

1. INTRODUÇÃO

A função primordial do processamento digital de imagens de sensoriamento remoto é a de fornecer ferramentas para **facilitar a identificação e a extração da informação** contidas nas imagens, para posterior interpretação. Nesse sentido, sistemas dedicados de computação são utilizados para atividades interativas de análise e manipulação das imagens brutas. O resultado desse processo é a produção de outras imagens, estas já contendo informações específicas, extraídas e realçadas a partir das imagens brutas.

A informação de interesse é caracterizada em função das propriedades dos objetos ou padrões que compõem a imagem. Portanto, extrair informação de imagens envolve o reconhecimento de objetos ou padrões. A maior parte dessa atividade requer grande capacidade de cognição por parte do intérprete, devido à complexidade dos processos envolvidos e à falta de algoritmos computacionais precisos o bastante para realizá-lo de forma automática.

O sistema visual humano possui uma notável capacidade de reconhecer padrões. Contudo, ele dificilmente é capaz de processar o enorme volume de informação presente numa imagem. Vários tipos de degradações e distorções, inerentes aos processos de aquisição, transmissão e visualização de imagens, contribuem para limitar ainda mais essa capacidade do olho humano. **O objetivo principal do processamento de imagens é o de remover essas barreiras, inerentes ao sistema visual humano, facilitando a extração de informações a partir de imagens.** Nesse contexto, o processamento digital deve ser encarado como um estágio preparatório, embora quase sempre obrigatório, da atividade de interpretação das imagens de sensoriamento remoto.

Operações de processamento de imagens podem ser implementadas por métodos ópticos, fotográficos e digitais. A precisão e a flexibilidade de sistemas de computação tornaram os métodos digitais os mais eficazes. Além disso, a enorme evolução ocorrida no campo da computação gráfica, a partir da qual nasceu o processamento de imagens, aliada à queda experimentada nos últimos anos pelos custos de computadores e periféricos, tornaram os sistemas de processamento de imagens mais acessíveis. Calcula-se que os custos de aquisição de um sistema de processamento de imagens tenha caído da casa das centenas de milhares de dólares para a das dezenas, nos últimos 10 anos. A principal razão da queda é que o intensivo trabalho de computação exigido por esse tipo de processamento, que anteriormente requeria o uso de computadores de grande porte e custo (de

"mainframes" a mini-computadores), pode ser feito hoje em microcomputadores ou estações de trabalho ("workstations"). Estes têm um poder de processamento superior ao dos computadores de maior porte de poucos anos atrás, a um custo muito inferior. É possível encontrar sistemas de processamento de imagens com razoável grau de sofisticação baseados até mesmo em microcomputadores tipo PC, com custos de poucos milhares de dólares.

Um das consequências dessa queda nos custos foi uma grande disseminação de sistemas de processamento de imagens de sensoriamento remoto, ocorrida principalmente nos países desenvolvidos. Eles são hoje utilizados no ensino de alunos de escolas e universidades, em pequenas empresas de prestação de serviço, além dos tradicionais usuários de maior porte (empresas e órgãos estatais e grandes corporações privadas). Infelizmente essa ainda não é a situação encontrada no Brasil, onde as restrições à importação, a ausência de uma economia de escala e os investimentos insuficientes no setor de computação em geral, e no da computação gráfica em particular, tem freado essa tendência observada em outros países, de expansão no número de sistemas de processamento. Dessa forma, a maior utilização de produtos de sensoriamento remoto no Brasil ocorre ainda na forma de imagens impressas em papel fotográfico, o que não permite a utilização plena de toda a informação nelas contidas. Outra consequência dessa falta de disponibilidade de sistemas de processamento é a carência de recursos humanos capacitados nessa área.

A maioria das técnicas aqui abordadas podem ser usadas para o processamento de quaisquer tipos de imagens digitais, sejam elas fotografias de qualquer natureza, imagens médicas (raios-X, tomografia, ressonância magnética nuclear), fotomicrografias e mesmo dados geo-referenciados de qualquer natureza (topografia, geoquímica, geofísica, etc.). O único pré-requisito para que dados geo-referenciados sejam processados através das técnicas aqui tratadas é que eles sejam estruturados digitalmente em uma malha ou *grid* regular e quantificados geralmente em 6, 8 ou 12 bits, para efeito de visualização em monitores de vídeo.

