



aplicações de  
**Sensoriamento  
Remoto**

William Tse Horng Liu

2ª edição ampliada

**oficina de textos**

© 2007 WILLIAM TSE HORNG LIU

Proibida a reprodução total ou parcial por qualquer meio de impressão, em forma idêntica, resumida ou modificada, em língua portuguesa ou qualquer outro idioma.

Depósito Legal na Biblioteca Nacional

© Copyright 2015 Oficina de Textos

**Conselho editorial**

Cylon Gonçalves da Silva; Doris C. C. K. Kowaltowski;

José Galizia Tundisi; Luis Enrique Sánchez;

Paulo Helene; Rozely Ferreira dos Santos;

Teresa Gallotti Florenzano

**Capa** Malu Vallim

**Projeto gráfico** Daniel Neves

**Diagramação** Allzone Digital Services Limited

**Revisão de textos** Gislene Fernandes Soares e Helio Hideki Iraha

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UNIDERP

**L783a** Liu, William Tse Horng.  
Aplicações de sensoriamento remoto / William Tse Horng Liu.

—  
Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006.  
908 p: il. color.

Inclui bibliografia.  
ISBN 85-7704-040-0  
eISBN 978-85-7975-177-6

1. Satélites - Sensoriamento remoto 2. Monitoramento I. Título.

CDD 21.ed. 621.3678  
526.982

Todos os direitos reservados à Oficina de Textos

Rua Cubatão, 959

CEP 04013-043 – São Paulo – Brasil

Fone (11) 3085 7933 Fax (11) 3083 0849

[www.ofitexto.com.br](http://www.ofitexto.com.br) e-mail: [atend@ofitexto.com.br](mailto:atend@ofitexto.com.br)

# Biografia



William Tse Horng Liu, nascido em Tungshiao, Taiwan, em 20 de agosto de 1942, foi premiado várias vezes como estudante padrão e jovem padrão durante o período em que cursou o ensino fundamental e o médio. Em 1956 foi premiado na categoria Excelência Acadêmica com nota A em todas as matérias, um fato inédito na história do Primeiro Colégio Estadual Taichung, onde estudou. Após concluir o bacharelado em Ciência do Solo na Universidade Nacional Chung Hsing, em Taiwan, foi aos Estados Unidos para realizar seus estudos de pós-graduação, obtendo seu mestrado na Universidade de New Hampshire, em Durham, em 1970, e seu Ph.D. na Universidade de Cornell, em Ithaca (Nova York), em 1974.

Ao longo de sua carreira realizou várias visitas internacionais com fins científicos, nas quais proferiu diversas palestras, incluindo aquelas realizadas no International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), em Hyderabad, Índia, onde concluiu os estudos de pós-doutorado; na Divisão das Aplicações Climáticas do NESDIS/NOAA e na Universidade de Missouri em Columbia por duas vezes como parte dos estudos de pós-doutorado; no Satellite Applications Laboratory do NESDIS/NOAA e no World Weather Center, em Camp Springs (Maryland), por duas vezes; no Goddard Space Flight Center (GSFC), da Nasa, em Greenbelt (Maryland); no World Agricultural Outlook Board/USDA, em Washington D.C.; na Universidade Estadual de Colorado, em Fort Collins; no Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research (SC-DLO), em Wageningen, Holanda; no Instituto Nacional de Tecnologia Agrária (INTA), em Buenos Aires, Argentina; no Serviço Florestal/USDA, em Washington D.C.; no Serviço Geológico em Pequim e Nanquim, China; no Serviço Meteorológico em Xangai, China; no Serviço Meteorológico em Taipei, Taiwan; na Universidade Nacional Chung Yang, em Taiwan; na Universidade de Estrasburgo, na França, e no Centro Nacional de Pesquisas Bioclimáticas, em Avignon, França; na Ducks Unlimited e na Universidade de Tennessee em Memphis, entre outras.

Antes de lecionar na Universidade Nacional Chung Hsing, em Taiwan, trabalhou no Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA/Embrapa), em Petrolina, Pernambuco, em 1976. Como coordenador do Programa de Sistema de Produção em Área de Sequeiro do CPATSA, desenvolveu vários sistemas de captação de água para minimizar o risco da perda de produção na região Nordeste brasileira. Em 1978, foi contratado pelo Centro Tecnológico (Cetec) de Minas Gerais, em Belo Horizonte, e desenvolveu o método e produziu os mapas de zoneamento ecológico das culturas energéticas, incluindo cana-de-açúcar, mandioca e sorgo sacarino, para todos os Estados do Brasil em escala de 1:1.000.000. Também desenvolveu os métodos alternativos de previsão da safra agrícola, incluindo modelos estatísticos, modelos de processos fisiológicos e modelos via satélite. Em 1988, foi contratado para lecionar no Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo. Criou o Laboratório de Aplicações de Sensoriamento Remoto, desenvolveu as técnicas de previsão de safra agrícola via satélite e executou as validações de métodos de estimativa de parâmetros biofísicos, tais como albedo, temperatura da superfície e balanço de energia da superfície via satélite NOAA em campo. Em 2000, foi contratado pela Universidade Católica Dom Bosco, em Campo Grande, Mato Grosso do Sul, e desenvolveu técnicas de previsão de cota, cheias e tendência de erosão da bacia do rio Alto Paraguai (BAP), métodos de zoneamento ecológico-econômico aplicando o modelo de Sistema de Informações Geográficas e modelos de manejo sustentável dessa bacia hidrográfica. Por meio desses vários projetos, foram gerados os mapas da base cartográfica e dos usos atuais do solo da BAP em escala de 1:100.000 e desenvolvidos o plano sustentável de manejo da bacia do rio Miranda e o plano de manejo do Parque Estadual do Rio Alto Taquari.

Tem a honra de ser membro da equipe de revisores da revista internacional *International Journal of Remote*

*Sensing* desde 2002. Seus trabalhos publicados incluem: revistas nacionais (5), revistas internacionais (11), simpósios e congressos (103), relatórios técnicos (23), capítulos de livros (2), palestras proferidas (44) e publicações em língua chinesa (7).

