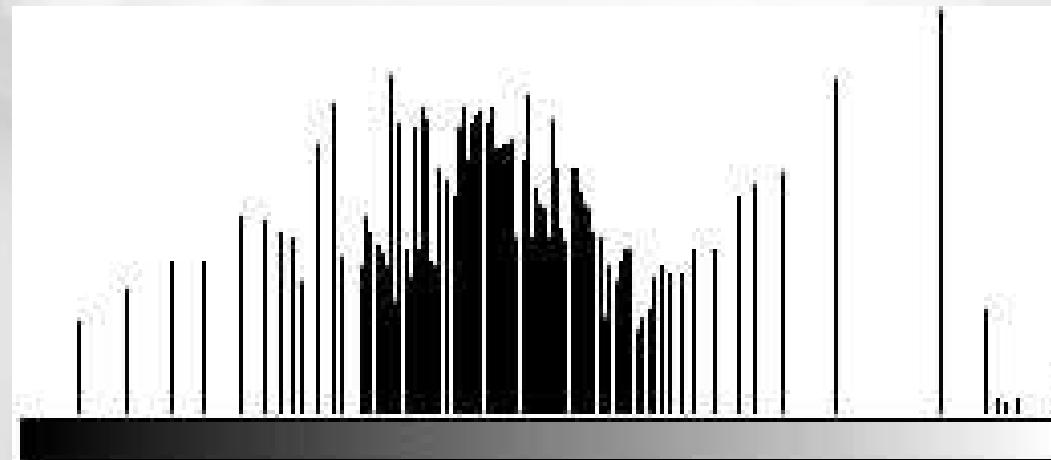
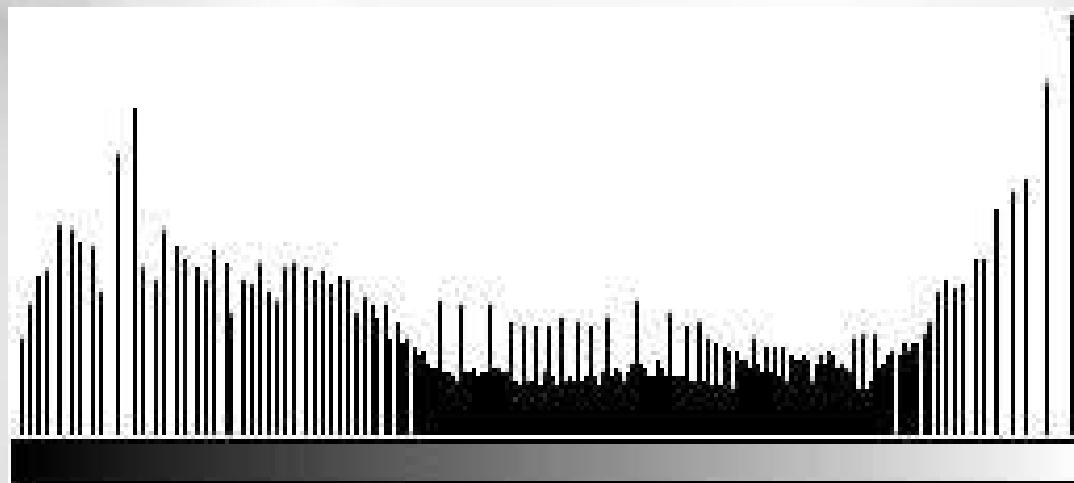


imagem de baixo contraste

# *Definição (cont.)*



# *Definição (cont.)*

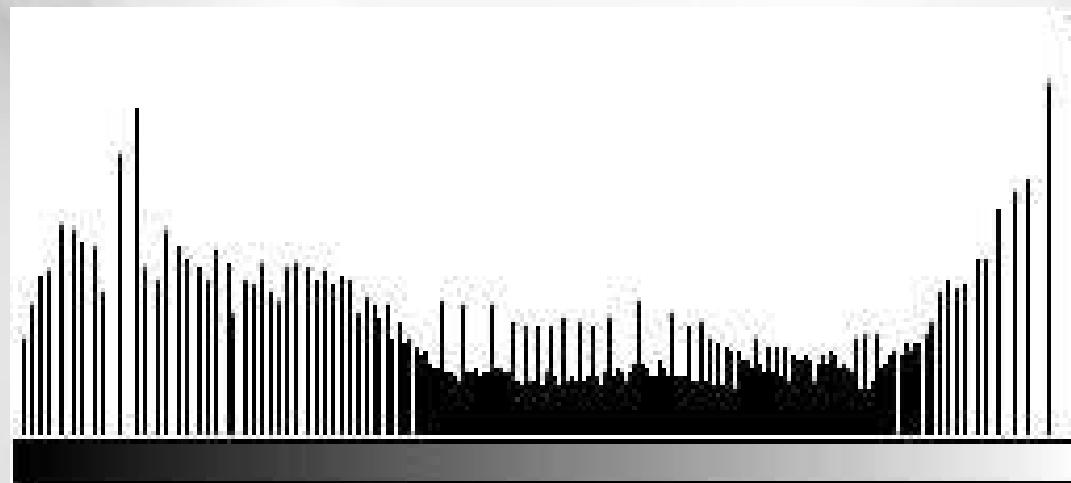
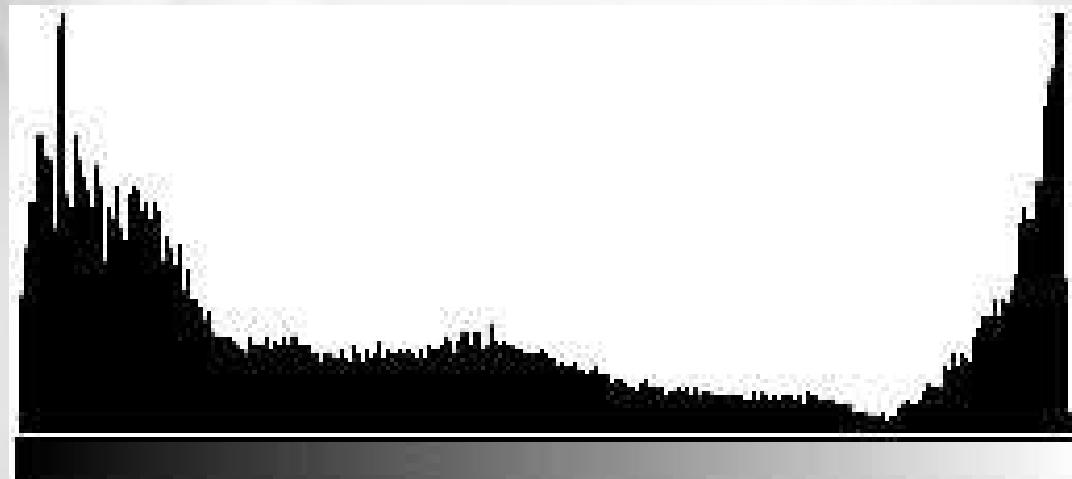
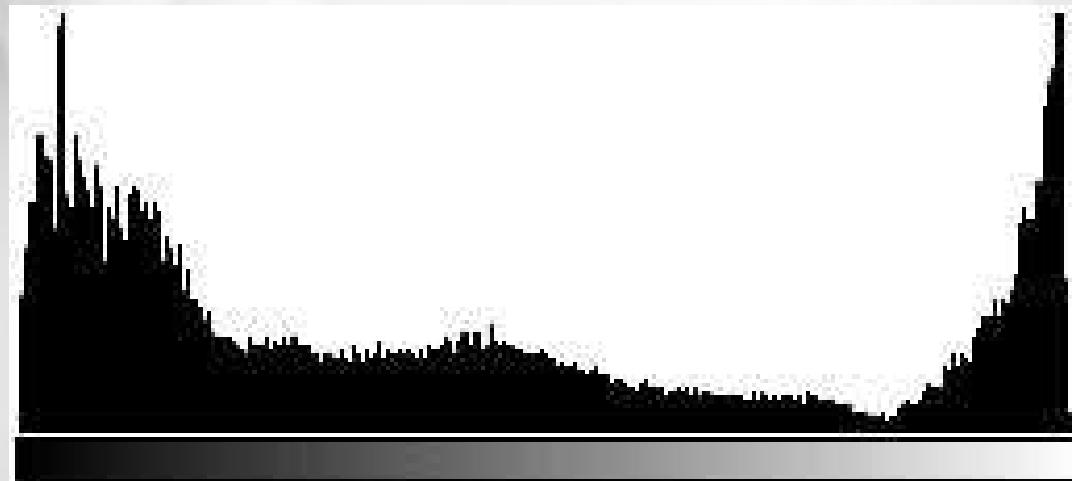