Neste livro tratar-se-á apenas do processamento digital voltado especificamente para imagens geradas por sensores remotos. Estes incluem os sistemas que adquirem imagens da superfície terrestre a bordo de plataformas aéreas (aviões) ou orbitais (satélites). As imagens de sensores remotos possuem quase sempre uma característica que as diferencia de outras imagens digitais: o

fato de serem multiespectrais. Imagens multiespectrais são aquelas adquiridas em diferentes porções do espectro eletromagnético, geralmente variando da porção visível (VIS), passando pelo infravermelho próximo (NIR), médio (MWIR) e de comprimento de onda curto (SWIR), e chegando até o infravermelho termal (TIR) e microondas. Isso faz com que seja necessário o uso intensivo de técnicas de processamento baseadas em métodos estatísticos, principalmente no que diz respeito à estatística multi-variada. Contudo, nem todos os sensores remotos existentes produzam imagens multiespectrais, como por exemplo os sistemas de radar atualmente em operação ou o modo pancromático do SPOT/HRV.

2. CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

As imagens coletadas por sensores remotos possuem algumas características que as diferenciam de outras imagens digitais e que são essenciais para se entender os fundamentos do processamento digital. Entre essas características estão sua **estrutura** e sua **resolução**.

2.1 Estrutura das imagens de sensoriamento remoto

As imagens de sensoriamento remoto, por sua natureza digital ou discreta, são constituídas por um arranjo de elementos sob a forma de uma malha ou grid. Cada cela desse grid tem sua localização definida em um sistema de coordenadas do tipo "*linha e coluna*", representados por "**x**" e "**y**", respectivamente. Por convenção, a origem do grid é sempre no seu canto superior esquerdo. O nome dado a essas celas é **pixel**, derivado do inglês "*picture element*". Para um mesmo sensor remoto, cada pixel representa sempre uma área com as mesmas dimensões na superfície da Terra.

Cada cela possui também um atributo numérico "**z**", que indica o **nível de cinza** dessa cela, que obviamente vai variar do preto ao branco; esse nível de cinza é conhecido em inglês por **DN**, de "*digital number*". O DN de uma cela representa a intensidade da energia eletromagnética (refletida ou emitida) medida pelo sensor, para a área da superfície da Terra correspondente ao tamanho do pixel. Deve ser ressaltado que o DN de um pixel corresponde sempre à **média da intensidade da energia refletida ou emitida pelos diferentes materiais presentes nesse pixel**.

Uma imagem digital pode então ser vista como uma matriz, de dimensões **x** linhas por **y** colunas, com cada elemento possuindo um atributo **z** (nível de cinza). No caso das imagens de sensoriamento remoto, essas matrizes possuem dimensões de até alguns milhares de linhas e de colunas (o Landsat gera imagens de 6.550 x 6.550 elementos, o que significa mais de 42 milhões de pixels para cada banda!).

A Figura 2.1 exemplifica uma imagem bastante simples, composta apenas por áreas quase brancas e quase pretas, e sua respectiva matriz numérica, representando a forma pela qual essa imagem seria utilizada no processamento digital.