## Prefácio à segunda edição

Os mil exemplares da primeira edição do livro *Aplicações de Sensoriamento Remoto* esgotaram no início do ano de 2014. Visando dar continuidade às aquisições do livro por leitores e às facilidades para a pesquisa e o ensino na área de Sensoriamento Remoto, tomei a decisão de publicar esta segunda edição com o apoio da Editora Oficina de Textos. Nesta edição, além de corrigir os erros ocorridos na primeira edição, acrescentei o Cap. 16, *Modelo Universal de Previsão de Safra Agrícola (MUPSA)*. MUPSA é um modelo que pode ser aplicado para prever as produções agrícolas para quaisquer tipos de vegetação em qualquer área e para monitorar as evoluções temporais e espaciais da superfície do planeta Terra. Trata-se de um modelo inédito internacionalmente, fruto valioso da integração dos conhecimentos nas diversas áreas científicas. Essa integração só se tornou possível com a visita, no ano de 2008, ao Setor de Agrimensura e Geoprocessamento do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Viçosa (MG), liderado pelo Prof. Dr. Carlos Vieira, especialista na aplicação do software Redes Neurais para identificar e classificar culturas usando os dados multi-espectrais, multi-temporais e multi-fontes. A visita foi financiada pelo CNPq, por meio da Bolsa de Professor Visitante, pelo período de um ano. Gostaria de divulgar o MUPSA àqueles que têm interesse em aplicar esse modelo para prever as produções agrícolas e para monitorar as evoluções temporais e espaciais de usos da terra do mundo inteiro.

Agradeço cordialmente o apoio da Sra. Héliida Machado Pelozio e do Sr. Marcel Iha, da Editora Oficina de Textos. Sem esse incentivo, seria impossível realizar a divulgação desta segunda edição.

Curitiba, PR, junho de 2014.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'William Tse Horng Liu'. The signature is fluid and cursive, with the last name 'Liu' being particularly prominent.

William Tse Horng Liu, Ph.D.

[liu\\_rslivro@hotmail.com](mailto:liu_rslivro@hotmail.com)

# Prefácio à primeira edição

Apresentações extensas sobre os fundamentos teóricos de sensoriamento remoto via satélite e suas aplicações podem ser encontradas nos dois volumes do livro, chamado Manual de Sensoriamento Remoto (Manual of Remote Sensing), editado por Colwell em 1985. Os conteúdos das aplicações baseiam-se nos resultados das pesquisas obtidas nas décadas de 1960 e 1970 e no início da década de 1980. Os avanços das aplicações nas diversas disciplinas somente podem ser encontrados nas revistas, tais como International Journal of Remote Sensing, Remote Sensing of Environment, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, e nos artigos de outras revistas que contestam as aplicações dos dados adquiridos por satélites nas diversas áreas.

Desde a publicação de Colwell, passaram-se mais de 20 anos e sem que se pudesse encontrar outro livro abordando as aplicações dos dados de sensoriamento remoto via satélite tão abrangente. Este livro apresenta as técnicas modernas de sensoriamento remoto aplicadas em diversas disciplinas. Os três motivos que me levaram a escrever este livro foram: fazer uma revisão mais ampla das potencialidades de aplicações dos dados adquiridos por satélites; escrever em Língua Portuguesa para facilitar os ensinamentos e as pesquisas; fornecer sucintamente os conhecimentos básicos das diversas disciplinas, principalmente nas áreas de micrometeorologia, solo e fisiologia vegetal, entre outros, para ampliar suas aplicações. Nesse contexto, as aplicações atuais mais destacadas são apresentadas e revisadas e os avanços das pesquisas nas décadas de 1960 a 1980, citados por Colwell, também são incluídos neste livro para formar um fluxo contínuo do assunto.

O livro recebeu o título "Aplicações de Sensoriamento Remoto". O conteúdo é apresentado em 15 capítulos: fundamento teórico; sistema de satélites; características espectrais de solo; características espectrais de vegetação; aplicações em geologia; recursos hídricos; índices de vegetação; balanço de energia da superfície terrestre; monitoramento das secas; usos do solo urbano; monitoramento de queimadas; previsão de safra agrícola; processamento de dados de satélites; classificação de imagem digital e sistema de informações geográficas.

Considerando-se que o assunto das aplicações de satélites ambientais envolve uma gigantesca gama das diversas disciplinas e a ciência de sensoriamento remoto avança rapidamente, as contribuições significantes das aplicações de dados de satélites são de fato vastas e dinâmicas. Portanto é impossível englobar todas as descobertas e as contribuições distintas nas diversas áreas publicadas por todos os pesquisadores e profissionais em todas as disciplinas neste espaço limitado. Entre as contribuições das mais distintas, pode acontecer de algumas não terem sido discutidas neste livro. Suas opiniões e críticas são importantes e bem-vindas. Espero que as informações apresentadas por este livro sirvam para facilitar o trabalho de pesquisadores, professores, profissionais e alunos de alguma maneira, a fim de explorarem as possíveis aplicações dos dados de sensoriamento remoto via satélite nas suas especialidades.

Campo Grande, MS, janeiro de 2007.



William Tse Horng Liu, Ph.D.

[liu\\_rslivro@hotmail.com](mailto:liu_rslivro@hotmail.com)

# Agradecimentos

À Diretora-Geral da EDITORA UNIDERP, Profa. Maysa de Oliveira Brum Bueno, às Profas. Lúcia Helena Paula do Canto, Edmara Moraes Veloso e Rúbia de Oliveira Vasques, revisoras. Ao M. Sc. Aloizo Rodrigues dos Santos, assessor técnico da Editora UNIDERP, e equipe, Daniel Neves, Ricardo Rojas, Adalberto Souza, Alex Joboji e Kátia Barbosa pela produção do livro; ao Prof. Dr. Edson Kassar, Departamento de Física da UFMS, Prof. Dr. Gutemberg França, Departamento de Ciências Atmosféricas, UFRJ, e Dr. Ronbinson Negon Juarez, School of Earth and Atmospheric Sciences, Geórgia Institute of Technology, Atlanta, Geórgia, USA, que revisaram o conteúdo científico contribuindo valiosas sugestões. Ao meu filho Shinjen A. Liu e Daniel Neves, que revisaram e finalizaram a arte gráfica das figuras, tabelas, conteúdo, formato e diagramação.

