

Sensoriamento Remoto

Texto - Cópias

# **Sensoriamento Remoto do Ambiente:** **Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**

*Tradução da Segunda Edição*

**John R. Jensen**

*University of South Carolina*

TRADUÇÃO:

JOSÉ CARLOS NEVES EPIPHANIO (Coordenador) - INPE

ANTONIO ROBERTO FORMAGGIO - INPE

ATHOS RIBEIRO DOS SANTOS - INPE

BERNARDO FRIEDRICH THEODOR RUDORFF - INPE

CLÁUDIA MARIA DE ALMEIDA - INPE

LÊNIO SOARES GALVÃO - INPE



São José dos Campos, SP, Brasil

2009

[www.parentese.com.br](http://www.parentese.com.br)

## Sensoriamento Remoto do Ambiente

# 1

Cientistas observam a natureza, fazem medições, e depois tentam aceitar ou rejeitar hipóteses referentes a esses fenômenos. A coleta de dados pode ocorrer diretamente no campo (chamada coleta de dados *in situ* ou *in loco*), ou a alguma distância remota do objeto em apreço (referida como *sensoriamento remoto* do ambiente).



### Coleta de Dados In Situ

Um tipo de coleta de dados *in situ* envolve o cientista indo ao campo e questionando o fenômeno de interesse. Por exemplo, um entrevistador de censo pode ir de porta em porta perguntando às pessoas questões sobre sua idade, sexo, educação, rendimento, etc. Esses dados são gravados e usados para documentar as características demográficas da população.

Por outro lado, um cientista pode usar um transdutor ou outro dispositivo de medição *in situ* na área de estudo para fazer medições. Geralmente, transdutores são colocados em contato físico direto com o objeto de interesse. Muitos tipos diferentes de transdutores são disponíveis. Por exemplo, um cientista poderia usar um termômetro para medir a temperatura do ar, solo ou água; um anemômetro para medir a velocidade do vento; ou um psicrômetro para medir a umidade do ar. Os dados gravados pelos transdutores podem ser um sinal elétrico analógico com variações de voltagem relacionadas à intensidade da propriedade sendo medida. Em geral, esses sinais analógicos são transformados em valores digitais usando procedimentos de conversão analógico-digital (conversão A-D). A coleta de dados *in situ* usando transdutores alivia o cientista da monótona coleta de dados, geralmente em condições meteorológicas inclementes. Também, o cientista pode distribuir transdutores em locais geográficos importantes da sua área de estudo, permitindo que o mesmo tipo de medida seja obtido em muitos locais ao mesmo tempo. Às vezes, os dados dos transdutores são tele-transmitidos eletronicamente para um ponto central de coleta para rápida avaliação e arquivamento (p.ex., Teillet et al., 2002).

Dois exemplos de coleta de dados *in situ* são demonstrados na Figura 1-1. As medidas de índice de área foliar (IAF) estão sendo coletadas por um cientista numa área de estudo usando um ceptômetro portátil na Figura 1-1a. As medidas de reflectância espectral da vegetação estão sendo obtidas na área de estudo usando um espectrorradiômetro portátil na Figura 1-1b. As medidas de IAF e reflectância espectral obtidas no campo podem ser usadas para calibrar as medidas de IAF e reflectância espectral coletadas por um sistema de sensoriamento remoto localizado numa aeronave ou num satélite (Jensen et al., 2005).

Medição *In Situ*

a. Medição do índice de área foliar (IAF) usando um ceptômetro.



b. Medição da reflectância espectral usando um espectrorradiômetro.

Figura 1-1 Dados *in situ* (no local) são coletados no campo. a) Um pesquisador está coletando medidas de índice de área foliar (IAF) de soja (*Glycine max* L. Merrill) usando um ceptômetro, que mede o número de regiões do substrato que foram iluminadas diretamente sem interceptação pelo dossel vegetal. As medições são feitas bem acima do dossel e no solo, sob o dossel. As medidas de IAF *in situ* podem ser usadas para calibrar as estimativas de IAF derivadas de dados de sensores remotos. b) Medidas de reflectância espectral de vegetação estão sendo coletadas usando um espectrorradiômetro colocado a aproximadamente 1 m acima do dossel. As medidas de reflectância espectral *in situ* podem ser usadas para calibrar medidas de reflectância espectral obtidas por um sistema de sensoriamento remoto.

As coletas de dados pelos cientistas no campo ou por instrumentos colocados no campo fornecem muitos dos dados para as pesquisas científicas físicas, biológicas e sociais. Entretanto, é importante lembrar que não importa quão cuidadoso seja o cientista, erros podem ser introduzidos durante o processo de coleta de dados *in situ*. Primeiro, no campo o cientista pode ser um *intruso*. Isso significa que a menos que seja tomado um grande cuidado, o cientista pode realmente alterar as características do fenômeno sendo medido durante o processo de coleta de dados. Por exemplo, um cientista pode inclinar-se de um barco para obter uma amostra de água superficial de um lago. Infelizmente, o movimento do barco na área de estudo pode ter mexido a coluna d'água nas vizinhanças da amostra de água, resultando numa amostra não-representativa, ou *viesada*. De forma similar, um cientista fazendo uma medição de reflectância espectral poderia inadvertidamente pisar no local da amostragem, alterando o dossel vegetal antes da coleta de dados.

Os cientistas também podem coletar dados no campo usando procedimentos viesados. Isso introduz o *erro produzido pelo método*. Ele pode envolver o uso de um delineamento

amostral viesado, ou o uso impróprio e sistemático de uma parte do equipamento. Finalmente, o dispositivo de medição para coleta de dados *in situ* pode estar calibrado incorretamente. Isso pode resultar em sérios erros de medição.

A intrusão na coleta de dados *in situ*, junto com o erro humano produzido pelo método e a má calibração do equipamento de medição, todos contribuem para o erro na coleta de dados *in situ*. Portanto, é impróprio referir aos dados *in situ* como *dados de verdade terrestre*. Em seu lugar, deveríamos simplesmente referir a eles como *dados de referência terrestre in situ*, reconhecendo que eles contêm erros.



### Coleta de Dados por Sensoriamento Remoto

Felizmente, também é possível coletar informação sobre um objeto ou área geográfica a partir de um ponto distante privilegiado usando instrumentos de *sensoriamento remoto* (Figura 1-2). A coleta de dados por sensoriamento remoto foi originalmente feita usando câmeras montadas

**Medição por Sensoriamento Remoto**

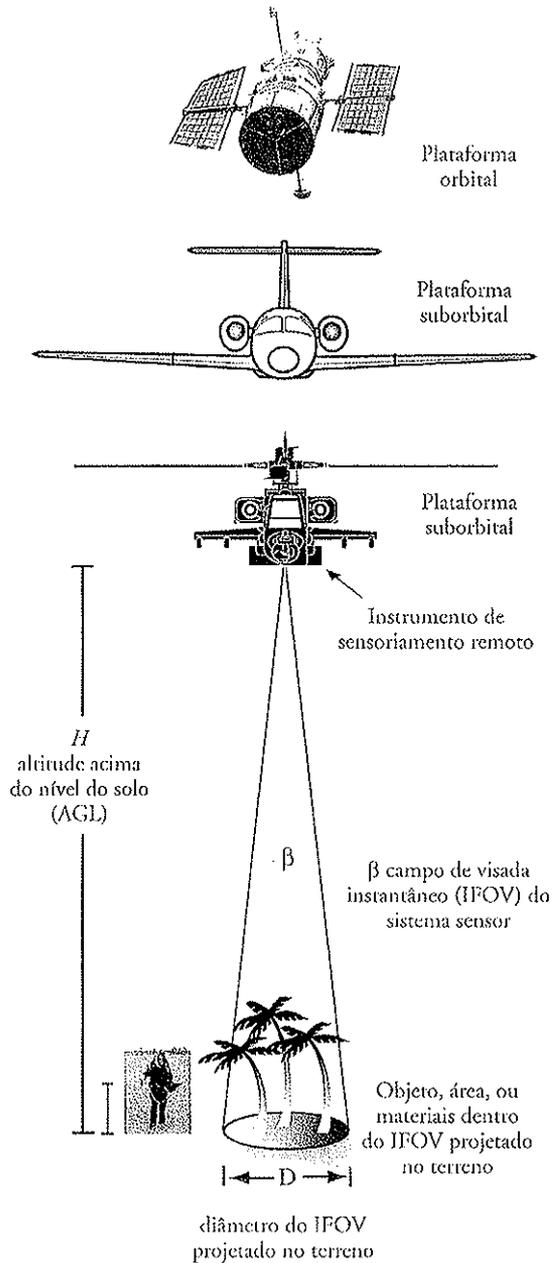


Figura 1-2 Um instrumento de sensoriamento remoto coleta informação sobre um objeto ou fenômeno dentro do campo de visada instantâneo (IFOV) do sistema sensor sem estar em contato físico direto com ele. O instrumento de sensoriamento remoto pode estar localizado a apenas poucos metros acima do solo e/ou a bordo de uma aeronave ou de um satélite.

em aeronaves suborbitais. A *fotogrametria* foi definida nas primeiras edições do *Manual of Photogrammetry* como:

a arte ou ciência de obter medidas confiáveis por meio da fotografia (American Society of Photogrammetry, 1952; 1966).

*Interpretação fotográfica* é definida como:

o ato de examinar imagens fotográficas para fins de identificar objetos e julgar sua significância (Colwell, 1960).

*Sensoriamento remoto* foi formalmente definido pela American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) como:

a medição ou aquisição de informação de alguma propriedade de um objeto ou fenômeno, por um dispositivo de registro que não esteja em contato físico ou íntimo com o objeto ou fenômeno em estudo (Colwell, 1983).

Em 1988, a ASPRS adotou uma definição combinada de fotogrametria e sensoriamento remoto:

Fotogrametria e sensoriamento remoto são a arte, ciência e tecnologia de obter informação confiável sobre objetos físicos e o ambiente por meio do processo de registro, medição, e interpretação de imagens e representações digitais dos padrões de energia derivados de sistemas sensores sem contato físico (Colwell, 1997).

Mas de onde veio o termo *sensoriamento remoto*? A real cunhagem do termo remonta a um artigo não-publicado do começo dos anos 1960 feito pelo grupo do Office of Naval Research (ONR) Geography Branch (Pruitt, 1979; Fussell et al., 1986). Evelyn L. Pruitt era a autora do artigo. Walter H. Bailey era seu colaborador e membro do grupo. A fotointerpretação aérea tinha se tornado muito importante na II Guerra Mundial. A era espacial estava apenas começando com os lançamentos do *Sputnik* (U.R.S.S.) em 1957, do *Explorer 1* (E.U.A.) em 1958, e com a coleção de fotografias do então secreto programa CORONA iniciado em 1960 (Tabela 1-1). Além disso, o Grupo de Geografia do ONR estava expandindo suas pesquisas usando instrumentos além de câmeras (p.ex., escâneres, radiômetros) e abrangendo regiões do espectro eletromagnético além do visível e do infravermelho próximo (p.ex., infravermelho termal e micro-ondas). Assim, no final dos anos 1950 estava claro que o prefixo “foto” estava sendo muito forçado em vista do fato de que a palavra raiz, *fotografia*, literalmente significa “escrever com luz. [visível]” (Colwell, 1997). Evelyn Pruitt (1979) escreveu:

Todo o campo estava avançando e era difícil para o Programa de Geografia saber em que direção se mover. Finalmente, em 1960, foi decidido levar o problema ao Comitê Assessor. Eu e o Walter H. Bailey ponderamos por um longo tempo sobre como apresentar a situação e sobre como denominar o campo mais abrangente que sentíamos deveria ser encampado num programa para substituir o projeto de fotointerpretação aérea. O termo "fotografia" era muito limitado porque ele cobria as regiões do espectro eletromagnético além da faixa do "visível", e era nessas frequências não-visíveis que parecia estar o futuro da interpretação. "Aérea" também estava muito limitada em função do potencial para observar a Terra a partir do espaço.

O termo *sensoriamento remoto* foi promovido numa série de simpósios patrocinados pelo ONR nos Laboratórios Willow Run da Universidade de Michigan em conjunto com o National Research Council durante os anos 1960s e inícios dos 1970s, e desde então tem sido usado (Estes e Jensen, 1998).

### Definições Máximas/Minimas

Numerosas outras definições de sensoriamento remoto têm sido propostas. De fato, Colwell (1984) sugere que "uma medida de quão nova uma ciência é, ou da rapidez com a qual está se desenvolvendo, está na preocupação dos seus cientistas com assuntos de terminologia." Alguns têm proposto uma *definição máxima* globalizante:

Sensoriamento remoto é a aquisição de dados sobre um objeto sem tocá-lo.

Tal definição é curta, simples, geral e memorizável. Infelizmente, ela exclui pouco da esfera do sensoriamento remoto (Fussell et al., 1986). Ela abrange virtualmente todos os dispositivos de sensoriamento remoto, incluindo câmeras, escâneres opto-mecânicos, dispositivos de imageamento lineares ou matriciais, lasers, sistemas de radar, sonares, sismógrafos, gravímetros, magnetômetros e cintilômetros.

Outros têm sugerido uma *definição mínima*, mais focada de sensoriamento remoto, que adicione qualificadores e mais qualificadores numa tentativa de assegurar que apenas funções legítimas sejam incluídas na definição do termo. Por exemplo:

Sensoriamento remoto é o registro da informação das regiões do ultravioleta, visível, infravermelho e micro-ondas do espectro eletromagnético, sem contato, por meio de instrumentos tais como câmeras, escâneres, lasers, dispositivos

lineares e/ou matriciais localizados em plataformas tais como aeronaves ou satélites, e a análise da informação adquirida por meio visual ou processamento digital de imagens.

Robert Green, do JPL (Jet Propulsion Laboratory), da NASA (National Aeronautics and Space Administration), sugere que o termo *medição remota* poderia ser usado ao invés de *sensoriamento remoto* porque os dados obtidos usando os novos sistemas de sensoriamento remoto hiperespectral são muito precisos (Robbins, 1999). Cada uma das definições é correta num contexto apropriado. É útil discutir brevemente os componentes dessas definições de sensoriamento remoto.

### Sensoriamento Remoto: Arte e/ou Ciência?

**Ciência:** Uma *ciência* é definida como um grande campo do conhecimento humano interessado em fatos unidos por *princípios* (regras). Os cientistas descobrem e testam fatos e princípios pelo método científico, um sistema ordenado para solução de problemas. Geralmente, os cientistas consideram que qualquer assunto que o ser humano possa estudar usando o método científico e outras regras especiais de pensamento possa ser chamado de uma ciência. As ciências incluem: 1) *matemática e lógica*, 2) *ciências físicas*, tais como a física e a química, 3) *ciências biológicas*, tais como a botânica e a zoologia, e 4) *as ciências sociais*, tais como a geografia, sociologia e antropologia (Figura 1-3). É interessante que algumas pessoas não considerem a matemática e a lógica como ciências. Mas os campos do conhecimento associados com a matemática e a lógica são *ferramentas* tão valiosas para a ciência que não podemos ignorá-las. As primeiras questões da raça humana estavam ligadas ao "quanto" e ao "o que pertence ao mesmo conjunto." Eles lutaram para contar, para classificar, para pensar sistematicamente e para descrever precisamente. Sob muitos aspectos, o nível de desenvolvimento de uma ciência é indicado pelo uso que faz da matemática. Uma ciência parece começar com uma matemática simples para medir, depois trabalha em direção a uma matemática mais complexa para explicar.

O sensoriamento remoto é uma ferramenta ou técnica similar à matemática. O uso de sofisticados sensores para medir a quantidade de energia eletromagnética que emana de um objeto ou área geográfica à distância, e depois a extração de informação importante dos dados usando algoritmos baseados em matemática e estatística é uma atividade *científica* (Fussell et al., 1986). O sensoriamento remoto funciona em harmonia com outras ciências da informação geográfica (frequentemente chamadas de *GIScience*), incluindo cartografia, levantamento, e sistemas de informações geográficas (GIS) (Curran, 1987; Clarke, 2001; Jensen, 2005). Dahlberg e Jensen (1986) e Fisher e Lindenbergh (1989) sugere-

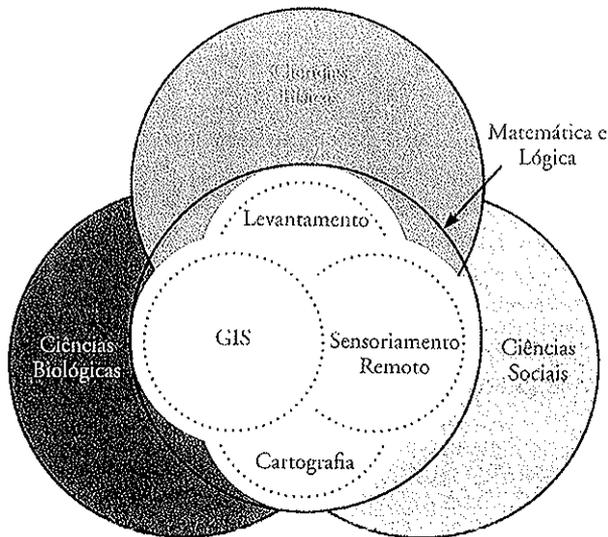


Figura 1-3 Modelo de interação mostrando a relação entre as ciências de informação geográfica (sensoriamento remoto, cartografia, sistemas de informações geográficas e levantamento) à medida que elas se relacionam com a matemática e a lógica, e com as ciências físicas, biológicas e sociais.

riram um modelo onde há interação entre sensoriamento remoto, cartografia, levantamento e GIS, em que nenhuma sub-disciplina domina, e todas são reconhecidas como tendo áreas únicas, ainda que com sobreposição, de conhecimento e atividade intelectual à medida que são usadas na pesquisa científica física, biológica e social (Figura 1-3).

A teoria da ciência sugere que as disciplinas científicas passam por quatro estádios clássicos de desenvolvimento. Wolter (1975) sugeriu que o crescimento de uma disciplina científica, tal como o sensoriamento remoto, que tem suas próprias técnicas, metodologias e orientação intelectual parece seguir a curva sigmóide ou logística ilustrada na Figura 1-4. Os estádios de crescimento de um campo científico são: Estádio 1 – um período de crescimento inicial com poucos incrementos de literatura; Estádio 2 – um período de crescimento exponencial quando o número de publicações dobra a intervalos regulares; Estádio 3 – um período quando a taxa de crescimento começa declinar, mas os incrementos anuais permanecem constantes; e Estádio 4 – um período final quando a taxa de crescimento aproxima-se de zero. As características de um campo do conhecimento durante cada um dos estádios podem ser brevemente descritas como se segue: Estádio 1 – pouca ou nenhuma organização social; Estádio 2 – grupos de colaboradores e existência de colégios invisíveis, frequentemente na forma de institutos e unidades de pesquisa *ad hoc*, etc.; Estádio 3 – aumento da especialização e aumento das con-

Estádios de Desenvolvimento de uma Disciplina Científica

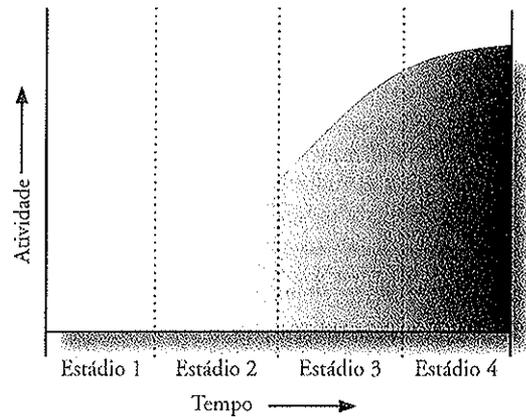


Figura 1-4 Estádios de desenvolvimento de uma disciplina científica (Wolter, 1975; Jensen e Dalilberg, 1983).

trovérias; e Estádio 4 – diminuição da participação tanto de colaboradores como dos colégios invisíveis.

Usando esta lógica pode-se dizer que o sensoriamento remoto esteja no Estádio 2 de um campo científico, tendo um crescimento exponencial desde meados dos anos 1960 com o número de publicações dobrando a intervalos regulares (Colwell, 1983; Cracknell e Hayes, 1993; Jensen, 2005). A evidência empírica é apresentada na Tabela 1-1, incluindo: 1) a organização de muitos institutos especializados e centros de excelência associados com sensoriamento remoto, 2) a organização de numerosas sociedades profissionais dedicadas à pesquisa em sensoriamento remoto, 3) a publicação de numerosas novas revistas especializadas em sensoriamento remoto, 4) significativo avanço tecnológico, tais como avançados sistemas sensores e métodos de análise de imagens, e 5) intensa auto-análise (p.ex., Dehqanzada e Florini, 2000). Podemos estar nos aproximando do Estádio 3, com aumento de especialização e de controvérsia teórica. Porém, a taxa de crescimento do sensoriamento remoto não começou a declinar. De fato, houve um enorme surto no número de pessoas especializando-se em sensoriamento remoto e empresas comerciais usando sensoriamento remoto durante os anos 1990 e início dos anos 2000 (Davis, 1999; ASPRS, 2004). Os significativos avanços na resolução espacial dos satélites de sensoriamento remoto (p.ex., dados pancromáticos em 1 x 1 m mais úteis) têm trazido à luz ainda mais pessoas ligadas à aplicação de GIS às ciências sociais. Centenas de novos artigos científicos de sensoriamento remoto são publicados em revistas com revisão pelos pares todo mês.

**Arte:** O processo de interpretação visual de uma foto ou imagem exige não apenas conhecimento científico, mas todo o conhecimento que uma pessoa obteve durante toda

Tabela 1-1. Principais marcos do sensoriamento remoto.