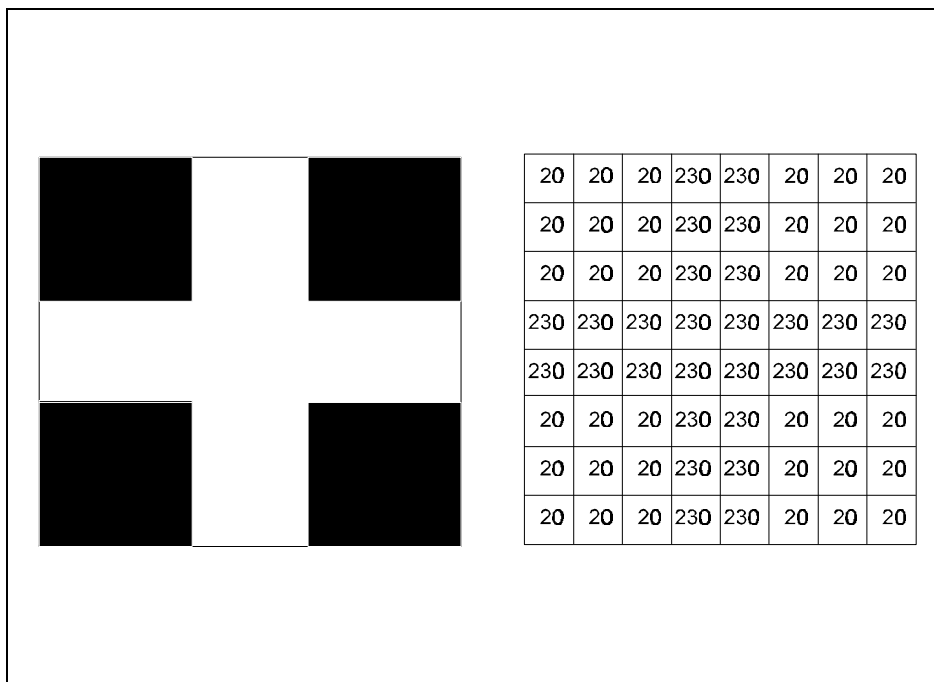


Figura 2.1 - Exemplo de uma imagem simples (cruz), mostrada à direita em sua forma digital, como uma matriz numérica. Nesta, cada célula ou "pixel" possui uma localização definida por linha e coluna e o valor de cinza correspondente, que varia de 0 (preto) a 255 (branco). O pixel da 1ª linha e 1ª coluna da imagem à esquerda tem um DN igual à 20 (quase preto), enquanto o pixel da 1ª linha e 4ª coluna possui um DN igual à 230 (quase branco).

Vale lembrar que qualquer imagem, mesmo não digital (como uma fotografia aérea, por exemplo), pode ser transformada em imagem digital através de um processo conhecido por **digitalização**. Esse processo é implementado através de um tipo de equipamento periférico denominado "*scanner*", que transforma uma imagem analógica (fotografias, mapas, etc.) em uma matriz com o número de linhas e colunas e o tamanho de cada célula pré-definidos, atribuindo para cada célula um valor de nível de cinza proporcional à tonalidade da imagem original. Essa matriz é então convertida para um formato digital gráfico, podendo ser lida e manipulada por sistemas de processamento digitais. Existem vários tipos de "*scanners*", desde simples modelos de mão, geralmente utilizados apenas para atividades de editoração eletrônica em microcomputadores, até sofisticados sistemas de cilindro rotatório com leitura a feixe de laser, apropriados para digitalização de mapas e fotos aéreas por evitarem distorções geométricas.

2.2 Resolução das imagens de sensoriamento remoto

O termo **resolução** em sensoriamento remoto se desdobra na verdade em três diferentes (e independentes) parâmetros: resolução **espacial**, resolução **espectral** e resolução **radiométrica**.

A resolução **espacial** é definida pela **capacidade do sistema sensor em "enxergar" objetos** na superfície terrestre; quando menor o objeto possível de ser visto, maior a resolução espacial. A maneira mais comum de se determinar a resolução espacial de um sensor é pelo seu **campo instantâneo de visada** ou IFOV. Este campo é determinado pelas propriedades geométricas do sistema sensor e define a área do terreno imageado que é "vista" pelo instrumento sensor de uma dada altitude e a um dado momento. O IFOV é medido pelas dimensões da área vista no terreno e, de uma forma simplificada, ele representa o tamanho do pixel (Figura 2.2). Deve ser mencionado que o IFOV, e conseqüentemente a resolução espacial, é um conceito teórico, visto que existem variações na altitude da órbita dos satélites que provocam mudanças no IFOV (mas não no tamanho do pixel, que é fixo e é determinado pelo intervalo de amostragem do sinal recebido pelo sensor).

A resolução **espectral** é um conceito inerente às imagens multiespectrais de sensoriamento remoto. Ela é definida pelo **número de bandas espectrais** de um sistema sensor e pela **largura do intervalo de comprimento de onda** coberto por cada banda. Quanto maior o número de bandas e menor a largura do intervalo, maior é a resolução espectral de um sensor. O conceito de **banda**, pode ser exemplificado no caso de duas fotografias tiradas de um mesmo objeto, uma em branco-e-preto e a outra colorida; a foto branco-e-preto representa o objeto em apenas uma banda espectral, enquanto a foto colorida representa o mesmo objeto em três bandas espectrais, vermelha, azul e verde que, quando combinadas por superposição, mostram o objeto em cores.

