

Introdução ao sensoriamento remoto e ao processamento de imagens

Das várias fontes de dados usadas em SIG, uma das mais importantes é indubitavelmente representada pelo sensoriamento remoto. Através do uso de satélites, existem programas de aquisição contínua de dados para o mundo inteiro, com intervalos de tempo que abrangem desde de semanas até uma questão de horas. Também muito importante é o fato de que temos acesso a imagens de sensores remotos na forma digital, permitindo uma rápida integração dos resultados de análises de sensoriamento remoto em um SIG.

O desenvolvimento de técnicas digitais para a correção, realce e interpretação de imagens de sensoriamento remoto auxiliada por computador ocorreu inicialmente de forma independente e um pouco à frente do desenvolvimento de SIG. Contudo, a estrutura de dados raster e muitos dos procedimentos envolvidos nestes sistemas de processamento de imagens (*Image Processing Systems - IPS*) eram idênticos àqueles envolvidos em SIG com estrutura raster. Como resultado, tem se tornado comum ver pacotes de processamento de imagens adicionados às capacidades mais gerais de análise de SIG, e *software* SIG incluírem ao menos um conjunto fundamental de ferramentas de processamento de imagens. O IDRISI for Windows é um sistema avançado combinando SIG e processamento de imagens.

Devido à grande importância do sensoriamento remoto como entrada de dados para SIG, tem se tornado necessário aos analistas de SIG (particularmente aqueles envolvidos na utilização de recursos naturais) adquirir uma boa familiaridade com sistemas de processamento de imagens. Por causa disso, este capítulo dá uma visão geral desta importante tecnologia e da sua integração com SIG.

Definição

Sensoriamento remoto pode ser definido como qualquer processo através do qual é coletada informação a respeito de um objeto, área ou fenômeno, sem entrar em contato com ele. Nossos olhos são um excelente exemplo de um dispositivo de sensoriamento remoto. Somos capazes de reunir informações sobre o que nos rodeia julgando a quantidade e a natureza da reflectância da energia da luz visível (proveniente de alguma fonte externa, como o Sol ou uma lâmpada) conforme ela reflete de objetos em nosso campo visual. Um exemplo do contrário disto é um termômetro, que precisa estar em contato com o fenômeno que ele está medindo e por isso não é um dispositivo de sensoriamento remoto.

Dadas estas definições mais gerais, o termo sensoriamento remoto vem sendo associado mais especificamente com a indicação de interações entre os materiais da superfície terrestre e a energia eletromagnética. Contudo, qualquer tentativa de uma definição mais específica se torna difícil, uma vez que não é sempre o ambiente natural que é analisado (p. ex., aplicações na conservação de arte); o tipo

de energia não é sempre eletromagnética (p. ex., sonar) e alguns métodos medem emissão de energia natural (p. ex., infravermelho termal) em vez de interações de energia proveniente de uma fonte independente.

Considerações fundamentais

Fonte de energia

Os sensores podem ser divididos em dois grandes grupos - *passivos* e *ativos*. Sensores passivos medem níveis de fontes de energia existentes, enquanto os sensores ativos têm sua própria fonte de energia. A maior parte do sensoriamento remoto usa sensores passivos, para os quais o Sol é a principal fonte de energia. O exemplo mais antigo destes sensores é a fotografia. Temos sido capazes de medir e registrar a reflexão da luz pelos elementos da superfície terrestre há bastante tempo através de câmeras fotográficas aerotransportadas. Apesar da fotografia aérea ainda ser uma das principais formas de sensoriamento remoto, tecnologias de estado sólido mais novas têm expandido a capacidade para enxergar nos comprimentos de onda do visível e do infravermelho próximo, incluindo assim comprimentos de onda maiores da radiação solar. Entretanto, nem todos os sensores passivos usam a energia do Sol. Sensores no infravermelho termal e sensores de microondas passivos medem emissões de energia natural da Terra. Portanto, sensores passivos são simplesmente aqueles que não fornecem a eles próprios a energia detectada.

Os sensores ativos, por outro lado, possuem sua própria fonte de energia. O exemplo mais familiar desta fonte de energia é o *flash* fotográfico. Em aplicações ambientais e de mapeamento o melhor exemplo é constituído pelo Radar. Sistemas de Radar emitem energia na região do espectro eletromagnético das microondas (figura 3-1). A reflexão dessa energia pelos materiais na superfície da Terra é então medida para produzir uma imagem da área recoberta pelo sensor.

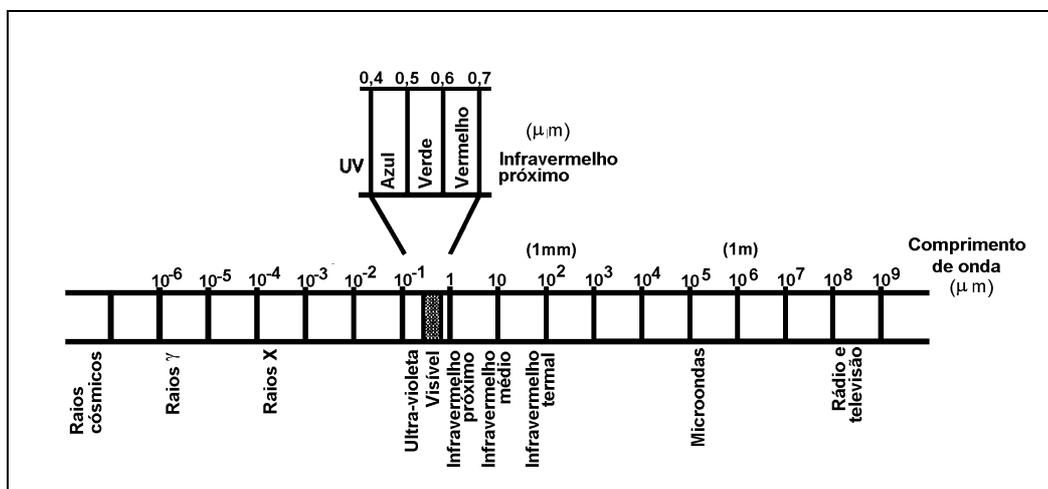


Figura 3-1. O espectro eletromagnético (Lillesand & Kiefer, 1987, adaptado⁸).

Comprimento de onda

Como já mencionado, a maior parte dos dispositivos de sensoriamento remoto fazem uso de energia eletromagnética. Entretanto, o espectro eletromagnético é muito amplo e nem todos os comprimentos de onda são igualmente efetivos para propósitos de sensoriamento remoto. Além disso, nem todos têm interações significativas com os materiais da superfície da Terra que nos interessam. A figura 3.1 ilustra o espectro eletromagnético. A própria atmosfera causa absorção e/ou espalhamento significativo dos comprimentos de onda mais curtos. Além disso, as lentes de vidro de muitos sensores também causam absorção significativa dos comprimentos de onda mais curtos como os do ultravioleta (UV). Como resultado, a primeira janela significativa (i.e., uma região na qual a energia pode significativamente

⁸ Lillesand, T. & Kiefer, R. 1987. *Remote Sensing and Image interpretation*. New York. Wiley.

atravessar a atmosfera) localiza-se nos comprimentos de onda do visível. Os comprimentos de onda do azul sofrem substancial atenuação pelo espalhamento atmosférico e por esse motivo são freqüentemente preteridos nas imagens de sensoriamento remoto. Entretanto, os comprimentos de onda do verde, do vermelho e do infravermelho próximo proporcionam boas oportunidades para medir interações da superfície terrestre sem interferência relevante por parte da atmosfera. Adicionalmente, estas regiões fornecem indícios importantes a respeito da natureza de muitos materiais da superfície terrestre. Os comprimentos de onda do vermelho visível, por exemplo, são fortemente absorvidos pela clorofila, enquanto os comprimentos de onda do infravermelho próximo fornecem indícios importantes da estrutura das folhas das plantas. Como resultado, o maior volume de imagens de sensoriamento remoto usadas em tarefas relacionadas a SIG são adquiridas nessas regiões.

Nas regiões do infravermelho médio e termal, várias boas janelas podem ser encontradas. Os comprimentos de onda mais longos do infravermelho médio mostraram grande utilidade em aplicações geológicas, enquanto as regiões do termal provaram ser muito úteis para o monitoramento não somente dos casos óbvios de distribuição espacial do calor da atividade industrial, mas de um amplo conjunto de aplicações desde o monitoramento do fogo e estudos de distribuição animal até as condições de umidade do solo.