imagem de alto contraste

# *Definição (cont.)*

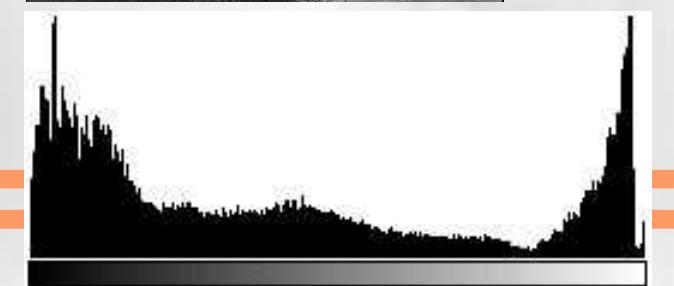
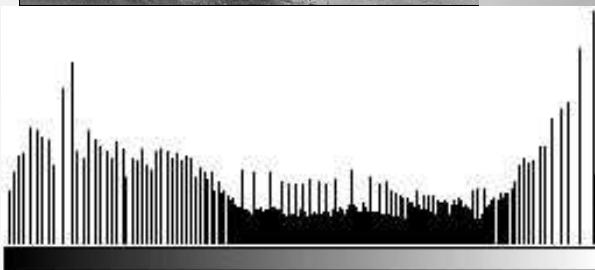
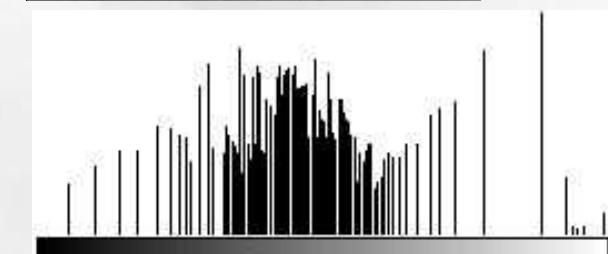
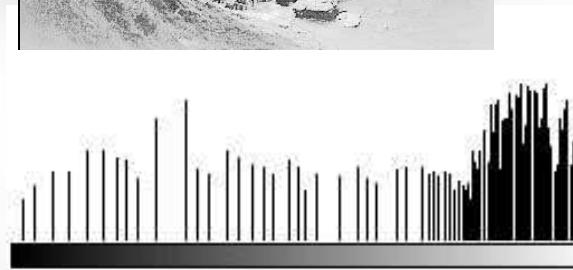
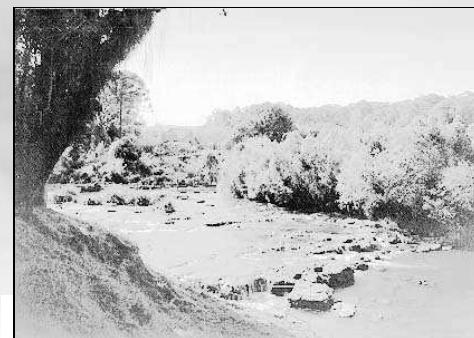
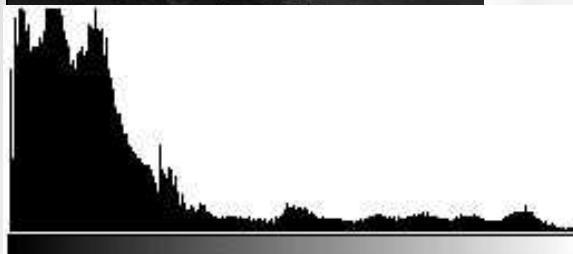


# Definição (cont.)



histograma bimodal: alto contraste  
entre 2 concentrações

# Definição (cont.)



# Transformações de contraste

- O objetivo das transformações de contraste é melhorar a qualidade das imagens sob critérios subjetivos ao sistema visual humano, tornando mais fácil a percepção de informações contidas nas imagens.
- O intervalo de contraste é a diferença entre os valores de intensidade máximo e mínimo que  $f(x,y)$  pode assumir.
- Quando uma imagem não ocupa todo o intervalo de cinza possível, pode-se ampliar o intervalo de contraste.

# Transformações de contraste

- ▶ Isso pode ser feito utilizando um mapeamento das variações de contraste dentro do intervalo de níveis de cinza  $[g_{min}, g_{max}]$  da imagem original para a variação máxima do dispositivo de visualização (geralmente entre 0 e 255).
- ▶ Essa transformação é realizada por uma função de mapeamento, tal que cada valor de cinza na imagem original seja mapeado para um novo valor de cinza.