**1600 e 1700s**

1687 – O livro *Principia*<sup>1</sup> de Sir Isaac Newton sumariza as leis básicas da mecânica

**1800s**

1826 – Joseph Nicéphore Niepce tira a primeira fotografia  
 1839 – Louis M. Daguerre inventa o daguerreótipo para impressão em positivo da fotografia  
 1839 – William Henry Fox Talbot inventa o processo negativo/positivo chamado Calótipo  
 1855 – James Clerk Maxwell postula a teoria aditiva da cor  
 1858 – Gaspard Felix Tournachon tira uma fotografia aérea a partir de um balão  
 1860s – James Clerk Maxwell desenvolve a teoria eletromagnética ondulatória  
 1867 – O termo fotogrametria é usado num trabalho publicado  
 1873 – Herman Vogel estende a sensibilidade dos pigmentos da emulsão a comprimentos maiores, abrindo o caminho para a fotografia no infravermelho próximo

**1900s**

1903 – O avião<sup>2</sup> é inventado pelos Irmãos Wright (17 de dezembro)  
 1903 – Alfred Maul patenteia a câmera para obter fotografias a partir de um foguete

**1910s**

1910 – A Sociedade Internacional de Fotogrametria (International Society for Photogrammetry – ISP) é fundada na Áustria  
 1913 – Primeiro Congresso Internacional da ISP em Viena  
 1914 a 1918 – Foto-reconhecimento na I Guerra Mundial (I GG)

**1920s**

1920 a 1930 – Aumento da fotointerpretação e fotogrametria civis  
 1926 – Robert Goddard lança o primeiro foguete movido a combustível líquido (16 de março)

**1930s**

1934 – Fundação da Sociedade Americana de Fotogrametria (American Society of Photogrammetry – ASP)  
 1934 – Surge a revista *Photogrammetric Engineering* (ASP)  
 1938 – Surge a revista *Photogrammetria* (ISP)  
 1939 a 1945 – Avanços no foto-reconhecimento durante a II Guerra Mundial

**1940s**

1940s – Invenção do RADAR  
 1940s – Invenção do avião a jato pela Alemanha  
 1942 – A Kodak patenteia o primeiro filme infravermelho falsa-cor  
 1942 – Lançamento do foguete Alemão V-2 por Werner Von-Braun (3 de outubro)

**1950s**

1950s – Invenção do sensoriamento remoto no infravermelho termal pelos militares  
 1950 a 1953 – Reconhecimento aéreo na Guerra da Coreia

Tabela 1-1. Continuação.

**1950s**

1953 – Surge a revista *Photogrammetric Record* (Photogrammetric Society, Inglaterra)  
 1954 – A Westinghouse, Inc., desenvolve o sistema de radar de visada lateral aerotransportado  
 1955 a 1956 – Programa Norte-Americano Genetrix de reconhecimento por balão  
 1956 a 1960 – Programa da Agência Central de Inteligência (CIA) de reconhecimento com aviões U-2  
 1957 – A União Soviética lança o satélite Sputnik (4 de outubro)  
 1958 – Os Estados Unidos lançam o satélite Explorer 1 (31 de janeiro)

**1960s**

1960s – Ênfase principal no processamento visual de imagens  
 1960s – Ativação do Laboratório de Michigan Willow Run – que evoluiu para o ERIM (Environmental Research Institute of Michigan – Instituto de Pesquisa Ambiental de Michigan)  
 1960s – Primeiro International Symposium on Remote Sensing of Environment em Ann Arbor, Michigan  
 1960s – Ativação do Laboratório para Sensoriamento Remoto Agrícola de Purdue (LARS – Purdue Laboratory for Agricultural Remote Sensing)  
 1960s – Laboratório de Sensoriamento Remoto Florestal na Universidade da Califórnia, em Berkeley (Robert Colwell)  
 1960s – ITC – em Delft, Holanda, começa a educação fotogramétrica para estudantes estrangeiros  
 1960s – Iniciou-se o processamento de imagens digitais no LARS, em Berkeley, Kansas, no ERIM  
 1960s – Desclassificação (militar para civil) dos sistemas sensores de radar e infravermelho termal  
 1960-1972 – Programa Norte Americano de satélites espiões CORONA  
 1960 – Manual of Photo-interpretation (ASP)  
 1960 – O termo “remote sensing” (sensoriamento remoto) é introduzido por Evelyn Pruitt e pelo pessoal do U. S. Office of Naval Research  
 1961 – Yuri Gagarin torna-se o primeiro homem a viajar ao espaço  
 1961-1963 – Programa espacial Mercury  
 1961 – Decreto presidencial cria o GOCNAE (Grupo de Organização da Comissão Nacional de Atividades Espaciais), embrião do INPE, no Brasil  
 1962 – Crise dos Mísseis Cubanos – foto-reconhecimento pelo U-2 é apresentado ao público  
 1964 – O SR-71 é apresentado pelo Presidente Lyndon Johnson numa coletiva de imprensa  
 1965-1966 – Programa espacial Gemini  
 1965 – ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing  
 1969 – Remote Sensing of Environment (Elsevier)  
 1969 – Início das atividades de sensoriamento remoto no INPE

**1970s**

1970s, 80s – É possível a especialização em sensoriamento remoto nas universidades  
 1970s – Florescimento do processamento digital de imagens  
 1970s – Sensoriamento remoto integrado com sistemas de informações geográficas  
 1972 – ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite, posteriormente re-batizado como Landsat) lançado (NASA)

<sup>1</sup>Há tradução em português, pela editora EDUSP, com o título *Principia* – Livro 1: princípios matemáticos de filosofia (N.T.).

<sup>2</sup>Santos Dumont foi o primeiro a decolar a bordo de um avião impulsionado por um motor aeronáutico. Foi o primeiro a cumprir um circuito pré-estabelecido sob testemunho oficial de especialistas, jornalistas e da população parisiense. Em 23 de outubro de 1906, voou cerca de 60 metros e a uma altura de dois a três metros com seu 14 Bis, no Campo de Bagatelle em Paris (N.T.).

Tabela 1-1. Continuação.

---

**1970s**  
 1972-73 – Implantação da estação de recepção de dados de satélite de sensoriamento remoto, em Cuiabá-MT  
 1972 – Implantação do Curso de Mestrado em Sensoriamento Remoto, no INPE  
 1973-1979 – Programa Skylab (NASA)  
 1973 – Canadian Journal of Remote Sensing (Canadian Remote Sensing Society)  
 1975 – BRTS-2 lançado (renomeado para Landsat-2)  
 1975 – Manual of Remote Sensing (ASP)  
 1977 – METEOSAT-1 lançado (European Space Agency)  
 1978 – Landsat-3 lançado (NASA)  
 1978 – Nimbus 7 lançado – sensor Coastal Zone Color Scanner  
 1978 – TIROS-N lançado com o sensor AVHRR  
 1978 – SEASAT lançado (NASA Jet Propulsion Laboratory)  
 1978 – Primeiro Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto

**1980s**  
 1980s – AAG Remote Sensing Specialty Group >500 membros  
 1980s – Tentativa frustrada de comercialização (do Landsat) – EOSAT, Inc.  
 1980 – ISP torna-se International Society for Photogrammetry & Remote Sensing  
 1980 – European Space Agency (ESA) é criada (30 de outubro)  
 1980 – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (GRSS Society)  
 1981 – Primeiro International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS)  
 1981 – Iniciado o programa Space Shuttle (STS-1), da NASA  
 1981 – Lançado o Space Shuttle Imaging Radar (SIR-A) (NASA)  
 1982 – Lançado o Landsat-4 com o Thematic Mapper (TM) e o MSS  
 1983 – Manual of Remote Sensing, 2ª edição (ASP)  
 1984 – Lançado o Landsat-5 - Thematic Mapper e MSS (NASA)  
 1984 – Lançado o Space Shuttle Imaging Radar (SIR-A) (NASA)  
 1986 – Lançado o SPOT-1 (SPOT Image, Inc.)  
 1986 – Início da Geocarto International (Geocarto International Center)  
 1989 – The Earth Observer (NASA Goddard Space Flight Center)

**1990s**  
 1990s – Maturidade da fotogrametria digital computadorizada (soft-copy)  
 1990s – São disponíveis programas de pós-graduação em sensoriamento remoto em universidades  
 1990s – Maturidade dos Light Detection and Ranging (LIDAR)  
 1990s – NASA apóia o sensoriamento remoto comercial (Stennis Space Center)  
 1990s – Aumento do uso de sensores hiperespectrais e LIDAR  
 1990 – Lançado o SPOT-2 (Spot Image, Inc.)  
 1991 – Começo da “Mission to Planet Earth” (NASA)  
 1991 – Lançado o ERS-1 (European Space Agency)  
 1992 – O U.S. Land Remote Sensing Act torna-se lei  
 1993 – O Landsat-6 não atinge sua órbita (EOSAT, Inc.)  
 1993 – Lançado o SPOT-3 (Spot Image, Inc.)  
 1993 – Space Shuttle Imaging Radar (SIR-C) (NASA)  
 1995 – Lançado o RADARSAT-1 (Canadá)  
 1995 – Lançado o ERS-2 (European Space Agency)  
 1995 – Lançado o IRS-1C (5 x 5 m) (Indian Remote Sensing Program)

---

Tabela 1-1. Continuação.

---

**1990s**  
 1995 – Imagens do CORONA são desclassificadas e transferidas para os Arquivos Nacionais (U.S.)  
 1996 – Manual of Photographic Interpretation, 2ª edição (ASPRS)  
 1997 – O Earlybird não atinge sua órbita (EarthWatch, Inc.)  
 1998 – O programa Mission to Planet Earth torna-se Earth Science Enterprise (NASA)  
 1998 – Manual of Remote Sensing – Radar (ASPRS)  
 1998 – Criação do Curso de Doutorado em Sensoriamento Remoto, no INPE  
 1999 – Lançado o Landsat-7 ETM+  
 1999 – Lançado o CBERS-1 (China-Brazil Earth Resources Satellite, outubro)  
 1999 – O IKONOS não atinge sua órbita (Space Imaging, Inc., 27 de Abril)  
 1999 – Lançado o IKONOS-2, (Space Imaging, Inc., 24 de setembro)  
 1999 – Lançado o sistema de observação da Terra chamado Terra  
 1999 – Lançado o ImageSat (Israel ImageSat International)

**2000s**  
 2000 – Iniciou-se o programa New Millenium (NASA)  
 2001 – Lançado o QuickBird (DigitalGlobe, Inc.)  
 2002 – Lançado o sistema de observação da Terra chamado Aqua (NASA)  
 2002 – Lançado o ENVISAT (European Space Agency)  
 2002 – Introdução dos algoritmos de segmentação de imagens orientada ao objeto  
 2003 – Lançado o OrbView-3 (ORBIMAGE, Inc.)  
 2003 – Lançado o CBERS-2 (China-Brazil Earth Resources Satellite, outubro)  
 2004 – GIScience & Remote Sensing (Bellwether Publishing, Inc.)  
 2004 – Manual of Photogrammetry, 5ª edição (ASPRS)  
 2005 – Google Earth usa dados da DigitalGlobe e do TM/Landsat  
 2006 – A ORBIMAGE compra a Space Imaging e muda o nome para GeoEye  
 2007 – Lançado o CBERS-2B (China-Brazil Earth Resources Satellite, setembro)

---

a sua vida. Tal aprendizado não pode ser medido, programado, ou entendido completamente. A sinergia da combinação do conhecimento científico com a experiência de mundo real do analista permite ao intérprete desenvolver métodos heurísticos práticos para extrair informações importantes de uma imagem. É conhecido o fato de que alguns analistas de imagens são superiores a outros analistas de imagens porque eles: 1) entendem melhor os princípios científicos, 2) têm maior experiência de campo e viram muitos objetos da paisagem e áreas geográficas, e/ou 3) podem sintetizar princípios científicos e experiência do mundo real para chegarem a conclusões lógicas e corretas. Então, a interpretação de imagens de sensoriamento remoto é tanto uma arte como uma ciência.

### Informação Sobre um Objeto ou Área

Os sensores podem obter uma informação muito específica sobre um objeto (p.ex., o diâmetro da copa de um carvalho) ou a extensão de um fenômeno geográfico (p.ex., o limite poligonal de toda uma floresta de carvalho). A energia eletromagnética emitida ou refletida por um objeto ou área geográfica é usada como um substituto da propriedade real sob investigação. As medições da energia eletromagnética devem ser convertidas em informação usando técnicas visuais e/ou técnicas de processamento digital de imagens.

### O Instrumento (Sensor)

O sensoriamento remoto é realizado usando um instrumento, frequentemente chamado de *sensor*. A maioria dos instrumentos de sensoriamento remoto registram a REM (radiação eletromagnética) que se desloca a uma velocidade de  $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$  a partir da fonte, diretamente através do vácuo ou, indiretamente, por reflexão ou rerradiação para o sensor. A REM representa um canal de comunicação muito eficiente e em alta velocidade entre o sensor e o fenômeno remoto. De fato, não conhecemos nada que se desloque mais rápido que à velocidade da luz. Mudanças na quantidade ou propriedade da REM tornam-se, pela detecção pelo sensor, uma valiosa fonte de dados para interpretar importantes propriedades do fenômeno (p.ex., temperatura, cor). Outros tipos de campos de força podem ser usados em lugar da REM, tais como ondas acústicas (sonar) (p.ex., Dartnell e Gardner, 2004). Entretanto, a maioria dos dados de sensoriamento remoto coletados para aplicações em recursos da Terra é o resultado de sensores que registram a energia eletromagnética.

### Distância: Quão Longe É Remoto?

O sensoriamento remoto ocorre a uma distância do objeto ou área de interesse. O interessante é que não há uma distinção clara sobre quão grande essa distância deveria ser. A distância poderia ser 1 cm, 1 m, 100 m, ou mais de 1 milhão de metros do objeto ou da área de interesse. Muito da astronomia é baseado em sensoriamento remoto. De fato, muitos dos mais inovadores sistemas de sensoriamento remoto e de métodos visuais e de processamento de imagens digitais foram originalmente desenvolvidos para o sensoriamento remoto de paisagens extra-terrestres, como a Lua, Marte, Io, Saturno, Júpiter, etc. Este texto, porém, trata primariamente com o sensoriamento remoto da Terra, usando sensores colocados em aeronaves suborbitais na atmosfera ou em satélites colocados no espaço, operando no vácuo.

As técnicas de sensoriamento remoto e de processamento digital de imagens também podem ser usadas para analisar espaços internos. Por exemplo, um microscópio eletrônico

pode ser usado para obter fotografias de objetos extremamente pequenos na pele, no olho, etc. Um instrumento de raios-x é um sistema de sensoriamento remoto onde a pele e o músculo são como a atmosfera que podem ser penetrados, e os ossos ou outra matéria internos são os objetos de interesse.

### Vantagens e Limitações do Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto tem várias vantagens únicas bem como algumas limitações.

#### Vantagens

O sensoriamento remoto é não-intrusivo se o sensor estiver registrando passivamente a energia eletromagnética refletida ou emitida pelo fenômeno de interesse. Esta é uma consideração muito importante, uma vez que o *sensoriamento remoto passivo* não perturba o objeto ou a área de interesse.

Os equipamentos de sensoriamento são programados para coletar dados sistematicamente, tais como as fotografias aéreas verticais de  $23 \times 23 \text{ cm}$  ou uma matriz (*raster*, ou *bitmap*, ou mapa de bits, ou uma matriz de pontos ou pixels) de dados do Thematic Mapper (Mapeador Temático) do Landsat-5. Esta coleta de dados sistemática pode remover o viés de amostragem introduzido em algumas investigações *in situ* (p.ex., Karaska et al., 2004).

A ciência do sensoriamento remoto também é diferente da cartografia ou do GIS (Ciência da Informação Geográfica) porque estas ciências assentam-se em dados obtidos por outras. A ciência do sensoriamento remoto pode fornecer nova e fundamental informação científica. Sob condições controladas, o sensoriamento remoto pode fornecer informação biofísica básica, incluindo localização em  $x$  e  $y$ ; elevação ou profundidade em  $z$ ; biomassa; temperatura; e teor de água. Nesse sentido, a ciência do sensoriamento remoto assemelha-se ao levantamento, fornecendo informação básica que outras ciências podem usar ao conduzirem investigações científicas. Porém, ao contrário do levantamento, os dados de sensoriamento remoto podem ser obtidos sistematicamente para áreas geográficas muito grandes ao invés de observações apenas pontuais. De fato, a informação derivada do sensoriamento remoto atualmente é crítica para o satisfatório modelamento de numerosos processos naturais (p.ex., estimativa do suprimento de água; estudos de eutrofização; poluição por fontes não-pontuais) e culturais (p.ex., conversão do uso da terra nas bordas urbanas; estimativa da demanda por água; estimativas populacionais) (Walsh et al., 1999; Stow et al., 2003; Nemani et al., 2003; Karaska et al., 2004). Um bom exemplo é o modelo digital de elevação, que é tão importante em mui-

tos modelos de GIS espacialmente distribuídos (Clarke, 2001). Agora, os modelos digitais de elevação são produzidos principalmente a partir de imagens estereoscópicas de LIDAR (*light detection and ranging* ou detecção da luz e medição de distância) (p.ex., Maune, 2001; Hodgson et al., 2003b; 2005), de medições por RAIDAR (*radio detection and ranging* ou detecção de ondas de rádio e medição de distância), ou de imagens interferométricas de radares de abertura sintética (IFSAR).

### Limitações

A ciência do sensoriamento remoto tem limitações. Talvez a maior limitação é que geralmente ela é superestimada. *O sensoriamento remoto não é uma panacéia* que fornecerá todas as informações necessárias à condução das pesquisas físicas, biológicas ou das ciências sociais. Ele simplesmente provê alguma informação espacial, espectral e temporal de valor, de uma forma que esperamos seja eficiente e econômica.

Os seres humanos selecionam o sistema de sensoriamento remoto mais apropriado para coletar os dados, especificam as várias resoluções dos dados dos sensores remotos, calibram os sensores, selecionam a plataforma que irá portar o sensor, determinam quando os dados serão coletados e especificam como os dados serão processados. O erro produzido pelo método humano pode ser introduzido quando os parâmetros da missão e do instrumento de sensoriamento remoto são especificados.

Potentes sistemas sensores remotos *ativos* que emitem sua própria radiação eletromagnética (p.ex., LIDAR, RADAR, SONAR) podem ser intrusivos e afetar o fenômeno que está sendo investigado. Mais pesquisas são necessárias para determinar quão intrusivos podem ser esses sensores ativos.

Os instrumentos de sensoriamento remoto podem ficar descalibrados, resultando em dados não-calibrados obtidos por tais sensores remotos. Finalmente, os dados dos sensores remotos podem ser muito caros para serem coletados e analisados. Espera-se, porém, que a informação extraída dos dados dos sensores remotos justifique os gastos. É interessante notar que o maior gasto numa típica investigação com sensoriamento remoto é com analistas de imagens bem treinados, e não com os dados dos sensores remotos.



### O Processo do Sensoriamento Remoto

Os cientistas vêm desenvolvendo procedimentos para coleta e análise de dados de sensoriamento remoto por mais de 150 anos. A primeira fotografia a partir de uma plataforma aérea (um balão fixo) foi obtida em 1858 pelo

francês Gaspard Felix Tournachon (que se auto-apelidava Nadar). Grandes passos na fotografia aérea e outros sistemas de coleta de dados por sensoriamento remoto ocorreram durante as I e II Guerras Mundiais, no conflito da Coreia, na Crise dos Mísseis de Cuba, na Guerra do Vietnã, na Guerra do Golfo, na guerra da Bósnia, e na guerra contra o terrorismo. Muitos dos marcos significativos estão sumarizados na Tabela 1-1 e no Capítulo 3 (História da Fotografia Aérea e das Plataformas Aéreas). Basicamente, os contratos militares junto às companhias privadas resultaram no desenvolvimento de sofisticados sistemas eletro-ópticos multiespectrais e sistemas sensores de infravermelho termal e de micro-ondas (radar), cujas características estão apresentadas nos Capítulos 7, 8 e 9, respectivamente. Embora a maioria dos sistemas de sensoriamento remoto possa ter sido inicialmente desenvolvida para aplicações de reconhecimento militar, esses sistemas são também largamente usados para monitoramento dos recursos naturais da Terra.

Os procedimentos de coleta e análise de dados de sensoriamento remoto usados para aplicações aos recursos da Terra são frequentemente implementados de um modo sistemático que pode ser chamado de *o processo do sensoriamento remoto*. Os procedimentos no processo do sensoriamento remoto são sumarizados aqui e na Figura 1-5:

- A hipótese a ser testada é definida usando um tipo específico de lógica (p.ex., indutiva, dedutiva) e um modelo adequado de processamento (p.ex., determinístico, estocástico).
- São coletados dados colaterais e *in situ* necessários para calibrar os dados do sensor remoto e/ou julgar suas características geométricas, radiométricas e temáticas.
- Os dados do sensor remoto são coletados passiva ou ativamente usando instrumentos de sensoriamento remoto analógicos ou digitais, idealmente ao mesmo tempo em que se coletam os dados *in situ*.
- Os dados *in situ* e de sensoriamento remoto são processados usando a) processamento de imagem analógica, b) processamento digital de imagens, c) modelagem, e d) visualização a *n*-dimensões.
- Os metadados, os passos do processamento e a exatidão da informação são fornecidos, e os resultados são comunicados usando imagens, gráficos, tabelas estatísticas, base de dados GIS, Sistemas Espaciais de Suporte à Decisão (SDSS), etc.

É útil revisar as características desses procedimentos do processo do sensoriamento remoto.