Depois do infravermelho termal, a próxima área de maior importância no sensoriamento remoto ambiental está na região das microondas. Existem várias janelas importantes nesta região, que são de particular interesse para o uso do imageamento ativo por Radar. A textura dos materiais da superfície da Terra causa interações significativas com vários comprimentos de onda na região das microondas. Isto pode ser usado como um complemento às informações obtidas em outros comprimentos de onda, e também oferece a vantagem de ser utilizável à noite (sendo um sistema ativo, ele independe da radiação solar) e em regiões com cobertura de nuvens persistente (os comprimentos de onda do Radar são pouco afetados por nuvens).

Mecanismos de interação

Quando a energia eletromagnética atinge um material, três tipos de interações podem ocorrer: reflexão, absorção e transmissão (Figura 3-2). Nosso principal interesse reside na porção da energia que é refletida pois é geralmente esta a que retorna ao sistema sensor. A quantidade refletida varia de acordo com a natureza do material e com a região do espectro magnético na qual a medida é feita. Como resultado, se examinarmos o comportamento da componente refletida ao longo de um intervalo de comprimentos de onda, podemos caracterizar o resultado como um *padrão de resposta espectral*.

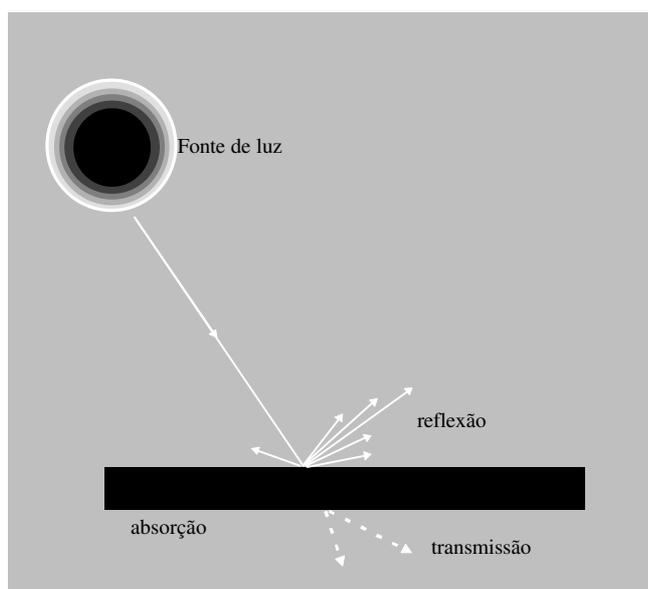


Figura 3-2. Mecanismo de interação entre energia eletromagnética e materiais.

Padrões de resposta espectral

Um padrão de resposta espectral é algumas vezes chamado de *assinatura*. É uma descrição (frequentemente na forma de um gráfico) do grau com o qual a energia é refletida em diferentes regiões do espectro. A maioria das pessoas está muito familiarizada com padrões de resposta espectral, uma vez que eles equivalem ao conceito humano de cor! Por exemplo, a figura 3-3 mostra padrões de resposta espectral típicos para algumas cores na porção visível de espectro eletromagnético, assim como para branco e cinza escuro. O padrão de reflectância vermelho claro, por exemplo, pode ser aquele produzido por um papel impresso com tinta vermelha. Aqui, a tinta é pensada para alterar a luz branca que brilha sobre ela e absorver os comprimentos de onda do azul e do verde. Restam, então, os comprimentos de onda do vermelho que refletem da superfície do papel para o sistema sensor (o olho). O alto retorno de comprimentos de onda do vermelho indica um vermelho claro, enquanto o baixo retorno de comprimentos de onda do verde, no segundo exemplo, sugere que ele aparecerá bastante escuro.

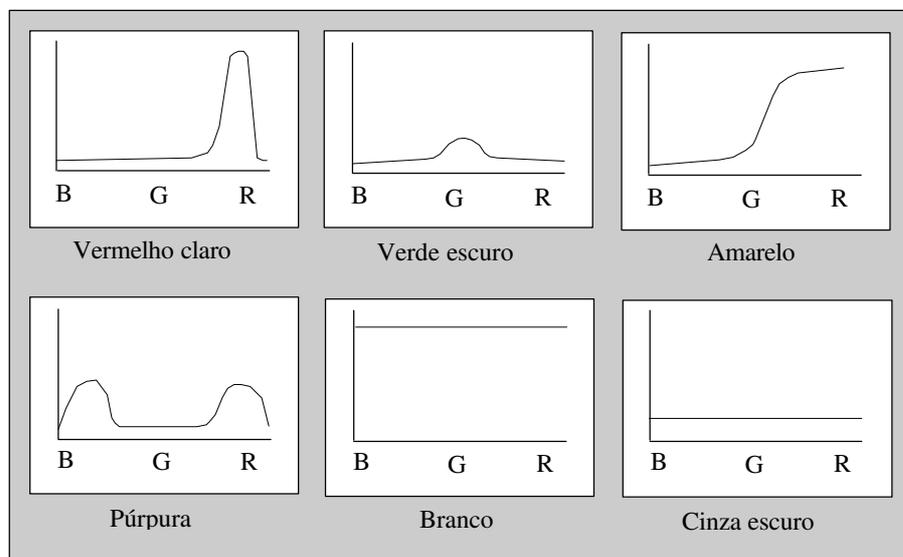


Figura 3-3. Padrões de resposta espectral para discos selecionados

O olho é capaz de perceber padrões de resposta espectral porque ele é um verdadeiro sensor multiespectral (isto é, ele tem percepção em mais de um local no espectro). Embora o verdadeiro funcionamento do olho seja muito complexo, ele de fato tem três tipos de detectores separados que podem ser considerados como capazes de responder às regiões de comprimento de onda do verde, vermelho e azul. Estas são as *cores primárias aditivas* e o olho responde à sua misturas para produzir uma sensação de outros tons. Por exemplo, a cor percebida pelo terceiro padrão de resposta espectral na figura 3-3 seria um amarelo -- resultado da mistura do vermelho e do verde. Entretanto, é importante reconhecer que esta é simplesmente nossa percepção fenomenológica de um padrão de resposta espectral. Considere, por exemplo, a quarta curva. Aqui nós temos reflectância em ambas as regiões do azul e do vermelho do espectro visível. Esta é uma distribuição bimodal, tecnicamente não é um tom específico no espectro. Todavia, perceberíamos isto visualmente como sendo púrpura! Púrpura não existe na natureza (isto é, como tom de cor -- um comprimento de onda dominante). É muito real em nossa percepção, mas púrpura é simplesmente nossa percepção de um padrão bimodal envolvendo um par de tons primários não adjacentes.

No início das pesquisas com sensoriamento remoto, acreditava-se (na verdade esperava-se) que cada material da superfície da Terra tivesse um padrão de resposta espectral distinto que lhe permitiria ser detectado com segurança por meios visuais ou digitais. Entretanto, como nossa experiência simples com cores sugere, na realidade isto não é freqüente. Por exemplo, duas espécies de árvores podem ter uma coloração bastante diferente em uma época do ano e muito similar em outra.

Encontrar padrões de resposta espectral distintos é a chave para a maior parte dos procedimentos de interpretação de imagens de sensoriamento remoto auxiliada por computador. Esta tarefa não é trivial. Além do mais, o analista precisa encontrar a combinação de bandas espectrais e a época do ano em que padrões distintos possam ser encontrados para cada uma das classes de informação de interesse.

Por exemplo, a figura 3-4 mostra um padrão de resposta espectral típico para vegetação, juntamente com os de água e de solo exposto seco. A forte absorção pelos pigmentos da folha (particularmente clorofila) nas regiões do azul e do vermelho da porção visível do espectro conduz à aparência verde característica da vegetação saudável. Entretanto, enquanto esta *assinatura* é bem diferente das superfícies sem vegetação, ela não é muito capaz de distinguir entre espécies -- a maioria terá uma cor verde similar na idade madura. No infravermelho próximo, todavia, nós encontramos um retorno muito maior das superfícies com vegetação devido ao espalhamento dentro da camada mesofílica das folhas. Os pigmentos das plantas não absorvem energia nesta região, de forma que a dispersão, combinada com o efeito multiplicador de um dossel completo de folhas, induz à alta "reflectância" nesta região do espectro. Esta reflectância é fortemente dependente da estrutura interna das folhas. Como resultado, diferenças significativas entre espécies podem ser freqüentemente detectadas nesta região. Da mesma forma, na região do infravermelho médio, vemos uma inclinação significativa no padrão de resposta espectral que está associada à umidade da folha. Esta é outra área onde diferenças significativas podem surgir entre espécies maduras. Como resultado, aplicações que buscam uma diferenciação ótima entre espécies envolvem geralmente tanto a região do infravermelho próximo quanto do infravermelho médio e usam imagens obtidas ao longo do ciclo de desenvolvimento.