# Compressão/Expansão de Histograma

- ◆ Compressão de histograma: produz uma diminuição do contraste mapeando o intervalo de intensidades  $[f_{min}, f_{max}]$  da imagem para o intervalo  $[g_{min}, g_{max}]$ :

$$g(i, j) = \left[ \frac{g_{\max} - g_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \right] [ f(i, j) - f_{\min} ] + g_{\min} \quad (1)$$

sendo  $f(i, j)$  o nível de cinza da imagem  $f$  de entrada.

# Compressão/Expansão de Histograma (cont.)

- É interessante notar que o valor da fração  $a$  (abaixo) representa se o intervalos de cinza será expandido ou comprimido. Se  $a=1$ , o intervalo permanece o mesmo, deslocando apenas os níveis de cinza, dependendo de  $f_{min}$  e  $g_{min}$ . Se  $a>1$ , o intervalo é expandido; se  $a<1$ , é comprimido.

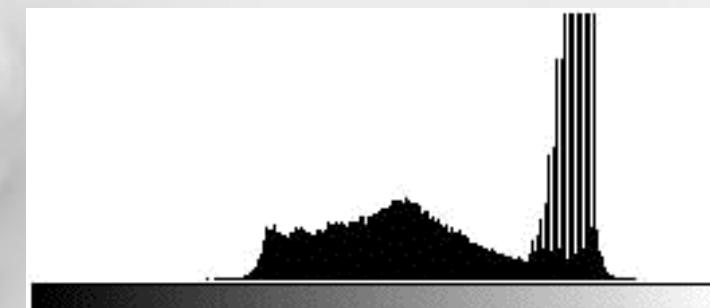
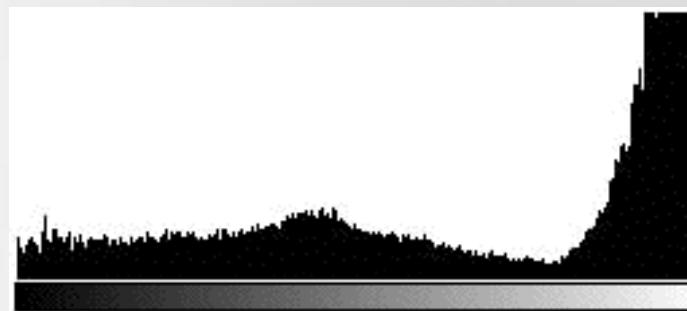
$$a = \frac{g_{\max} - g_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}$$

## Exemplo

imagem original



imagem com histograma comprimido

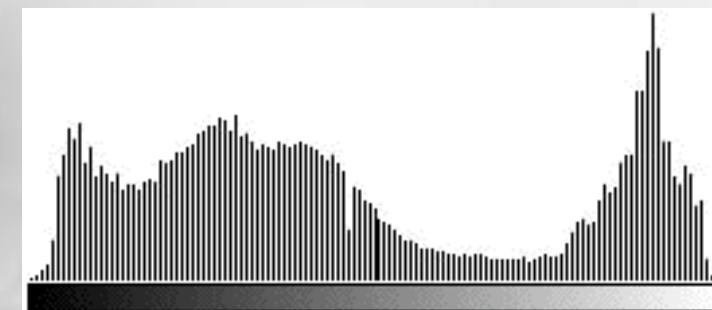
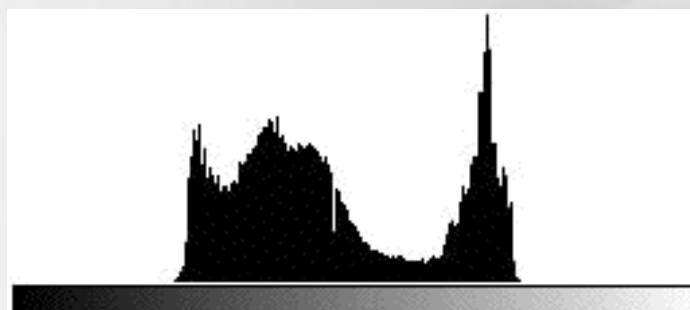


# Exemplo

imagem original



imagem com histograma expandido



# Deslocamento de Histograma

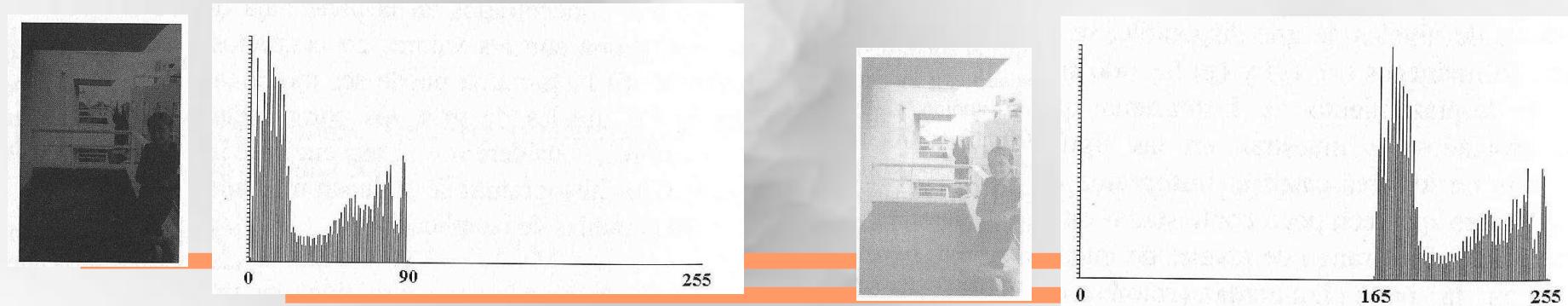
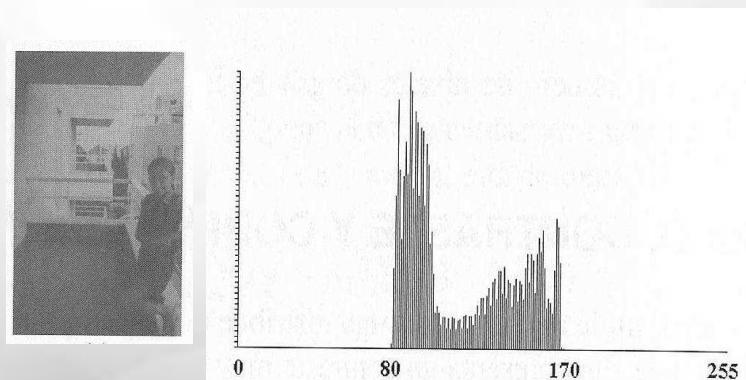
- É usado para clarear ou escurecer uma imagem, mas mantém a relação entre os valores dos níveis de cinza.
- É realizada por uma simples adição ou subtração de um número fixo a todos os valores de nível de cinza.

$$g(i,j) = f(i,j) + DES$$

sendo *DES* o valor do deslocamento.

