

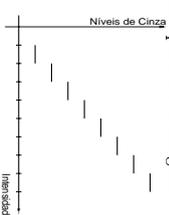
$k$  subintervalos e associar a cada subintervalo  $k$ -ésimo nível de cinza. Um dos problemas que surgem durante a quantização é o aparecimento de **bordas falsas** ou **contornos falsos** por falta de níveis de cinza para produzir *dégradé* com variações bem suaves.

(Ver Fig. 2.10 do livro-texto de Gonzalez, Figs. 13.2 – 13.4 do livro-texto de Foley.)

Os efeitos perceptuais do contorno falso decorrente da quantização podem ser amenizados por quatro classes de técnicas no domínio espacial: particionamento orientado a **histograma**, ou seja de acordo com a ocorrência das luminâncias na imagem; uso de técnicas de aproximação do meio-ton; uso de técnicas de meio-ton digital ou *dithering*; e uso de técnicas de difusão de erro.

## 8.1 Particionamento em Subintervalos

Uma forma mais simples e intuitiva para particionar o intervalo real  $I = [a, b]$  de luminância em  $k$  subintervalos é utilizar a razão  $\Delta I = \frac{I}{k}$ , de forma que  $I = [a, a + \Delta I] \cup [a + \Delta I, a + 2\Delta I] \cup \dots \cup [a + (i-1)\Delta I, a + i\Delta I] \cup \dots \cup [a + (k-1)\Delta I, a + k\Delta I] = b$ . Este tipo de particionamento é conhecido como **uniforme**. Entretanto, dependendo da distribuição de frequências das luminâncias, podemos ter um ou mais subintervalos de luminância associados a níveis de cinza que não aparecem na imagem.



Para um uso mais eficiente da quantidade de *bits* suportada pelo dispositivo de exibição para cada *pixel*, podemos fazer um particionamento em subintervalos não uniformes de forma que todos os subintervalos contenham algumas luminâncias da imagem original e fazer uma transformação não-linear entre as luminâncias da imagem original e os níveis de cinza a serem utilizados para exibi-la.

A seleção dos limites de cada subintervalo pode ser feita de forma **orientada a histogramas**. Quando o histograma apresenta um número finito de luminâncias comparável com o número de *bits* por *pixel* suportado, a seleção é relativamente simples. Basta associar a cada grupo um nível de cinza monotonicamente.

## Capítulo 8

# Quantização

As luminâncias ou brilhoâncias associadas a uma amostra de tamanho  $NM$  de uma imagem contínua são em valores reais. Na prática, a exibição destes valores depende da capacidade de reprodução ou da resolução de cada dispositivo *master*. Usualmente, essa resolução depende da quantidade de *pixels NM* (**resolução espacial**) e do número de bits  $m = \log_2 k$  alocado para representar os valores da luminância. Vimos no Capítulo 7 que quando reduz a resolução espacial, aparece os efeitos de **serrilhamento**

(Ver Fig. 2.9 do livro-texto de Gonzalez.)

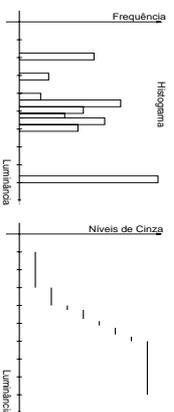
e neste capítulo nós nos ocuparemos com o problema da exibição de valores de luminância (**resolução radiométrica**).

A transformação de um intervalo real de valores para uma quantidade finita de valores é conhecida em sistemas gráficos como **quantização**. Se o nível de quantização for próximo da resolução visual humana ( $\approx 50$  níveis de cinza ou seja na escala de variação de preto para branco), poderemos reproduzir uma imagem equivalente à percebida pela nossa visão, sem nenhuma degradação perceptível.

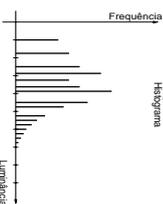
**Observação 8.1.** A *resolução radiométrica do olho humano varia com o indivíduo e com o comprimento de onda.*

**Observação 8.2.** Neste capítulo estaremos considerando somente imagens em tons de cinza (*resolução radiométrica*). As técnicas para imagens coloridas levam em consideração não só a resolução radiométrica como também a *resolução espectral*. Embora elas se baseiam nos mesmos princípios, os seus algoritmos são muito mais complexos e fogem do escopo desta disciplina.