À Sra. Teresinha S. Martins, do WWF Regional do Estado de Mato Grosso do Sul; Profa. Cristina França Monteiro Kassar, FUNLEC, e Sra. Rachel Rabello Soriani, Secretária Estadual de Meio Ambiente/MS, que revisaram previamente este livro, e ao Sr. Edson Luis Santiami, técnico do Laboratório de Geoprocessamento da UCDB, que produziu previamente as figuras e as imagens para o livro. Ao Dr. André Luiz Farias de Souza do Centro de Previsões do Tempo e Estudos Climáticos; ao Rafael Galvan Barbosa Ferraz, aluno do Programa de Mestrado em Desenvolvimento Local; aos acadêmicos do Programa de Iniciação Científica, incluindo: Maria Fernanda Hungria Cabral, Priscila Quevedo Monteiro, Moacir Ademilson Stumpf, Frederico Lício Pereira, Suelen Ferreira dos Santos, Bruna Peixoto Fonseca; aos estagiários do Laboratório de Geoprocessamento, incluindo Gustavo Ferreira de Souza, Paulo Jun Adachi Kanazawa e aos demais acadêmicos da UCDB, que contribuíram para o desenvolvimento do livro.

Só a ajuda desses queridos colegas e alunos tornou possível apresentar este livro dentro da perfeição que condiz com nossa humanidade.

Campo Grande, MS, janeiro de 2007.



William Tse Horng Liu



# FI

Capítulo

Fundamento Teórico

## 1.1 Introdução

O satélite é uma máquina fantástica que possui lentes em vários comprimentos de onda eletromagnética e vigia cada pedaço do planeta Terra para informar rapidamente e minuciosamente o que está acontecendo nele em uma altitude de 822 quilômetros e em uma velocidade que demora de 101,4 minutos para circular o globo terrestre de um pólo ao outro, de uma vez. Essas lentes vivas são compostas de um conjunto de sensores que captam várias faixas de energia da onda eletromagnética, que se originam da radiação solar refletida e emitida pelos objetos presentes na superfície da Terra.

Por que o satélite pode ver nitidamente ruas, carros, plantações, florestas, rios, montanhas e outros, com altitude e velocidade tão altas? Para responder a essa questão, primeiro, é importante saber que a energia solar é um tipo de energia eletromagnética composta de uma determinada faixa de onda. As características e magnitudes das energias refletidas e emitidas pelos objetos e captadas pelos sensores são fontes essenciais de informações para saber identificar os objetos. Portanto, é preciso conhecer a energia eletromagnética, suas propriedades de propagação e interações com os objetos na superfície.

Além disso, para saber qual é o limite teórico a partir do qual um sensor de satélite pode identificar os alvos na superfície terrestre, é comparada a velocidade do satélite com a velocidade de registrar os sinais manifestados pelo alvo na superfície. O registro dos sinais do alvo pelo sensor de um satélite depende da altura e velocidade do satélite.

A intensidade de energia eletromagnética diminui quando a distância entre o sensor e o alvo aumenta. A diminuição da intensidade é igual à distância ao quadrado. Considerando que a altitude do satélite seja de 822 km, tal como Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT), por exemplo, a velocidade do satélite é o fator crucial para calcular sua capacidade de identificar o alvo na superfície, porque ele passa rapidamente e o sensor tem seu limite de tempo para registrar as informações do alvo.

A energia manifestada pelo alvo na superfície pode ser considerada inalterada em um curtíssimo período de tempo. O problema é que o sistema de computador do sensor deve registrar rapidamente os sinais manifestados pelo alvo antes que o sensor passe para outro. Portanto, é preciso comparar as velocidades de satélite e a velocidade da energia eletromagnética para calcular o limite da resolução espacial do satélite. O limite máximo da velocidade da gravação de um computador é a velocidade de energia eletromagnética que é igual à velocidade da luz no vácuo, ou seja, 300.000 km/s. Já um satélite, do tipo SPOT, em uma altitude de 822 km gasta 101,4 minutos para circular o globo a uma só vez. O semi-eixo equatorial é de 6.378,4 km e a circunferência é de 40.076,7 km. A órbita do SPOT em uma altitude de 822 km é de 45.242 km. A velocidade do SPOT é de 446,2 km/min, isto é, 7,44 km/s. Considerando a velocidade da gravação de 300.000 km/s, que é 40.344 vezes mais rápida do que a do satélite, cada sensor do satélite pode registrar 40.344 informações quando o satélite passa a uma distância de 7,44 km em cada segundo. Dividindo os 40.344 registros por 7,44

remoto a serem desenvolvidas para estudar as propriedades das radiações que são espalhadas, absorvidas, refletidas e remetidas por um objeto atingido por uma onda eletromagnética artificial. O efeito *Brewster* é o caso de uma onda eletromagnética polarizada que incide verticalmente na superfície plana da água e toda a energia penetra na água.

## 1.4 Espectro energia eletromagnética

A energia eletromagnética possui as três propriedades, incluindo comprimento da onda ( $\lambda$ ), frequência ( $\nu$ ) e amplitude ( $A$ ). O comprimento da onda é a distância de um pico da onda ao outro. A frequência é mensurada pelo número das ondas que passam por um ponto fixo em um segundo. A unidade da frequência é definida como hertz (Hz). Por exemplo, um Hz é uma oscilação a cada segundo. A amplitude é a altura de cada pico que é a metade da distância entre o pico máximo e o pico mínimo. A figura 1.2 mostra as relações entre essas três propriedades:

- a) a amplitude =  $A$ , a frequência =  $\nu$  e o comprimento da onda =  $\lambda$ ;
- b) a amplitude =  $A$ , a frequência =  $2\nu$  e o comprimento da onda =  $\lambda/2$ ;
- c) a amplitude =  $A/2$ , a frequência =  $\nu$  e o comprimento da onda =  $\lambda$ .