# Deslocamento de Histograma (cont.)

- Assumimos que os valores que ultrapassarem o máximo e o mínimo são arredondados para o máximo e mínimo permitidos.

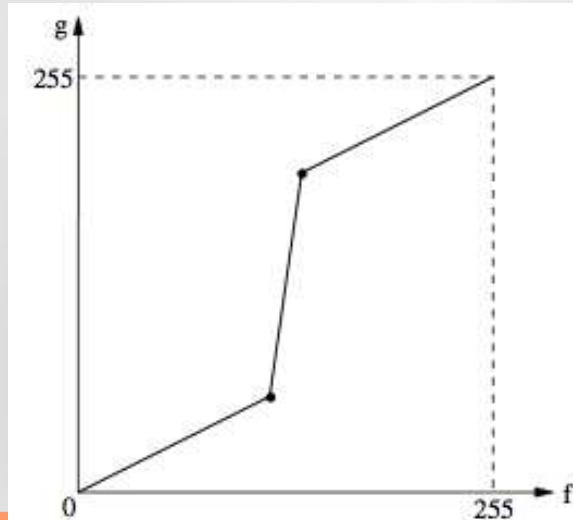


# Transformação Linear por Partes

- Muito útil, esta transformação é caracterizada pela existência de um conjunto de intervalos lineares.
- O realce na imagem é realizado de acordo com as intensidades dos pixels que se situam em intervalos específicos.
- Quando a imagem a ser transformada apresenta histograma muito irregular ou quando o objetivo é salientar um aspecto específico da imagem, essa técnica pode oferecer melhores resultados que uma única transformação linear.

# Transformação Linear por Partes (cont.)

- ◆ A figura (a) mostra um exemplo de transformação linear por partes.
- ◆ A figura (c) apresenta o resultado da alteração da escala de cinza da imagem original, mostrada em (b), obtido pela transformação linear por partes.



(a) transformação linear por partes



(b) imagem original



(c) imagem transformada

# Transformação Não-Linear

- Funções de mapeamento não-lineares também podem ser utilizadas para realçar detalhes específicos na imagem.
- Enquanto em uma transformação linear o parâmetro  $a$  da equação 1 é fixo, em uma transformação não-linear este parâmetro pode variar.
- As principais transformações de contraste não-lineares são baseadas nas funções:
  - Logaritmo;
  - Raiz quadrada;
  - Exponencial;
  - Quadrado.

# Transformação Não-Linear (cont.)

- ◆ A transformação pelo **logaritmo** substitui cada valor de pixel da imagem pelo seu logaritmo.
- ◆ Essa transformação **propicia um realce maior nos pixels de baixa intensidade**, ou seja, regiões escuras da imagem.
- ◆ Muitas implementações utilizam o logaritmo base 10 ou natural, embora a base não influencie o comportamento da curva, apenas a escala dos valores resultantes.

## Transformação Não-Linear (cont.)

- ◆ Uma vez que a função logaritmo não é definida para o valor 0, o qual pode estar presente na imagem, a transformação é descrita pela função:

$$g = T(f) = c \log(f + 1),$$

em que  $c$  é um fator de ajuste para manter os valores de intensidade resultantes dentro do intervalo válido (tipicamente  $[0, 255]$ ).

- ◆ Supondo que  $f_{max}$  seja a maior intensidade presente na imagem, o parâmetro  $c$  para a função logaritmo poderia ser calculado por:

$$c = 255 / \log(1 + f_{max}).$$

# Transformação Não-Linear (cont.)

- ◆ A transformação **exponencial** substitui cada valor de pixel da imagem pelo seu exponencial.
- ◆ Essa transformação **propicia um realce maior nos pixels de alta intensidade**, ou seja, regiões claras da imagem.
- ◆ Uma vez que os pixels da imagem de entrada podem assumir o valor 0, a transformação é descrita pela função  $g = T(f) = c(e^f - 1)$ , para evitar que o valor resultante seja deslocado pelo parâmetro  $c$ .

# Transformação Não-Linear (cont.)

- ◆ A transformação **quadrado** é descrita pela função:

$$g = T(f) = cf^2.$$

- ◆ Semelhante à função exponencial, a transformação quadrado **aumenta o contraste das regiões da imagem com média e alta intensidades.**

# Transformação Não-Linear (cont.)

- ◆ A transformação pela **raiz quadrada** é descrita pela função:

$$g = T(f) = a\sqrt{f}$$

- ◆ Semelhante à função logaritmo, a transformação raiz quadrada **aumenta o contraste das regiões da imagem com baixa e média intensidades.**

# Transformação Não-Linear (cont.)

► Exemplos de resultados da aplicação de um conjunto de transformações não-lineares a uma imagem de entrada.