O processo de quantização em  $k$  níveis de cinza consiste essencialmente em particionar o intervalo real de valores de luminância/brilhoância em



**Exercício 8.1** Dado um dispositivo de exibição que suporta 4 bits por pixel e o seguinte histograma de uma imagem



Quantize as intensidades existentes na imagem.

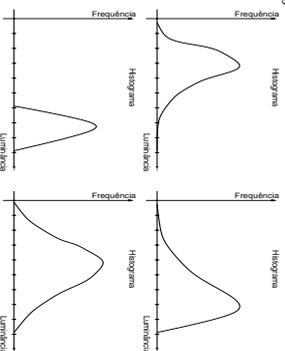
Na prática, a maioria das imagens não apresenta uma distribuição tão ideal, o que dificulta o processo de determinação dos limiares.

(Ver Fig. 4.13 do livro-texto de Gonzalez)

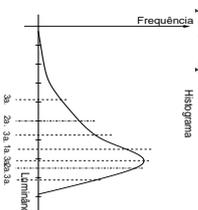
Em termos da configuração dos histogramas, existem essencialmente quatro tipos básicos de imagens: os níveis de cinza concentrados em direção à extremidade escura (esquerda) ou concentrados em direção à extremidade clara (direita), concentrados numa faixa muito estreita ou numa faixa muito larga.

(Ver Fig. 4.10 do livro-texto de Gonzalez)

**Exercício 8.2** Classifique as imagens quanto à clareza e ao redce a partir dos seus histogramas



Há procedimentos que ajudam na detecção dos limiares para cada subintervalo de valores de luminância com base na distribuição das frequências das luminâncias. Uma técnica iterativa é subdividir recursivamente os subintervalos pela mediana até que o número de subintervalos seja igual à quantidade de bits por pixel suportada.



**Exercício 8.3** Seja uma imagem de 32 níveis de cinza:

31	31	10	29	13	6	6	4	4
10	16	15	12	12	5	24	11	11
10	16	14	0	0	0	0	8	10
9	24	0	0	0	0	8	8	10
13	5	0	0	0	0	8	8	21
28	24	24	24	24	21	21	21	21

e um dispositivo que suporta 2 bits por pixel. Quantize a imagem pelo método mediano.

## 8.2 Aproximação do Meio-Tom

A técnica de meio-tom (*half-toning*) é uma técnica tradicionalmente utilizada para impressão de jornais, revistas e livros com apenas dois tons: preto e branco. A técnica consiste essencialmente em utilizar pontos pretos de tamanhos variados sobre o fundo branco de tal sorte que, quando olhados a uma certa distância, dão a sensação de vários níveis de tons de cinza. Nos jornais a densidade dos pontos varia de 80 a 80 pontos por polegada e na impressão de revistas e livros de qualidade melhor, é comum encontrar densidade entre 110 a 200 pontos por polegada.

(Ver Fig. 13.7 do livro-texto de Foley)

O processo de meio-tom analógico é obtido utilizando-se uma câmara fotográfica especial. A imagem é refotografada num filme de alto contraste sobrepondo a ela uma tela reticulada, de forma que o filme só é sensibilizada nos pontos correspondentes aos nós do reticulado. Cada nó do reticulado,

por sua vez, atua como uma lente que focaliza a luz proveniente da imagem. Assim, (o tamanho d) a área a ser sensibilizada depende do valor da luminância recebida.

Os dispositivos utilizados para exibição de imagens digitais só conseguem, de modo geral, produzir pontos de mesmo tamanho, como os *pixels* dos monitores CRT e os pontos de uma impressora matricial. Uma solução adotada é simular o método de meio-tom através da **aglomeração de pixels** (*clustered-dots* em diferentes padrões de níveis de cinza. Um grupo de  $n \times n$  *pixels* consegue emular  $n^2 + 1$  níveis de cinza. Por exemplo, um aglomerado de  $2 \times 2$  e  $3 \times 3$  *pixels* consegue emular 5 e 10 níveis de cinza, respectivamente. Observe que há um compromisso entre a resolução espacial e a resolução radionétrica a ser emulada, uma vez que a sensação de diferentes tons se deve a diferentes relações entre áreas escuras e áreas brancas.