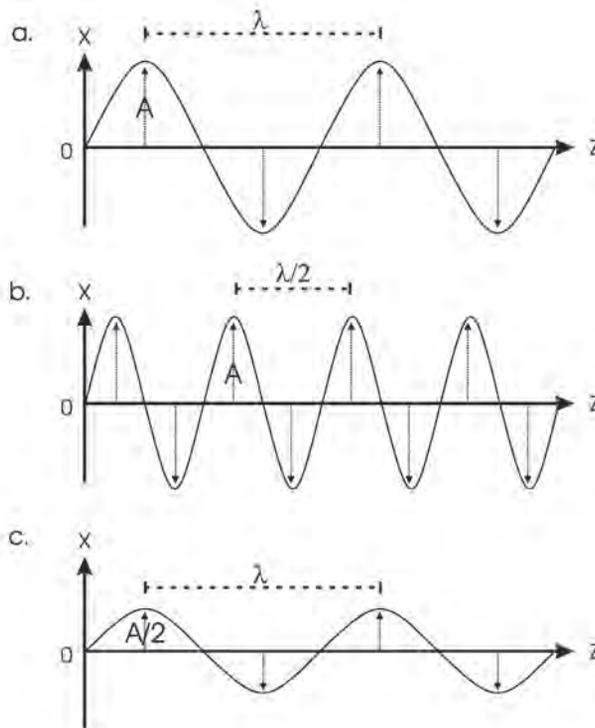


Figura 1.2 – Propriedades da onda de energia eletromagnética: a) a amplitude =  $A$ , a frequência =  $\nu$  e o comprimento da onda =  $\lambda$ ; b) a amplitude =  $A$ , a frequência =  $2\nu$  e o comprimento da onda =  $\lambda/2$ ; c) a amplitude =  $A/2$ , a frequência =  $\nu$  e o comprimento da onda =  $\lambda$ .

### 1.7.1 Janelas atmosféricas

A atmosfera do planeta Terra não é totalmente transparente à radiação solar porque os gases e aerossóis formam barreiras que impedem que essa radiação chegue à superfície terrestre. Mas, a atmosfera seletivamente transmite quase totalmente a radiação em determinadas faixas de comprimento da onda eletromagnética. Essas faixas de comprimento da onda, incluindo ultravioleta e visível (0,30 a 0,75  $\mu\text{m}$ ), infravermelha próxima (0,77 a 0,91  $\mu\text{m}$ ), infravermelha termal (8 a 9,2  $\mu\text{m}$  e 10,2 a 12,4  $\mu\text{m}$ ) e microondas (7,5 a 11,5 mm e >20 mm), são chamadas de janelas atmosféricas. Fora dessas bandas, a energia da radiação eletromagnética é atenuada severamente. Assim, os sensores de satélites são desenhados nas faixas de janelas atmosféricas que tentem evitar ao máximo o efeito das atenuações atmosféricas. A figura 1.8 mostra nas várias faixas de comprimento da onda que a atmosfera é relativamente transparente à radiação solar. Os sensores do monitoramento da superfície terrestre são desenhados nas faixas com alta transmitância atmosférica. Nas bandas de submilímetro e infravermelho longo, a absorção é quase total pelos constituintes atmosféricos. Por isso, o sensoriamento remoto da atmosfera é concentrado nessa faixa de ondas.

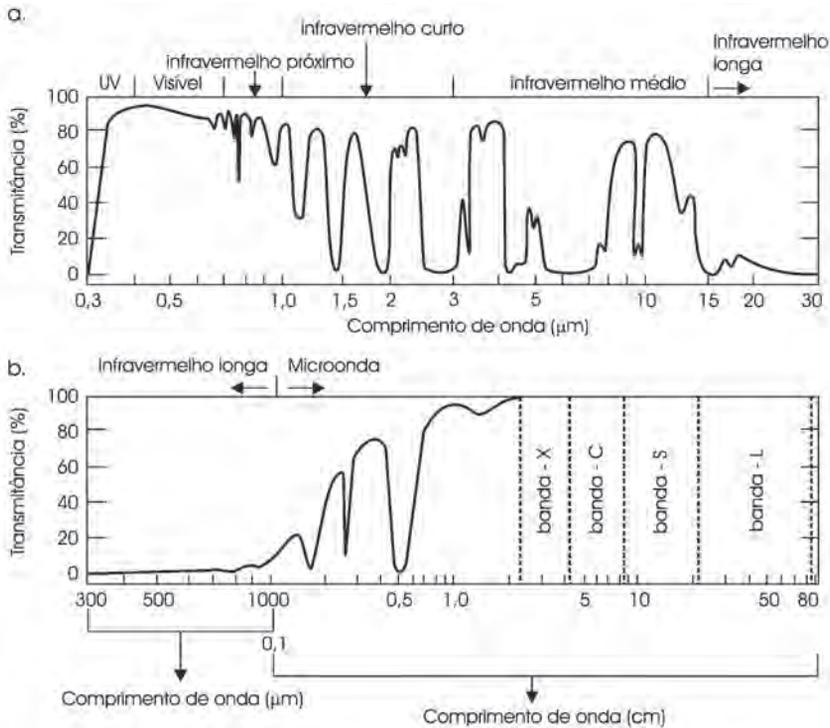


Figura 1.8 – Porcentagens de transmitância da radiação solar na camada atmosférica nas várias faixas de comprimento da onda de energia eletromagnética. Fonte: (IGBAL, 1983).

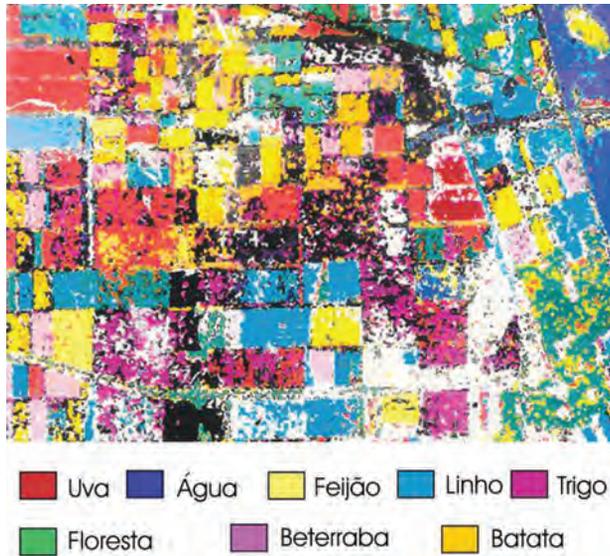


Figura 1.16 – Mapa de distribuição de plantação das culturas de uva, feijão, linho, trigo, floresta, beterraba e batata pelos dados de 4 combinações de polarizações da microonda (HH, HV, VH e VV) obtidos pelo RADARSAT. Fonte: (FREEMAN et al., 1994).