## O Processo do Sensoriamento Remoto

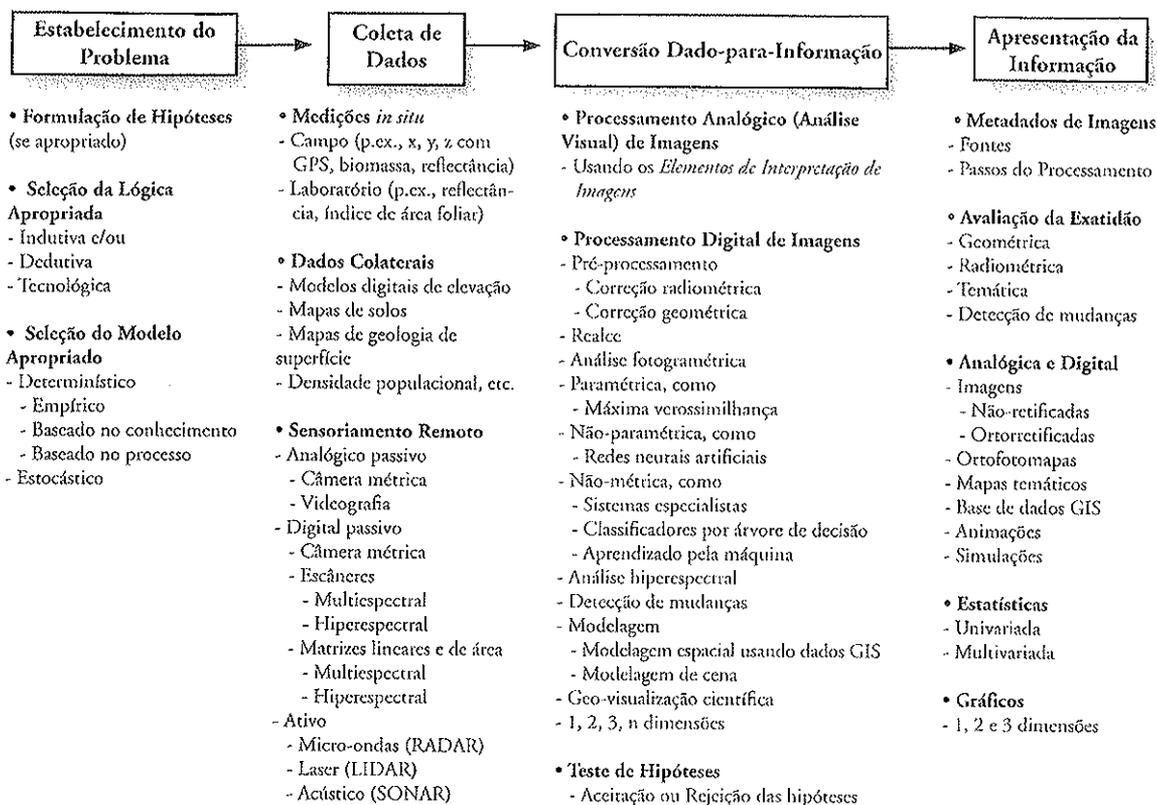


Figura 1-5 Os cientistas geralmente usam o processo do sensoriamento remoto quando extraem informação a partir de dados de sensoriamento remoto.

### Enunciado do Problema

Às vezes o público leigo e mesmo as crianças olham uma fotografia aérea ou outro dado de um sensor remoto e extraem informação útil. Geralmente, eles fazem isso sem uma hipótese formal em mente. Com muito mais frequência, entretanto, eles interpretam a imagem incorretamente porque não entendem a natureza do sistema do sensoriamento remoto usado para coletar os dados ou não valorizam a perspectiva oblíqua ou vertical do terreno registrada na imagem.

Os cientistas que usam o sensoriamento remoto, por outro lado, geralmente são treinados no método científico – uma maneira de pensar sobre os problemas e resolvê-los. Usam um plano formal que tem pelo menos cinco elementos: 1) enunciado do problema, 2) formulação das hipóteses da pesquisa (isto é, uma possível explicação), 3) observação e experimentação, 4) interpretação dos dados, e 5) delineamento das conclusões. Não é necessário seguir exatamente este plano formal.

O método científico é normalmente usado em conjunto com modelos ambientais que são baseados em dois tipos primários de lógica:

- lógica dedutiva
- lógica indutiva

Modelos baseados na lógica dedutiva e/ou indutiva podem ser ainda subdivididos de acordo com o seu processamento, seja deterministicamente ou estocasticamente (Jensen, 2005). Alguns cientistas extraem novas informações temáticas diretamente da imagem de sensoriamento remoto mesmo sem nunca usar explicitamente a lógica indutiva ou dedutiva. Eles estão interessados apenas na extração da informação a partir da imagem usando métodos e tecnologias apropriados. Esta abordagem tecnológica não é tão rigorosa, mas é comum no sensoriamento remoto aplicado. E também pode gerar novos conhecimentos.

O sensoriamento remoto é usado tanto na abordagem científica (indutiva e dedutiva) quanto na tecnológica para obter conhecimento. Há controvérsia sobre como os diferentes tipos de lógica usados no processo do sensoriamento remoto fornecem novos conhecimentos científicos (p.ex., Fussel et al., 1986; Curran, 1987; Fisher e Lindenberg, 1989; Dobson, 1993; Skidmore, 2002).

### Identificação dos Requisitos de Dados *In situ* e de Sensoriamento Remoto

Se uma hipótese é formulada usando lógica indutiva e/ou dedutiva, é identificada uma lista de variáveis ou observações que serão usadas durante a investigação. Observações *in situ* e/ou de sensoriamento remoto podem ser usadas para coletar informação sobre a maioria das variáveis importantes.

Cientistas usando tecnologias de sensoriamento remoto deveriam ser bem treinados nos procedimentos de coleta de dados no campo e no laboratório. Por exemplo, se um cientista quer mapear a temperatura superficial de um lago, em geral é necessário coletar algumas medidas da temperatura do lago *in situ* de forma precisa e empírica ao mesmo tempo em que os dados do sensor remoto forem coletados. As observações *in situ* podem ser usadas para 1) calibrar os dados do sensor remoto, e/ou 2) fazer uma avaliação não-viciada da precisão dos resultados finais (Congalton e Green, 1998). Os livros-textos de sensoriamento remoto fornecem alguma informação sobre técnicas de amostragem no campo e no laboratório. Entretanto, os procedimentos de amostragem *in situ* são mais bem aprendidos durante os cursos formais de ciência (por exemplo, química, biologia, floresta, solos, hidrologia, meteorologia). Também é importante saber como coletar de forma precisa informação sócio-econômica e demográfica em ambientes urbanos com base no treinamento em geografia humana, sociologia, etc.

Atualmente, a maioria dos dados *in situ* é coletada em conjunto com dados  $x$ ,  $y$ ,  $z$  do sistema de posicionamento global (GPS) (Jensen e Cowen, 1999). Os cientistas deveriam saber como coletar os dados de GPS em cada estação (local) de coleta de dados *in situ* e como fazer a correção diferencial para obter coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  precisas (Rizos, 2002).

### Requisitos de Dados Colaterais

Muitas vezes os dados *colaterais* (frequentemente chamados dados *auxiliares*), tais como modelos digitais de elevação, mapas de solos, mapas geológicos, arquivos com limites políticos, e estatísticas populacionais agrupadas, são importantes no processo de sensoriamento

remoto. Idealmente, os dados colaterais ficam residentes em um GIS (Clarke, 2001).

### Requisitos de Dados de Sensoriamento Remoto

Uma vez que tenhamos uma lista de variáveis, é útil determinar quais delas podem ser obtidas por sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto pode fornecer informação sobre duas classes de variáveis: *biofísicas* e *híbridas*.

**Variáveis biofísicas:** Algumas variáveis biofísicas podem ser medidas diretamente por um sistema de sensoriamento remoto. Isso significa que os dados de sensoriamento remoto podem fornecer diretamente informação biológica e/ou física (*biofísica*) fundamental, geralmente sem ter de usar outros dados substitutos ou auxiliares. Por exemplo, os sistemas de sensoriamento remoto no infravermelho termal podem registrar a temperatura aparente de um corpo rochoso pela medição da energia radiante que emana dessa superfície. Similarmente, é possível fazer sensoriamento remoto numa região muito específica do espectro e identificar a quantidade de vapor d'água na atmosfera. É possível também medir o teor de umidade do solo diretamente usando técnicas de sensoriamento remoto na faixa de micro-ondas (Engman, 2000). O Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS), da NASA, pode ser usado para medir a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) e o índice de área foliar (LAI). A localização  $x$ ,  $y$ , e a altura ( $z$ ) precisas de um objeto podem ser extraídas diretamente da fotografia aérea estereoscópica, de imagem de satélite com recobrimento (p.ex., SPOT), de dados de sensor de detecção de luz e distância (LIDAR), ou de imagem interferométrica de radar de abertura sintética (IFSAR).

A Tabela 1-2 é uma lista selecionada de variáveis biofísicas que podem ser obtidas por sensoriamento remoto usando sensores adequados para adquirir os dados. As características de muitos desses sistemas de sensoriamento remoto são discutidas nos Capítulos 4, 7, 8 e 9. Foram dados grandes passos no sensoriamento remoto de muitas dessas variáveis biofísicas. Elas são importantes para o esforço nacional e internacional em andamento para modelar o ambiente global (Jensen et al., 2002; Asrar, 2004).

**Variáveis Híbridas:** O segundo grupo geral de variáveis que podem ser obtidas por sensoriamento remoto inclui as variáveis híbridas, criadas pela análise sistemática de mais de uma variável biofísica. Por exemplo, pelo sensoriamento remoto das características de uma planta quanto à sua absorção pela clorofila, temperatura e teor de umidade, seria possível modelar esses dados para detectar estresse de vegetação — uma variável híbrida. A diversidade de variáveis híbridas é grande; conseqüentemente, nenhuma

Tabela 1-2. Seleção de variáveis biofísicas e híbridas, e o potencial dos sistemas de sensoriamento remoto usados para obter a informação.

Variáveis Biofísicas	Sistemas de Sensoriamento Remoto Potenciais
<b>Controle Geodésico <math>x, y, z</math></b>	- Sistemas de Posicionamento Global (GPS)
<b>Localização <math>x, y</math> a partir de Imagem Ortocorrigida</b>	- Fotografia aérea estereoscópica analógica ou digital, Ikonos da Space Imaging, QuickBird da DigitalGlobe, OrbView-3 da Orbimage, HRV-SPOT da França, Landsat (Thematic Mapper, Enhanced TM <sup>+</sup> ), IRS-1CD da Índia, Sensor de micro-ondas dos ERS-1 e 2 da Europa, MERIS-ENVISAT da Europa, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer), LIDAR, Radarsat 1 e 2 do Canadá, CBERS-1, 2 e 2B do Brasil-China.
<b>Topografia/Batimetria <math>z</math></b>	
- Modelo Digital de Elevação (DEM)	- GPS, fotografia aérea estereoscópica, LIDAR, SPOT, RADARSAT, IKONOS, QuickBird, OrbView-3, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Radar Interferométrico de Abertura Sintética (IFSAR)
- Modelo Batimétrico Digital (DBM)	- SONAR, LIDAR batimétrico, fotografia aérea estereoscópica
<b>Vegetação</b>	
- Pigmentos (p.ex., clorofilas $a$ e $b$ )	- Fotografia área colorida, ETM <sup>+</sup> Landsat, IKONOS, QuickBird, OrbView-3, SeaWiFS da Orbimage, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), ENVISAT, hiperespectral aerotransportado (p.ex., AVIRIS, HyMap, CASI)
- Estrutura e altura do dossel	- Fotografia aérea estereoscópica, LIDAR, RADARSAT, IFSAR
- Biomassa derivada de índices de vegetação	- Fotografia aérea infravermelha colorida (CIR), fotografia aérea, Landsat (TM, ETM <sup>+</sup> ), IKONOS, QuickBird, OrbView-3, Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), CBERS (CCD, WFI), Multiangle Imaging Spectroradiometer (MISR), sistemas hiperespectrais aerotransportados (p.ex., AVIRIS, HyMap, CASI)
- Índice de área foliar (LAI ou IAF)	
- Radiação fotossinteticamente ativa absorvida	
- Evapotranspiração	
<b>Temperatura Superficial</b> (terra, água, atmosfera)	- ASTER, AVHRR, GOES, Hyperion, MISR, MODIS, SeaWiFS, infravermelho termal aerotransportado
<b>Solos e Rochas</b>	
- Umidade	- ASTER, micro-ondas passivo (SSM/I), RADARSAT, MISR, ALMAZ, Landsat (TM, ETM <sup>+</sup> ), ERS-1 e 2, Intermap Star 3i
- Composição mineral	- ASTER, MODIS, sistemas hiperespectrais (p.ex., AVIRIS, HyMap, CASI)
- Taxonomia	- Fotografia área colorida de alta resolução e fotografia aérea infravermelha colorida (CIR), sistemas hiperespectrais aerotransportados (p.ex., AVIRIS, HyMap, CASI)
- Alteração hidrotermal	- Landsat (TM, ETM <sup>+</sup> ), ASTER, MODIS, hiperespectrais aerotransportados (p.ex., AVIRIS, HyMap, CASI)
<b>Rugosidade Superficial</b>	- Fotografia aérea, ALMAZ, ERS-1 e 2, RADARSAT, Intermap Star 3i, IKONOS, QuickBird, ASTER, ENVISAT ASAR
<b>Água</b>	
- Cor	- Fotografia aérea colorida normal e infravermelha, Landsat (TM, ETM <sup>+</sup> ), SPOT, IKONOS, QuickBird, OrbView-3, ASTER, SeaWiFS, MODIS, sistemas hiperespectrais aerotransportados (p.ex., AVIRIS, HyMap, CASI), AVHRR, GOES, LIDAR batimétrico, MISR, CERES, Hyperion, TOPEX/POSEIDON, MERIS
- Hidrologia de superfície	
- Minerais em suspensão	
- Clorofila/material orgânico em suspensão	
- Material orgânico dissolvido	

Tabela 1-2. Continuação.

Variáveis Biofísicas	Sistemas de Sensoriamento Remoto Potenciais
<b>Neve e Gelo Marinho</b> - Extensão e características	- Fotografia aérea colorida normal e infravermelha, AVHRR, GOES, Landsat (TM, ETM <sup>+</sup> ), SPOT, SeaWiFS, IKONOS, QuickBird, ASTER, MODIS, MERIS, ERS-1 e 2, RADARSAT
<b>Efeitos Vulcânicos</b> - Temperatura, gases	- ASTER, MISR, Hyperion, MODIS, sistemas hiperespectrais aerotransportados
<b>BRDF (Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional)</b>	- MISR, MODIS, CERES
Variáveis Híbridas Seleccionadas	Sistemas de Sensoriamento Remoto Potenciais
<b>Uso da Terra</b> - Comercial, residencial, transporte, etc. - Cadastral (propriedades) - Mapeamento para taxaço	- Fotografia aérea estereoscópica de alta resolução pancromática, colorida normal ou infravermelha, imagem de satélite de alta resolução espacial (<1 x 1 m: IKONOS, QuickBird, OrbView-3), SPOT (2,5 m), LIDAR, sistemas hiperespectrais de alta resolução espacial aerotransportados (p.ex., AVIRIS, HyMap, CASI)
<b>Vegetação</b> - Estresse	- Fotografia aérea colorida normal ou infravermelha, Landsat (TM, ETM <sup>+</sup> ), IKONOS, QuickBird, OrbView-3, AVHRR, SeaWiFS, MISR, MODIS, ASTER, MERIS, sistemas hiperespectrais aerotransportados (p.ex., AVIRIS, HyMap, CASI)

tentativa é feita para identificá-las. Entretanto, é importante salientar que o uso da terra e a cobertura da terra em escala nominal são variáveis híbridas. Por exemplo, a cobertura da terra de uma área particular numa imagem pode ser derivada a partir da avaliação de diversas variáveis biofísicas ao mesmo tempo [p.ex., localização ( $x$ ,  $y$ ) do objeto, altura ( $z$ ), cor e/ou tonalidade, biomassa e talvez temperatura]. Tãmanha atenção foi colocada no sensoriamento remoto dessas variáveis híbridas de escala nominal que as variáveis biofísicas escalonadas por *intervalo* ou *fração* foram muito negligenciadas até meados dos anos 1980s. O mapeamento em escala nominal do uso da terra e da cobertura da terra são potencialidades importantes da tecnologia do sensoriamento remoto e não deveriam ser minimizadas. Muitos cientistas sociais e físicos usam rotineiramente tais dados em suas pesquisas. Entretanto, agora há um dramático aumento na extração de dados biofísicos escalonados por intervalo e fração que são incorporados em modelos quantitativos que podem aceitar informação espacialmente distribuída.

#### Coleta de Dados de Sensoriamento Remoto

Os dados de sensoriamento remoto são coletados usando sistemas de sensoriamento remoto passivos ou ativos. Os

sensores passivos registram a radiação eletromagnética que é refletida ou emitida pelo terreno (Shippert, 2004). Por exemplo, câmeras e gravadores de vídeo podem ser usados para registrar a energia visível e infravermelha refletida pelo terreno. Um escãner multiespectral pode ser usado para registrar a quantidade de fluxo radiante termal que deixa o terreno. Sensores ativos, tais como os de microondas (RADAR), LIDAR ou SONAR, cobrem o terreno com energia eletromagnética gerada pelo próprio equipamento, e depois registram a quantidade de fluxo radiante espalhado de volta em direção ao sistema sensor.

Os sistemas de sensoriamento remoto coletam dados analógicos (p.ex., fotografias aéreas em papel ou dados de vídeo) e/ou dados digitais [p.ex., uma matriz (raster) de valores de brilho obtidos usando um escãner, uma matriz linear, ou uma matriz de área ou bidimensional]. Uma lista selecionada de alguns dos mais importantes sistemas de sensoriamento remoto é apresentada na Tabela 1-3.

A magnitude da radiação eletromagnética,  $L$  (watts  $m^{-2} sr^{-1}$ ; watts por metro quadrado por esterradiano), registrada dentro de um IFOV de um sistema de sensoriamento remoto óptico (p.ex., um elemento de imagem numa imagem digital), é uma função de:

Tabela 1-3. Seleção de sistemas de sensoriamento remoto e suas características.

Sistemas de Sensoriamento Remoto	Resolução							Espacial (m)	Temporal (dias)
	Azul	Verde	Vermelho	Infravermelho próximo	Infravermelho médio (SWIR)	Infravermelho termal	Micro-ondas		
<b>Sensores Suborbitais</b>									
Filme pancromático (preto e branco)		0,5						Variável	Variável
Filme colorido	0,4							Variável	Variável
Filme infravermelho colorido		0,5				0,9 µm		Variável	Variável
Câmeras métricas digitais (CCD)	1	1	1	1				0,25 - 5	Variável
CASI 1500	0,40		288 bandas			1,0 µm		Variável	Variável
AVIRIS - Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer	0,40		224 bandas					2,5 ou 20	Variável
Intermap Star-3i Radat banda								Variável	Variável
<b>Sensores em Satélites</b>									
NOAA-9 AVHRR LAC			1	1				1.100	14,5/dia
NOAA-K, L, M			1	1				1.100	14,5/dia
Landsat Multispectral Scanner (MSS)		1	1	2				79	16-18
Landsat 4 e 5 Thematic Mappers (TM)	1	1	1	1	2			30 e 120	16
Landsat 7 Enhanced TM (ETM+)	1	1	1	1	2			30 e 60	16
- Multispectral									
- Pancromático		0,52				0,9 µm		15	16
SPOT 4 HRV - Multispectral		1	1	1	1			20	com apontamento
- Pancromático		0,51				0,73 µm		10	com apontamento

Tabela 1-3. Seleção de sistemas de sensoriamento remoto e suas características (continuação).

	Resolução									
	Azul	Verde	Vermelho	Infravermelho próximo	Infravermelho médio (SWIR)	Infravermelho termal	Micro-ondas	Espacial (m)	Temporal (dias)	
<b>Sistemas de Sensoriamento Remoto</b>										
Série GOES (Leste e Oeste)		0,52		0,72 µm		4		700	0,5/dia	
European Remote Sensing Satellite (ERS-1 e 2)				Polarização VV Banda C (5,3 GHz)			1	26 - 28	-	
RADARSAT Canadense (vários modos)				Polarização HH Banda C (5,3 GHz)			1	9-100	1-6 dias	
Shuttle Imaging Radar (SIR-C)							3	30	Variável	
Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS)	3	2	1	2				1.130	1	
MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectrometer	0,405			36 bandas		14,385 µm		250, 500, 1000	1-2	
ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer				0,52 - 3 bandas - 0,86 µm				15, 30, 90	5, 16, 16	
MISR - Multiangle Imaging Spectro-Radiometer										
NASA Topex/Poseidon - TOPEX radar altimeter										
- POSEIDON single-frequency radiometer										
Space Imaging IKONOS										
- Multispectral	1	1	1	1				4	com apontamento	
- Pancromático	0,45			0,9 µm				1		
DigitalGlobe QuickBird										
- Multispectral	1	1	1	1				2,44	com apontamento	
- Pancromático	0,45			0,9 µm				0,61		

$$L = f(\lambda, s_{x,y,z}, t, \theta, P, \Omega) \quad (1-1)$$

onde

$\lambda$  = comprimento de onda (resposta espectral medida em várias bandas ou em frequências específicas). O comprimento de onda ( $\lambda$ ) e a frequência ( $\nu$ ) podem ser usados intercambiavelmente com base na sua relação com a velocidade da luz ( $c$ ) onde  $c = \lambda \times \nu$ .

$s_{x,y,z}$  = localização  $x$ ,  $y$ ,  $z$  do pixel e seu tamanho ( $x$ ,  $y$ );

$t$  = informação temporal, i.e., quando, durante quanto tempo, e com que frequência os dados são adquiridos;

$\theta$  = conjunto de ângulos que descrevem as relações geométricas entre a fonte de radiação (por exemplo, o Sol), o objeto de interesse no terreno (por exemplo, um campo ou talhão de milho), e o sistema de sensoriamento remoto;

$P$  = polarização da energia retroespalhada registrada pelo sensor; e

$\Omega$  = resolução radiométrica (precisão) com que os dados (i.e., radiação refletida, emitida, ou retroespalhada) foram registrados pelo sistema de sensoriamento remoto.