(Ver Fig. 13.8 e 13.10 do livro-texto de Foley)

Certamente, para  $n \times n$  *pixels* há uma grande variedade na forma de aglomerar estes *pixels* para formar os  $n^2 + 1$  padrões de cinza. Algumas regras típic para dispor estes *pixels* num padrão são:

1. não devem produzir artefatos visuais numa área grande de mesma intensidade; (Ver Fig. 13.11 do livro-texto de Foley)
2. o aglomerado dos *pixels* deve formar uma sequência monotônica crescente. Um *pixel* que fizer parte de um nível de cinza  $i$ , faz parte dos níveis maiores que  $i$ ;
3. o aglomerado dos *pixels* deve crescer do centro para fora para dar impressão de pontos de tamanhos variáveis; e (Ver Fig. 13.12 do livro-texto de Foley)
4. os *pixels* escuros ficam adjacentes.

Por eficiência, uma proposta para quantização de uma imagem de níveis de cinza numa imagem binária (de meio-tom) é utilizar **matrizes de dither** (*dither matrix*), cujos elementos são distintos lineares de quantização. Estas matrizes são também conhecidas como **máscaras de padrão**. Os efeitos da quantização é fortemente dependente da distribuição destes lineares. O procedimento de quantização em si consiste simplesmente em correr a máscara sobre a imagem original, **ordenando** bloco a bloco, e comparar o valor de cada elemento da máscara com o valor do *pixel* sobreposto. A partir do

resultado da comparação (maior ou igual, menor), atribui-se ao *pixel* um dos dois tons.

(Ver Eq. 13.11 do livro-texto de Foley)

O número inteiro  $i$  na matriz de *dither* indica o  $i$ -ésimo linear de luminância no intervalo real de luminância. Os lineares podem ser igualmente espaçados ou com espaçamentos diferenciados, conforme explicado na seção 8.1.

**Exercício 8.4** Considere a imagem do Exercício 8.3 e que o dispositivo suporta 1 bit por *pixel*.

1. Utilize o método de meio-tom para determinar os 9 lineares de quantização.
2. Obter uma nova imagem quantizada em “9 níveis de cinza” com uso da seguinte matriz de *dither*

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

**Observação 8.3** Nas referências de Computação Gráfica e Processamento de Imagens é comum referir a técnica de aproximação do meio-tom por *dithering ordenado com aglomeração* (*clustered-dot ordered dither*).

**Exercício 8.5** A seguinte matriz de *dither* pode gerar textura decorrente dos padrões de meios-tons em regiões de luminância constante:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 & 7 \\ 8 & 9 & 10 & 11 \\ 12 & 13 & 14 & 15 \end{bmatrix}$$

Por quê?

**Observação 8.4** A aproximação do meio-tom é uma técnica que aumenta a resolução multidimensional através da redução da resolução espacial.

### 8.3 Dithering

A aglomeração dos *pixels* é importante para dispositivos que não conseguem exibir pontos isolados, como impressoras *laser*. No caso dos monitores CRT que conseguem exibir os *pixels* isoladamente, os *pixels* “escuros” não precisam estar adjacentes para produzir uma dada percepção de tom de cinza. Quando se aproxima o método de meio-tom por conjunto de *pixels* escuros não necessariamente adjacentes, dizemos então, que a aproximação é por **dispensão de pixels**.

A eliminação da restrição dos *pixels* escuros ficarem adjacentes permite dar à imagem uma aparência com maiores variações nos níveis de cinza. Bayer mostrou que uma dispensão feita de forma que a distribuição de *pixels* escuros correspondente a cada nível de cinza ser mais uniforme possível minimize a visibilidade dos padrões de meios tons em regiões da imagem com luminosidade constante. Ele estabeleceu ainda condições necessárias e suficientes para construir matrizes de *dither* que facilitem a implementação da sua técnica de quantização. Com isso, podemos aumentar a resolução radiométrica sem reduzir a resolução espacial. As matrizes são conhecidas como **matrizes de Bayer**.