## 1.9 Potencial de aplicações

Uma disciplina nova chamada Ciências de Sistema Terrestre (Earth System Sciences) surgiu recentemente pela necessidade de aprimorar o entendimento do sistema do planeta Terra, como ele está funcionando em escala global. Ciências de Sistema Terrestre investiga como **o** componentes do globo e sua interações funcionam atualmente e prevê suas tendências no funcionamento no futuro pela agregação de todas as disciplinas clássicas, tais como Geociências, Biologia, Micrometeorologia, Pedologia e outras, e as disciplinas modernas, tais como Sensoriamento Remoto, Ciências Espaciais, Sistema de Informações Geográficas, Ciências de Computação, e outras. Isto envolve freqüentemente um treinamento e trabalho multidisciplinar.

As aplicações atuais da Ciência de Sensoriamento Remoto via satélite abrangem monitoramento dinâmico de usos de solo e evoluções de biodiversidade, recursos naturais, precipitação, clima, manejo dos recursos hídricos da superfície, exploração dos recursos hídricos no subsolo, inventário e monitoramento de usos do solo, das pastagens e das coberturas vegetais, monitoramento da produção primária das florestas e pastagens, monitoramento das ocorrências dos eventos catastróficos, tais como geadas, enchentes, secas, doenças e pragas das culturas, monitoramento dos focos de queimadas, mapeamento topográfico, monitoramento da degradação e erosão de solos, estudo das mudanças climáticas, e outros. O objetivo mais urgente no presente estado da comunidade de Ciências de Sistema Terrestre é o estabelecimento de um banco de dados globais que possa ser utilizado por todos os cientistas, para investigar e estudar os diversos processos que ocorrem nas várias esferas, tais como biosfera, geosfera e atmosfera do planeta terrestre (LANDGREBE, 2005). Neste livro, abordam-se os fundamentos teóricos e suas aplicações de satélites ambientais.



2



**Capítulo**



**Sistema de satélites**

## 2.1 História dos satélites

O desenvolvimento da técnica de sensoriamento remoto via satélite pode ser dividido em duas épocas: uma antes do lançamento do primeiro satélite pelos Russos em 04 de outubro de 1957, em que a técnica de fotografia aérea era a única técnica e a outra, após essa data, em que os diversos sensores de satélites foram desenvolvidos com o rápido avanço do programa espacial. A idéia de desenvolver uma máquina fotográfica foi originada por um experimento chamado “Câmera Obscura”, conduzido por Aristóteles cerca de 2300 anos atrás. Desde essa época, vários experimentos foram conduzidos pelos cientistas entre os séculos XIII e XIX. Em agosto de 1839, os Franceses Louis Jacques Mandem Daguerre e Joseph Nicephoce declararam que desenvolveram o primeiro processo de revelação de filme da fotografia chamado *Daguerriatype* que removia o produto químico não reagido separando-se com o reagido para produzir a imagem fotográfica.

Em 1859, Gaspard Felix Tournachon fotografou a bordo de um balão a paisagem da superfície terrestre em uma vila perto de Paris chamada Petit Becetre. Em 1860, Samuel A. King e James W. Black fotografaram a cidade de Boston a bordo de um balão a uma altura de 400 metros. No fim do século XIX, as técnicas de fotografia moderna já estavam disponíveis. Durante a Primeira Guerra Mundial, os militares usaram avião para tirar fotografias da superfície terrestre. Nesse tempo surgiram as primeiras fotografias aéreas históricas. Entre a Primeira e a Segunda Guerra Mundial, as técnicas de fotografia aérea foram aplicadas para levantamento de recursos naturais, tais como formações geológicas, florestas, solos, agricultura e para a elaboração dos mapas cartográficos. O crescente uso de fotografias aéreas incentivou o aprimoramento das técnicas de sensoriamento remoto. Durante a Segunda Guerra Mundial, as técnicas de fotografia aérea do infravermelho termal e radar de microonda ativa foram desenvolvidas, mas somente após a Segunda Guerra Mundial, é que foi possível utilizar um sensor radiométrico capaz de detectar os sinais de radiação eletromagnética e um computador com capacidade de gravar e armazenar rapidamente os imensos dados adquiridos.

Os Estados Unidos lançaram o segundo satélite, chamado Explorer 1 no dia 31 de janeiro de 1958. As tecnologias aeroespaciais e de satélites avançaram rapidamente após a criação de um centro de pesquisa nos Estados Unidos, a National Aeronautics and Space Administration (NASA), no dia 1 de outubro de 1958. O primeiro satélite que carregou instrumentos meteorológicos foi o *Vanguard 2*. Lançado no dia 17 de fevereiro de 1959, ele tinha um par de células fotográficas atrás da lente para registrar as imagens visíveis, mas infelizmente, não registraram as imagens porque o foco dos dois celulares fotográficos se cruzaram. A primeira fotografia obtida por via satélite deu-se pelo Explorer 6 da NASA em 7 de agosto de 1959, mas os sensores de radiômetros também falharam ao registrar os valores digitais. O primeiro sucesso no registro de dados meteorológicos foi com o lançamento do Explorer 7 no dia 13 de outubro de 1959, que produziu pela primeira vez mapas globais da radiação solar refletida e da radiação de infravermelho emitida. O primeiro satélite exclusivamente destinado para fins meteorológicos foi lançado no dia 1 de abril de 1960, denominando-se Television and Infrared Observational Satellite, (TIROS 1), que foi o vigésimo segundo