É interessante revisar brevemente as características dos parâmetros associados com a Equação 1-1 e como eles influenciam a natureza dos dados de sensoriamento remoto coletados.

### Informação Espectral e Resolução

A maioria das pesquisas de sensoriamento remoto é baseada no desenvolvimento de uma relação determinística (i.e., um modelo) entre a quantidade de energia eletromagnética refletida, emitida, ou retroespalhada em bandas ou frequências específicas e as características químicas, biológicas e físicas dos fenômenos em investigação (p.ex., um dossel de campo de milho). *Resolução espectral* é o número e a dimensão (tamanho) de intervalos de comprimentos de onda específicos (chamados de *bandas* ou *canais*) no espectro eletromagnético aos quais um instrumento de sensoriamento remoto é sensível.

Os sistemas de sensoriamento remoto *multiespectrais* registram a energia em múltiplas bandas do espectro eletromagnético. Por exemplo, nos anos 1970s e início dos 1980s, o Multispectral Scanner do Landsat (MSS) registrou dados de sensoriamento remoto de grande parte da Terra que ainda são de valor significativo para estudos de detecção de mudanças. As larguras das quatro bandas do MSS são mostradas na Figura 1-6a (banda 1 = 500 - 600 nm; banda 2 = 600 - 700 nm; banda 3 = 700 - 800 nm; e banda 4 = 800 - 1.100 nm). A largura nominal de uma

banda pode ser grande (isto é, grossieira), como a banda 4 do MSS Landsat no infravermelho próximo (800 - 1.100 nm) ou relativamente menor (isto é, mais fina), como a banda 3 do MSS do Landsat (700 - 800 nm). Neste caso, os detectores da banda 4 do MSS do Landsat registravam um intervalo relativamente largo de fluxo radiante refletido no infravermelho (300 nm de largura) enquanto os detectores da banda 3 do MSS registravam um intervalo bem mais reduzido de fluxo radiante no infravermelho (100 nm de largura).

As quatro bandas multiespectrais da câmera métrica digital do ADAR 5500 da Positive Systems são mostradas para fins comparativos (Figura 1-6a, c e d). As larguras de banda da câmera foram refinadas para registrarem informação em regiões mais específicas do espectro (banda 1 = 450 - 515 nm; banda 2 = 525 - 605 nm; banda 3 = 640 - 690 nm, e banda 4 = 750 - 900 nm). Há espaços entre as sensibilidades espectrais dos detectores. Observe que esse sistema de câmera digital também é sensível à energia refletida no comprimento de onda do azul.

A terminologia mencionada anteriormente é tipicamente usada para descrever a *resolução espectral nominal* de um sensor. Entretanto, é difícil criar um detector que tenha limites de comprimento de onda extremamente bem definidos tais como aqueles mostrados na Figura 1-6a. Mais propriamente, o método mais preciso para estabelecer o intervalo de comprimento de onda é observar a forma Gaussiana típica da sensibilidade do detector, como mostrado no exemplo da Figura 1-6b. O analista então determina a Largura Completa na Metade do Máximo (FWHM). Neste exemplo hipotético, a banda 3 do infravermelho próximo do MSS do Landsat em análise é sensível à energia entre 700 e 800 nm.

Um instrumento *hiperespectral* de sensoriamento remoto adquire os dados tipicamente em centenas de bandas espectrais (Goetz, 2002). Por exemplo, o Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) tem 224 bandas na região de 400 a 2.500 nm espaçadas de apenas 10 nm entre elas com base no critério de FWHM (Clark, 1999; NASA, 2006). Um cubo de dados hiperespectrais AVIRIS de uma porção da área da Usina Nuclear de Savannah River, perto de Aiken, Carolina da Sul, é mostrado na Figura 1-7. O sensoriamento remoto *ultraespectral* envolve a coleta de dados em muitas centenas de bandas.

Certas regiões ou bandas espectrais do espectro eletromagnético são ótimas para obter informações sobre parâmetros biofísicos. As bandas são normalmente selecionadas para maximizar o contraste entre o objeto de interesse e o seu substrato (i.e., o contraste objeto-substrato). A seleção cuidadosa das bandas espectrais pode melhorar a probabilidade de que a informação desejada vá ser extraída do sensor remoto.

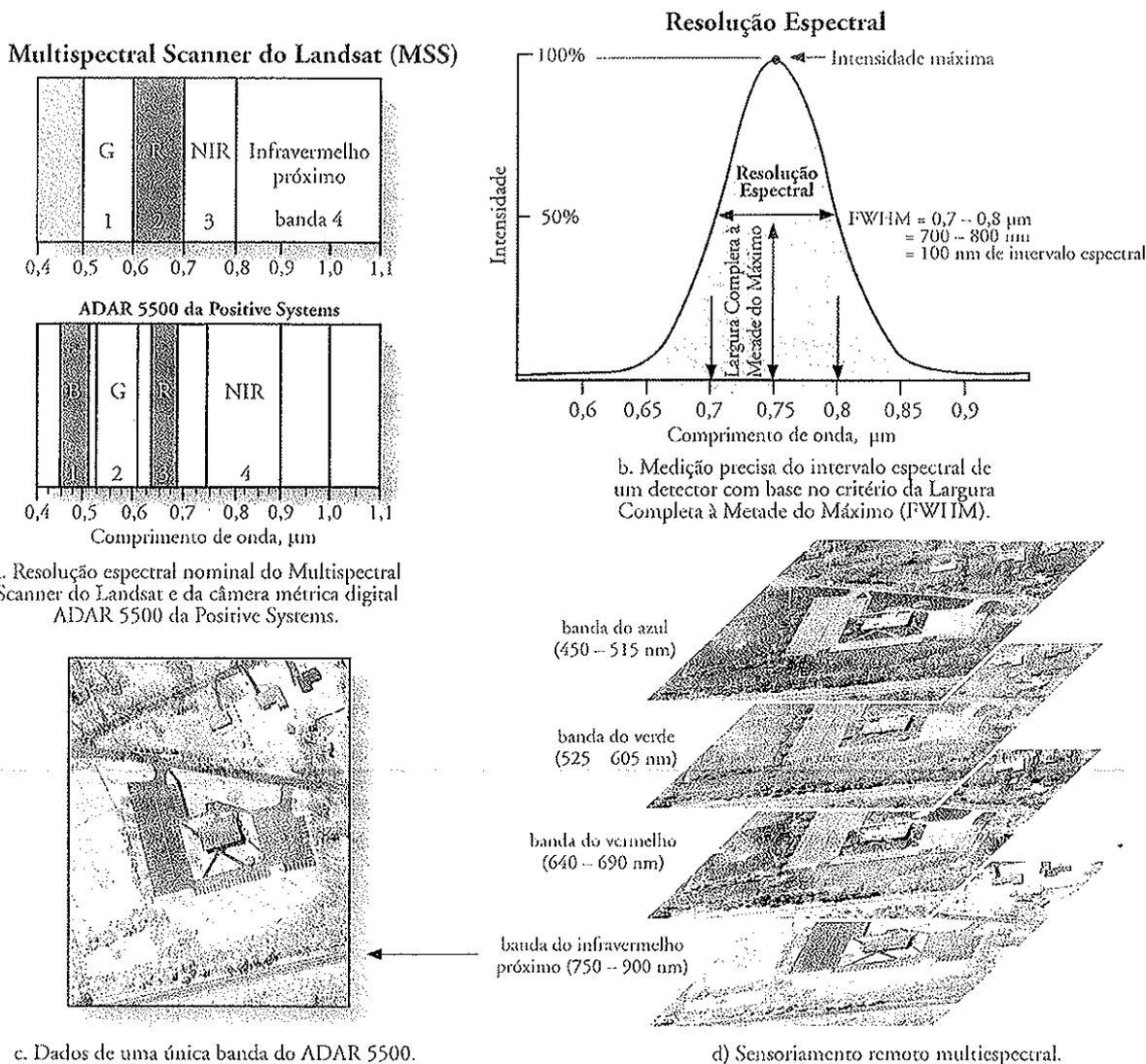


Figura 1-6 a) Intervalos espectrais das quatro bandas (verde, vermelho, e duas no infravermelho próximo) do Multispectral Scanner do Landsat (MSS) comparados com os intervalos espectrais de uma câmera métrica digital ADAR 5500. b) O intervalo espectral verdadeiro é a largura do perfil espectral de uma forma Gaussiana na Largura Completa na Metade da Máxima (FWHM) intensidade (Clark, 1999). Este exemplo tem intervalo espectral de 0,1  $\mu\text{m}$  (100 nm) entre 700 e 800 nm. c) Se desejável, é possível coletar energia refletida numa única banda do espectro eletromagnético (p.ex., 750 - 900 nm). Esta é uma imagem do ADAR 5500 de 0,33 x 0,33 m de resolução espacial no infravermelho próximo. d) Sensores multispectrais coletam dados em múltiplas bandas do espectro eletromagnético (as imagens são uma cortesia da Positive Systems, Inc.).

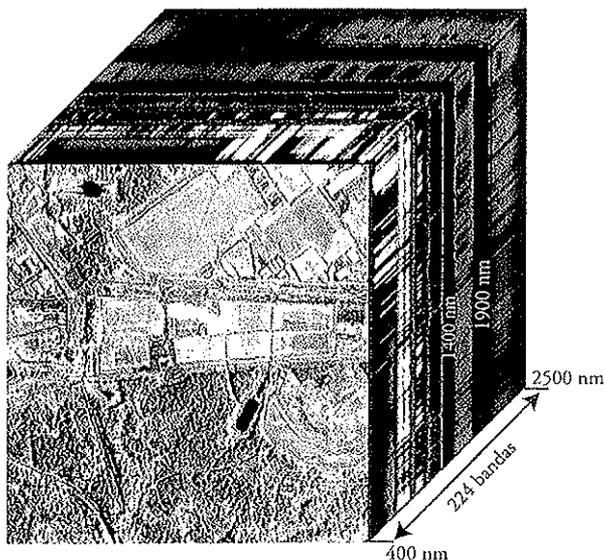
**Informação e Resolução Espacial**

A maioria dos estudos de sensoriamento remoto registra os atributos espaciais dos objetos no terreno. Por exemplo, cada cristal de haleto de prata numa fotografia aérea analógica e cada elemento de imagem (pixel) numa imagem digital de sensoriamento remoto está localizado numa posição específica na imagem e associado com coordenadas x,y específicas no terreno. Uma vez retificada para uma projeção cartográ-

fica padrão, a informação espacial associada com cada cristal de haleto de prata ou pixel é de valor significativo porque ela permite que a informação derivada do sensoriamento remoto seja usada com outros dados espaciais num GIS ou sistema de suporte à decisão (Jensen et al., 2002).

Há uma relação geral entre o tamanho de um objeto ou área a ser identificada e a resolução espacial de um sistema de sensoriamento remoto. *Resolução espacial* é uma medida

**Cubo de Dados Hiperespectrais do Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) da área da Usina do Savannah River próxima a Aiken, na Carolina do Sul.**



A imagem do infravermelho próximo no topo do cubo de dados é apenas uma das 224 bandas com intervalo espectral de 10 nm adquirida em 26 de Julho de 1999.

**Figura 1-7** Imagem hiperespectral de uma área da Usina do Savannah River, Carolina do Sul, obtida pelo Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) da NASA. A resolução espacial nominal é de 3,4 x 3,4 m. A atmosfera absorve a maioria da radiação eletromagnética próxima aos comprimentos de onda de 1.400 e 1.900 nm, causando as bandas escuras no cubo de dados hiperespectrais.

da menor separação angular ou linear entre dois objetos que pode ser determinada pelo sistema de sensoriamento remoto. A resolução espacial de fotografias aéreas pode ser medida por 1) colocação de linhas pretas e brancas paralelas e calibradas sobre placas colocadas no campo, 2) obtenção de fotografias aéreas da área de estudo, e 3) cálculo do número de *pares de linha por milímetro* determinado na fotografia. Também é possível determinar a resolução espacial de uma imagem pelo cálculo da sua função de transferência de modulação (MTF), a qual está além do escopo deste texto (Joseph, 2000).

Muitos sistemas de sensoriamento remoto em satélites usam ópticas que têm um campo de visada instantâneo (IFOV) constante (Figura 1-2). Assim, a *resolução espacial nominal* de um sistema sensor é definida como a dimensão em metros do IFOV projetado no terreno, onde o diâme-

tro do círculo (D)<sup>1</sup> no terreno é uma função do campo de visada instantâneo ( $\beta$ ) vezes a altitude ( $H$ ) do sensor sobre o nível do terreno (AGL) (Figura 1-2):

$$D = \beta \times H \quad (1-2)$$

Pixels são normalmente representados na tela do computador e em imagens em papel como retângulos com comprimento e largura. Portanto, descrevemos um sistema de resolução espacial nominal de um sistema sensor como sendo 10 x 10 m ou 30 x 30 m. Por exemplo, o QuickBird da DigitalGlobe tem resolução espacial nominal de 61 x 61 cm para sua banda pancromática e 2,44 x 2,44 m para as suas quatro bandas multiespectrais. O Enhanced Thematic Mapper Plus do Landsat-7 (ETM<sup>+</sup>) tem resolução espacial nominal de 15 x 15 m para a sua banda pancromática e 30 x 30 m para as suas seis bandas multiespectrais. Geralmente, quanto menor a resolução espacial nominal, maior o poder de resolução espacial do sistema de sensoriamento remoto.

A Figura 1-8 mostra uma imagem de câmera digital de uma área em Mechanicsville, Nova Iorque, em resoluções variando de 0,5 x 0,5 m a 80 x 80 m. Observe que não há uma diferença significativa na interpretabilidade nos dados de 0,5 x 0,5 m, nos de 1 x 1 m, e mesmo nos dados de 2 x 2 m. Entretanto, o conteúdo de informação urbana diminui rapidamente quando se usa imagem de 5 x 5 m e é praticamente inútil para análises urbanas as resoluções espaciais maiores de 10 x 10 m. Essa é uma razão histórica pela qual os dados MSS Landsat (79 x 79 m) são de pouco valor para a maioria das aplicações urbanas (Jensen e Cowen, 1999; Jensen et al., 2002).

Uma regra heurística prática útil é a de que, a fim de detectar uma feição, a resolução espacial nominal do sistema de sensoriamento remoto deveria ser pelo menos a metade do tamanho da feição medida na sua menor dimensão. Por exemplo, se quisermos identificar a localização de pequenas árvores num parque, a resolução espacial mínima aceitável seria aproximadamente a metade do diâmetro da menor copa de árvore encontrada no parque. Mesmo esta resolução espacial, entretanto, não garantirá sucesso se não houver diferença entre a resposta espectral da árvore (o objeto) e o solo ou a grama que está ao redor dela (isto é, o substrato).

Alguns sistemas sensores, como o LIDAR, não "mapeiam" completamente a superfície do terreno. Mais propriamente, a superfície é "amostrada" usando pulsos de laser enviados da aeronave num intervalo de tempo nominal (Ra-

<sup>1</sup> Em geral, como os detectores são retangulares ou quadrados, é comum usar as dimensões dos seus lados para calcular o IFOV. São raros os detectores circulares. (N.1.)

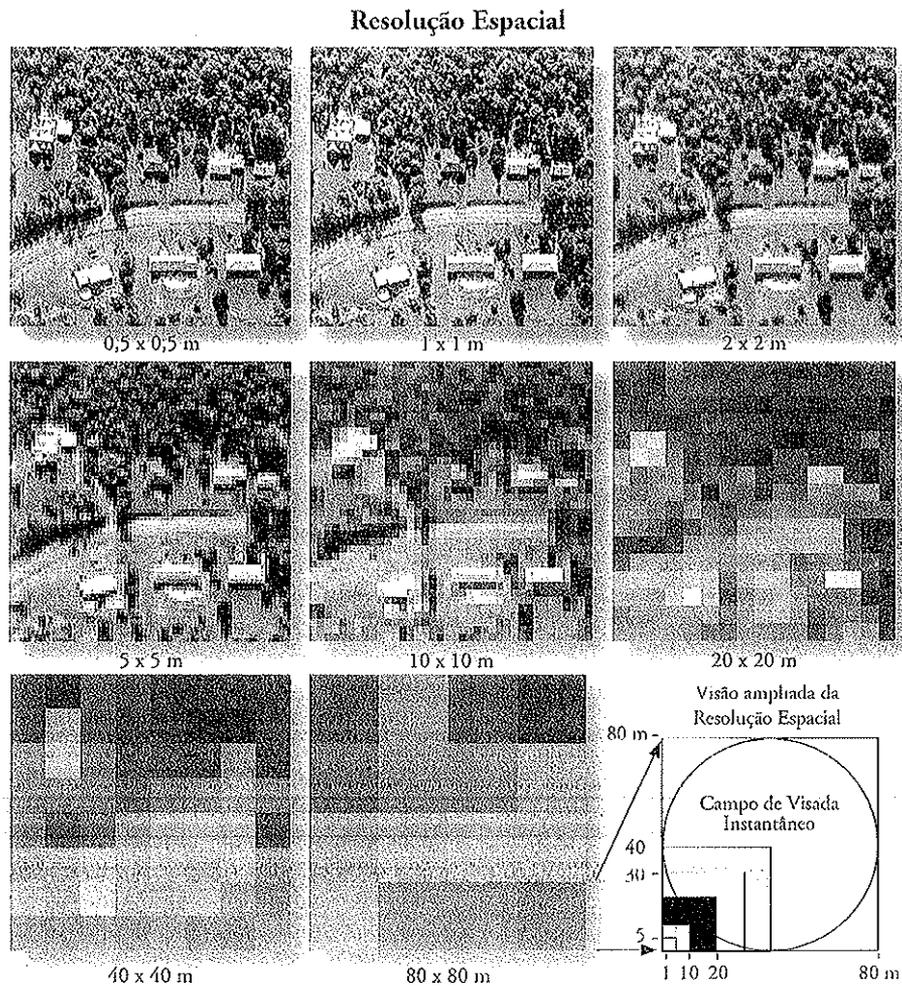


Figura 1-8 Imagem de uma área residencial próxima a Mechanicsville, Nova Iorque, obtida em 1º de Junho de 1998, na escala nominal de  $0,3 \times 0,3$  m usando uma câmara digital (cortesia da Litton Emerge, Inc.). Os dados originais foram reamostrados para gerar a imagem com as resoluções espaciais simuladas mostradas.

ber et al., 2002). A projeção do pulso de laser no terreno pode ser muito pequena (p.ex., 10 – 15 cm de diâmetro) com amostras localizadas aproximadamente a cada 1 a 6 m no terreno. A resolução espacial seria apropriadamente descrita pela projeção do pulso de laser no terreno (p.ex., 15 cm), mas a *densidade de amostragem* (i.e., o número de pontos por unidade área) descreve a frequência das observações no terreno (Hodgson et al., 2005).

Como temos informação espacial sobre a localização de cada pixel ( $x,y$ ) na imagem matricial, é também possível examinar a relação espacial entre um pixel e seus vizinhos. Conseqüentemente, a magnitude de auto-correlação espectral e outras medidas geoestatísticas espaciais podem ser determinadas com base na informação espacial inerente na imagem (Walsh et al., 1999; Jensen, 2005).

### Informação e Resolução Temporal

Uma das coisas de muito valor quanto à ciência do sensoriamento remoto é que ela obtém um registro das feições da Terra num momento único no tempo. Registros múltiplos da mesma feição terrestre obtidos através do tempo podem ser úteis para identificar processos em desenvolvimento e fazer previsões.

A *resolução temporal* de um sistema de sensoriamento remoto geralmente se refere a quão frequentemente o sensor registra imagens de uma área particular. A resolução temporal do sistema sensor mostrado na Figura 1-9 é de 16 dias. Idealmente, o sensor obtém dados repetitivamente para captar características discriminativas singulares de um objeto sob investigação (Haack et al., 1997). Por exemplo,

### Resolução Temporal

Aquisição de Dados por um Sensor Remoto

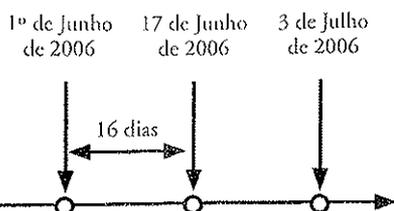


Figura 1-9 A resolução temporal de um sistema de sensoriamento remoto refere-se à frequência com que ele registra a imagem de uma certa área. Este exemplo mostra a coleta sistemática de dados a cada 16 dias, presumivelmente aproximadamente à mesma hora do dia. Os Thematic Mappers dos Landsat-4 e 5 tinham ciclos de revisita de 16 dias.

as culturas agrícolas têm ciclos fenológicos bem definidos em cada região geográfica (discutido no Capítulo 11). Para medir variáveis agrícolas específicas, é necessário adquirir dados de sensoriamento remoto em datas críticas no ciclo fenológico (Johannsen et al., 2003). A análise de imagens de múltiplas datas fornece informação sobre como as variáveis estão mudando através do tempo. A informação de mudança fornece indicativos sobre os processos influenciadores do desenvolvimento da cultura (Jensen et al., 2002). Felizmente, vários sistemas sensores em satélites, como o SPOT, IKONOS, ImageSat e QuickBird são apontáveis, significando que eles podem adquirir imagens fora do nadir. *Nadir* é o ponto diretamente abaixo do satélite ou plataforma. Isso aumenta substancialmente a probabilidade de que a imagem será obtida durante a estação de crescimento ou durante uma emergência. Entretanto, a visada oblíqua fora do nadir também introduz problemas quanto à função de distribuição da reflectância bidirecional (BRDF), discutida na próxima seção.