A matriz de Bayer de ordem 2 é dada por

$$D^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrizes de Bayer de ordem maior podem ser obtidas de forma recorrente usando a relação

$$D^{(n)} = \begin{bmatrix} 4D^{(n/2)} + D_{00}^{(2)}T^{n/2} & 4D^{(n/2)} + D_{01}^{(2)}T^{n/2} \\ 4D^{(n/2)} + D_{10}^{(2)}T^{n/2} & 4D^{(n/2)} + D_{11}^{(2)}T^{n/2} \end{bmatrix},$$

com

$$T^{(n)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

**Exercício 8.6** Derive a matriz de Bayer de ordem 3 e 4.

**Exercício 8.7** Escreva um algoritmo que quantiza uma imagem com uso de matrizes de Bayer de ordem 4, supondo que os 16 binários sejam argumentos de entrada da função.

**Exercício 8.8** Quantize a imagem do Exercício 8.3 em “4 níveis de cinza” e “9 níveis de cinza” para um dispositivo monocromático (1 bit por pixel) utilizando, respectivamente, as matrizes de Bayer de ordem 2 e de ordem 3.

**Observação 8.5** A seguinte matriz de *dither* é conhecida como quadrado mágico pelo fato de que as somas dos elementos das colunas, das linhas e das diagonais são todas iguais a 34

$$\begin{bmatrix} 0 & 6 & 9 & 15 \\ 11 & 13 & 2 & 4 \\ 7 & 1 & 14 & 8 \\ 12 & 10 & 5 & 3 \end{bmatrix}$$

O efeito é ter uma distribuição uniforme de pixels escuros em todas as direções.

### 8.4 Difusão de Erro

Diferentemente das técnicas de *dithering*, que por definição incluem erros de aproximação em cada *pixel*, as técnicas por difusão de erro propagam tais erros para os *pixels* adjacentes procurando balanceá-los. Mais precisamente, é aproximado o valor de um *pixel* (incluindo os erros herdados) por um limiar de luminosidade mais próximo possível e o erro de aproximação é propagado para os *pixels* vizinhos. As técnicas existentes na literatura diferem na distribuição deste erro de aproximação.

(Ver Fig. 13.14 do livro-texto de Foley)

A técnica mais clássica é a proposta por Floyd e Steinberg que utiliza a seguinte matriz de distribuição

$$P_{\text{eso}} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7 \\ 3 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

sempre centrada no *pixel* em processamento. Esta matriz de distribuição nos indica que será distribuído

- $\frac{7}{16} \sum_i \sum_j P_{\text{eso},i,j}$  do erro de aproximação para o *pixel* do lado direito;
- $\frac{5}{16} \sum_i \sum_j P_{\text{eso},i,j}$  do erro de aproximação para o *pixel* imediatamente abaixo;
- $\frac{3}{16} \sum_i \sum_j P_{\text{eso},i,j}$  do erro de aproximação para o *pixel* abaixo, em diagonal no lado esquerdo; e

- $\frac{1}{16} \sum_i \sum_j P_{eso_{ij}}$  do erro de aproximação para o pixel abaixo, em diagonal no lado direito.

**Exercício 8.9** Quantize a imagem do Exercício 8.3 com uso da técnica de Floyd-Steinberg, distribuindo os erros na seguinte forma:

- $\frac{1}{16}$  para o pixel do lado direito,
- $\frac{3}{16}$  para o pixel abaixo em diagonal para esquerda,
- $\frac{5}{16}$  para o pixel abaixo e
- $\frac{1}{16}$  para o pixel abaixo em diagonal para direita.

Inicie o procedimento de cima para baixo e de esquerda para direita. Se invertermos a ordem, o resultado pode ser alterado?

**Observação 8.6** O algoritmo de Floyd-Steinberg foi desenvolvido originalmente para imagens de meio-ton, mas se adapta facilmente para imagens a cores. Uma boa referência é *Graphics Gems volume II*, editado por James Arvo.

Outras duas matrizes de distribuição de erro encontradas na literatura são

$$P_{eso} = \frac{1}{48} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7 & 5 \\ 3 & 5 & 7 & 5 & 3 \\ 1 & 3 & 5 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_{eso} = \frac{1}{42} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 4 \\ 2 & 4 & 8 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$