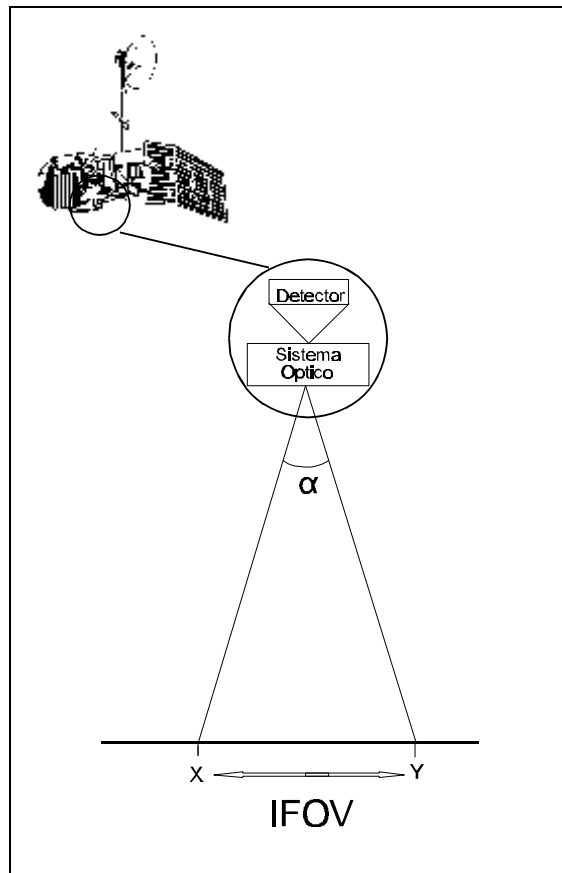


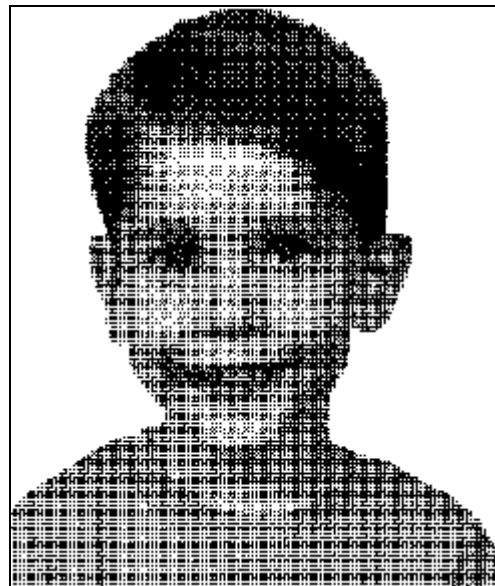
Figura 2.2 - O campo instantâneo de visada (IFOV) de um sensor define o tamanho do pixel e, conseqüentemente, a resolução espacial do mesmo. O IFOV é por sua vez definido pelo diâmetro do campo instantâneo de visada angular α do sensor.

A resolução **radiométrica** é dada pelo **número de níveis digitais**, representando níveis de cinza, usados para expressar os dados coletados pelo sensor. Quanto maior o número de níveis, maior é a resolução radiométrica. Para entender melhor esse conceito, pensemos numa imagem com apenas 2 níveis (branco e preto) em comparação com uma imagem com 32 níveis de cinza entre o branco e o preto; obviamente a quantidade de detalhes perceptíveis na segunda será maior do que na primeira e portanto a segunda imagem terá uma melhor resolução radiométrica. A Figura 2.3 compara duas imagens com resoluções

radiométricas diferentes. O número de níveis é comumente expresso em função do número de dígitos binários ("*bits*") necessários para armazenar em forma digital o valor do nível máximo. O valor em bits é sempre uma potência do número 2; desse modo, "6 bits" quer dizer $2^6 = 64$ níveis. Os sistemas sensores mais comuns, dos satélites LANDSAT e SPOT, possuem resolução radiométrica variando entre 6 e 8 bits, o que significa de 64 a 256 níveis de cinza. O sistema visual humano não é muito sensível a variações em intensidade, de tal modo que dificilmente são percebidas mais do que 30 diferentes tons de cinza numa imagem; o computador, por sua vez, consegue diferenciar qualquer quantidade de níveis, razão pela qual torna-se importante ter imagens de alta resolução radiométrica.



a)



b)

Figura 2.3

- a) Imagem com resolução radiométrica de 1 bit (2 níveis de cinza apenas);
- b) a mesma imagem, com resolução radiométrica de 5 bits (32 níveis de cinza).