Frequentemente, há análises de relações custo/benefício associadas com as várias resoluções que devem ser feitas ao coletar dados de sensoriamento remoto (Figura 1-10; Prancha Colorida 1-1). Geralmente, quanto maior o requisito de resolução temporal (p.ex., monitoramento de furacões a cada meia hora), menor o requisito de resolução espacial (p.ex., o satélite meteorológico NOAA GOES registra imagens com pixels de 4 x 4 a 8 x 8 km). Por outro lado, quanto maior o requisito de resolução espacial (p.ex., monitoramento do uso da terra em área urbana com dados de 1 x 1 m), menor o requisito de resolução temporal (p.ex., a cada 1 a 10 anos). Por exemplo, a Figura 1-11 documenta o sensível desenvolvimento residencial e comercial do uso da terra para uma área perto de Atlanta, Geórgia, usando fotografias aéreas de

alta resolução espacial (1 x 1 m) obtidas em 1993 e 1999. Algumas aplicações, tais como tipo de cultura ou estimativa de safras, poderiam requerer dados de alta resolução temporal (p.ex., várias imagens obtidas durante a estação de crescimento) e dados de resolução espacial moderada (p.ex., pixels de 250 x 250 m). Aplicações de resposta a emergências podem necessitar de coletas de dados com resoluções espaciais e temporais muito altas, que geram uma enorme quantidade de dados.

Um outro aspecto da informação temporal é a forma como muitas observações são registradas a partir de um pulso único de energia que é dirigido à Terra por um sensor ativo, tal como um LIDAR. Por exemplo, a maioria dos sensores LIDAR emite um pulso de energia a laser e grava múltiplas respostas desse pulso. Medições de diferença no tempo entre as múltiplas respostas permitem a determinação da altura dos objetos e da estrutura do terreno. Também, a duração do tempo necessário para emitir um sinal de energia por um sensor ativo é chamada de *duração do pulso*. Pulsos de curta duração permitem medições precisas de distância (i.e., extensão).

### Informação e Resolução Radiométrica

Alguns sistemas de sensoriamento remoto registram a radiação eletromagnética refletida, emitida, ou retroespalhada com mais precisão que outros sistemas sensores. Isso é análogo a fazer uma medição com uma régua. Se você quiser medir precisamente o comprimento de um objeto você preferiria usar uma régua que tivesse 16 ou 1.024 subdivisões?

*Resolução radiométrica* é definida como a sensibilidade de um detector de sensoriamento remoto a diferenças na potência do sinal à medida que ele registra o fluxo radiante refletido, emitido, ou retroespalhado pelo terreno. Ele define o número de níveis de sinal claramente discriminados. Portanto, a resolução radiométrica pode ter um impacto significativo em nossa habilidade para medir as propriedades dos objetos da cena. O Multispectral Scanner do Landsat-1 lançado em 1972 registrava a energia refletida com uma precisão de 6 bits (valores variando 0 a 63). Os sensores do Thematic Mapper dos Landsat-4 e 5 lançados em 1982 e 1984, respectivamente, registravam os dados em 8 bits (valores de 0 a 255) (Figura 1-12). Assim, os sensores TM/Landsat tiveram a resolução radiométrica (sensibilidade) melhorada quando comparados com os MSS/Landsat originais. Os sensores QuickBird e IKONOS registram a informação em 11 bits (valores de 0 a 2.047). Vários novos sistemas sensores têm resolução radiométrica de 12 bits (valores variando de 0 a 4.095). Às vezes a resolução radiométrica é chamada de nível de *quantização*. Uma alta resolução radiométrica geralmente aumenta a probabilidade de que os fenômenos sejam avaliados com mais exatidão pelo sensoriamento remoto.

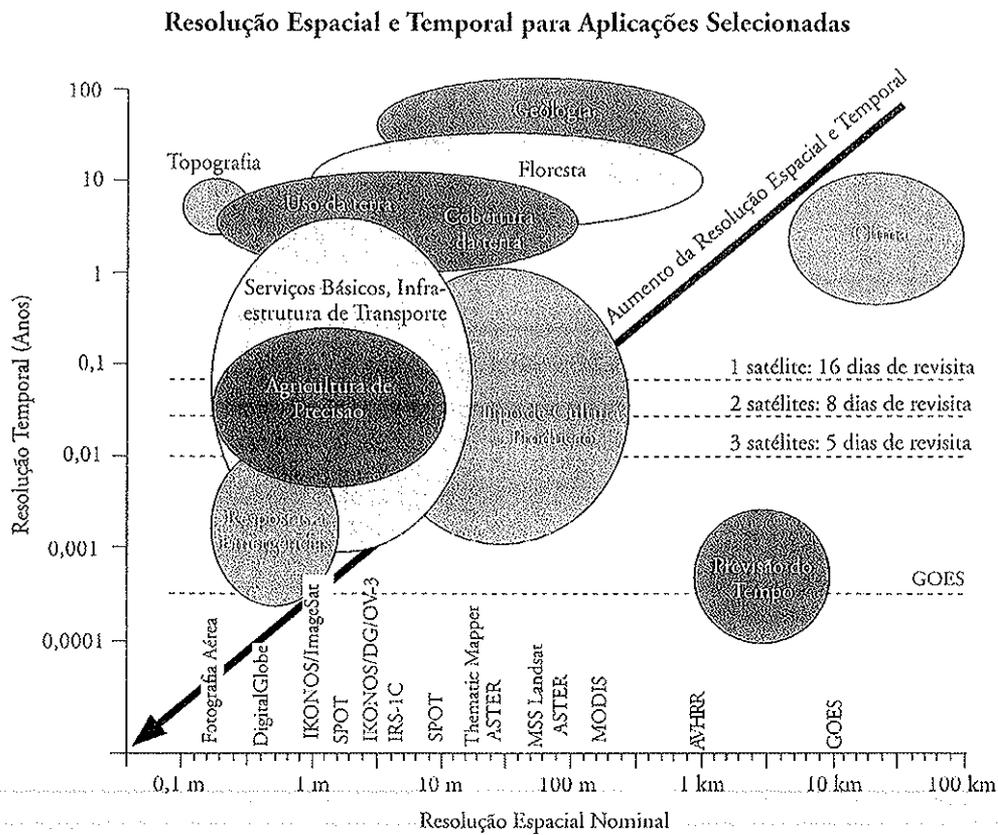


Figura 1-10 Há considerações sobre resolução espacial e temporal que precisam ser feitas para certas aplicações (Prancha Colorida 1-1). Um maior detalhamento dos requisitos espaciais e temporais para aplicações urbanas encontra-se no Capítulo 13.

### Ortofotos Digitais de uma Área Próxima a Atlanta, Geórgia

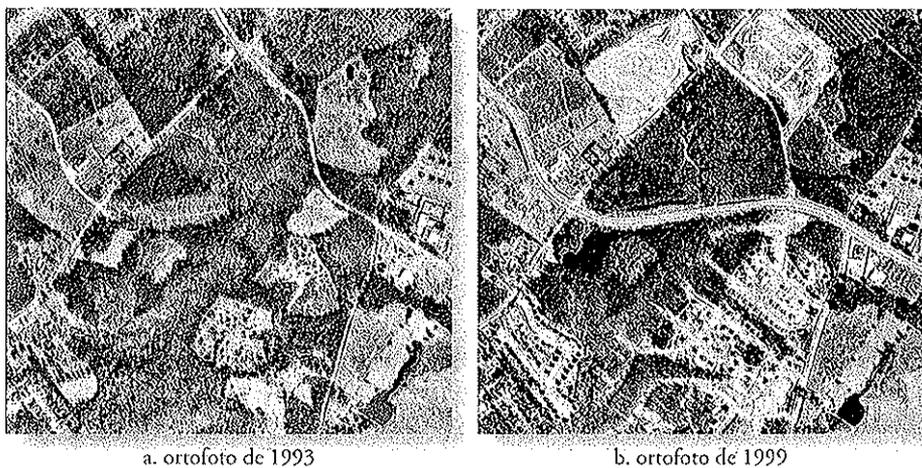


Figura 1-11 Trechos de ortofotos digitais de uma área próxima a Atlanta, Geórgia. Esses dados ficam no banco de dados da Georgia Spatial Data Infrastructure e são úteis para o monitoramento da mudança de uso-da-terra ao longo do tempo e do processo de urbanização.

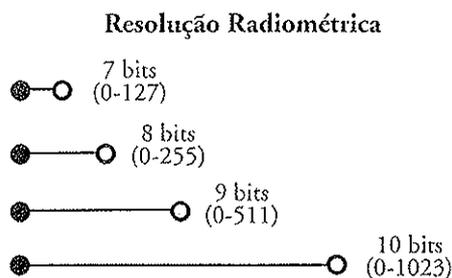


Figura 1-12 A resolução radiométrica de um sistema de sensoriamento remoto é a sensibilidade dos seus detectores a diferenças na potência do sinal ao registrarem o fluxo radiante refletido, emitido ou retroespalhado pelo terreno. A energia normalmente é quantizada durante o processo de conversão analógico-para-digital (A-D) em 8, 9, 10 bits ou mais.

### Informação de Polarização

As características de polarização da energia eletromagnética registradas por um sistema de sensoriamento remoto são uma variável importante que pode ser usada em muitas das investigações dos recursos terrestres (Curran et al., 1998). A luz solar é fracamente polarizada. Entretanto, quando a luz solar atinge um objeto não-metálico (p.ex., grama, floresta, ou concreto) ela se torna despolarizada e a energia incidente é espalhada diferenciadamente. Geralmente, quanto mais lisa a superfície, maior é a polarização. É possível usar filtros de polarização em sistemas de sensoriamento remoto passivos (p.ex., câmeras aéreas) para registrar a luz polarizada em vários ângulos. Também é possível transmitir e receber seletivamente energia polarizada usando sistemas ativos de sensoriamento remoto, como o RADAR (p.ex., enviar radiação polarizada horizontal, receber radiação polarizada vertical – HV; enviar vertical, receber horizontal – VH; enviar vertical, receber vertical – VV; enviar horizontal, receber horizontal – HH). A imagem de RADAR multipolarizada é uma aplicação especialmente útil da energia polarizada.

### Informação Angular

Os sistemas de sensoriamento remoto registram características angulares muito específicas associadas com cada cristal de haleto de prata exposto ou pixel (Barnsley, 1999). As características angulares são uma função da (Figura 1-13a):

- localização na esfera tridimensional da fonte de iluminação (p.ex., o Sol para um sistema passivo ou o próprio sensor no caso do RADAR, LIDAR e SONAR) e seus ângulos azimutais e zenitais associados,
- da orientação da face do terreno (pixel) ou cobertura do terreno (p.ex., vegetação) sob investigação, e

- da localização do sistema de sensoriamento remoto orbital ou suborbital e seus ângulos azimutais e zenitais associados.

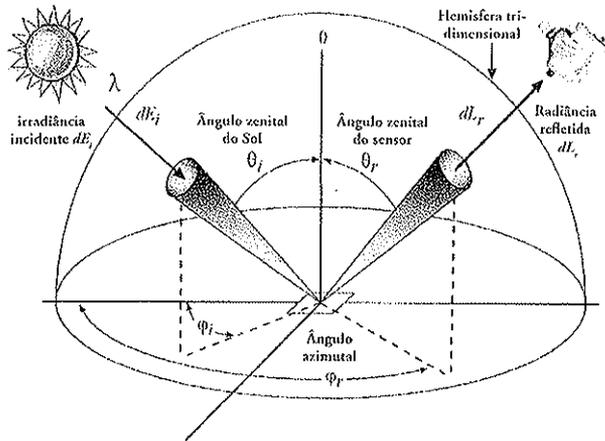
Há sempre um ângulo de incidência associado à energia incidente que ilumina o terreno e um ângulo de exitância do terreno para o sistema sensor. Sabe-se que esta natureza bidirecional da coleta de dados de sensoriamento remoto influencia as características espectrais e de polarização da radiação no sensor,  $L$ , registrada pelo sistema de sensoriamento remoto.

Um *goniômetro* pode ser usado para documentar as mudanças de radiação no sensor,  $L$ , causadas pela mudança da posição do sensor e/ou da fonte de iluminação (p.ex., o Sol) (Figura 1-13b). Por exemplo, a Figura 1-13c apresenta gráficos tridimensionais dos dados de BRDF de grama (*Spartina alterniflora*) coletados às 8 a.m., 9 a.m., 12 p.m., 4 p.m. de 21 de março de 2000, para a banda de 624,20 nm. A única coisa que mudou entre as observações foi o ângulo azimutal e zenital do Sol. Os ângulos azimutais e zenitais do espectrorradiômetro foram mantidos constantes enquanto se visava a grama em estudo. Idealmente, os gráficos de BRDF seriam idênticos, sugerindo que não importa em que hora do dia coletamos os dados de sensoriamento remoto, uma vez que as características de reflectância espectral da grama lisa permanecem constantes. Fica claro que este não é o caso e que a hora do dia influencia a resposta espectral. O Multisangle Imaging Spectroradiometer (MISR), a bordo do satélite Terra, foi planejado para investigar os fenômenos de BRDF. A pesquisa continua sobre como incorporar a informação de BRDF no sistema de processamento de imagens digitais para melhorar nosso entendimento do que é registrado numa imagem de sensoriamento remoto (Sandmeier, 2000; Schill et al., 2004). A informação angular é central para usar os dados de um sensor remoto em aplicações fotogramétricas. A análise de uma imagem estereoscópica é baseada na pressuposição de que o sensoriamento remoto de um objeto no terreno dá-se a partir de dois ângulos. A visada do mesmo terreno sob duas visadas diferentes introduz a paralaxe estereoscópica, que é o fundamento para a análise fotogramétrica estereoscópica e radargramétrica (Light e Jensen, 2002).

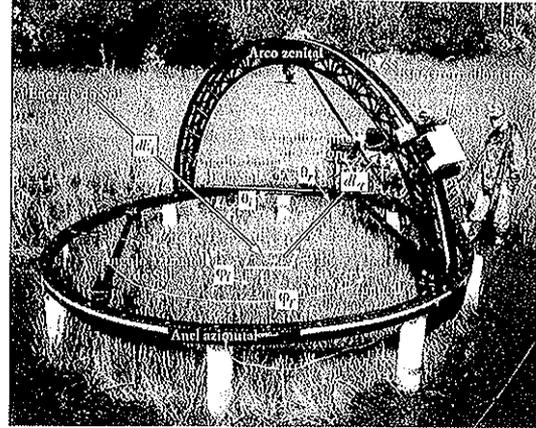
### Sistemas Suborbitais (Aeronave) de Sensoriamento Remoto

Câmeras fotogramétricas de alta qualidade montadas a bordo de aeronaves continuam a fornecer fotografias aéreas para muitas aplicações em recursos terrestres. Por exemplo, o U.S. Geological Survey's National Aerial Photography Program (NAPP) sistematicamente coletava fotografias aéreas preto e branco ou infravermelhas coloridas na escala de

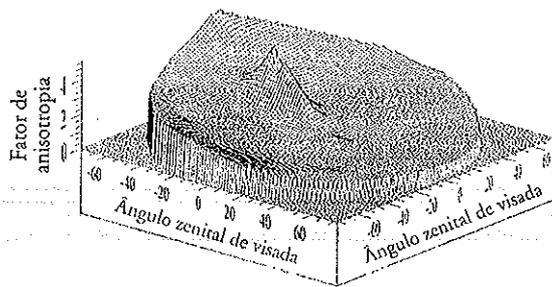
Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional (BRDF)



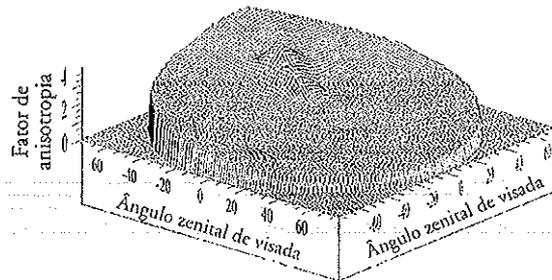
a. Relações angulares.



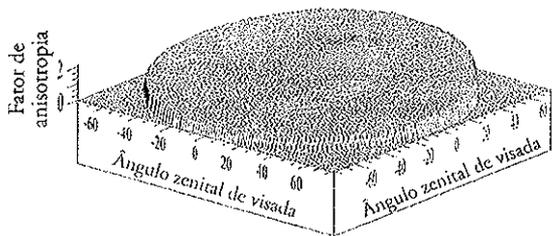
b. Goniômetro de Campo de Sandmeier.



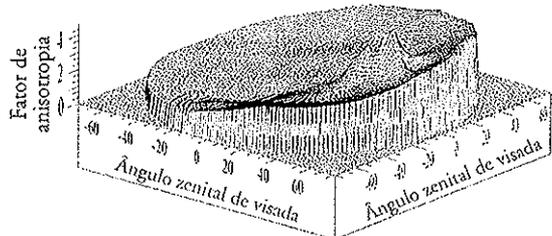
Banda 624,20 nm 8:00 a.m.  $\theta_i 20,4^\circ \phi_i 103,4^\circ$



Banda 624,20 nm 9:00 a.m.  $\theta_i 32,3^\circ \phi_i 113,0^\circ$



Banda 624,20 nm 12:00 p.m.  $\theta_i 57,1^\circ \phi_i 169,0^\circ$



Banda 624,20 nm 4:00 p.m.  $\theta_i 29,8^\circ \phi_i 248,7^\circ$

c. Comparação dos gráficos horários e tridimensionais dos dados de BRDF do capim praturá (*Spartina alterniflora*) às 8 a.m., 9 a.m., 12 p.m., e 4 p.m. num campo vegetado em 21-22 de Março de 2000, para a banda de 624,20 nm.

Figura 1-13 a) Conceitos e parâmetros da função de distribuição da reflectância bidirecional (BRDF). Um alvo recebe uma irradiância ( $dE_i$ ) a partir de um ângulo Solar zenital e azimutal específico, e o sensor registra a radiação ( $dL_r$ ) emergindo do alvo de interesse num ângulo azimutal e zenital específico. b) O Goniômetro de Campo de Sandmeier fazendo medições de BRDF em gramínea capim praturá (*Spartina alterniflora*) em North Inlet, Carolina do Sul. As medições espectrais são feitas com o ângulo zenital do Sol  $\theta_i$  e ângulo azimutal do Sol  $\phi_i$ , e um ângulo zenital do sensor  $\theta_r$  e ângulo azimutal do sensor  $\phi_r$ . Um espectrorradiômetro GER 3700, acoplado à plataforma móvel deslizando no arco zenital, registra a quantidade de radiação que deixa o alvo em 704 bandas e 76 ângulos (Sandmeier, 2000; Schill et al., 2004). c) Gráficos horários tridimensionais de dados BRDF.

1:40.000 da maior parte do Estados Unidos a cada cinco ou 10 anos. Alguns desses dados fotogramétricos agora estão sendo coletados usando câmeras métricas digitais. Além disso, sofisticados sistemas de sensoriamento remoto são rotineiramente montados em aeronaves para fornecerem dados de sensoriamento remoto em altas resoluções espaciais e espectrais. Os exemplos incluem sensores hiperespectrais tais como o AVIRIS da NASA, o Canadian Airborne Imaging Spectrometer (CASI - Espectrômetro Imageador Aerotransportado), e o sistema hiperespectral australiano HyMap. Esses sensores podem coletar dados sob demanda quando ocorrem desastres (por exemplo, derramamentos de óleo ou enchentes) se as condições de cobertura de nuvem assim o permitirem. Também há numerosos radares, como o Star-3i da Intermap, que podem voar em aeronaves dia e noite e sob tempos inclementes. Infelizmente, os dados de sensores remotos suborbitais geralmente têm um alto custo por km<sup>2</sup>. A turbulência também pode fazer com que os dados tenham severas distorções geométricas, que podem ser de difícil correção.

#### Sistemas de Sensoriamento Remoto por Satélite Atuais e Propostos

Os sistemas de sensoriamento remoto a bordo de satélites fornecem dados de alta qualidade e relativamente baratos quando analisados por km<sup>2</sup>. Por exemplo, os satélites European Remote Sensing (ERS-1 e 2) coletam imagens de micro-ondas ativas (RADAR) na banda C com resolução espacial de 26 x 28 m mesmo através das nuvens. Da mesma forma, o RADARSAT da Agência Espacial Canadense obtém imagens de micro-ondas ativas na banda C. Os Estados Unidos fizeram progresso com os sistemas de varredura multiespectrais (MSS/Landsat lançado em 1972), e com sistemas mais avançados de varredura (Enhanced Thematic Mapper Plus, do Landsat-7 em 1999). O Land Remote Sensing Policy Act (Ato Normativo de Política de Sensoriamento Remoto Terrestre) de 1992, dos Estados Unidos, especificou o futuro dos programas norte americanos de satélites de sensoriamento remoto (Asker, 1992; Jensen, 1992). Infelizmente, o Landsat-6 com o seu Enhanced Thematic Mapper não atingiu a órbita quando lançado em 5 de Outubro de 1993. O Landsat-7 foi lançado em 15 de Abril de 1999 para minimizar o problema norte americano de ausência de dados de sensoriamento remoto terrestre. Infelizmente, ele agora enfrenta sérios problemas com o seu corretor de linhas de varredura. O Capítulo 7 revisa os planos de proposta de continuidade da missão do Landsat – Landsat Data Continuity Mission. Enquanto isso, os franceses foram pioneiros no desenvolvimento da tecnologia de matrizes lineares para sensoriamento remoto, com o lançamento dos satélites SPOT-1 ao 5 em 1986, 1990, 1993, 1998, e 2002, respectivamente.