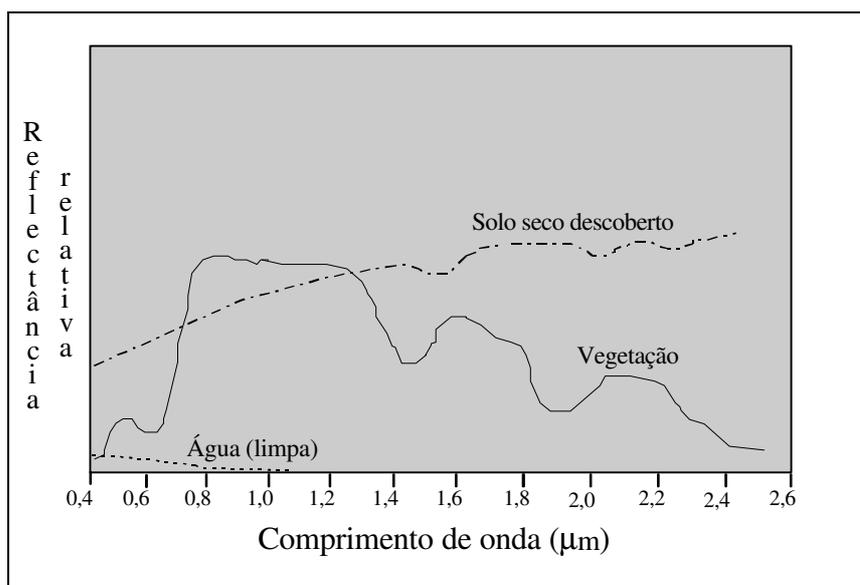


Figura 3-4. Assinaturas típicas de solo descoberto, vegetação verde e água limpa (Lillesand & Kiefer, 1987, adaptado⁹).

Algumas tecnologias de sensoriamento remoto recentes (como o AVIRIS) produzem imagens hiperespectrais - dados adquiridos em dezenas ou centenas de bandas muito estreitas. Assinaturas desenvolvidas usando esses dados são potencialmente muito precisas. Além disso, bibliotecas de assinaturas hiperespectrais foram criadas em condições de laboratório, contendo centenas de assinaturas para diferentes tipos de cobertura do solo, incluindo muitos minerais e outros materiais. Essas bibliotecas de curvas espectrais estão disponíveis a partir de vários sites na *World Wide Web*, como o do *United States Geological Survey (USGS) Spectroscopy Lab* (<http://spclab.cr.usgs.gov>). Veja o capítulo **Classificação de imagens de sensoriamento remoto** na seção **TÓPICOS ESPECIAIS** do Manual do usuário para mais detalhes sobre análise de dados hiperespectrais.

⁹ Lillesand, T. & Kiefer, R. 1987. *Remote Sensing and Image interpretation*. New York. Wiley.

Sensoriamento remoto multiespectral

Na interpretação visual de imagens de sensoriamento remoto, várias características das imagens são levadas em consideração, como a cor (ou tom, no caso de imagens pancromáticas), textura, tamanho, forma, padrão, contexto e a semelhança. Entretanto, na interpretação auxiliada por computador é usada com mais frequência simplesmente a cor (isto é, o padrão de resposta espectral). É por esta razão que uma forte ênfase é dada ao uso de sensores multiespectrais (sensores que, como o olho humano, vêem mais do que um local no espectro e por isso são capazes de captar padrões de resposta espectral), bem como ao número e à localização específica das bandas espectrais desses sensores.

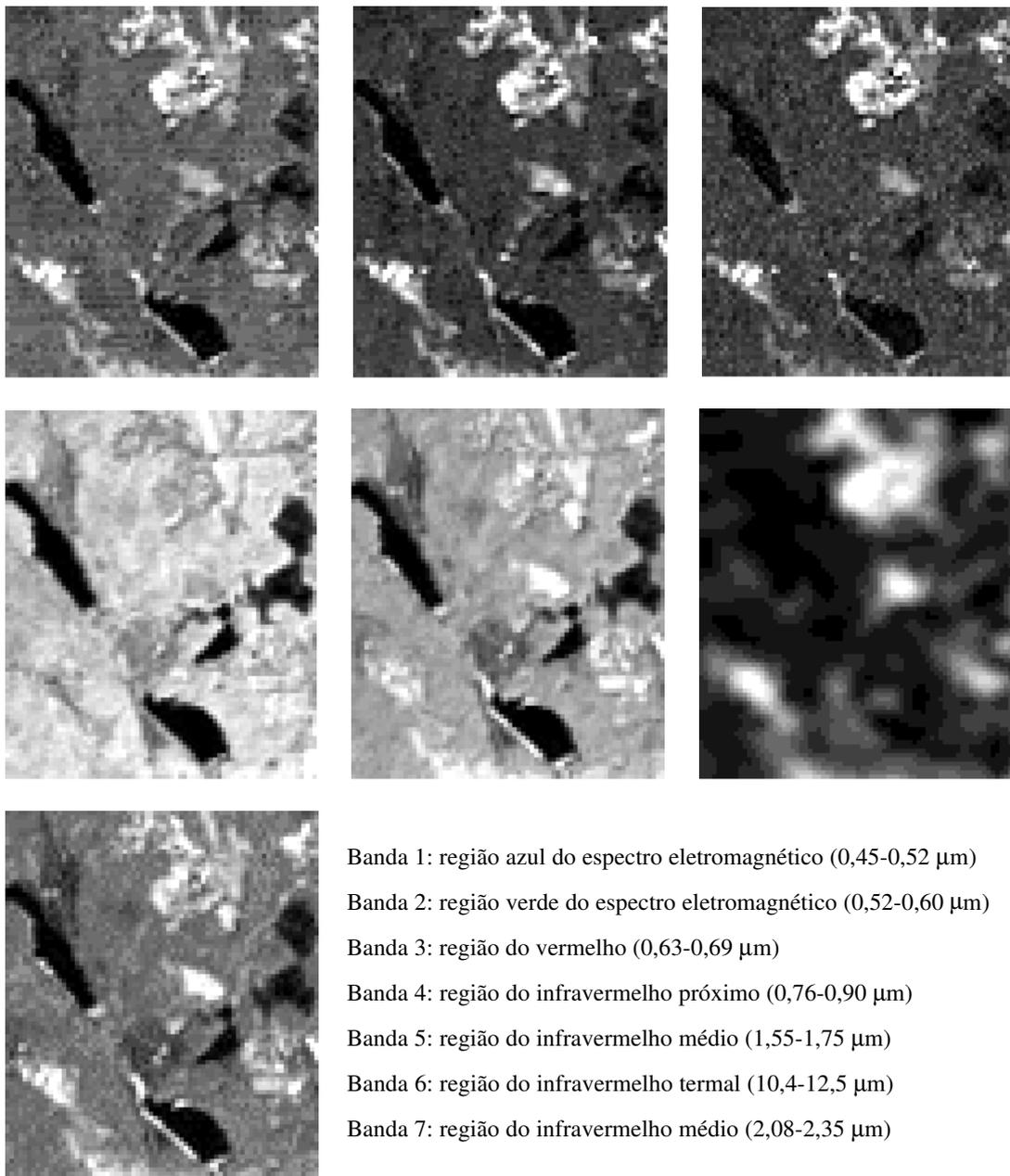


Figura 3-5

A figura 3-5 ilustra as bandas espectrais do sensor *Thematic Mapper* (TM) do LANDSAT. O satélite LANDSAT é um sistema comercial que fornece imageamento multiespectral em sete bandas espectrais com uma resolução espacial de 30 metros.