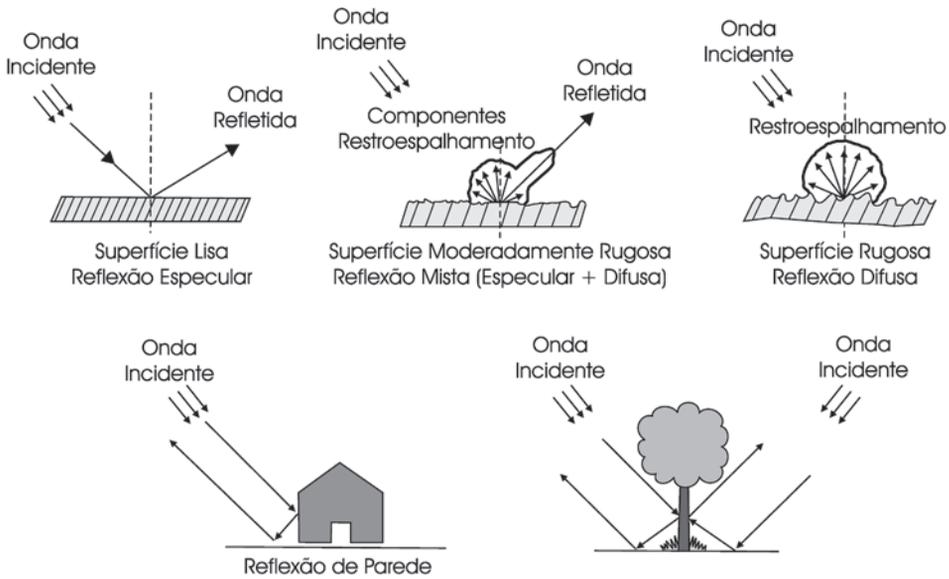


Figura 2.7 – Cinco tipos de espalhamentos incoerentes dos sinais não-recebidos pelos sensores de radar por causa das diferentes formas e rugosidade da superfície: superfície espelhada, terrenos ondulados e terrenos rugosos (3 figuras de cima) e paredes verticais, copas das vegetações (2 figuras de abaixo). Fonte: (CORINA et al., 2003).

A resolução espacial dos sensores de radar de visada lateral e do SAR é composta de duas resoluções: resolução azimutal e resolução radial. A figura 2.8 mostra uma área definida pelas resoluções azimutal e radial (área cinza) que é a resolução espacial calculada pelas equações 2.5 a 2.7.

A resolução azimutal de radar é calculada pela equação (2.5):

$$\rho_a = \beta h / \cos\theta = \lambda h / L \cos\theta \quad (2.5)$$

Em que:

- $\rho_a$  = resolução azimutal;
- $\beta$  = ângulo de abertura do sensor;
- $h$  = altura do sensor;
- $\theta$  = ângulo de incidência;
- $\lambda$  = comprimento da onda;
- $L$  = distância da cobertura na direção do voo.

A resolução azimutal do SAR é calculada pela equação (2.6):

$$\rho_a = L/2 \quad (2.6)$$

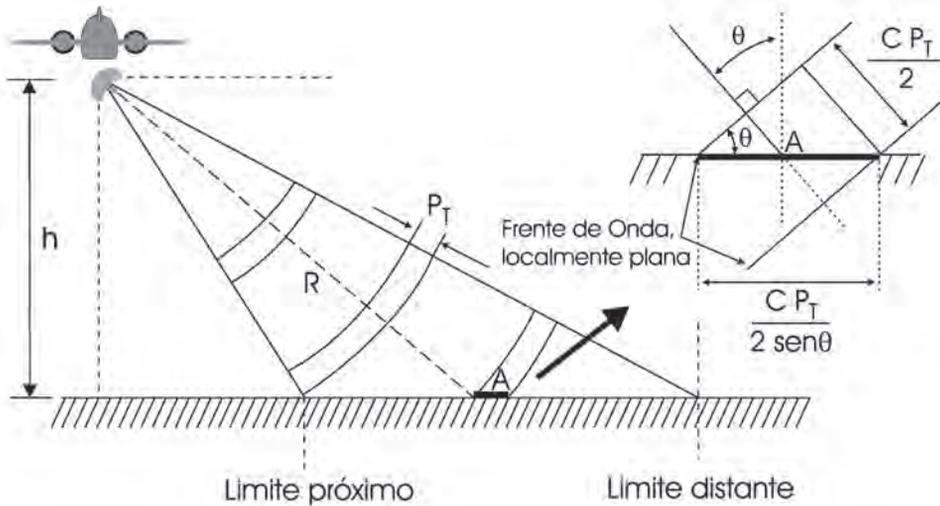


Figura 2.9 – Resolução radial no plano horizontal ( $\rho$ ) em relações ao ângulo de incidência  $\theta$  de um sistema de radar de visada lateral. Fonte: (CORINA et al., 2003).

da constante dielétrica dos alvos, o ângulo de incidência e a geometria do alvo afetam a intensidade de sinais polarizados retornados. A interferometria de imagens SAR é uma técnica para estimar a diferença de fase de sinais retornados do mesmo *pixel* adquiridos pelas duas antenas do SAR. Essa técnica pode ser aplicada para separar a intensidade de sinais de retorno causada pelas propriedades dielétricas do alvo pela rugosidade, ângulo de incidência e inclinação da superfície do alvo e serve para geração de modelo digital do terreno, Digital Elevation Model (DEM), com alta precisão. As descrições detalhadas sobre os fundamentos teóricos e as aplicações das imagens adquiridas pelo SAR e pela interferometria em diversas disciplinas podem ser encontradas no livro publicado por Floyd e Lewis (1998).

#### 2.4.2.4 Sensores de LIDAR

Os sensores de Light Detection and Ranging (LIDAR) usam um pulso do *laser* para medir a distância entre o sensor e a superfície da Terra (FLOOD; GUTELIUS, 1997). O posicionamento de uma área rastreada pelo escaneador é registrado pelo Differential Global Positioning System (DGPS). Os limites de uma unidade de área posicionam cada ponto a ser identificado e registrado pelo DGPS (WEHR; LOHR, 1999). Um modelo digital da superfície, chamado Digital Surface Model (DSM), pode ser gerado automaticamente baseado nos dados de elevação dos pontos registrados. O DSM fornece as informações de geomorfologia e feições da superfície terrestre e fisionomias da morfologia da superfície. A separação dos elementos dessas paisagens na superfície de um DSM cria um modelo digital de terreno, Digital Terrain Model (DTM) e um modelo de altura das copas de vegetação e dos prédios. Esse modelo de altura pode fornecer as informações de altura, densidade, cobertura das copas e biomassa das árvores para caracterizar a estrutura das florestas.