(a) imagem ori-  
ginal



(b) logaritmo



(c) raiz qua-  
drada



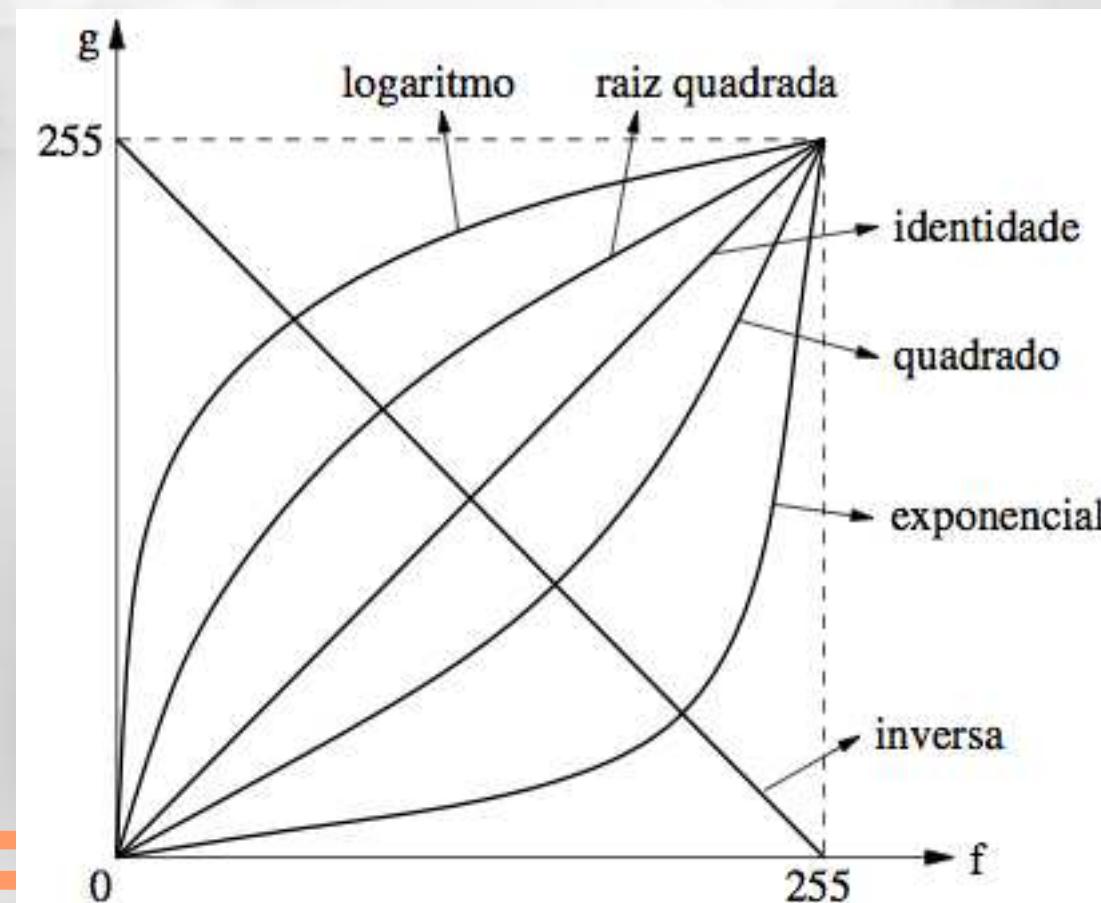
(d) exponencial



(e) quadrado

# Transformação Lineares e Não-Linear

Ilustração das principais transformações lineares e não-lineares da escala de cinza:



# Equalização de Histograma

- ◆ A escolha adequada de uma transformação da escala de cinza é, em geral, essencialmente empírica.
- ◆ Há uma classe de métodos em que a transformação tem por finalidade produzir uma imagem cujo histograma tenha um formato desejado.
- ◆ Um desses métodos é a **equalização de histograma**: modifica o histograma da imagem original de tal forma que a imagem transformada tenha um **histograma mais uniforme**, ou seja, todos os níveis de cinza devem aparecer na imagem com aproximadamente a **mesma frequência**.

# *Equalização de Histograma (cont.)*

- O resultado de uma equalização é o aumento do contraste e, consequentemente, melhora de qualidade na imagem fazendo com que os objetos apareçam com maior nitidez.

# Equalização de Histograma (cont.)

- ▶ Cálculo dos novos níveis de cinza:

$$F(g) = N_g \sum_{i=0}^g p(i)$$

sendo  $F(g)$  o nível de cinza resultante;  $N_g$  nível de cinza atual,  $g$  um nível de cinza e  $p(g)$  a probabilidade do nível de cinza  $g$  na imagem original calculado como mostrado abaixo:

$$p(g) = \frac{n(g)}{NxM}$$

$n(g)$  é a quantidade de vezes que  $g$  aparece na imagem e  $NxM$  é o tamanho da imagem. Note que o **somatório** que aparece na fórmula indica **probabilidade acumulada**.

# *Equalização de Histograma (cont.)*

Exemplo de imagem com equalização uniforme



# *Equalização de Histograma (cont.)*

- A equalização de histograma possui a vantagem de ser completamente automática com relação às técnicas manuais de alteração de contraste.
- Entretanto, há situações nas quais a equalização de histograma pode degradar uma imagem: um exemplo é quando a imagem a ser transformada possui um histograma com grande concentração de pixels em poucos níveis de cinza.

# Exercício 1

► Calcule a equalização da seguinte matriz:

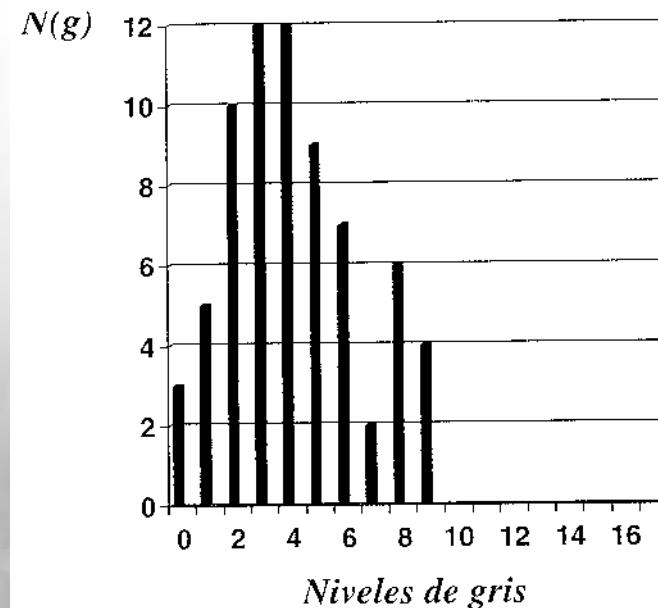
$$\begin{bmatrix} 0 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 1 & 4 & 4 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 4 & 5 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 7 & 6 & 6 \\ 2 & 2 & 7 & 7 & 6 & 6 \\ 8 & 2 & 7 & 7 & 9 & 9 \end{bmatrix}$$

## Exercício 2

- Refaça a equalização anterior estendendo a variação de níveis de cinza para 20 níveis ao invés de 10 e veja como fica o histograma.

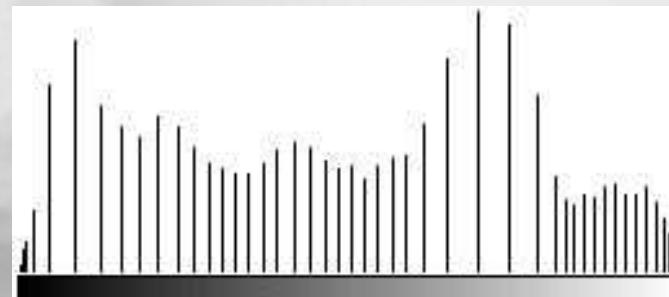
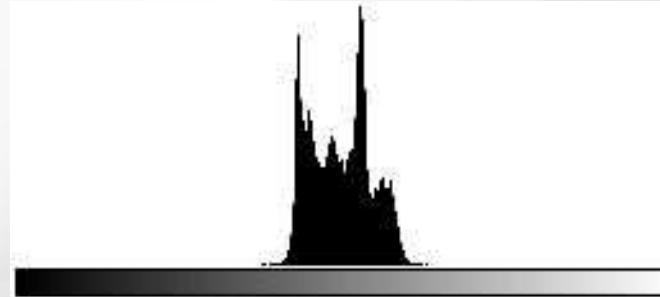
## **Exercício 3**

- O histograma abaixo possui 9 níveis de cinza. Faça a equalização deste histograma (considere que a imagem final terá 16 níveis de cinza).