É possível demonstrar através de técnicas analíticas como a análise de componentes principais, que na maioria dos ambientes as bandas que carregam a maior parte da informação sobre o ambiente natural são as dos comprimentos de onda do infravermelho próximo e do vermelho. A água absorve fortemente o infravermelho, o que a torna fácil de distinguir nessa região do espectro. Além disso, as espécies de plantas apresentam as maiores diferenças nesta região. A região do vermelho também é muito importante porque é a principal região de absorção de energia pela clorofila para a fotossíntese. Esta banda é a que melhor permite distinguir entre superfícies com vegetação e sem vegetação.

Dada a importância das bandas do vermelho e do infravermelho próximo, não é surpresa que os sistemas de sensores projetados para o monitoramento de recursos naturais invariavelmente as incluam em qualquer sistema multiespectral particular. A inclusão de outras bandas depende da gama de aplicações pretendidas. Muitos sistemas incluem a banda do verde visível porque ele pode ser usado, juntamente com outros dois, para produzir uma composição falsa cor tradicional -- uma imagem em cor plena derivada das bandas do verde, vermelho e infravermelho em oposição às bandas do azul, verde e vermelho de imagens em cor natural. Este formato tornou-se comum com o advento da fotografia infravermelha colorida, e é conhecida de muitos especialistas do campo do sensoriamento remoto. Além disso, a combinação destas três bandas funciona bem na interpretação da paisagem alterada e de superfícies naturais e com vegetação. Contudo, é cada vez mais comum incluir outras bandas especificadamente direcionadas para a diferenciação dos materiais da superfície. Por exemplo, a banda 5 LANDSAT TM está colocada entre duas bandas de absorção da água e tem sido muito útil na determinação de diferenças de umidade do solo e das folhas. De forma similar, a Banda 7 LANDSAT TM está direcionada para a detecção de zonas de alteração hidrotermal em superfícies de rocha exposta. Ao contrário do sistema LANDSAT, o sistema AVHRR, da série de satélites NOAA, inclui vários canais termais para o sensoriamento da temperatura de nuvens.

Em adição às imagens multiespectrais tradicionais, alguns novos sistemas experimentais como AVIRIS e EOS-MODIS têm a capacidade de adquirir dados hiperespectrais. Esses sistemas cobrem um intervalo de comprimentos de onda similar mas em bandas muito mais estreitas, o que aumenta sensivelmente o número de bandas disponíveis para a classificação de imagens. O grande potencial de detectar assinaturas distintas ao longo de um grande número de bandas torna possível classificar dados usando bibliotecas de curvas espectrais de diferentes materiais da Terra.

Sistemas de sensores multiespectrais

Como é feito o sensoriamento multiespectral? A forma mais antiga é a fotografia colorida, que é ainda muito usada atualmente. Entretanto, para fins de interpretação auxiliada por computador, os sistemas de imageamento de estado sólido são agora mais comumente usados.

Fotografia colorida

As fotografias normais são produzidas a partir de uma composição de três camadas do filme com filtros intercalados que atuam isolando os comprimentos de onda do vermelho, do verde e do azul. Com o filme infravermelho colorido, estes comprimentos de onda são deslocados para os comprimentos de onda mais longos para produzir uma composição que isola os comprimentos de onda das regiões do verde, vermelho e infravermelho próximo. Todavia, como o olho humano não enxerga o infravermelho, uma composição em falsa cor é produzida fazendo os comprimentos de onda do verde aparecerem em azul, do vermelho aparecerem em verde e do infravermelho em vermelho.

Uma alternativa para o uso do filme colorido é agrupar várias câmeras em uma mesma instalação numa aeronave, cada uma com filme preto e branco e um filtro específico para isolar um intervalo específico de comprimentos de onda. A vantagem deste arranjo é que as bandas ficam acessíveis de forma independente e podem ser fotograficamente realçadas. Se uma composição colorida for desejada, é possível criá-la mais tarde a partir das bandas individuais.

É evidente que as fotografias não estão em um formato que pode ser imediatamente usado em análise digital. Entretanto, é possível escanear fotografias com um *scanner* de mesa comum e criar conjuntos de

dados multiespectrais, tanto pelo escaneamento das imagens em bandas individuais quanto de uma imagem colorida e posterior separação e suas bandas. Vários sistemas SIG e/ou de processamento de imagens oferecem essa possibilidade. Adicionalmente, também pode ser adquirido um *software* especial para retificar imagens de baixa altitude através de técnicas fotogramétricas.

Vídeo

Gravadores videocassete em formato Super VHS podem ser usados com pequenas câmeras de vídeo CCD para produzir vídeos aéreos coloridos de alta qualidade. Usando várias câmeras simultaneamente, cada uma com um filtro para isolar um intervalo específico de comprimentos de onda, é possível isolar imagens de bandas multiespectrais, que podem ser usadas individualmente ou combinadas na forma de uma composição colorida. Para uso em análise digital, placas gráficas especiais conhecidas como *frame grabbers* podem ser usadas para congelar qualquer quadro de uma seqüência contínua de vídeo e convertê-lo para formato digital, geralmente em um dos mais populares formatos de intercâmbio como TIF ou TARGA.

Scanners multiespectrais

A fotografia provou ser um importante dispositivo para a interpretação visual e para a produção de mapas analógicos. Entretanto, o desenvolvimento de plataformas em satélites e a necessidade de telemetrar imagens na forma digital, assim como o desejo por imagens altamente consistentes, deram impulso ao desenvolvimento de *scanners* de estado sólido como formato principal para a captação de dados de sensoriamento remoto. Os aspectos específicos dos diferentes sistemas variam. Na discussão que segue é apresentado um esquema representativo dos sistemas atualmente em uso.

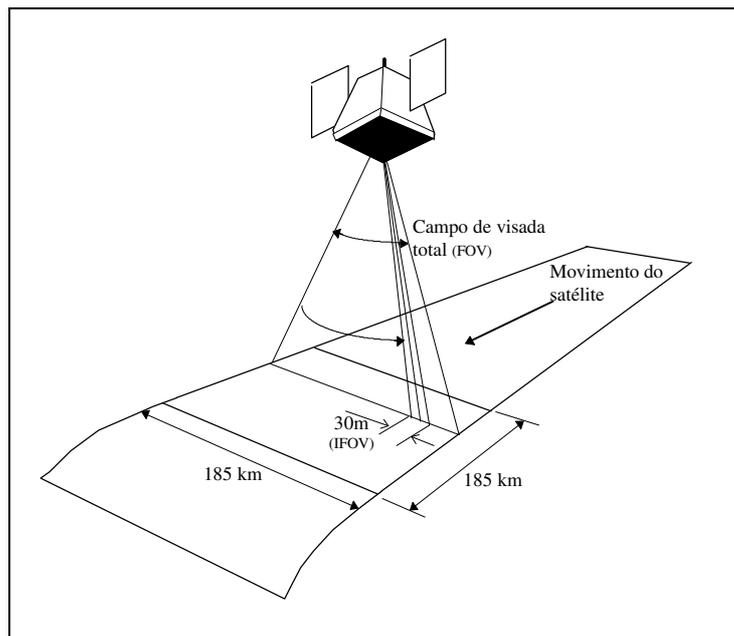


Figura 3-6. Configurações operacionais do sistema Landsat TM (Lillesand & Kiefer, 1987, adaptado¹⁰)

A lógica básica de um sensor de escaneamento é o uso de um mecanismo para varrer um pequeno campo de visada (conhecido como *instantaneous field of view* -- IFOV, ou campo de visada instantâneo) na direção oeste para leste ao mesmo tempo em que o satélite está se movendo de norte para sul. Este movimento combinado permite compor uma imagem raster completa do ambiente.

Uma técnica simples de escaneamento é usar um espelho rotativo que possa varrer o campo de visada na direção oeste para leste de forma consistente. O campo de visada é interceptado com um prisma que pode dispersar a energia oriunda do IFOV em seus componentes espectrais. Detectores fotoelétricos (da mesma natureza que aqueles encontrados em medidores de exposição luminosa comumente disponíveis

¹⁰ Lillesand, T. & Kiefer, R. 1987. *Remote Sensing and Image interpretation*. New York. Wiley.

em câmeras fotográficas) são então dispostos no caminho deste espectro para fornecer medições elétricas da quantidade de energia detectada em várias partes do espectro eletromagnético. Conforme a varredura vai de oeste para leste, estes detectores coletam um conjunto de leituras ao longo da mesma. Essas leituras formam as colunas ao longo de uma linha de um conjunto de imagens raster -- uma para cada detector. O movimento do satélite de norte para sul posiciona então o sistema para detectar a próxima linha, processo cujo final resulta na produção de um conjunto de imagens raster com um registro da reflectância ao longo de um intervalo de bandas espectrais.