Figura 2.13 – Imagem Landsat 7 ETM+ R/G/B 5/4/3, Cena 224/74 do ano de 2002 mostra a região metropolitana de Campo Grande, capital do Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil. Fonte: (LIU, et al., 2005).

tecnológicos permitem qualificar o Landsat 7 como o satélite mais interessante para a geração de imagens pancromáticas com aplicações diretas até a escala 1:75.000, em áreas rurais principalmente, mesmo em grandes extensões de território, como acontece freqüentemente no Brasil.

O Landsat 7 pode adquirir imagens de uma área que se estende desde 81° de latitude norte até 81° de latitude sul e obviamente, em todas as longitudes do globo terrestre. Uma órbita do Landsat 7 é realizada em aproximadamente 99 minutos, permitindo ao satélite dar 14 voltas na Terra por dia, completando a cobertura total do nosso planeta sendo completada em 16 dias. A órbita é descendente, ou seja, de norte para sul, o satélite cruza a linha do equador entre 10h e 10h15min na hora local em cada passagem. O Landsat 7 é “heliosincronizado”, ou seja, sempre passa num mesmo local no mesmo horário solar. Outro fato importante é que o satélite Landsat 7 tem o mesmo período de revisita que o Landsat 5 (17 dias) e a sua órbita resultou na mesma grade de referência do Landsat 5 e tem a mesma área imageada (185 x 185 km por cena). A conservação destes parâmetros técnicos facilita o processo de pesquisa de imagens, pois pode ser feito com a mesma grade de referência e a perfeita integração no processamento das imagens do Landsat 7 com os dados históricos do Landsat 5, existentes desde 1985, no caso de utilização dos dois tipos de dados simultâneos no mesmo projeto para a mesma área como, por exemplo, em estudo multitemporal.

Tabela 2.9 – Data de lançamento e características do satélite QuickBird II. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br/satelite/quickbird.html>> acesso em 10 de abril de 2004.

QuickBird II	Características	
Data de lançamento	18 de outubro de 2001	
Veículo de lançamento	Boeing Delta II	
Local de lançamento	Base de Força Aérea em Vandenberg, Califórnia	
Capacidade de armazenamento de dados	128 Gbytes, aproximadamente 57 áreas de imagens simples.	
Altitude da órbita	450 km	
Inclinação da órbita	98 graus, sincronizada com o Sol	
Velocidade	7,1 km / segundo	
Horário de passagem	10h30min	
Duração da órbita	98 minutos	
Capacidade de envio de dados	320 Mbps em banda X	
Peso, tamanho	953 kg, 3,04 m de comprimento	
Tempo de vida útil	No mínimo 7 anos	
Tempo de revisita	1 a 3,5 dias, dependendo da latitude (30° off-nadir)	
Largura do imageamento	16,5 km x 16,5 km, no nadir	
Precisão métrica	latitudinal: 23 m longitudinal: 17 m	
Digitalização	11 bits	
Resolução	PAN: 61 cm (nadir) e 72 cm (25° off-nadir) Multiespectral: de 2,44 m (nadir) até 2,88 m (25° off-adir)	
Formatos disponíveis	GeoTIFF 1.0, NITF 2.1 ou NITF 2.0	
Bandas	Pancromática	450 - 900 nm
	Azul:	450 - 520 nm
	Verde:	520 - 600 nm
	Vermelho:	630 - 690 nm
	Infravermelho próximo:	760 - 900 nm



Figura 2.22 – Imagem obtida pelo EOS AM-1 ASTER, mostrando o ponto de encontro do Rio Negro, da cor negra, indicando alta concentração de minerais, com o Rio Salomão da cor marrom indicando alta concentração de sedimento. Imagem obtida no dia 16 de julho de 2000 pela equipe científica dos Estados Unidos e Japão. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/gsf/c/meti/ersdac/jaros>> acesso em 16 de julho de 2005.

## 2.5.12 NOAA

O programa de satélites da série NOAA é gerenciado por meio do National Environmental Satellite Data and Information Service (NESDIS/NOAA) e pela NASA, que é responsável pelo desenvolvimento e lançamento dos aparelhos. Este programa começou com a denominação Television and Infrared Observation Satellite (TIROS) e foi desenvolvido pela NASA e pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos na tentativa de desenvolver um sistema de satélites meteorológicos. Entre 1960 e 1965 foram lançados dez satélites TIROS. Entre 1966 e 1969, foram lançados nove novos satélites, denominados TIROS Operational Satellites (TOS), operados pela Environmental Science Services Administration (ESSA), pertencente à NOAA. No dia 23 de janeiro de 1970, foi lançado o Improved TIROS Operational System, (ITOS) que é o TOS aperfeiçoado. O lançamento do ITOS iniciou a primeira geração da série de NOAA satélites que incluíam sensores infravermelhos. Posteriormente os cinco satélites da série ITOS M foram renomeados para NOAA 1, NOAA 2, NOAA 3, NOAA 4 e NOAA 5.

No dia 13 de outubro de 1978 foi lançado o satélite da série TIROS N, que era a segunda geração da nova série de satélites, na qual se incluem o NOAA 6 e o NOAA 7. Essa série foi substituída a partir de 1983 pela série Advanced TIROS N (ATN) com