O International Geosphere-Biosphere Program (IGBP - Programa Internacional de Geosfera – Biosfera) e o United States Global Change Research Program (USGCRP - Programa de Pesquisa em Mudanças Globais dos Estados Unidos) visam à pesquisa científica para esclarecer e entender os processos interativos físicos, químicos e biológicos que regulam todo o sistema terrestre. O sistema espacial de sensoriamento remoto é uma parte integrante desses programas de pesquisa porque fornece o único meio de observação dos ecossistemas globais de uma forma consistente e sinóptica. O Earth Science Enterprise (ESE - Programa de Ciência Terrestre) da NASA é o nome dado ao plano coordenado para fornecer as plataformas e instrumentos orbitais necessários e um Sistema de Dados e Informações para o Sistema de Observação da Terra (Earth Observing System Data and Information System - EOSDIS), e pesquisas científicas relacionadas para o IGBP. O Sistema de Observação da Terra (Earth Observing System - EOS) é uma série de satélites que orbitam a Terra e que fornecerão observações globais por 15 anos ou mais. Os primeiros satélites foram lançados no final dos anos 1990s. O EOS é complementado por missões e instrumentos em parcerias internacionais. Por exemplo, a Missão de Mapeamento da Chuva Tropical (Tropical Rainfall Mapping Mission - TRMM) é uma missão conjunta NASA/Japão.

**O Plano Científico do EOS:** Asrar e Dozier (1994) conceberam a condução da ciência do sensoriamento remoto como parte do ESE da NASA. Sugeriram que a Terra consiste de dois subsistemas: 1) o clima físico, e 2) os ciclos biogeoquímicos ligados pelo ciclo hidrológico global, como mostrado na Figura 1-14. O subsistema de *clima físico* é sensível a flutuações no balanço de radiação da Terra. As atividades humanas têm causado mudanças no mecanismo de aquecimento radiativo do Planeta que iguala ou excede as mudanças naturais. Os aumentos dos gases de efeito estufa entre 1765 e 1990 causaram uma forçante radiativa de 2,5 W m<sup>-2</sup>. Se essa taxa for mantida, pode resultar num acréscimo da temperatura média global de cerca de 0,2 a 0,5 °C por década durante este século. As erupções vulcânicas e a capacidade dos oceanos para absorver calor podem impactar as projeções. Não obstante, as seguintes questões estão sendo colocadas usando sensoriamento remoto (Asrar e Dozier, 1994):

- Como as nuvens, vapor d'água, e aerossóis mudam os balanços de radiação e calor terrestre com o acréscimo das concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa?
- Como os oceanos interagem com a atmosfera no transporte e absorção de calor?
- Como as propriedades da superfície terrestre, como a neve e a cobertura de gelo, evapotranspiração, uso da terra urbana/suburbana, e a vegetação influenciam a circulação?

Os *ciclos biogeoquímicos* da Terra também têm sido mudados pelo ser humano. O dióxido de carbono atmosférico aumentou em 30% desde 1859, o metano em mais de 100%, e as concentrações de ozônio na estratosfera têm diminuído, causando aumentos nos níveis de radiação ultravioleta que atingem a superfície terrestre. As pesquisas em mudanças globais ressaltam as seguintes questões:

- Que papel os componentes da biosfera oceânica e terrestre desempenham na mudança do balanço global de carbono?
- Que efeitos nos ecossistemas naturais e manejados são causados pelo acréscimo de dióxido de carbono e deposição ácida, alterações nos padrões de precipitação, e mudanças na erosão dos solos, química dos rios, e concentração de ozônio na atmosfera?

O *ciclo hidrológico* liga os ciclos biogeoquímicos e o clima físico. As mudanças de fase da água em seu estado gasoso, líquido e sólido envolvem o armazenamento e a liberação de calor latente; assim, ele influencia a circulação atmosférica e redistribui globalmente a água e o calor (Asrar e Dozier, 1994). O ciclo hidrológico é o processo integrador para os fluxos de água, energia e elementos químicos entre os componentes do sistema terrestre. Questões importantes a serem assinaladas incluem essas três:

- Como a variabilidade atmosférica, as atividades humanas e as mudanças climáticas afetam os padrões de umidade, precipitação, evapotranspiração e umidade do solo?
- Como a umidade do solo varia no tempo e no espaço?
- Podemos prever mudanças no ciclo hidrológico global usando modelos e sistemas de observações atuais e futuros?

Essas e outras questões científicas são atualmente articuladas nas áreas focais da Ciência do Sistema Terrestre da NASA (Asrar, 2004). Os modelos que levam em conta essas questões científicas requerem sofisticadas medições de sensoriamento remoto. Para este fim, o satélite *Terra* do EOS foi lançado em 18 de Dezembro de 1999. Ele contém cinco instrumentos de sensoriamento remoto (MODIS, ASTER, MISR, CERES, e MOPITT) projetados para considerarem muitos desses tópicos de pesquisa (King, 2003). O satélite *Aqua* do EOS foi lançado em Maio de 2002. O Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS - Espectrômetro Imageador de Resolução Moderada) tem 36 bandas de 0,405 a 14,385  $\mu\text{m}$  que coletam dados com resoluções espaciais de 250 x 250 m, 500 x 500 m, e 1 x 1 km. O MODIS cobre a superfície terrestre inteira a cada 1 ou 2 dias, fazendo observações em

36 bandas espectrais da superfície terrestre e oceânica, da temperatura, da produtividade primária, da cobertura da superfície terrestre, nuvens, aerossóis, vapor d'água, perfis de temperatura, e incêndios florestais.

O Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER - Radiômetro Espacial Avançado de Emissão Térmica e Reflexão) tem cinco bandas na região do infravermelho termal entre 8 e 12  $\mu\text{m}$  com pixels de 90 m. Ele também tem três bandas largas entre 0,5 e 0,9  $\mu\text{m}$  com pixels de 15 m e capacidade estéreo, e seis bandas na região do infravermelho de ondas curtas (1,6 - 2,5  $\mu\text{m}$ ) com resolução espacial de 30 m. O ASTER é o sistema sensor que tem a melhor resolução espacial na plataforma *Terra* do EOS e fornece informação sobre a temperatura superficial, que pode ser usada em modelos de evapotranspiração.

O Multiangle Imaging Spectroradiometer (MISR - Espectrorradiômetro Imageador Multiangular) tem nove câmeras de varredura eletrônica baseadas em dispositivos de carga acoplada (CCD) para observar a Terra em quatro bandas espectrais e em nove ângulos de visada. Ele fornece dados de nuvens, aerossóis atmosféricos, e visadas em múltiplos ângulos de desertos, vegetação e cobertura de gelo da Terra. O Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES - Sistema de Nuvens e Energia Radiante Terrestre) consiste de dois radiômetros de varredura que medem o balanço de radiação terrestre e fornecem estimativas de propriedades das nuvens para avaliar seu papel nos fluxos radiativos da superfície da Terra para o topo da atmosfera. Finalmente, o Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT - Sistema de Medição de Poluição na Troposfera) é um radiômetro de varredura que fornece informação sobre a distribuição, transporte, fontes e sumidouros de monóxido de carbono e metano na troposfera.

O Projeto Preparatório (NPP - Preparatory Project to NPOESS) do National Polar-Orbiting Operational Environmental Satellite System (NPOESS - Sistema Nacional de Satélites Ambientais Operacionais de Órbita Polar) a ser lançado ampliará as medições-chaves do EOS como suporte ao monitoramento de longo prazo das tendências climáticas e da produtividade biológica global até que o NPOESS possa ser lançado em algum momento do futuro. O NPP conterá instrumentos parecidos com os do MODIS, tais como o Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS - Conjunto de Radiômetros Imageadores no Visível e Infravermelho). Com uma vida útil projetada de cinco anos, o NPP fornecerá dados entre o final das vidas úteis projetadas dos satélites *Terra* e *Aqua* do EOS e o lançamento do NPOESS (NOAA NPOESS, 2006).

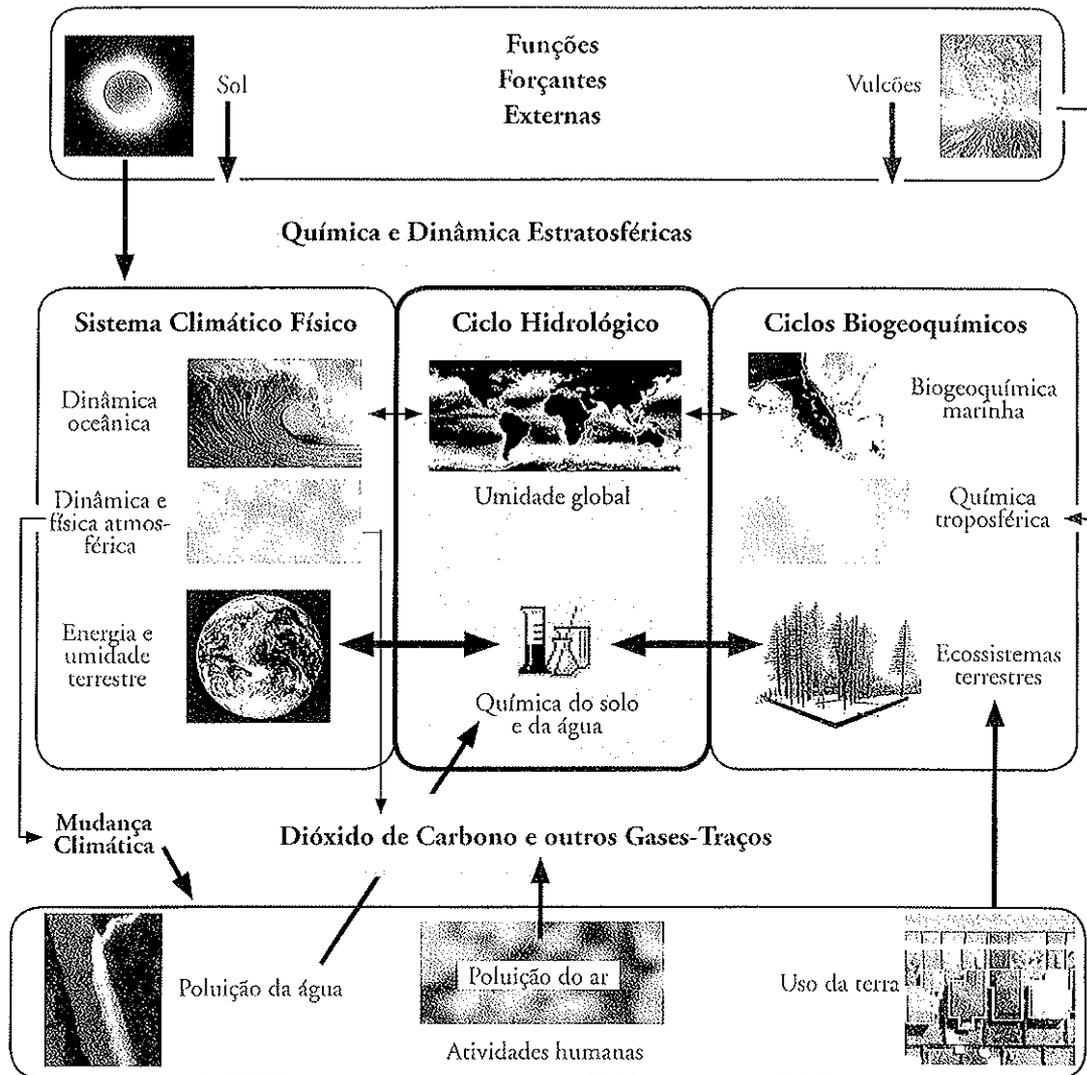


Figura 1-14 O sistema Terra pode ser subdividido em dois subsistemas – o sistema climático físico e os ciclos biogeoquímicos – que são ligados pelo ciclo hidrológico global. Alterações significativas nas funções forçantes externas e nas atividades humanas têm impacto no sistema climático físico, nos ciclos biogeoquímicos, e no ciclo hidrológico global. O exame desses subsistemas e suas ligações definem as questões críticas que o Sistema de Observação da Terra (EOS - Earth Observing System), da NASA, está tentando responder (adaptado de Asrar e Dozier, 1994).

**Empresas Comerciais:** A Space Imaging, Inc., lançou o IKONOS-2 em 24 de setembro de 1999. O sistema sensor do IKONOS-2 tem uma banda pancromática e quatro bandas multiespectrais de 4 x 4 m (tabela 1-3). A DigitalGlobe, Inc., lançou o QuickBird em 18 de Outubro de 2001, com uma banda pancromática e quatro bandas multiespectrais de 2,44 x 2,44 m. A Orbimage, Inc., lançou o OrbView-3 em 26 Junho de 2003 com uma banda pancromática de 1 x 1m e bandas multiespectrais de 4 x 4m.

### Análise de Dados de Sensoriamento Remoto

Os dados de um sensor remoto são analisados usando uma variedade de técnicas de processamento de imagens (Figuras 1-5 e 1-15), incluindo:

- Processamento analógico (visual) de imagens, e
- Processamento digital de imagens.

As análises analógica e digital de dados de sensoriamento remoto buscam detectar e identificar fenômenos importantes na cena. Uma vez identificados, geralmente os fenômenos são medidos, e a informação é usada na solução de problemas (Estes et al., 1983; Haack et al., 1997). Assim, tanto a análise visual como a digital têm os mesmos fins genéricos. Entretanto, para atingir esses objetivos é preciso seguir diferentes percursos.

Os seres humanos são adeptos da interpretação visual de imagens produzidas por certos tipos de dispositivos de sensoriamento remoto, especialmente de câmeras. Poderíamos perguntar, "por que tentar imitar ou melhorar esta capacidade?" Primeiro, há certos limiares acima dos quais o intérprete humano não pode detectar "pequenas diferenças" na imagem. Por exemplo, é sabido que um analista pode discriminar apenas cerca de nove níveis de cinzas ao interpretar uma fotografia preto e branco de tons contínuos. Se os dados forem originalmente gravados com 256 níveis de cinza, haveria mais informações sutis presentes na imagem do que o intérprete poderia extraí-las visualmente. Além disso, o intérprete traz para o trabalho toda a pressão do dia a dia, tornando a interpretação subjetiva e geralmente não-reproduzível. Por outro lado, os resultados obtidos pelo computador são reproduzíveis (mesmo quando errados!). Também, quando é necessário manter o registro de uma grande quantidade de informação quantitativa detalhada, como as características espectrais de um campo vegetal agrícola durante uma estação de crescimento para fins de identificação de culturas, o computador é muito prático para armazenar e manipular tais informações tediosas e possivelmente obter uma conclusão mais definitiva sobre qual cultura está em crescimento naquele campo. Isso não significa dizer que o processamento digital de imagens seja superior à análise visual de imagens. Significa apenas que pode haver situações em que a abordagem digital seja mais adequada ao problema em apreço. Frequentemente são obtidos ótimos resultados usando uma combinação sinérgica de ambos os processamentos de imagens, tanto digital quanto visual.

#### Processamento Analógico (Visual) de Imagens

Os seres humanos usam os elementos fundamentais de interpretação de imagens apresentados na Figura 1-15, incluindo escala de cinza, tom, cor, altura (profundidade), tamanho, forma, sombra, textura, localização, associação e arranjo. A mente humana é muito boa para reconhecer e associar esses elementos complexos numa imagem ou fotografia porque nós constantemente processamos (a) vistas de perfil das feições da Terra todo dia, e (b) imagens vistas em livros, revistas, televisão e internet. Além disso, somos competentes em juntar todo o nosso conhecimento

peçoal antecedente e informações colaterais. Então, convergimos todas essas evidências para identificar fenômenos nas imagens e julgar sua significância. Medições precisas dos objetos (comprimento, área, perímetro, volume, etc.) podem ser feitas usando técnicas fotogramétricas aplicadas seja a imagens monoscópicas (fotos isoladas) ou a imagens estereoscópicas (imagens com sobreposições). Muitos livros foram escritos sobre como fazer interpretação visual de imagens e medição fotogramétrica. Há um ressurgimento na arte e ciência da interpretação visual de imagens à medida que os sistemas digitais de sensoriamento remoto fornecem imagens cada vez mais com maior resolução espacial. Muitos estão mostrando imagens IKONOS 1 x 1 m e QuickBird 61 x 61 cm na tela de computadores e interpretando visualmente os dados. Os dados também são frequentemente usados como mapas-bases em projetos de GIS (Clark, 2001).

#### Processamento Digital de Imagens

Os cientistas têm feito significativos avanços no processamento digital de imagens de sensoriamento remoto para visualizações científicas e testes de hipóteses (p.ex., Estes e Jensen, 1998; Townshend e Justice, 2002; Kraak, 2003). Os métodos estão resumidos em Donnay et al. (2001), Bossler et al. (2002), Jensen (2005) e outros. O processamento digital de imagens faz uso de muitos elementos de interpretação de imagens usando as técnicas resumidas na Figura 1-15. Os principais tipos de processamento digital de imagens incluem o pré-processamento de imagens (correções radiométricas e geométricas), o realce das imagens, o reconhecimento de padrões usando estatísticas inferenciais, o processamento fotogramétrico de imagens usando imagens estereoscópicas, sistemas especialistas (árvores de decisão) e análises de imagens usando redes neurais, análises de dados hiperespectrais, e detecção de mudanças (Figura 1-5).

**Correção Radiométrica de Dados de Sensores Remotos:** Imagens analógicas e digitais provenientes de sensores remotos podem conter ruídos ou erros que foram introduzidos pelo sistema sensor (p.ex., ruído eletrônico) ou pelo ambiente (p.ex., espalhamento atmosférico da luz na direção do campo de visada do sensor). Têm havido avanços na nossa habilidade de remover esses efeitos deletérios por meio de técnicas simples de normalização de imagens, e de técnicas mais avançadas de calibração radiométrica absoluta dos dados para a reflectância superficial escalonada (para dados ópticos). Os dados calibrados de um sensor remoto permitem que imagens e produtos derivados obtidos em diferentes datas sejam comparados (p.ex., para medir a mudança no índice de área foliar entre duas datas). Os princípios fundamentais de processamento digital de imagem são discutidos em Jensen (2005).

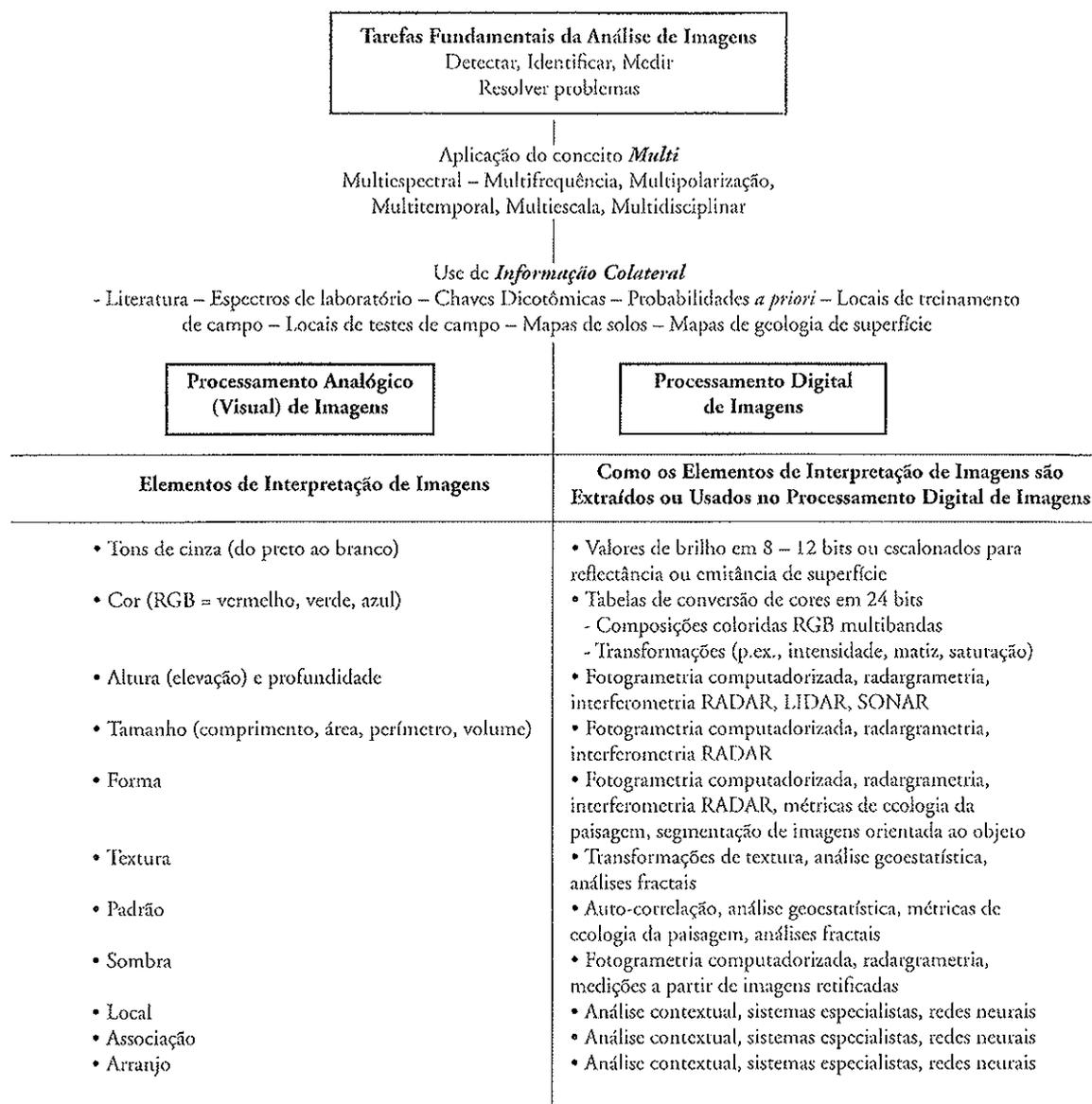


Figura 1-15 Os processamentos analógico (visual) e digital de imagens de sensoriamento remoto usam os elementos de interpretação de imagens.

#### Correção Geométrica de Dados de Sensores Remotos:

A maioria dos dados analógicos e digitais de sensores remotos é agora processada de tal forma que os elementos de imagens individuais fiquem em suas posições planimétricas apropriadas numa projeção cartográfica padrão. Isto facilita o uso da imagem e produtos derivados em sistemas de suporte à decisão espacial ou em GIS.