Sistemas plataforma/sensor

Em função dos recentes desenvolvimentos em sensores, existem atualmente várias plataformas disponíveis para a captação de dados de sensoriamento remoto. Nós revisamos algumas das principais combinações plataforma/sensor normalmente disponíveis para a comunidade de usuários de SIG.

Fotografia aérea

A fotografia aérea é o método de sensoriamento remoto mais antigo e mais amplamente usado. Câmeras montadas em aeronaves leves voando em altitudes entre 200 e 15.000 m captam uma grande quantidade de informação detalhada. Fotos aéreas fornecem um inventário visual instantâneo de uma porção da superfície terrestre e podem ser usadas para criar mapas detalhados. Fotografias aéreas são frequentemente produzidas por empresas comerciais especializadas, que possuem e operam aeronaves especialmente modificadas, equipadas com câmeras de grande formato (23cmx23cm) e de alta qualidade. Fotos aéreas também podem ser obtidas a partir de câmeras de pequeno formato (35 mm e 70 mm), manuais ou acopladas em uma aeronave leve não modificada.

As configurações de câmera e plataforma podem ser agrupadas em verticais e oblíquas. As plataformas configuradas e a câmera podem ser agrupadas em termos verticais e oblíquos. A fotografia aérea oblíqua é obtida a partir de um determinado ângulo em relação ao terreno. As imagens resultantes dão uma visão semelhante à de um observador olhando pela janela do avião. Estas imagens são bem mais fáceis de interpretar do que fotografias verticais, mas é difícil localizar e medir feições neste tipo de foto para propósitos de mapeamento.

A fotografia aérea vertical é adquirida olhando diretamente para baixo. As imagens resultantes mostram feições do terreno em forma plana e são facilmente comparadas com mapas. As fotos aéreas verticais são sempre altamente desejáveis, mas são particularmente úteis para levantamentos de recursos em áreas onde não há mapa disponíveis. Fotos aéreas mostram feições como padrões de campo e vegetação que são frequentemente omitidas em mapas. Comparações entre fotos aéreas antigas e mais recentes podem também evidenciar as mudanças dentro de uma área ao longo do tempo.

Fotos aéreas verticais contêm deslocamentos sutis devido ao relevo, inclinação e balanço da aeronave e distorções das lentes. As imagens verticais podem ser tomadas com sobreposição, geralmente com cerca de 60 por cento ao longo da linha de vôo e pelo menos de 20 por cento entre linhas. A sobreposição de imagens pode ser vista com um estereoscópio para criar uma visão tridimensional, chamada de modelo estereoscópico.

Fotografia de grande formato

Empresas comerciais de levantamentos aéreos usam aeronaves mono ou bimotores equipadas com câmeras de grande formato para mapeamento. As câmeras de grande formato, como a WILD RC-10, usam filme de 23cm x 23cm que está disponível em cartuchos. A companhia Kodak, entre outras, fabrica vários tipos de películas de filmes especialmente destinadas ao uso em fotografias aéreas. Um filme negativo é empregado quando o produto desejado é um material impresso, enquanto filme positivo é empregado quando o produto desejado são transparências. Filmes para impressão permitem ampliações de detalhes, como a produção de posters de grandes dimensões. O uso de filme para impressão é útil também quando muitas cópias necessitam ser distribuídas e usadas no campo.

Fotografia de pequeno formato

Câmeras de pequeno formato transportadas em aeronaves alugadas são uma alternativa de baixo custo para substituir fotos aéreas de grande formato. São necessários uma câmera de 35mm ou 70mm, uma aeronave simples e um piloto, além de alguns meios para processar o filme. Devido à existência de laboratórios comerciais de processamento praticamente no mundo todo, os sistemas de 35mm são especialmente convenientes.

Fotografias oblíquas podem ser tiradas com uma câmera sustentada pela mão em qualquer aeronave simples, mas fotografias verticais requerem alguma forma de montagem especial, direcionada através de uma pequena abertura na parte inferior do avião ou estendida para fora de uma porta ou de uma janela.

As fotografias aéreas de pequeno formato apresentam várias limitações. As aeronaves leves não pressurizadas são limitadas a altitudes abaixo de 4.000m e o tamanho do filme é pequeno, de forma que sacrifícios devem ser feitos na resolução ou na área coberta por cada foto. Por causa das distorções no sistema da câmera, fotografias de pequeno formato não podem ser usadas quando há a necessidade de um mapeamento preciso. Além disso, impressões ampliadas de boa qualidade não podem ser feitas a partir de negativos pequenos. Apesar disso, fotografias de pequeno formato podem ser muito úteis para levantamentos de reconhecimento e podem ser usadas como pontos amostrais.

Videografia

Videocâmeras e gravadores leves, portáteis e de baixo custo podem ser carregadas em vôos alugados. Algumas companhias de mapeamento aéreo oferecem a videografia como uma opção de produto de aerolevanteamento, a qual consiste em nada menos do que imagens em composição falsa cor numa gravação contínua em vídeo tape. Da mesma forma que a fotografia de pequeno formato, o vídeo aéreo não pode ser usado para mapeamento detalhado, mas propicia uma visão geral útil para levantamentos de reconhecimento, e pode ser usado juntamente com amostragem em campo.

Sistemas de satélites

Existem atualmente vários sistemas em operação que coletam imagens subseqüentemente distribuídas aos usuários. Alguns dos sistemas mais comuns são descritos abaixo. Cada tipo de dado de satélite oferece características específicas que o tornam mais ou menos apropriado para uma aplicação em particular.

Em geral, existem duas características que podem ajudar você na escolha do dado do satélite: a *resolução espacial* e a *resolução espectral*. A resolução espacial refere-se ao tamanho da área no terreno que é resumida por cada valor de dado nas imagens. Trata-se do campo de visada instantâneo (IFOV) descrito anteriormente. A resolução espectral refere-se ao número e à largura das bandas espectrais que o sensor do satélite detecta. Adicionalmente, questões referentes ao custo e disponibilidade das imagens também devem ser consideradas na escolha.

LANDSAT

O sistema LANDSAT de satélites para sensoriamento remoto é operado pela *Earth Observation Satellite Company* (EOSAT), que vende dados digitais e fotográficos. Cenas inteiras ou um quarto delas são disponibilizadas através de vários meios de distribuição, como os produtos fotográficos de cenas MSS e TM em falsa cor e em preto e branco.

Existem seis satélites LANDSAT, o primeiro deles lançado em 1972. O LANDSAT 6 foi perdido no lançamento, mas o LANDSAT 5 continua em operação.

O LANDSAT carrega dois sensores multiespectrais. O primeiro deles é o *scanner* multiespectral (*multispectral scanner* -- MSS), que obtém as imagens em quatro bandas espectrais: azul, verde, vermelho e infravermelho próximo. O segundo é o mapeador temático (*Thematic mapper* -- TM), que coleta 7 bandas: azul, verde, vermelho, infravermelho próximo, duas no infravermelho médio e uma no infravermelho termal. O MSS tem uma redução espacial de 80 metros e o TM de 30 metros. Ambos os sensores recobrem uma área de 185km x 185km, e o satélite passa às 09:45 da hora local e retorna à mesma área a cada 16 dias.

SPOT

O SPOT (*Système Pour L'Observation de la Terre*) foi lançado e vem sendo operado por um consórcio francês desde 1985. O SPOT carrega dois sensores de varredura *High Resolution Visible* -- HRV¹¹, que operam em modo multiespectral ou pancromático. No modo multiespectral, o sensor coleta três bandas, uma banda verde, uma banda vermelha e uma banda no infravermelho próximo, com uma resolução espacial de 20 metros. No modo pancromático, o sensor coleta uma única imagem com uma resolução espacial de 10 metros. Ambos os modos cobrem uma faixa de 60km de largura. O sensor SPOT pode ser direcionado para imagear ao longo de faixas de varredura adjacentes. Isto permite ao instrumento adquirir imagens repetidas de qualquer área até 12 vezes durante seu período orbital de 26 dias. A capacidade de direcionamento faz do SPOT o único sistema de satélite que pode adquirir imagens estereoscópicas.