3. O HISTOGRAMA DE UMA IMAGEM

Em processamento de imagens, trabalha-se sempre com os tons de cinza (**DNs**) atribuídos aos pixels de uma imagem. O **histograma** é uma das formas mais comuns de se representar a distribuição dos DNs de uma imagem, e possivelmente a mais útil em processamento digital de imagens. Ele fornece a informação sobre quantos pixels na imagem possuem cada valor possível de DN (que, no caso das imagens de 8 bits, variam de 0 a 255) ou, de forma equivalente, qual a proporção da imagem que corresponde a cada valor de DN. Os histogramas são também conhecidos como **distribuição de intensidades** e **função de densidade de probabilidade (PDF)**. Esse último termo advém do fato de que, estatisticamente, o histograma representa, neste caso, a probabilidade de se achar um DN de um dado valor dentro de uma imagem.

Outro ponto importante com relação a histogramas é que eles representam dados digitais, também chamados de discretos. Assim sendo, a distribuição de intensidades é representada por colunas discretas, que não podem ser divididas ou "quebradas", correspondentes a números inteiros (em contraposição a números fracionários). Esse conceito assume importância ao se tratar de realce de contraste em imagens.

3.1. Histograma uni-dimensional

No caso do histograma de apenas uma banda, ou **uni-dimensional**, a representação pode ser uma tabela ou um gráfico contendo o número de pixels atribuído a cada um dos possíveis DNs. Note-se que o histograma pode ser calculado para a imagem inteira ou apenas para uma porção da imagem. Neste caso, é necessário que o sistema de processamento utilizado seja capaz de oferecer essa opção ao usuário, o que geralmente é feito graficamente, através da especificação interativa da área para a qual se quer adquirir o histograma. É claro que o histograma da imagem inteira será diferente do histograma de uma porção da mesma imagem, uma vez que as propriedades estatísticas das intensidades de uma imagem são ditas não-estacionárias.

Ao se observar o histograma de uma imagem, tem-se uma noção instantânea sobre as características da mesma (Figura 3.1). A **forma** do histograma fornece

informações de grande importância no caso das imagens de sensoriamento remoto, tais como intensidade média e espalhamento dos valores de DN; este último, por sua vez, dá a medida do **contraste** de uma imagem: quanto maior o espalhamento ao longo do eixo dos DNs, maior o contraste da imagem.

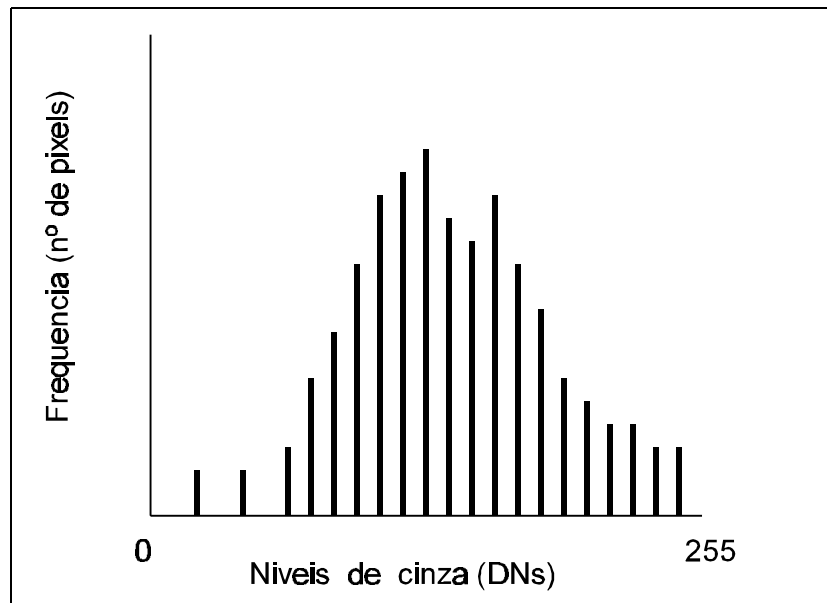


Figura 3.1 - Histograma uni-dimensional (uma única banda) de uma imagem de 8 bits. A altura da barra para cada intervalo de DN indica a frequência de pixels com esse tom de cinza na imagem. O espalhamento ao longo do eixo dos DNs é diretamente proporcional ao contraste da imagem.