# **Equalização de Histograma (cont.)**

- Exemplo de aplicação da equalização uniforme de histograma para aumentar o contraste de uma imagem com 256 tons de cinza.



# Equalização de Histograma (cont.)

- ▶ Podemos ter também vários outros tipos de equalização, além da uniforme, como por exemplo, a equalização exponencial, de Rayleigh, hipercúbica, entre outras.
- ▶ Em resumo, considerando valores de intensidade máximos e mínimos,  $g_{max}$  e  $g_{min}$  respectivamente, e  $P_g(g)$  a probabilidade acumulada de  $g$  calculada como ( $p(i)$  é a probabilidade de  $i$ )  $P_g(g) = \sum_{i=0}^g p(i)$  , podemos escrever as equações de equalizações como mostrado nos próximos slides.

# **Equalização de Histograma (cont.)**

- Função de distribuição de probabilidade uniforme

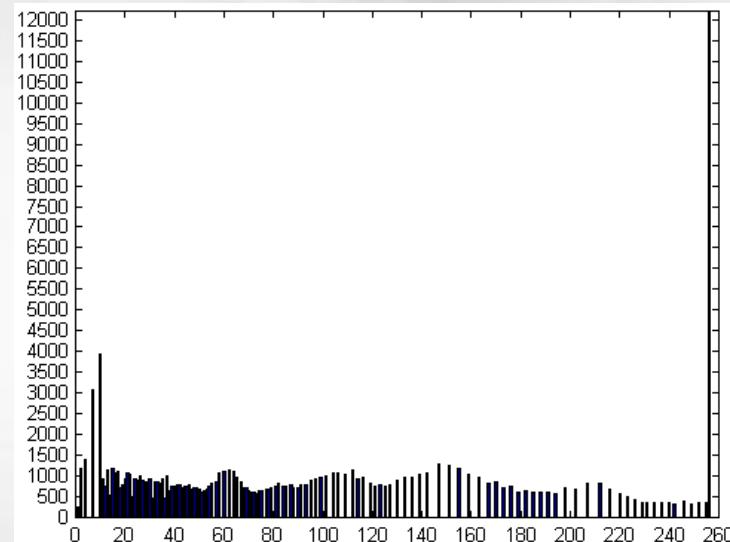
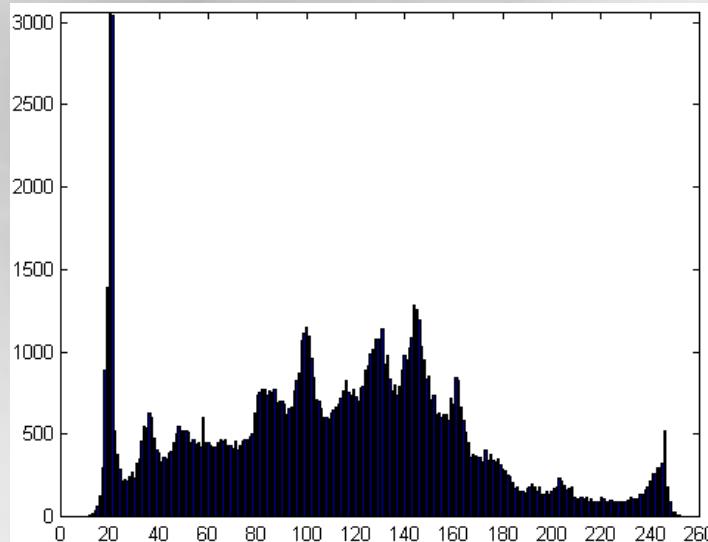
$$F(g) = [g_{\max} - g_{\min}]P_g(g) + g_{\min}$$

- Função de distribuição de probabilidade exponencial

$$F(g) = g_{\min} - \frac{1}{\alpha} \ln[1 - P_g(g)]$$

quanto maior for  $\alpha$ , menor será o valor dos pixels mais frequentes do histograma na imagem resultante. Para  $P_g(g)=1$ , assumimos que  $F(g)=g_{\max}$ , para evitar indeterminação.

## Exemplo de equalização exponencial ( $\alpha=0.009$ )



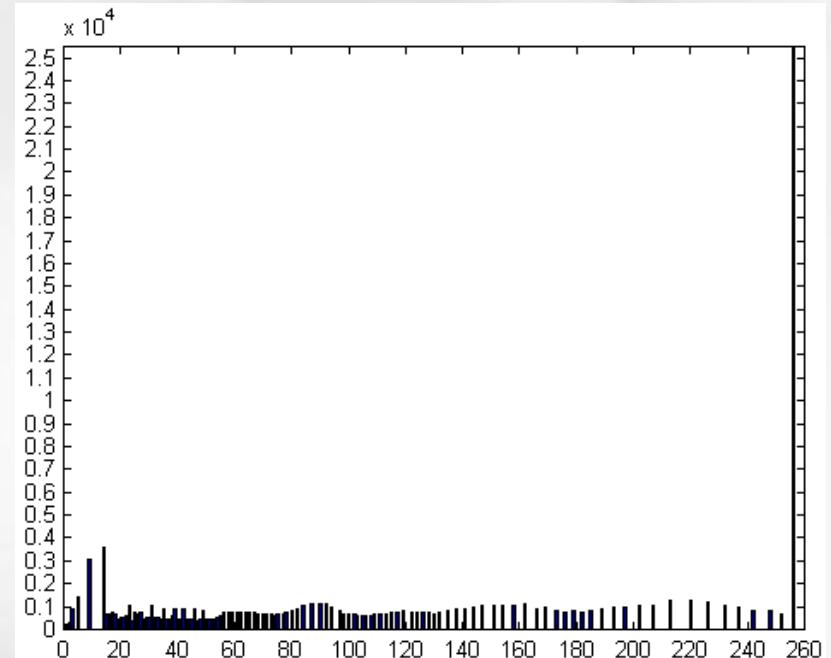
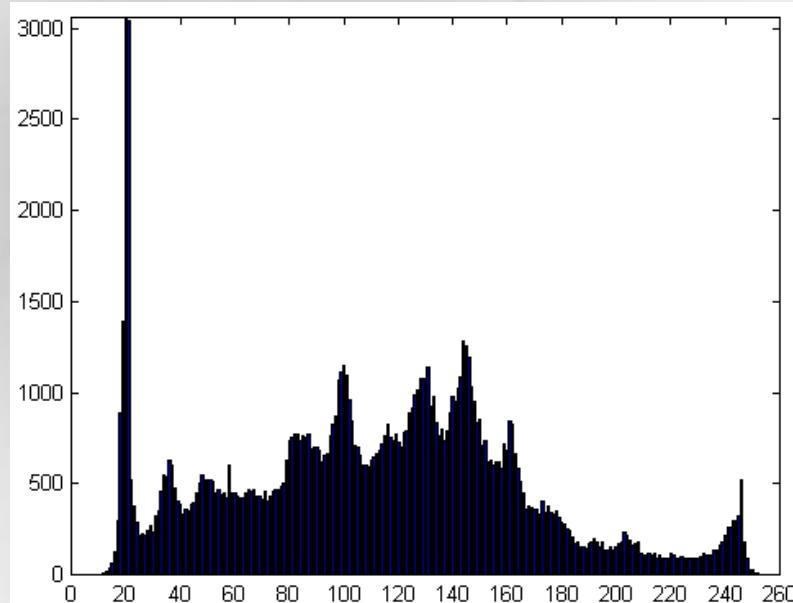
# Equalização de Histograma (cont.)