A *SPOT Image Inc.* comercializa vários produtos, incluindo imagens digitais e produtos fotográficos. Imagens existentes podem ser compradas, mas a aquisição de novas imagens necessita ser solicitada. Os clientes podem solicitar que o satélite seja apontado para uma direção particular para as novas aquisições.

NOAA - AVHRR

O *Advanced Very High Resolution Radiometer* -- AVHRR encontra-se a bordo de uma série de satélites operados pela *U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration* -- NOAA. Ele adquire dados ao longo de uma faixa de 2400km diariamente. O AVHRR coleta cinco bandas, uma no vermelho, duas no infravermelho próximo, uma no infravermelho médio e uma no infravermelho termal. A resolução espacial do sensor é 1,1 km e este dado é chamado de cobertura de área local (*Local Area Coverage* -- LAC). Para o estudo de áreas muito grandes, também está disponível uma versão reamostrada com resolução de aproximadamente 4 km, denominado cobertura de área global (*Global Area Coverage* -- GAC).

O AVHRR pode ter alta resolução para aplicações meteorológicas, mas as imagens retratam apenas os padrões mais extensos e apresentam pouco detalhe para uso em estudos terrestres. Todavia, eles têm uma alta resolução temporal, mostrando grandes áreas em uma base diária. O AVHRR tem se tornado uma escolha popular para o monitoramento de grandes áreas. As imagens AVHRR são usadas por várias organizações engajadas com a previsão da fome e é uma parte importante de muitas atividades de alerta de risco. As imagens do AVHRR estão disponíveis na NOAA a menos de 100 dólares por imagem.

ERS-1

O *European Remote Sensing Satellite* -- ERS- 1 é um novo sistema desenvolvido pela agência espacial européia. Até o momento desta publicação, ela ainda estava operando em modo experimental. O sistema propicia complemento interessante para os outros produtos de imagens comerciais, oferecendo vários formatos de saída de imagens de Radar. Para aplicações de SIG, a principal saída de interesse é o Radar de visada lateral (*side-looking airborne Radar* -- SAR), saída que provê faixas de 100 km de largura com uma resolução espacial de 30m. Isto é de considerável interesse numa variedade de aplicações, incluindo estudos de vegetação e projetos de mapeamento, onde a cobertura de nuvens é um problema persistente.

RADARSAT

O RADARSAT é um satélite de observação da Terra lançado em novembro de 1995 pela *Canadian Space Agency*. Os dados são distribuídos pela *RADARSAT International* (RSI) a partir de Richmond, Colúmbia Britânica, Canadá. A resolução espacial das imagens varia de 3 a 100 metros e o intervalo de repetição de cobertura do terreno é de 24 dias. Os sensores podem ser direcionados para o local de interesse, o que possibilita a coleta de imagens estereoscópicas. O sinal de Radar também penetra a cobertura de nuvens, atingindo áreas não visíveis para outros sistemas de sensoriamento remoto. Ao contrário dos outros sistemas, o sinal de Radar retornado é afetado mais pelas características elétricas e

¹¹ Os sensores de varredura produzem uma saída semelhante à de um *scanner*. Entretanto, não há movimento de escaneamento como nos mesmos. Ao contrário, o sensor consiste de um denso arranjo de detectores -- um para cada célula raster na linha de varredura -- que é movido através da cena.

físicas (principalmente a textura) do alvo do que pela sua reflexão e padrão espectral, necessitando por isso de técnicas especiais de interpretação e georreferenciamento. Comparado a outros tipos de imagens de sensoriamento remoto, o uso de dados de Radar ainda está no início, mas tem um enorme potencial.

AVIRIS

O AVIRIS é um sistema experimental que produz dados hiperespectrais. Ele coleta dados em 224 bandas ao longo do mesmo intervalo de comprimentos de onda do LANDSAT. Está previsto para 1998 o lançamento de outro sistema, o EOS-MODIS, para coletar dados em 36 bandas que cobrem o mesmo intervalo do sistema AVHRR.

Georreferenciamento de imagens e fotogrametria

Para propósitos de mapeamento, é essencial que quaisquer formas de imagens de sensoriamento remoto sejam referenciadas com exatidão ao mapa proposto como base. Com as imagens de satélite, a grande altitude das plataformas resulta num deslocamento mínimo devido ao relevo, sendo o georreferenciamento normalmente feito através do uso de um processo de transformação sistemática que suavemente “empena” a imagem (através de equações polinomiais) com base nas posições conhecidas de um conjunto de pontos de controle dispersos. Esta capacidade está disponível no IDRISI for Windows através do módulo RESAMPLE.

Com fotografias aéreas o processo é mais complexo. Não existem somente distorções sistemáticas relacionadas ao balanço e à variação de altitude da aeronave. A variação topográfica do relevo leva a distorções muito irregulares que não podem ser removidas através de procedimentos de transformação do tipo *rubber sheet* como os usados nas imagens orbitais. Nestas condições, é necessário usar restituição fotogramétrica para remover estas distorções e propiciar medidas de mapa mais exatas.

Fotogrametria é a ciência de fazer medições espaciais a partir de fotografias aéreas. Para obter uma restituição plena é necessário ter imagens estereoscópicas, fotografias que se sobrepõem o suficiente (p. ex., 60% na direção da linha e 10% entre as linhas de vôo) para proporcionar duas imagens independentes de cada parte da paisagem. Usando estes pares estereoscópicos e pontos de controle no terreno com posição e altitude conhecidas, é possível recriar inteiramente a geometria das condições de visada e, através disso, não apenas retificar medidas dessas imagens como também derivar medidas de altitude do terreno. As fotografias retificadas são chamadas de *ortofotos*. As medidas de altitude podem ser usadas para produzir modelos digitais de elevação.

A retificação fotogramétrica requer *hardware* e *software* especializados que são tradicionalmente muito caros. Todavia, existem atualmente alguns produtos fotogramétricos de custo relativamente baixo entrando no mercado e que podem propiciar retificação de alta qualidade com investimentos menores. Apesar disso, a retificação permanece sendo uma atividade especializada e requer a experiência de um profissional adequadamente treinado.

Processamento digital de imagens

Como resultado de *scanners* multiespectrais de estado sólido e de outros dispositivos raster temos atualmente disponíveis imagens raster digitais com dados de reflectância espectral. A grande vantagem de ter estes dados na forma digital é a possibilidade de utilizar as técnicas de análise em computador para os dados das imagens -- um campo de estudo chamado de *processamento digital de imagens*.

O processamento digital de imagens está fortemente direcionado a quatro operações básicas:

- correção das imagens
- realce das imagens
- classificação das imagens
- transformação das imagens

A *correção* diz respeito à correção e calibração das imagens de forma a obter uma representação da superfície da Terra o mais fiel possível à realidade -- uma consideração fundamental para todas as aplicações. O *realce* está predominantemente voltado à modificação das imagens para otimizar sua aparência para o sistema visual. A análise visual é um elemento chave, mesmo no processamento digital de imagens, e os efeitos das técnicas de realce podem ser significativos. A *classificação* refere-se à interpretação de imagens auxiliada por computador -- uma operação vital para uso em SIG. Finalmente, a *transformação* de imagens refere-se à derivação de novas imagens através de algum tratamento matemático das bandas das imagens brutas.

Para compreender as operações listadas nesta seção é necessário ter acesso a um *software* de processamento de imagens. Entretanto, como já foi afirmado anteriormente, muitos sistemas raster oferecem atualmente uma mistura de ferramentas de SIG e de processamento de imagens. No IDRISI for Windows, os módulos encontrados no menu de Análise/Processamento de imagens permitirão a você realizar todos os procedimentos descritos a seguir.

Correção de imagens

Imagens de sensoriamento remoto do meio ambiente são usualmente captadas a grande distância da superfície da Terra. Como consequência, há um percurso atmosférico substancial que a energia eletromagnética precisa atravessar antes de chegar ao sensor. Dependendo dos comprimentos de onda envolvidos e das condições atmosféricas, a energia que atinge o sensor pode ser substancialmente modificada. O próprio sensor pode interferir, uma vez que pode combinar uma variedade de componentes mecânicos, óticos e elétricos que servem para modificar ou mascarar a energia radiante medida. Além disso, durante o período em que a imagem está sendo adquirida, o satélite segue uma faixa que está sujeita a pequenas variações ao mesmo tempo em que a Terra se move abaixo dele. A geometria da imagem está, portanto, constantemente sofrendo alterações. Finalmente, o sinal necessita ser telemetrado de volta à Terra e subsequentemente recebido e processado para produzir os dados finais que recebemos. Conseqüentemente, uma variedade de distúrbios sistemáticos e aparentemente aleatórios podem se combinar para degradar a qualidade da imagem que recebemos no final. A correção de imagens procura remover estes efeitos de degradação.