**Realce de Imagens:** As imagens podem ser realçadas digitalmente para identificar informações sutis em imagens

analógicas ou digitais que de outra forma seriam perdidas. Foram feitos avanços significativos na nossa habilidade para realçar contrastes e filtrar dados para realçar componentes de alta ou baixa frequência, bordas e texturas em imagens (p.ex., Emerson et al., 1999). Além disso, os dados de sensores remotos podem ser linearmente e/ou não-linearmente transformados em informação que seja mais altamente correlacionada com os fenômenos do mundo real por meio de análises de componentes principais e vários índices de vegetação (Townshend e Justice, 2002).

**Fotogrametria:** Avanços significativos foram feitos na análise de dados estereoscópicos de sensores remotos obtidos por plataformas aerotransportadas ou por satélites usando estações de trabalho computadorizadas e algoritmos de processamento fotogramétrico de imagens digitais (p.ex., Adams e Chandler, 2002). Imagens digitais trabalhadas em estações de trabalho fotogramétricas podem ser usadas para extrair modelos digitais de elevação precisos (DEMs) e ortofotografias corrigidas diferencialmente a partir de fotografias aéreas ou imagens trianguladas (Light e Jensen, 2002; Linder, 2003). A tecnologia está revolucionando o modo como os DEMs e as ortofotos são produzidos para aplicações rurais e urbanas/suburbanas.

**Extração de Informação Paramétrica:** Cientistas tentando extrair informação de cobertura da terra a partir de dados de sensoriamento remoto agora rotineiramente especificam se a classificação vai ser:

- *rigida (hard)* com classes discretas e mutuamente exclusivas, ou *nebulosa (fuzzy)*, onde são extraídas as proporções dos materiais no interior dos pixels (Seong e Usery, 2001);
- baseada em pixels individuais (chamada de *classificação por pixel*) ou se será usado um algoritmo de segmentação de imagens orientada ao objeto que leve em conta não apenas as características espectrais de um pixel, mas também as características espectrais dos pixels da vizinhança contextual. Assim, os algoritmos levam em conta a informação espectral e espacial (Herold et al., 2003; Hodgson et al., 2003a; Tullis e Jensen, 2003).

Uma vez colocados esses assuntos, trata-se de determinar se se deve usar técnicas de classificação paramétrica, não-paramétrica, e/ou não-métrica. O algoritmo de classificação por máxima verossimilhança continua a ser o algoritmo de classificação paramétrica mais largamente empregado. Infelizmente, o algoritmo requer que os dados de treinamento sejam distribuídos normalmente em  $n$  bandas (raramente o caso) para computar a variância da classe e as matrizes de covariância. É difícil incorporar dados categóricos que não sejam imagens numa classificação de máxima verossimilhança. Felizmente, os algoritmos de classificação por máxima verossimilhança nebulosos são agora disponíveis (p.ex., Foody, 1996).

**Extração de Informação Não-Paramétrica:** Algoritmos de agrupamento não-paramétricos, como o ISODATA, continuam a ser largamente usados em pesquisa em processamento digital de imagens. Infelizmente, tais algoritmos dependem de como os dados de treinamento sementes são extraídos, e geralmente é difícil rotular os agrupamentos para torná-los classes de informação. Por essas razões tem havido um signifi-

cativo aumento no desenvolvimento do uso de redes neurais artificiais (ANN – Artificial Neural Networks) para aplicações de sensoriamento remoto (p.ex., Qiu e Jensen, 2005). A ANN não precisa de dados de treinamento normalmente distribuídos. A ANN pode incorporar virtualmente qualquer tipo de dados distribuídos espacialmente na classificação. O único inconveniente é que algumas vezes é difícil determinar exatamente como a ANN chega a uma certa conclusão porque a informação é conjugada com os pesos nas camadas ocultas. Os cientistas estão trabalhando numa maneira de extrair a informação oculta de tal forma que as regras usadas possam ser mais formalmente estabelecidas. A habilidade de uma ANN para *aprender* não deve ser subestimada.

**Extração de Informação Não-Métrica:** É difícil fazer um computador entender e usar as regras heurísticas práticas e o conhecimento que um especialista humano usa ao interpretar uma imagem. Não obstante, tem havido progresso no uso da inteligência artificial (AI) para tentar fazer com que os computadores façam coisas que, no momento, as pessoas fazem melhor. Uma área de AI que tem grande potencial na análise de imagens é o uso de sistemas especialistas que colocam toda a informação contida numa imagem num contexto apropriado com dados auxiliares e extraem informações valiosas. Duda et al. (2001) descrevem vários tipos de classificadores do tipo sistemas especialistas baseados em árvore de decisão como sendo *não-métricos*.

As técnicas de classificação digital de imagens paramétricas são baseadas primariamente em estatísticas básicas, tais como média, variância e matrizes de covariância. Classificadores de árvore de decisão ou baseados em regras não são baseados em estatísticas inferenciais, mas sim no “deixe os dados falarem por si mesmos” (Gahegan, 2003). Em outras palavras, os dados retêm sua precisão e não seria fora de propósito sumariá-los pela média, etc. Os classificadores por árvore de decisão podem processar qualquer tipo de dados distribuídos espacialmente, e podem incorporar probabilidades *a priori* (McIver e Friedl, 2002). Há três abordagens para a criação de regras: 1) explicitamente pela extração de conhecimento e criação de regras a partir de especialistas, 2) implicitamente extraindo variáveis e regras usando métodos cognitivos (Lloyd et al., 2002), e 3) empiricamente gerando regras a partir de dados observados e métodos de indução automática (Tullis e Jensen, 2003). O desenvolvimento de uma árvore de decisão usando regras baseadas no conhecimento humano é difícil e muito demandante de tempo. Entretanto, ela recompensa o usuário com informação detalhada sobre como as decisões individuais de classificação foram feitas (Zhang e Wang, 2003).

Idealmente, os computadores podem derivar as regras a partir de dados de treinamento sem a intervenção huma-

na. A isso se chama *aprendizagem da máquina* (Huang e Jensen, 1997; Jensen, 2005). O analista identifica áreas de treinamento representativas. A máquina aprende os padrões a partir desses dados de treinamento, cria as regras, e as usa para classificar os dados de sensoriamento remoto. As regras são disponíveis para documentar como as decisões são feitas.

**Hiperespectral:** São necessários softwares especiais para processar dados hiperespectrais obtidos por espectrômetros imageadores como o AVIRIS e o MODIS. Kruse et al. (1992), Landgrebe e Biehl (2006), Digital Research Systems (2006) e outros foram pioneiros no desenvolvimento de software de análise de imagens hiperespectrais. O software reduz a dimensionalidade dos dados (números de bandas) a um grau gerenciável, embora retenha a essência dos dados. Sob certas condições o software pode ser usado para comparar as curvas de reflectância espectral obtidas por sensoriamento remoto com uma biblioteca de curvas de reflectância espectral. Os analistas também são capazes de identificar o tipo e a proporção dos diferentes materiais contidos num elemento de imagem individual (chamada de análise de mistura espectral dos membros individuais) (Lu e Weng, 2004; Platt e Goetz, 2004).

**Modelagem de Imagem de Sensoriamento Remoto Usando uma Abordagem GIS:** Dados de sensoriamento remoto não deveriam ser analisados num vácuo, sem o benefício de informações colaterais, tais como mapas de solos, hidrologia e topografia (Ramsey et al., 1995). Por exemplo, o mapeamento de cobertura da terra usando dados de sensoriamento remoto é significativamente melhorado pela incorporação de informação topográfica a partir de modelos digitais do terreno e outros dados GIS (p.ex., Stow et al., 2003). Os estudos de GIS requerem atualizações precisas e periódicas das variáveis distribuídas espacialmente na base de dados, as quais o sensoriamento remoto pode fornecer. O sensoriamento remoto pode beneficiar-se do acesso à informação auxiliar precisa para melhorar a exatidão da classificação e outros tipos de modelagem. Tal sinergia é crítica para que as análises com sistemas especialistas e redes neurais sejam feitas satisfatoriamente (Tullis e Jensen, 2003). A estrutura conceitual da modelagem da incerteza entre o sensoriamento remoto e os sistemas de informação geográfica foi desenvolvida por Gahegan e Ehlers (2000).

**Modelagem de Cena:** Strahler et al. (1986) descrevem a estrutura conceitual para a modelagem em sensoriamento remoto. Basicamente, um modelo de sensoriamento remoto tem três componentes: 1) um modelo de cena, que especifica a forma e a natureza da energia e da matéria no interior da cena e sua ordem espacial e temporal; 2) um modelo atmosférico, que descreve a interação entre a

atmosfera e a energia incidente e emitida da cena; e 3) um modelo de sensor, que descreve o comportamento do sensor em resposta aos fluxos de energia incidentes sobre si e na produção das medidas que constituem a imagem. Eles sugerem que o problema da inferência da cena, então, torna-se um problema de inversão de modelo, no qual a ordem na cena é reconstruída a partir da imagem e do modelo de sensoriamento remoto. Por exemplo, Woodcock et al. (1997) inverteram o modelo de reflectância de dossel de Li-Strahler para o mapeamento da estrutura da floresta.

Basicamente, uma modelagem satisfatória em sensoriamento remoto prevê quanto do fluxo radiante em certos comprimentos de onda deveria deixar um objeto particular (p.ex., um dossel de coníferas), mesmo sem efetivamente estar fazendo o sensoriamento remoto do objeto. Quando a predição do modelo é a mesma da medição pelo sensor, a relação foi corretamente modelada. O cientista então tem uma melhor avaliação das interações energia-matéria na cena e pode ser capaz de estender com confiança a lógica a outras regiões ou aplicações. Os dados de sensores remotos podem então ser usados mais efetivamente em modelos físico-determinísticos (p.ex., modelos de escoamento superficial da água em bacias de drenagem, produtividade primária líquida, e evapotranspiração), que são tão importantes para a modelagem de grandes ecossistemas. Um trabalho recente permite que se modele a utilidade de sensores com diferentes resoluções espaciais para aplicações particulares, como análises urbanas (Collins e Woodcock, 1999).

**Deteção de Mudança:** Dados de sensoriamento remoto obtidos em múltiplas datas podem ser usados para identificar o tipo e a distribuição de mudanças que ocorrem na paisagem (Friedl et al., 2002; Zhan et al., 2002). A informação de mudanças fornece preciosa intuição compreensiva sobre os *processos* em ação (Alberti et al., 2002; Auch et al., 2004). Os algoritmos de deteção de mudanças podem ser usados em classificações por pixel e orientadas ao objeto (polígono). Infelizmente, ainda não há um método universalmente aceito para deteção de mudança ou para avaliação da exatidão dos produtos em mapas de deteção de mudança. Os princípios de processamento digital de imagens para deteção de mudanças são discutidos em Jensen (2005).

### *Apresentação da Informação*

A informação derivada dos dados de sensores remotos é geralmente apresentada como uma imagem realçada, um mapa-imagem, ortofotomapas, mapas temáticos, arquivos espaciais em bancos de dados, estatísticas, ou gráficos (Figura 1-5). Assim, os produtos de saída finais frequentemente requerem conhecimentos de sensoriamento remoto, cartografia, GIS e estatísticas espaciais, assim como

da ciência sistemática sob investigação (p.ex., solos, agricultura, estudos urbanos). Os cientistas que entendem as regras e as relações sinérgicas das tecnologias podem gerar produtos de saída que comuniquem efetivamente os resultados. Aqueles que violam regras fundamentais (p.ex., teoria cartográfica ou projeto topológico de base de dados) frequentemente geram produtos de saída pobres que não comunicam efetivamente os resultados.

Os *mapas-imagens* oferecem aos cientistas uma alternativa aos mapas de linha para muitas aplicações cartográficas. Milhares de mapas-imagens de satélite foram produzidos a partir do MSS/Landsat (escalas 1:250.000 e 1:500.000), TM/Landsat (escala 1:100.000), e de dados AVHRR e MODIS. Mapas-imagens em escalas >1:24.000 são possíveis usando imagens com uma resolução espacial  $\leq 1 \times 1$  m (Light e Jensen, 2002). Em função de os produtos de mapas-imagens poderem ser produzidos a uma fração do custo dos mapas convencionais de linha, eles fornecem a base para as séries de mapas nacionais orientados à exploração e ao desenvolvimento econômico de áreas menos desenvolvidas do mundo, a maioria das quais não foram mapeadas em escalas 1:100.000 ou maiores.

Dados de sensores remotos que foram geometricamente retificados para uma projeção cartográfica padrão estão se tornando indispensáveis em bases de dados GIS mais sofisticadas. Isto é especialmente verdadeiro para os ortofotomapas, que têm as qualidades métricas de um mapa de linha e o conteúdo informativo de uma fotografia aérea ou de outro tipo de imagem.

Infelizmente, *erros* são introduzidos no processo de sensoriamento remoto e devem ser identificados e relatados. As inovações na redução de erros incluem: 1) registro dos passos operacionais aplicados aos dados originais de sensoriamento remoto, 2) documentação dos erros geométricos (espacial) e erros temáticos (atributo) dos materiais-fontes, 3) melhoria da legenda, especialmente para produtos que são mapas de detecção de mudanças derivados de sensoriamento remoto, e 4) melhoria da avaliação da exatidão. A comunidade de sensoriamento remoto e GIS deve incorporar tecnologias que rastreiem o erro nos produtos finais, sejam mapas ou imagens. Isso resultará em informação mais exata sendo usada nos processos de tomada de decisão.



### **Economia da Observação da Terra**

O National Research Council (Conselho Nacional de Pesquisa) reconheceu que há um sistema econômico em jogo quando dados de sensoriamento remoto são usados para aplicações de gerenciamento dos recursos terrestres

(Figura 1-16) (Miller et al., 2001). Ele consiste de um sistema de transmissão de informação com três componentes: coleta de dados, processamento de imagens e consumo da informação (usuário).

O sistema de coleta de dados é composto por empresas comerciais e agências públicas que operam sistemas de sensoriamento remoto. A indústria privada fornece informação a valor de mercado. As agências públicas geralmente fornecem dados de sensoriamento remoto ao custo da geração do produto pedido pelo usuário (COFUR). O sensoriamento remoto existe desde cerca de 1960. Há um número crescente de especialistas que podem usar técnicas de processamento de imagens digitais e ou analógicas para extrair informação de imagens. Finalmente, há o consumidor (usuário) da informação derivada do sensoriamento remoto. O usuário normalmente precisa de informação que tenha valor econômico, social, estratégico, ambiental e/ou político (Liverman et al., 1998).

A fim de que o lucro produzido pelo sistema de geração de informação seja suficiente para fazer frente aos custos de capital e operação do sistema, é preciso que haja um balanço (equilíbrio) entre o valor da informação, como é percebido pelo usuário (consumidor), e o lucro necessário para sustentar o sistema (Miller et al., 2001, 2003). O equilíbrio tem sido conseguido para aplicações de mapeamento com levantamentos fotogramétricos e por LIDAR há várias décadas. O tempo dirá se o balanço entre o valor sentido pelo usuário e o custo pode ser mantido no caso de sistemas orbitais. Estão ocorrendo agrupamentos de empresas. Em 12 de Janeiro de 2006 a ORBIMAGE adquiriu os bens da Space Imaging e agora opera como GeoEye, Inc., fornecendo produtos e imagens IKONOS, OrbView-2 e Orbview-3. A GeoEye lançou um novo sensor em 2008 com uma resolução espacial de 0,41 x 0,41 m (GeoEye, 2006).

O equilíbrio também pode ser impactado pelos especialistas em tecnologia de sensoriamento remoto que não têm um bom entendimento dos requisitos de informação pelos usuários. De fato, alguns especialistas em sensoriamento remoto ficam desconcertados quanto ao porquê de os usuários não se entusiasmarem com a informação derivada do sensoriamento remoto. O que eles falham em considerar é que os usuários geralmente não têm motivação para migrarem para uma informação derivada de sensoriamento remoto sobre parâmetros econômicos, sociais, ambientais, estratégicos ou políticos simplesmente porque tal informação é baseada em nova tecnologia. Além do mais, os usuários que estão do lado direito do gráfico da Figura 1-16 geralmente têm pouco conhecimento da tecnologia de sensoriamento ou como ela é usada para extração de informação.

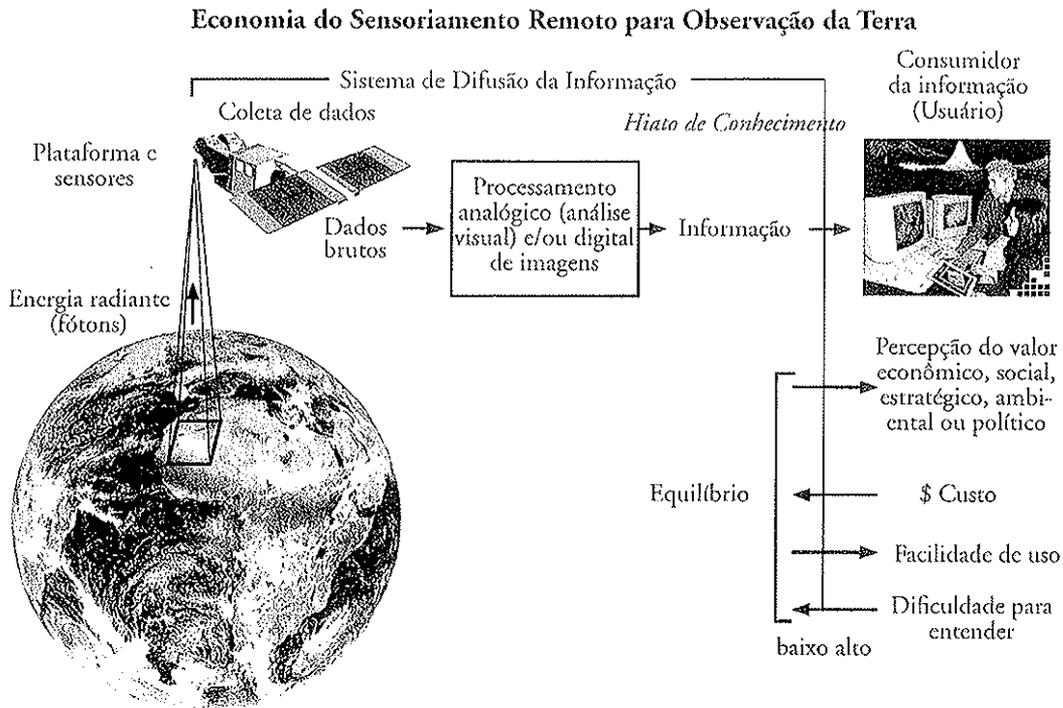


Figura 1-16 Economia do sensoriamento remoto para observação da Terra. O objetivo é minimizar o hiato de conhecimento entre o sistema de geração de informação, o especialista em sensoriamento remoto, e o consumidor da informação (usuário). A informação econômica, social, estratégica, ambiental, e/ou política gerada pelo sensoriamento remoto deve ser custo-efetiva, e ser fácil de usar a fim de atingir um equilíbrio (adaptado de Miller et al., 2003).

Miller et al. (2001; 2003) sugerem que esta situação cria um *vazio de conhecimento* entre os especialistas em sensoriamento remoto e os consumidores de informação (usuários) (Figura 1-16). Fazer a ponte para superar esse vazio é mandatório se vamos usar o sensoriamento remoto para resolver problemas de gerenciamento ambiental. É improvável que a comunidade de usuários vá devotar tempo para aprender a física do sensoriamento remoto e os métodos de análise e processamento de imagens analógicas e/ou digitais e a modelagem em GIS necessários para produzir uma informação útil. Por outro lado, há um considerável interesse pelo lado tecnológico do problema para construir uma ponte de comunicação. Portanto, uma maneira de diminuir o tamanho do vazio de conhecimento é que os técnicos em sensoriamento remoto trabalhem ao lado da comunidade de usuários para entender seus requisitos. Isso levará a uma informação de sensoriamento remoto mais útil e que seja de valor para as comunidades de usuários.

Os avanços nos sistemas de entrega de imagens de sensoriamento remoto por empresas comerciais como a Google, Inc., e seu aplicativo Google Earth estão tendo um tre-

mendo impacto na opinião e no uso dos dados de sensoriamento remoto pelo público em geral (Fallows, 2006).



### Perspectiva da Análise de Recursos Terrestres

O sensoriamento remoto é usado para muitas aplicações, tais como análise de imagens médicas (p.ex., raios-x de um braço quebrado), avaliação não-destrutiva de produtos numa linha de montagem, e análise de recursos da Terra. *O foco deste livro é na arte e ciência da aplicação do sensoriamento remoto para a extração de informação sobre os recursos da Terra* (Figura 1-17). Informação dos recursos da Terra é definida como qualquer informação concernente à vegetação, solos, minerais, rochas, água e infraestrutura urbana terrestres, bem como certas características atmosféricas. Tais informações podem ser úteis para a modelagem do ciclo global do carbono, da biologia e bioquímica dos ecossistemas, de aspectos dos ciclos globais da água e da energia, da variabilidade e previsão do clima, da química atmosférica, das características da Terra sólida, das estimativas populacionais, e do monitoramento da mudança de uso da terra e desastres naturais (Johannsen et al., 2003).

Organização do  
*livro Sensoriamento Remoto do Ambiente*



Figura 1-17 Organização do livro.