É importante notar que o histograma de uma imagem não contém nenhuma informação espacial sobre a imagem - por exemplo, onde está localizado um pixel com determinada intensidade em relação a outro pixel com qualquer outra intensidade. Quando se computa a distribuição de intensidades (DNs) de uma imagem, essa informação espacial não é necessária, sendo essa distribuição tratada como uma longa lista de números aleatórios.

Uma imagem de satélite contendo áreas cobertas por água e outras cobertas por solo (por exemplo, uma região costeira) vai ter seu histograma tipicamente bimodal. Os pixels correspondentes à água, mais escuros, vão aparecer agrupados perto da origem, enquanto os demais vão se espalhar de forma menos pronunciada

pelo restante do intervalo de DN's (Figura 3.2a). Uma imagem de uma área homogênea (uma monocultura em terreno plano, por exemplo), com um baixo contraste, vai produzir um histograma com um único e proeminente pico (Figura 3.2b). Por outro lado, imagens contendo diferentes tipos de cobertura superficial mostrarão picos múltiplos e, se estes tiverem diferenças significativas em seus valores médios de resposta espectral, serão claramente separados no histograma. Desse modo, ao observar-se a forma do histograma, tem-se uma espécie de aproximação sobre as características espectrais da área imageada. O processo de entendimento do histograma de uma imagem é a base necessária para se aplicar as funções de realce ou aumento de contraste, abordadas mais adiante.

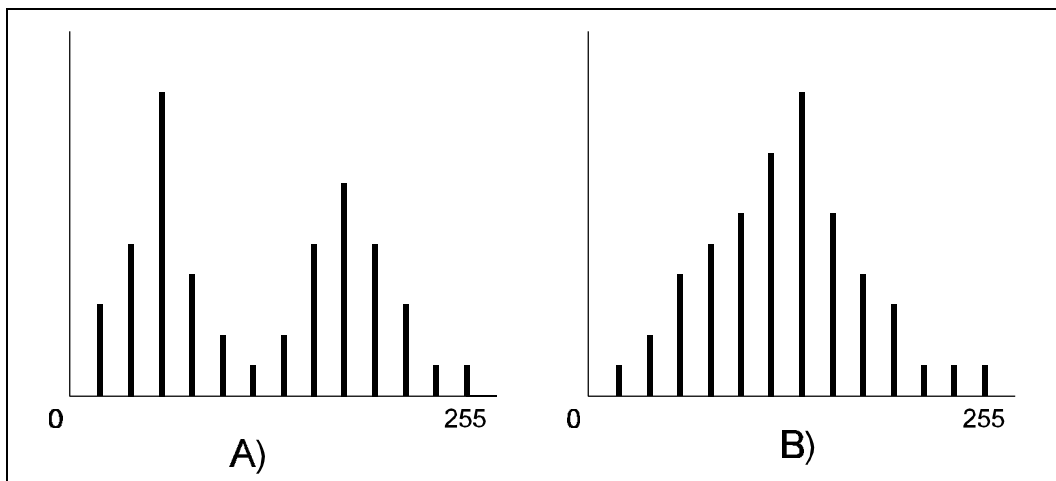


Figura 3.2 - A figura **A** é um histograma bi-modal, representando uma imagem com dois grupos contrastantes de pixels, sendo um mais claro e o outro mais escuro; a Figura **B** é um histograma uni-modal, de uma imagem cuja maioria dos pixels possui tonalidades médias de cinza, com a minoria restante distribuída entre tons claros e escuros.

Alguns conceitos estatísticos básicos são úteis ao se tratar com histogramas.