A correção de imagens pode ser subdividida nas sub-áreas de correção geométrica e de correção radiométrica.

Correção radiométrica

A correção radiométrica refere-se à remoção ou diminuição de distorções no grau nível de energia eletromagnética registrado por cada detector. Vários agentes podem causar distorções nos valores registrados para as células de uma imagem. Algumas das distorções mais comuns, para as quais existem procedimentos de correção, incluem:

- **valores elevados uniformemente**, devido à nebulosidade da atmosfera, que espalha principalmente bandas de comprimento de onda curto (particularmente os comprimentos de onda do azul);
- **listras/faixas**, devido à descalibração dos detectores;
- **ruídos aleatórios**, devido à imprevisibilidade e à performance não sistemática do sensor ou da transmissão dos dados;
- **perda de linhas de varredura**, devido à perda de sinal de detectores específicos.

Convém também incluir aqui procedimentos que são usados para converter os valores brutos de reflectância relativa das bandas originais, sem unidades, para medidas reais de potência reflexiva.

Veja o capítulo **Correção de imagens** na seção **TÓPICOS ESPECIAIS** do Manual do usuário para uma discussão mais detalhada sobre correção radiométrica e como ela pode ser implementada no IDRISI for Windows.

Correção geométrica

Com imagens de satélite comerciais como as do LANDSAT e do SPOT, a maior parte dos elementos de distorção geométrica associados à aquisição das imagens são corrigidos pelos distribuidores das imagens. Esses elementos incluem:

- **correção de skew (deformação)** - para considerar o fato de que a Terra se move enquanto uma imagem é adquirida;
- **correção das distorções do scanner** - para explicar o fato de que o campo de visada instantâneo (IFOV) cobre mais território no final das linhas de varredura (onde o ângulo de visão é mais oblíquo) do que no meio.

Parece lógico que deveríamos incluir a transformação do tipo *rubber sheet* e outros procedimentos de georreferenciamento nesta seção. Entretanto, com georreferenciamento, a questão não é restaurar as características *originais* dos dados, mas modificá-las através de uma reorientação e retroprojeção da imagem para encontrar as características *finais* desejadas.

Veja o capítulo **Georreferenciamento** na seção **TÓPICOS ESPECIAIS** do manual para acompanhar uma discussão mais aprofundada sobre como isso está implementado no IDRISI for Windows.

Realce de imagens

O realce de imagens diz respeito à modificação de imagens para torná-las mais apropriadas às capacidades da visão humana. Independente da extensão da intervenção digital, a análise visual invariavelmente desempenha um papel muito importante em todos os aspectos do sensoriamento remoto. Embora a gama das técnicas de realce de imagens seja ampla, as seguintes questões fundamentais formam a espinha dorsal nesta área:

Ampliação de contraste

Os sensores digitais têm um amplo intervalo de valores de saída para acomodar os valores altamente variáveis de reflectância que podem ser encontrados em diferentes ambientes. Entretanto, em qualquer ambiente simples, freqüentemente apenas um intervalo estreito de valores ocorre na maior parte das áreas e a distribuição dos níveis de cinza tende a ser muito distorcida. Procedimentos de manipulação de contraste são então essenciais para a maior parte das análises visuais.

Geração de composições

Para análise visual, as composições coloridas fazem melhor uso das capacidades do olho humano. Dependendo dos sistemas gráficos em uso, a geração de composições varia da simples seleção das bandas a serem usadas a procedimentos mais avançados de combinação de bandas e ampliação de contraste.

Filtragem digital

Uma das possibilidades mais intrigantes da análise digital é a de aplicar filtros digitais. Os filtros podem ser usados para promover o realce de bordas (algumas vezes também chamado *crispening* na literatura), para remover a névoa (falta de definição) da imagem e para isolar lineamentos e tendências direcionais, para mencionar apenas algumas aplicações.

Classificação de imagens

A classificação de imagens refere-se à interpretação de imagens de sensoriamento remoto auxiliada por computador. Embora alguns procedimentos permitam incorporar informações acerca de características das imagens, como textura e contexto, a maior parte da classificação de imagens baseia-se

exclusivamente na detecção de assinaturas espectrais (isto é, padrões de resposta espectral) de classes de cobertura do solo. O sucesso com o qual isto pode ser feito depende de duas coisas: 1) da presença de assinaturas distintas para as categorias de cobertura do solo de interesse no conjunto de bandas a ser usado; e 2) da habilidade para distinguir com segurança estas assinaturas de outros padrões de resposta espectral que possam estar presentes.

Um passo vital no processo de classificação é a avaliação da exatidão das imagens finais produzidas. Isto envolve a identificação de um conjunto de locais amostrais que são visitados no campo. A classe de cobertura do solo encontrada no campo é então comparada à que foi mapeada na imagem para os mesmos locais. As avaliações estatísticas de exatidão podem então ser derivadas para a área de estudo inteira, assim como para as classes individuais.

A classificação de imagens pode ser dividida em *supervisionada* e *não supervisionada*, de acordo com a forma como a classificação é conduzida. No caso da classificação supervisionada, a tarefa consiste em detectar tipos específicos de cobertura do solo já conhecidos, enquanto que na classificação não supervisionada o analista busca definir todas as categorias de cobertura do solo existentes na imagem em certos níveis de generalização. Para ambos os tipos de classificação, o IDRISI for Windows oferece classificadores rígidos e relativos que são únicos no tipo de resultado produzido pela classificação. No caso de classificadores rígidos (tradicional), uma decisão definida é feita sobre a associação de um *pixel* a uma classe determinada. Os classificadores relativos, ao contrário, adotam uma abordagem *fuzzy* para a avaliação dessa associação e do grau com que um *pixel* pertence a todas as classes envolvidas, incluindo as classes desconhecidas. Adicionalmente, o IDRISI for Windows oferece classificadores que reconhecem explicitamente a presença de classes mistas de cobertura do solo em um único *pixel*. Ele ainda oferece a técnica para o desenvolvimento de assinaturas *fuzzy*, que também leva em conta a mistura de classes. Todas essas técnicas acrescentam maior controle da incerteza no desenvolvimento de cada assinatura ou no estágio de final classificação. Todas as técnicas de classificação relativa produzem uma superfície de incerteza na classificação para auxiliar o usuário na determinação de fontes e tipos de incerteza que ocorrem durante o processo de classificação.

Classificação supervisionada

Com a classificação supervisionada nós identificamos exemplos das classes de informação (isto é, tipos de cobertura do solo) de interesse na imagem. Estes exemplos são chamados *áreas de treinamento*. O sistema de processamento de imagens é então usado para desenvolver uma caracterização estatística das reflectâncias para cada classe de informação. Este estágio é freqüentemente chamado *análise de assinaturas* e pode envolver o desenvolvimento de uma caracterização tão simples quanto a média ou o intervalo de reflectâncias em cada banda, ou tão complexo como análises detalhadas da média, variâncias e covariâncias em todas as bandas.

Uma vez que a caracterização estatística tiver sido obtida para cada classe de informação, a imagem é então classificada através do exame das reflectâncias de cada píxel para decidir com qual das assinaturas ele mais se parece. Há várias técnicas para tomar estas decisões, e elas são com freqüência denominadas de *classificadores*. A maior parte dos *software* de processamento de imagens oferece mais de um classificador. O IDRISI for Windows oferece três classificadores rígidos supervisionados comumente usados: por paralelepípedo, mínima distância às médias e por máxima verossimilhança. Cada um deles emprega uma lógica diferente para atribuir *pixels* a classes. Adicionalmente, um novo grupo de classificadores rígidos foi incluído especificamente para o processamento de imagens hiperespectrais. Eles incluem os classificadores por mapeamento de ângulo espectral e por distância mínima às médias hiperespectrais.

Classificação não supervisionada

Em contraste com a classificação supervisionada, onde informamos ao sistema o caráter (isto é, assinatura) das classes de informação pelas quais estamos procurando, a classificação não supervisionada não requer qualquer informação prévia sobre as classes de interesse. Ela examina os dados e os divide nos agrupamentos espectrais naturais predominantes presentes na imagem. O analista então identifica esses agrupamentos como classes de cobertura do solo, através de uma combinação de sua familiaridade com a região estudada e visitas para levantamento de verdade de campo.