Organização do  
*livro Sensoriamento Remoto do Ambiente*

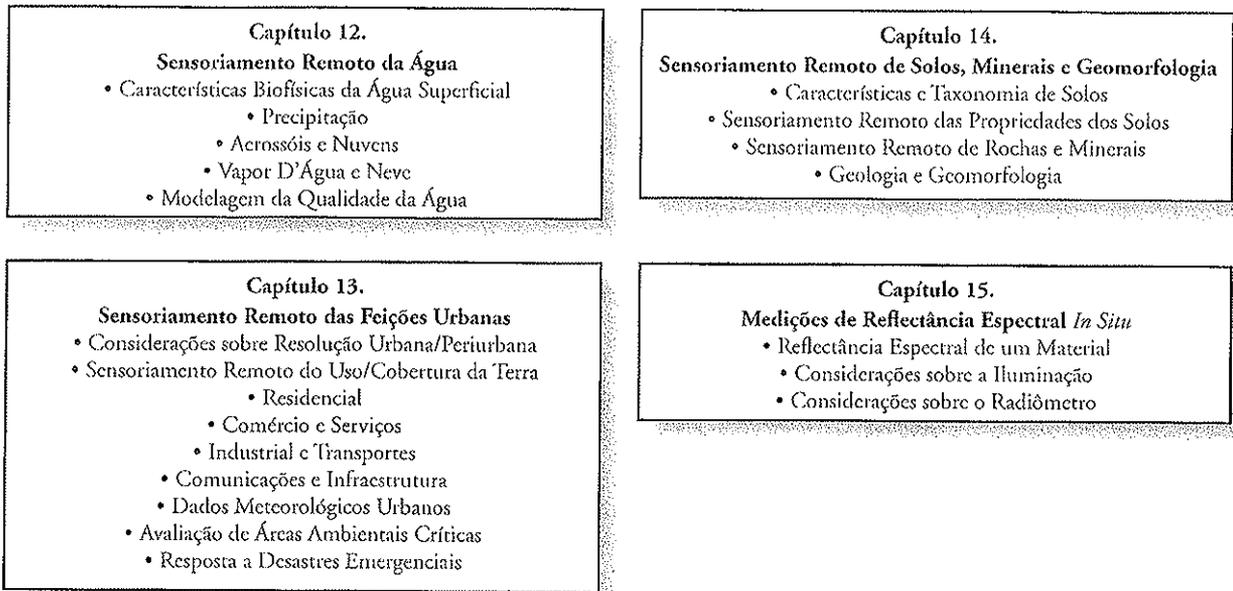
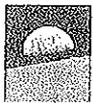


Figura 1-17 Organização do livro (continuação).



### Organização do Livro

Este capítulo definiu termos e forneceu uma perspectiva de como a ciência do sensoriamento remoto pode ser útil para pesquisas sobre os recursos da Terra (Figura 1-17). O Capítulo 2 introduz princípios de energia eletromagnética e como ela é usada para fazer o sensoriamento remoto do ambiente. O Capítulo 3 revê a história da fotografia, e as plataformas aéreas e os satélites. O Capítulo 4 introduz a fotografia aérea, filtros e filmes. O Capítulo 5 apresenta os elementos de fotointerpretação. O Capítulo 6 revê os princípios de fotogrametria usados para extrair informação quantitativa da fotografia aérea. O Capítulo 7 revê os sistemas opto-mecânicos de sensoriamento remoto. O Capítulo 8 introduz o sensoriamento remoto no infravermelho termal. O Capítulo 9 revê o sensoriamento remoto passivo e ativo (RADAR) nas micro-ondas. O Capítulo 10 introduz o sensoriamento remoto usando a tecnologia de detecção e medição de distância pela luz (LIDAR). O Capítulo 11 descreve como o sensoriamento remoto é usado para extrair características biofísicas da vegetação terrestre e aquática. O Capítulo 12 fornece ideias sobre o sensoriamento remoto da água, gelo e neve, bem como do vapor d'água e temperatura atmosféricos. O Capítulo 13 demonstra como o sensoriamento remoto pode forne-

cer uma informação única sobre a infraestrutura urbana/periurbana. O Capítulo 14 descreve como características selecionadas de solos e minerais podem ser obtidas por sensoriamento remoto e como importantes feições geomórficas da superfície da Terra podem ser identificadas. O Capítulo 15 descreve como são obtidas medidas de reflectância espectral *in situ*.



### Referências

- Adams, J. C. and J. H. Chandler, 2002, "Evaluation of Lidar and Medium Scale Photogrammetry for Detecting Soft-cliff Coastal Change," *Photogrammetric Record*, 17(99): 405-418.
- Alberti, M., Weeks, R. and S. Coe, 2004, "Urban Land-Cover Change Analysis in Central Puget Sound," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(9):1043-1052.
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1952, 1966, *Manual of Photogrammetry*, Bethesda: ASP&RS.
- Asker, J. R., 1992, "Congress Considers Landsat 'Decommercialization' Move," *Aviation Week & Space Technology*, May 11, 18-19.

- Asrar, G., 2004, Earth Science Applications Plan, Washington: NASA, 89 p. Asrar, G. and J. Dozier, 1994, *EOS: Science Strategy for the Earth Observing System*, Woodbury, MA: American Institute of Physics, 342 p.
- Auch, R., Taylor, J. and W. Acevedo, 2004, *Urban Growth in American Cities – Glimpses of U. S. Urbanization*, Circular #1252, Washington: U.S. Geological Survey, 52.
- Barnsley, M., 1999, "Digital Remotely Sensed Data and Their Characteristics," in Longley, P. E., Goodchild, M. F., McGwire, D. J. and D. W. Rhind (Eds.), *Geographical Information Systems*, NY: John Wiley, 451–466.
- Bossler, J. D., Jensen, J. R., McMaster, R. B. and C. Rizos, 2002, *Manual of Geospatial Science & Technology*, London: Taylor & Francis, 623 p.
- Clark, R. N., 1999, *Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy*, Denver: U.S. Geological Survey, <http://speclab.cr.usgs.gov>, 58 p.
- Clarke, K. C., 2001, *Getting Started with Geographic Information Systems*, Upper Saddle River: Prentice-Hall, 353 p.
- Collins, J. B. and C. E. Woodcock, 1999, "Geostatistical Estimation of Resolution-Dependent Variance in Remotely Sensed Images," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(1):41–50.
- Colwell, R. N. (Ed.), 1960, *Manual of Photographic Interpretation*, Falls Church: ASP&RS.
- Colwell, R. N. (Ed.), 1983, *Manual of Remote Sensing*, 2nd Ed., Falls Church: ASP&RS.
- Colwell, R. N., 1984, "From Photographic Interpretation to Remote Sensing," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50(9):1305.
- Colwell, R. N., 1997, "History and Place of Photographic Interpretation," in *Manual of Photographic Interpretation*, 2nd Ed., W. R. Phillipson (Ed.), Bethesda: ASPRS, 33–48.
- Cracknell, A. P. and L. W. B. Hayes, 1993, *Introduction to Remote Sensing*, London: Taylor & Francis, 293 p.
- Curran, P. J., 1987, "Remote Sensing Methodologies and Geography," *Intl. Journal of Remote Sensing*, 8:1255–1275.
- Curran, P. J., Milton, E. J., Atkinson, P. M. and G. M. Foody, 1998, "Remote Sensing: From Data to Understanding," in P. E. Longley, et al. (Eds.), *Geocomputation: A Primer*, NY: John Wiley, 33–59.
- Dahlberg, R. W. and J. R. Jensen, 1986, "Education for Cartography and Remote Sensing in the Service of an Information Society: The United States Case," *American Cartographer*, 13(1):51–71.
- Dartnell, P. and J. V. Gardner, 2004, "Predicting Seafloor Facies from Multibeam Bathymetry and Backscatter Data," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(9):1081–1091.
- Davis, B. A., 1999, "Overview of NASA's Commercial Remote Sensing Program," *Earth Observation*, 8(3):58–60.
- Digital Research, 2006, *Environment for Visualizing Images: ENVI*, [www.digitalresearch.com](http://www.digitalresearch.com)
- Dehqanzada, Y. A. and A. M. Florini, 2000, *Secrets for Sale: How Commercial Satellite Imagery Will Change the World*, Washington: Carnegie Endowment for Intl. Peace, 45 p.
- Dobson, J. E., 1993, "Commentary: A Conceptual Framework for Integrating Remote Sensing, Geographic Information Systems, and Geography," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 59(10):1491–1496.
- Donnay, J., Barnsley, M. J. and P. A. Longley, 2001, *Remote Sensing and Urban Analysis*, NY: Taylor & Francis, 268 p.
- Duda, R. O., Hart, P. E. and D. G. Stork, 2001, *Pattern Classification*, N.Y: John Wiley, 394–452.
- Emerson, C. W., Lam, N. and D. A. Quattrochi, 1999, "Multiscale Fractal Analysis of Image Texture and Pattern," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(1):51–61.
- Engman, E. T., 2000, "Soil Moisture," in Schultz, G. A. and E. T. Engman (Eds.), *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*, Berlin: Springer, 197–216.
- Estes, J. E. and J. R. Jensen, 1998, "Development of Remote Sensing Digital Image Processing Systems and Raster GIS," *History of Geographic Information Systems*, T. Foresman (Ed.), NY: Longman, 163–180.
- Estes, J. E., Hajic, E. J. and L. R. Tinney, 1983, "Fundamentals of Image Analysis: Visible and Thermal Infrared Data," *Manual of Remote Sensing*, R. N. Colwell, (Ed.), Bethesda: ASPRS, 987–1125.
- Fallows, J., 2006, "Spy's-Eye View," *Atlantic Monthly*, (March):140–144.
- Fisher, P. F. and R. E. Lindenber, 1989, "On Distinctions among Cartography, Remote Sensing, and Geographic Information Systems," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 55(10):1431–1434.

- Foody, G. M., 1996, "Approaches for the Production and Evaluation of Fuzzy Land Cover Classifications from Remotely Sensed Data," *Intl. Journal of Remote Sensing*, 17(7):1317-1340.
- Friedl, M. A., McIver, D. K., Hodges, J. C. F., Zhang, X. Y., Muchoney, D., Strahler, A. H., Woodcock, C. E., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F. and C. Schaaf, 2002, "Global Land Cover Mapping from MODIS: Algorithms and Early Results," *Remote Sensing of Environment*, 83:287-302.
- Fussell, J., Rundquist, D. and J. A. Harrington, 1986, "On Defining Remote Sensing," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 52(9):1507-1511.
- Gahegan, M., 2003, "Is Inductive Machine Learning Just Another Wild Goose (or Might It Lay the Golden Egg)?" *Intl. Journal of GIScience*, 17(1):69-92.
- Gahegan, M. and M. Ehlers, 2000, "A Framework for the Modelling of Uncertainty Between Remote Sensing and Geographic Information Systems," *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 55:176-188.
- GeoEye, 2006, *ORBIMAGE Acquires Space Imaging and Changes Brand Name to GeoEye*, Dulles: GeoEye, Inc., <http://www.orbimage-acquisition.com/news/geoEye.htm>.
- Goetz, S. J., 2002, "Recent Advances in Remote Sensing of Biophysical Variables: An Overview of the Special Issue," *Remote Sensing of Environment*, 79:145-146.
- Haack, B., Guptill, S. C., Holz, R. K., Jampoler, S. M., Jensen, J. R. and R. A. Welch, 1997, "Urban Analysis and Planning," *Manual of Photographic Interpretation*, Bethesda: ASP&RS, 517-553.
- Herold, M., Guenther, S. and K. Clarke, 2003, "Mapping Urban Areas in the Santa Barbara South Coast Using IKONOS Data and eCognition," *eCognition Application Note*, Munich: Definiens Imaging GmbH, 4(1):3.
- Hodgson, M. E., Jensen, J. R., Tullis, J. A., Riordan, K. D. and C. M. Archer, 2003a, "Synergistic Use of LIDAR and Color Aerial Photography for Mapping Urban Parcel Imperviousness," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(9):973-980.
- Hodgson, M. E., Jensen, J. R., Schmidt, L., Schill, S. and B. A. Davis, 2003b, "An Evaluation of LIDAR- and IFSAR-derived Digital Elevation Models in Leaf-on Conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs," *Remote Sensing of Environment*, 84(2003):295-308.
- Hodgson, M. E., Jensen, J. R., Raber, G., Tullis, J., Davis, B., Thompson, G. and K. Schuckman, 2005, "An Evaluation of LIDAR derived Elevation and Terrain Slope in Leaf-off Conditions," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(7):817-823.
- Huang, X. and J. R. Jensen, 1997, "A Machine Learning Approach to Automated Construction of Knowledge Bases for Image Analysis Expert Systems That Incorporate Geographic Information System Data," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63(10):1185-1194.
- Jensen, J. R., 1992, "Testimony on S. 2297, The Land Remote Sensing Policy Act of 1992," Senate Committee on Commerce, Science, and Transportation, *Congressional Record*, (May 6):55-69.
- Jensen, J. R., 2005, *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, Upper Saddle River: Prentice-Hall, 525 p.
- Jensen, J. R. and D. C. Cowen, 1999, "Remote Sensing of Urban/ Suburban Infrastructure and Socioeconomic Attributes," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(5):611-622.
- Jensen, J. R. and R. E. Dahlberg, 1983, "Status and Content of Remote Sensing Education in the United States," *Intl. Journal of Remote Sensing*, 4(2):235-245.
- Jensen, J. R. and S. Schill, 2000, "Bi-directional Reflectance Distribution Function (BRDF) of Smooth Cordgrass (*Spartina alterniflora*)," *Geocarto International*, 15(2):21-28.
- Jensen, J. R., Botchway, K., Brennan-Galvin, E., Johannsen, C., Juma, C., Mabogunje, A., Miller, R., Price, K., Reining, P., Skole, D., Stancioff, A. and D. R. F. Taylor, 2002, *Down to Earth: Geographic Information for Sustainable Development in Africa*, Washington: National Academy Press, 155 p.
- Jensen, J. R., Qiu, F. and K. Patterson, 2001, "A Neural Network Image Interpretation System to Extract Rural and Urban Land Use and Land Cover Information from Remote Sensor Data," *Geocarto International*, 16(1):19-28.
- Jensen, J. R., Saalfeld, A., Broome, F., Cowen, D., Price, K., Ramsey, D., Lapine, L. and E. L. Usery, 2005, "Chapter 2: Spatial Data Acquisition and Integration," in R. B. McMaster and E. L. Usery (Eds.), *A Research Agenda for Geographic Information Science*, Boca Raton: CRC Press, 17-60.
- Johannsen, C. J., Petersen, G. W., Carter, P. G. and M. T. Morgan, 2003, "Remote Sensing: Changing Natural Resource Management," *Journal of Soil & Water Conservation*, 58(2):42-45.

- Joseph, G., 2000, "How Well Do We Understand Earth Observation Electro-optical Sensor Parameters?" *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 55:9-12.
- Karaska, M. A., Huguenin, R. L., Beacham, J. L., Wang, M., Jensen, J. R., and R. S. Kaufman, 2004, "AVIRIS Measurements of Chlorophyll, Suspended Minerals, Dissolved Organic Carbon, and Turbidity in the Neuse River, N.C.," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(1):125-133.
- Kraak, M., 2003, "Geovisualization Illustrated," *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, (2003):390-399.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J. and A. F. H. Goetz, 1992, "The Spectral Image Processing System," *Proceedings, Intl. Space Year Conference*, Pasadena, 10 p.
- Landgrebe, D. and L. Biehl, 2006, *An Introduction to MULTISPEC*, W. Lafayette: Purdue University, 50 p.
- Light, D. L. and J. R. Jensen, 2002, "Photogrammetric and Remote Sensing Considerations," in *Manual of Geospatial Science & Technology*, Bossler, J. D., Jensen, J. R., McMaster, R. B. and C. Rizos (Eds.), London: Taylor & Francis, 233-252.
- Linder, W., 2003, *Digital Photogrammetry: Theory and Applications*, Berlin: Springer-Verlag, 189 p.
- Liverman, D., Moran, E. F., Rindfuss, R. R. and P. C. Stern, 1998, *People and Pixels: Linking Remote Sensing and Social Science*, Washington: NRC, 244 p.
- Lloyd, R., Hodgson, M. E. and A. Stokes, 2002, "Visual Categorization with Aerial Photographs," *Annals of the Association of American Geographers*, 92(2):241-266.
- Lu, D. and Q. Weng, 2004, "Spectral Mixture Analysis of the Urban Landscape in Indianapolis with Landsat ETM+ Imagery," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(9):1053-1062.
- Maune, D. F., (Ed.), 2001, *Digital Elevation Model Technologies and Applications*, Bethesda: ASP&RS, 538 p.
- McIver, D. K. and M. A. Friedl, 2002, "Using Prior Probabilities in Decision-tree Classification of Remotely Sensed Data," *Remote Sensing of Environment*, 81:253-261.
- Miller, R. B., Abbott, M. R., Harding, L. W., Jensen, J. R., Johannsen, C. J., Macauley, M., MacDonald, J. S. and J. S. Pearlman, 2001, *Transforming Remote Sensing Data into Information and Applications*, Washington: NRC, 75 p.
- Miller, R. B., Abbott, M. R., Harding, L. W., Jensen, J. R., Johannsen, C. J., Macauley, M., MacDonald, J. S. and J. S. Pearlman, 2003, *Using Remote Sensing in State and Local Government: Information for Management and Decision Making*, Washington: NRC, 97 p.
- NASA, 2006, *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) home page*, <http://aviris.jpl.nasa.gov/>.
- NOAA NPOESS, 2006, *National Polar Orbiting Operational Environmental Satellite System*, <http://www.ipo.noaa.gov/>.
- Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., Jolly, W. M., Piper, S. C., Tucker, C. J., Myneni, R. B. and S. W. Running, 2003, "Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999," *Science*, 300(6):1560-1563.
- Platt, R. V. and A. F. H. Goetz, 2004, "A Comparison of AVIRIS and Landsat for Land Use Classification at the Urban Fringe," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(7):813-819.
- Pruitt, E. L., 1979, "The Office of Naval Research and Geography," *Annals*, Association of American Geographers, 69(1):106.
- Qiu, F. and J. R. Jensen, 2005, "Opening the Neural Network Black Box and Breaking the Knowledge Acquisition Bottleneck of Fuzzy Systems for Remote Sensing Image Classification," *Intl. Journal of Remote Sensing*, 25(9):1749-1768.
- Raber, G. T., Jensen, J. R., Schill, S. R. and K. Schuckman, 2002, "Creation of Digital Terrain Models using an Adaptive LIDAR Vegetation Point Removal Process," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(12):1307-1315.
- Ramsey, R. D., Falconer, A. and J. R. Jensen, 1995, "The Relationship Between NOAA-AVHRR Normalized Difference Vegetation Index and Ecoregions in Utah," *Remote Sensing of Environment*, 53:188-198.
- Rizos, C., 2002, "Introducing the Global Positioning System," in *Manual of Geospatial Science and Technology*, Bossler, J. D., Jensen, J. R., McMaster, R. B. and C. Rizos (Eds.), London: Taylor & Francis, 77-94.
- Robbins, J., 1999, "High-Tech Camera Sees What Eyes Cannot," *New York Times*, Science Section, September 14, D5.
- Sandmeier, S. R., 2000, "Acquisition of Bidirectional Reflectance Factor Data with Field Goniometers," *Remote Sensing of Environment*, 73:257-269.

- Schill, S., Jensen, J. R., Raber and D. E. Porter, 2004, "Temporal Modeling of Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF) in Coastal Vegetation," *GIScience & Remote Sensing*, 41(2):116-135.
- Seong, J. C. and E. L. Uery, 2001, "Fuzzy Image Classification for Continental-Scale Multitemporal NDVI Images Using Invariant Pixels and an Image Stratification Method," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(3):287-294.
- Shippert, P., 2004, *Spotlight on Hyperspectral*, Boulder: Research Systems, [www.geospatial\\_online.com/shippert](http://www.geospatial_online.com/shippert), 5 p.
- Skidmore, A. K., 2002, "Chapter 2: Taxonomy of Environmental Models in the Spatial Sciences," in *Environmental Modelling with GIS and Remote Sensing*, A. K. Skidmore (Ed.), London: Taylor & Francis, 8-25.
- Stow, D., Coulter, L., Kaiser, J., Hope, A., Service, D., Schutte, K. and A. Walters, 2003, "Irrigated Vegetation Assessments for Urban Environments," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(4):381-390.
- Strahler, A. H., Woodcock, C. E. and J. A. Smith, 1986, "On the Nature of Models in Remote Sensing," *Remote Sensing of Environment*, 20:121-139.
- Teillet, P. M., Gauthier, R. P., Chichagov, A. and G. Fedosejevs, 2002, "Towards Integrated Earth Sensing: Advanced Technologies for in situ Sensing in the Context of Earth Observation," *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(6):713-718.
- Townshend, J. R. G. and C. O. Justice, 2002, "Towards Operational Monitoring of Terrestrial Systems by Moderate-resolution Remote Sensing," *Remote Sensing of Environment*, 83:351-359.
- Tullis, J. A. and J. R. Jensen, 2003, "Expert System House Detection in High Spatial Resolution Imagery Using Size, Shape, and Context," *Geocarto International*, 18(1):5-15.
- Walsh, S. J., Evans, T. P., Welsh, W. F., Entwisle, B. and R. R. Rindfuss, 1999, "Scale-dependent Relationships Between Population and Environment in N.E. Thailand," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(1):97-105.
- Wolter, J. A., 1975, The Emerging Discipline of Cartography, Minneapolis: University of Minnesota, Department of Geography, unpublished dissertation. Woodcock, C. E., Collins, J. B., Jakabhazy, V., Li, X., Macomber, S. and Y. Wu, 1997, "Inversion of the Li-Strahler Canopy Reflectance Model for Mapping Forest Structure," *IEEE Transactions Geoscience & Remote Sensing*, 35(2):405-414.
- Zhan, X., Sohlberg, R. A., Townshend, J. R. G., DiMiccili, C., Carrol, M. L., Eastman, J. C., Hansen, M. C. and R. S. De-Fries, 2002, "Detection of Land Cover Changes Using MODIS 250 m Data," *Remote Sensing of Environment*, 83:336-350.
- Zhang, Q. and J. Wang, 2003, "A Rule-based Urban Land Use Inferring Method for Fine-resolution Multispectral Imagery," *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(1):1-13.