São eles:

- **Média:** representa a média aritmética de um conjunto de valores (DN's, por exemplo); num histograma, é o "centro de gravidade" do mesmo (Figura 3.3);
- **Moda:** representa o valor mais comum de um conjunto de valores; num histograma, é o ponto mais alto do gráfico (Figura 3.3).

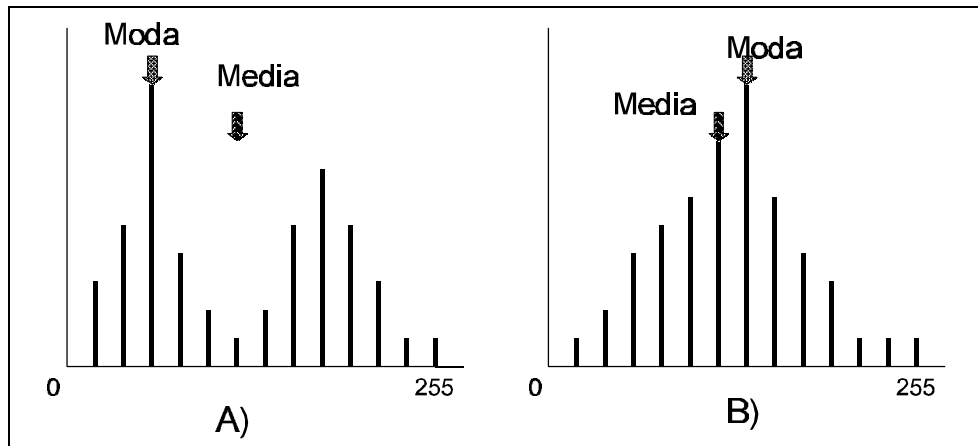


Figura 3.3 - Histogramas uni e bi-modal da Figura 3.2, com a indicação dos respectivos valores de **moda** e **média**.

3.2. Histograma cumulativo

Uma outra maneira de se representar a função de densidade de probabilidade (PDF) é o **histograma cumulativo** (Figura 3.4). Neste, plota-se a frequência cumulativa dos pixels com determinado DN contra os valores de DNs. Para cada valor de DN, a frequência cumulativa é aquela do DN mais as frequências de todos os DNs abaixo dele. Neste caso, a inclinação da curva do gráfico é a medida do contraste, sendo que as heterogeneidades se mostram como quebras na curva.

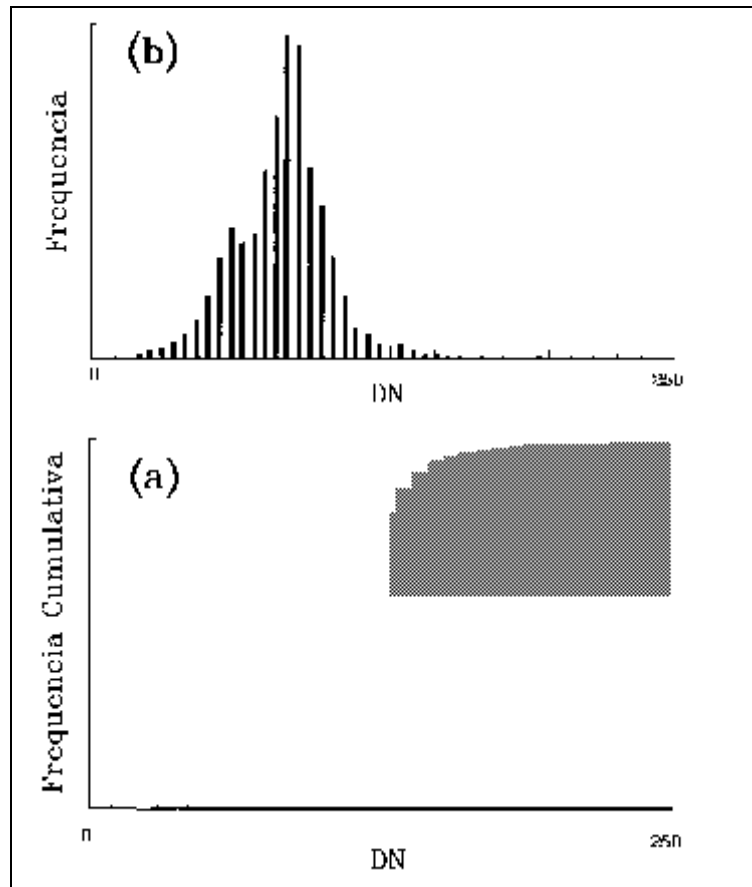


Figura 3.4 - Histograma (a) e histograma cumulativo (b) de uma imagem (Adapt. de Drury, 1987)