A lógica com a qual a classificação não supervisionada trabalha é conhecida como *análise de agrupamento* (ou *cluster*) e é fornecida pelo IDRISI for Windows através do módulo CLUSTER. CLUSTER efetua a classificação de imagens compostas que combinam as bandas de informação mais úteis. É importante reconhecer, entretanto, que os agrupamentos que a classificação não supervisionada produz não são classes de informação, mas categorias espectrais (isto é, eles agrupam feições (*pixels*) com padrões de reflectância similares). Geralmente o analista necessita reclassificar as classes espectrais em classes de informação. Por exemplo, o sistema pode identificar classes diferentes para asfalto e cimento, que o analista deve agrupar posteriormente para criar uma classe de informação chamada de pavimento.

A classificação não supervisionada está se tornando muito popular em agências envolvidas na manutenção de bases de dados de longo período para SIG, principalmente por que atualmente há sistemas que usam procedimentos de agrupamento extremamente rápidos e que necessitam poucos parâmetros operacionais. Dessa forma, tem sido possível treinar analistas de SIG com pouca familiaridade com o sensoriamento remoto a executar classificações que satisfazem os padrões de exatidão típicos de mapas. Com procedimentos adequados de trabalho de campo e avaliação de exatidão, essa ferramenta pode representar uma maneira rápida e eficaz de produzir dados confiáveis de cobertura do solo de forma contínua.

Além das duas técnicas mencionadas acima, dois módulos unem as classificações supervisionada e não supervisionada. O módulo ISOCLUST usa análise de agrupamento auto-organizativa para classificar até 7 bandas brutas com o número de agrupamentos especificado pelo usuário. O módulo MAXSET usa assinaturas para criar um resultado que inclui tanto classes definidas por essas assinaturas quanto as classes para suas possíveis combinações. Ele reconhece explicitamente a existência de *pixels* mistura (classificação sub-*pixel*) e pode atribuir um *pixel* a uma classe para a qual não foram fornecidos dados de treinamento exclusivos.

Todos esses tipos de classificação pertencem ao grupo de classificadores rígidos porque, de acordo com sua lógica intrínseca, eles fazem um julgamento final sobre a classe ou grupo de classes ao qual cada *pixel* deve ser atribuído (ou *pixels* são deixados como não classificados).

Classificações rígidas e relativas

Diferente dos classificadores rígidos, os classificadores relativos protelam uma decisão definitiva sobre a associação de qualquer *pixel* a uma classe. Em vez de uma imagem de saída final, eles produzem um conjunto de imagens, cujo número depende do número de assinaturas envolvido na classificação. As imagens resultantes avaliam o grau com o qual um *pixel* pertence a uma classe ou combinação de classes. Vários métodos de classificação relativa são oferecidos, incluindo aqueles baseados na teoria de probabilidade *Bayesiana*, teoria *Dempster-Shafer* e teoria de conjuntos *Fuzzy*. Eles tratam várias questões da maior significância para o processamento de imagens em computador, como a análise de misturas, avaliação de evidência em suporte às classes envolvidas, reconhecimento de conhecimento incompleto e presença de classes desconhecidas.

Veja o capítulo *Classificação de imagens de sensoriamento remoto* na seção **TÓPICOS ESPECIAIS** para acompanhar uma discussão detalhada das técnicas tradicionais versus novas técnicas de classificação.

Transformação de imagens

O processamento digital de imagem oferece uma gama ilimitada de possíveis transformações em dados de sensoriamento remoto. São mencionadas aqui especificamente duas, por causa de sua importância em aplicações em monitoriamento ambiental.

Índices de vegetação

Há uma variedade de índices de vegetação que têm sido desenvolvidos para auxiliar no monitoriamento da vegetação. A maior parte está baseada em interações entre a vegetação e a energia eletromagnética

nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo. Vamos voltar temporariamente à ilustração 3-4, que inclui um padrão de resposta espectral mais geral para vegetação verde de folhas grandes. Como pode ser visto, a reflectância na região do vermelho (cerca de 0,6 - 0,7 μ) é baixa devido à absorção pelos pigmentos das folhas (principalmente clorofila). A região do infravermelho (aproximadamente 0,8 - 0,9 μ), entretanto, mostra caracteristicamente alta reflectância por causa do espalhamento por parte da estrutura das células das folhas. Um índice de vegetação muito simples pode ser obtido dividindo a medida da reflectância no infravermelho pela reflectância no vermelho. Áreas de vegetação densa terão como resultado um valor de índice muito alto.

Embora um razoável número de variantes desta lógica básica tenha sido experimentada, a única que recebeu mais atenção é a do *índice de vegetação de diferença normalizada* (NDVI). Ele é calculado da seguinte maneira:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

onde NIR = Infravermelho próximo
e R = Vermelho

Este tipo de cálculo é bastante simples para um SIG raster ou um sistema de processamento de imagens, e o resultado tem mostrado boa correlação com as medidas de biomassa no terreno. Embora necessite calibração específica para ser usado como uma medida real de biomassa, muitas agências acharam o índice útil como uma medida relativa para fins de monitoramento. Por exemplo, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (*United Nations Food and Agricultural Organization -- FAO*), o Sistema em Tempo Real de Informação da África (*Africa Real Time Information System -- ARTEMIS*) e o Sistema de Alerta Contra a Fome do USAID (*Famine Early Warning System -- FEWS*), usam imagens NDVI em escala continental derivadas do sistema NOAA - AVHRR para produzir imagens de índice de vegetação para todo o continente africano a cada dez dias.

Veja o capítulo *Índices de vegetação* na seção *TÓPICOS ESPECIAIS* para uma discussão detalhada de uma variedade de cálculos potenciais.

Análise de componentes principais

A análise de componentes principais (PCA) é uma técnica de transformação linear relacionada com análise fatorial. Para um conjunto de bandas de imagem, a técnica PCA produz um novo conjunto de imagens, conhecidas como componentes, que estão decorrelacionadas umas com as outras e que são ordenadas em termos da variância do conjunto de bandas original que explicam.

A PCA tem sido tradicionalmente usada no sensoriamento remoto como um meio de compactação de dados. Para um conjunto típico de bandas de imagem multiespectral, é comum descobrir que as primeiras duas ou três componentes são capazes de explicar virtualmente toda a variabilidade original nos valores de reflectância. As últimas componentes tendem a ser dominadas por efeitos de ruído. Rejeitando estas últimas componentes, o volume de dados é reduzido sem perda apreciável de informação.

Recentemente, a PCA tem mostrado ter aplicação especial para o monitoramento ambiental. Nos casos onde imagens multiespectrais estão disponíveis para duas datas, as bandas de ambas as imagens são submetidas à PCA como se todas elas viessem da mesma imagem. Nestes casos, mudanças entre as duas datas tendem a aparecer nos últimos componentes. Mais nitidamente, se uma série temporal de imagens NDVI (ou um índice similar) é submetida à análise; uma visão muito detalhada das mudanças ambientais e tendências pode ser obtida. Neste caso, a primeira componente mostrará o NDVI típico sobre a série completa, enquanto cada componente sucessiva irá ilustrar eventos de mudança em uma seqüência com importância ordenada. Examinando-se estas imagens, juntamente com gráficos da sua correlação com as bandas individuais na séries original, pode ser obtida uma percepção importante da natureza das mudanças e tendências sobre a série temporal.

Conclusões

Dados de sensoriamento remoto são importantes para uma grande variedade de disciplinas. Essa importância certamente aumentará com a maior disponibilidade de dados prometida por um crescente número de sistemas operacionais. A disponibilidade destes dados, associada ao *software* necessário para analisá-los, oferece oportunidades para planejadores e estudantes da área ambiental, particularmente nas áreas de mapeamento de uso do solo e detecção de mudanças, das quais não se ouvia falar há poucas décadas atrás.

A estrutura raster inerente aos dados de sensoriamento remoto os torna prontamente compatíveis com os SIG raster, e vários, incluindo o IDRISI for Windows, são projetados para desempenharem tarefas de processamento de imagens e para facilitar a incorporação dos resultados em análises de SIG. O IDRISI for Windows é excepcional pelo fato de que oferece técnicas avançadas de classificação de imagens em adição a um avançado sistema de análise geográfica.