- Função de distribuição de Rayleigh

$$F(g) = g_{\min} + \left[ 2\alpha^2 \ln \left\{ \frac{1}{1-P_g(g)} \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

quanto maior for  $\alpha$ , maior será o valor dos *pixels* mais frequentes do histograma na imagem resultante.

## *Exemplo de equalização hipercúbica Rayleigh ( $\alpha=9$ )*

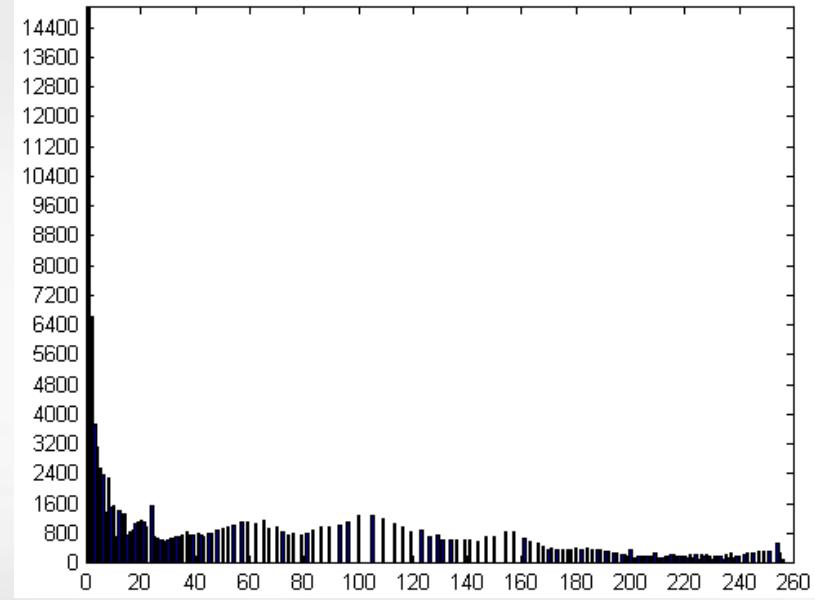
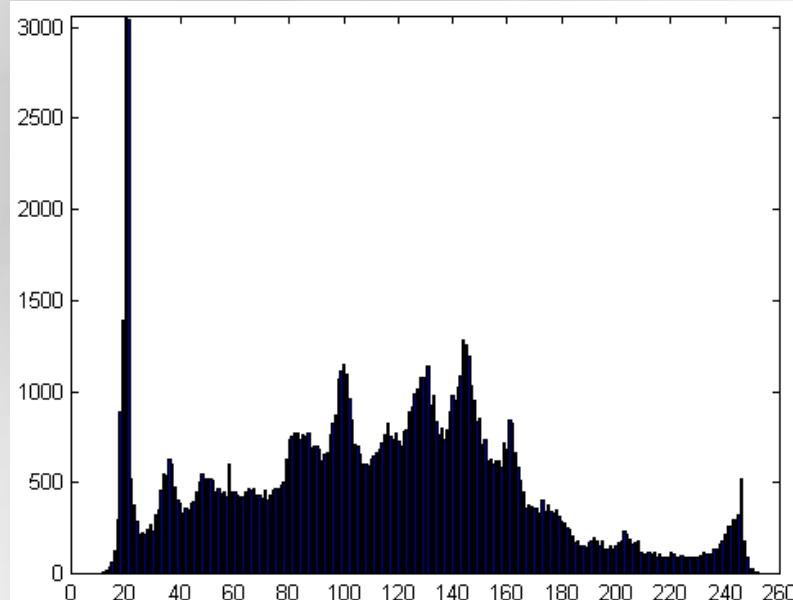


# *Equalização de Histograma (cont.)*

- Função de distribuição hipercúbica

$$F(g) = \left( \sqrt[3]{g_{\max}} - \sqrt[3]{g_{\min}} \right] P_g(g) + \sqrt[3]{g_{\min}} \right)^3$$

## *Exemplo de equalização hipercúbica*



# Equalização de Histograma (cont.)

- As técnicas de obtenção e equalização de histogramas também podem ser aplicadas a trechos de imagens, por exemplo, janelas  $n \times m$ .
- Estas técnicas locais servem principalmente para realçar detalhes sutis de pequenas porções da imagem.