3.3 Histogramas multi-dimensionais

Imagens multiespectrais podem ser expressas como histogramas multi-dimensionais, sendo o de 2 dimensões o mais simples deles. Este chama-se **scattergrama** e são plots bivariados dos DNs de uma banda contra os DNs de uma outra banda. Eles mostram visualmente o grau de correlação entre as duas bandas consideradas e identificam as situações em que a superfície mostra claramente diferentes tipos de resposta nas duas bandas. A densidade de ocorrência de pixels nesse espaço bidimensional é uma medida da coincidência entre os picos dos histogramas individuais. Dados altamente correlacionados, ou classes de materiais

superficiais que possuem aparência similar em duas bandas de uma mesma imagem, plotam próximo a linhas retas nos scattergramas. Dados pouco correlacionados aparecem como nuvens de pontos pouco densas, de formato indefinido, nos scattergramas, ocupando uma área maior no espaço bidimensional.

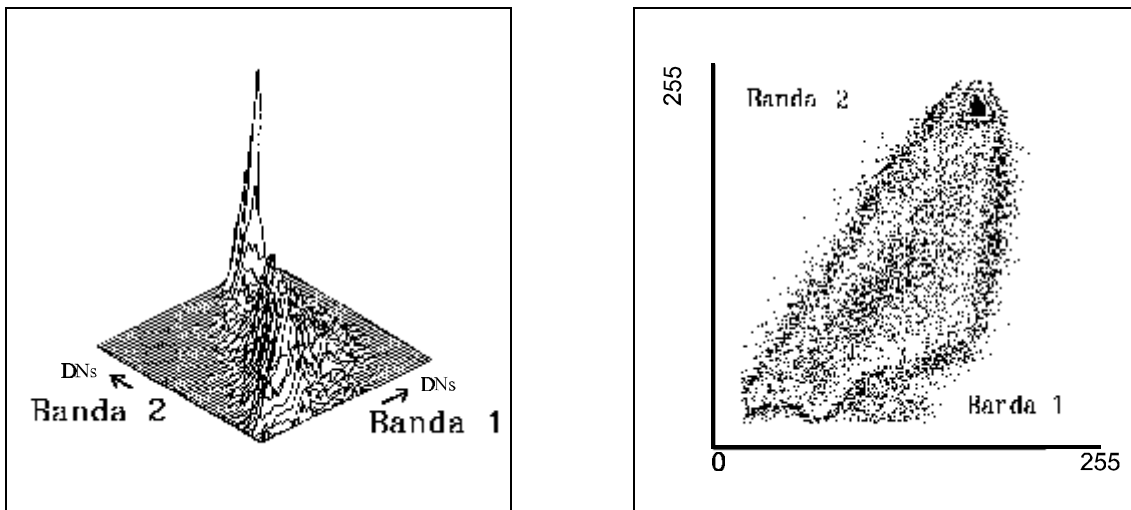


Figura 3.5 - A figura da esquerda é uma representação em 3 dimensões da distribuição de frequência de duas imagens hipotéticas, em que as maiores alturas do gráfico indicam maiores frequências de pixels com o mesmo DN nas duas imagens. A figura da direita é o scattergrama dessas mesmas duas imagens, com a região de maior frequência representada pela pequena área escura na parte superior direita do gráfico; o alongamento ao longo da direção 60° indica a existência de correlação entre as duas imagens. (Adapt. de Niblack, 1986)

Scattergramas são úteis na avaliação do grau de correlação entre pares de imagens e na decisão sobre tipos de técnicas de aumento de contraste a serem aplicadas a imagens multi-espectrais, para se produzir imagens coloridas realçadas. Contudo, sua maior importância reside no fato de que eles podem ser descritos estatisticamente e manipulados para servirem de base para classificação estatística e para análise estatística multi-variada de imagens multiespectrais de sensoriamento remoto, o que é tratado no Capítulo 8.