# *Equalização de Histograma (cont.)*

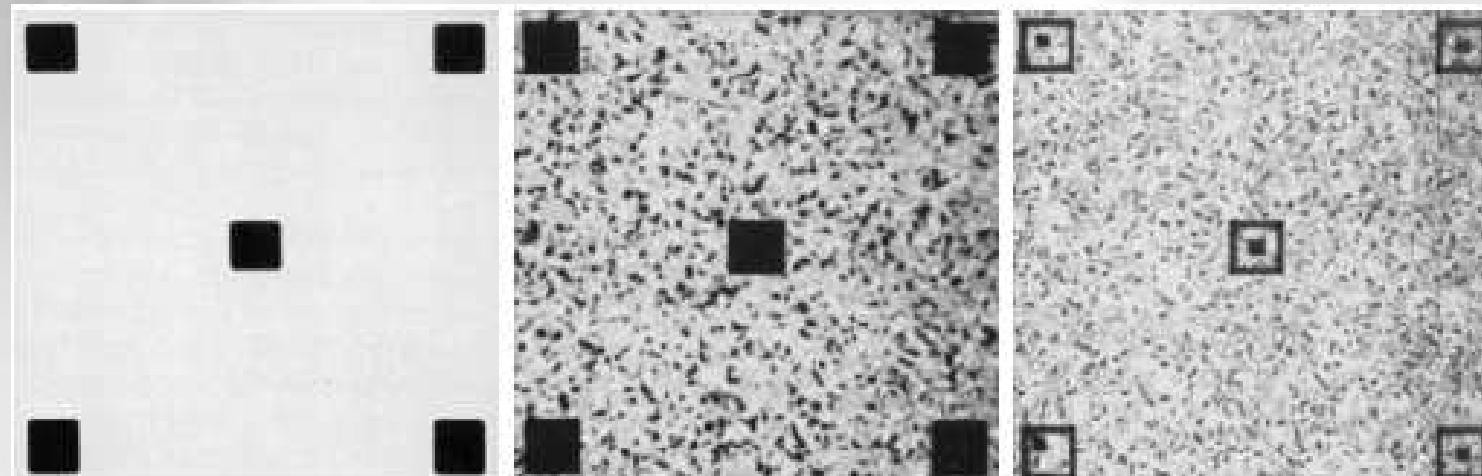
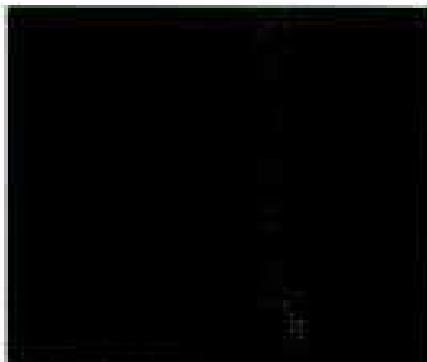


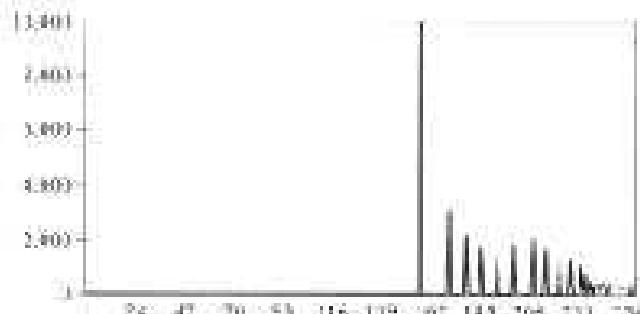
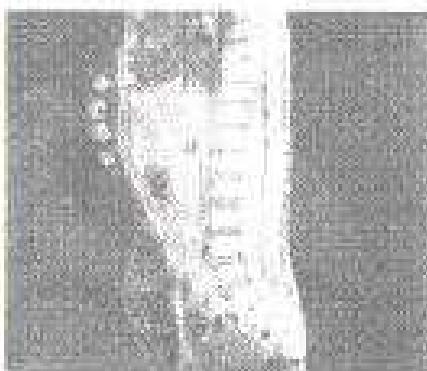
imagem original; imagem resultante da equalização global de histograma; imagem resultante da equalização local de histograma usando vizinhança de 7x7 centrada em cada pixel.

# *Equalização de Histograma (cont.)*

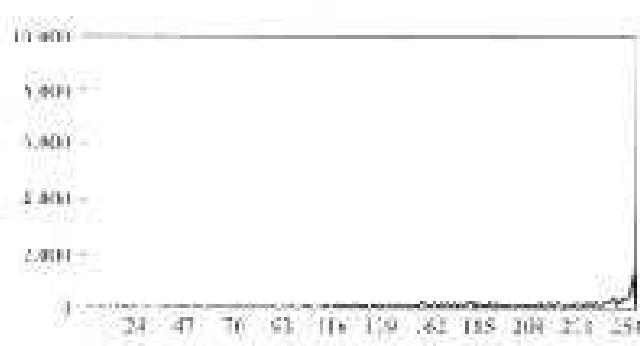
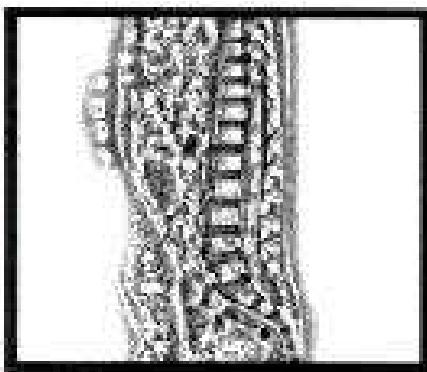
- Em muitos casos a equalização é importante para revelar uma imagem que está escondida, como por exemplo, uma imagem em que só enxergamos preto e que depois de equalizada, conseguimos revelar a imagem que existe nela.



(a)



(b)



(c)

# Exercício

- ◆ Considere a imagem a seguir, representada por uma matriz  $7 \times 7$ , em que cada elemento da matriz corresponde ao nível de cinza normalizado do pixel correspondente, sendo 0 = preto, 1 = branco.

0	3/7	2/7	2/7	1/7	1/7	4/7
3/7	2/7	1/7	1/7	1/7	1/7	4/7
2/7	0	1	1/7	3/7	0	0
0	5/7	1/7	0	6/7	0	1/7
1/7	1/7	1/7	3/7	6/7	6/7	5/7
1/7	1/7	1/7	1/7	5/7	6/7	4/7
0	1	0	0	0	0	4/7

- Calcular as probabilidades de cada nível de cinza e mostrar seu histograma.
- Na imagem original predominam pixels claros ou escuros?
- Equalizar o histograma calculado utilizando a função de distribuição de probabilidade acumulada, informando os novos valores e mostrando o histograma resultante (equalizado).

# Referências

## ◆ Slides:

- Prof. Fabio Faria (UNIESP)

## ◆ Livros:

- **Pedrini, H.; Schwartz, W.R. Análise de Imagens Digitais, Thomson, 2008.**
- Marque Filho, Ogê; Vieira Neto, Hugo. Processamento Digital de Imagens, Brasport, 1999.]
- Gonzalez, R. C.; Woods, R. E. Processamento de Imagens Digitais, Blücher, 2000.