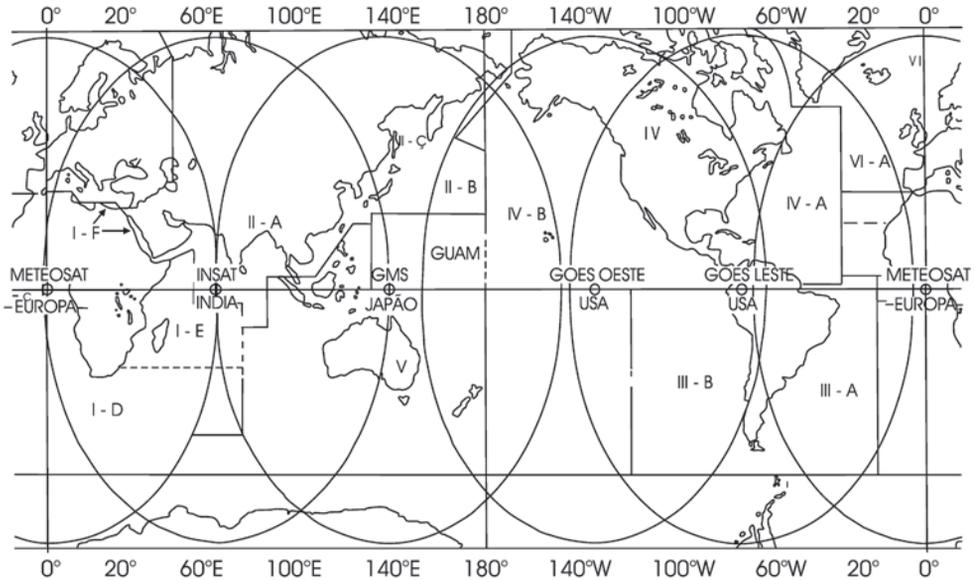


Figura 2.23 – As coberturas globais dos satélites estacionários. Disponível em: <<http://www.nesdis.noaa.gov>> acesso em 3 de janeiro de 2004.

Os principais sensores do satélite GOES são os radiômetros nas bandas de visível e infravermelho. O satélite gira a cem rotações por minuto. Em cada rotação, um radiômetro de alta resolução varre a superfície terrestre de oeste para leste. Em geral, nos satélites GOES, os instrumentos Visible-Infrared Spin Scan Radiometer (VISSR) fornecem maior capacidade para uma sondagem atmosférica. A maioria dos instrumentos são formalmente denominados como Vertical VISSR Atmospheric Sounder (VAS). O VAS permite uma visão multiespectral adicional. O modo de rastreamento multiespectral permite coletar e transmitir dados provenientes de três canais infravermelhos diferentes, em adição ao canal visível. Nesse caso, as resoluções espaciais são de 1 km no nadir para o canal visível e 13,8 km para os canais do infravermelho.

### 2.5.14 METEOSAT

A série METEOSAT iniciou-se em 1977, como resultado de uma iniciativa da Agência Espacial Européia (ESA) para a produção de dados primários relacionados à previsão de tempo e às condições meteorológicas. Em 16 anos, foram lançados sete satélites da série METEOSAT, culminando com o posicionamento em órbita geoestacionária do METEOSAT 7, em 2 de setembro de 1997. O METEOSAT situa-se na altitude de 35.800 km acima da linha do equador com inclinação de 5° cobrindo 42% da superfícies do globo, incluindo: Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Irlanda, Itália, Noruega, Países Baixos, Inglaterra, Suécia e Suíça (figura 2.23).

An aerial photograph of a desert landscape. The terrain is arid and brownish-yellow. In the center, there is a large, prominent rock formation with distinct horizontal layers or strata. The rock formation is surrounded by a circular area of greenish vegetation. To the right of the rock formation, there is a small cluster of buildings and a road. The overall scene is a typical desert environment.

# FEI

**Capítulo**

**Características  
espectrais de solo**

---

## 3.1 Introdução

Com a crescente preocupação com a degradação do planeta Terra causada pelo uso impróprio do solo, as pesquisas nas áreas de desenvolvimento das técnicas modernas de medição, previsão e controle de erosão e conservação e recuperação do solo são muito ativas (TOY; FOSTER; RENARD, 2002). As técnicas rápidas e eficientes para identificar e delinear usos do solo, identificar as propriedades químicas e físicas do solo, delinear os limites de tipos do solo e, conseqüentemente, classificar e mapear tipos de solo são fundamentais para monitorar, diagnosticar e planejar as ações na conservação e na preservação dos recursos naturais. As técnicas de fotografias aéreas são utilizadas tradicionalmente no levantamento do solo.

Com o recente avanço da tecnologia espacial, os satélites de alta resolução temporal e espacial oferecem possibilidades ilimitadas para desenvolver técnicas viáveis para monitorar as condições de usos do solo em tempo real. As imagens e os dados digitais dos satélites Landsat, SPOT, IKONOS e TERRA/MODIS são empregados para facilitar levantamento e delineamento de tipos e de usos do solo. Antes, a apresentação das aplicações dos dados de sensoriamento remoto nas áreas, os conhecimentos básicos de ciências do solo, tais como perfil do solo, propriedades físicas e químicas do solo e outros são apresentados brevemente para facilitar suas aplicações. Os fundamentos teóricos e as aplicações das técnicas no monitoramento dos movimentos de água nos solos saturados e não saturados são apresentados no Capítulo 9.

## 3.2 Natureza e propriedades de solo

### 3.2.1 Perfil de solo

Pode-se ver algum trecho de solo exposto na beirada de uma estrada, quando se viaja. Observa-se que o solo tem materiais soltos depositados sobre as rochas como mostra a figura 3.1. Um perfil típico de solo consiste em solo de superfície, subsolo e substrato. As camadas, que formam um perfil de solo, são representadas por quatro letras: O, A, B e C. As subdivisões destas são chamadas horizontes. A figura 3.2 apresenta um perfil típico de solo. A camada O é o horizonte orgânico que se forma sobre o solo mineral. Esta é uma conseqüência de decomposição das plantas e animais mortos. O horizonte A, chamado horizonte iluvial, é o horizonte de minerais, que fica perto da superfície. O horizonte mineral é a zona de lixiviação. O horizonte B, chamado horizonte aluvial, é a camada que recebe os depósitos vindos de cima ou de baixo. Esse horizonte é a região que acumula os minerais, tais como óxidos de ferro, alumínio, silicatos de argilas, carbonatos de cálcio, fosfato de cálcio e outros.

O perfil estratificado, chamado solo (*solum*), incluindo horizontes A e B, é a zona de um perfil desenvolvido por meio de processo de formação do solo sob a influência do clima. O horizonte C consiste em materiais não consolidados abaixo

### 3.3.1 Cores de solo

A cor é geralmente usada para distinguir os grandes grupos de solos. Os tipos do solo geralmente podem ser distinguidos baseados nas cores e tonalidades do solo. Todos os tipos de solo têm suas características de reflectância espectrais ligadas às suas cores específicas. A cor do solo é incluída na descrição do perfil do solo.

O sistema “Munsell” da roda de cores oferece um sistema para descrever as três propriedades da cor: brilho, matiz e pureza. O sistema foi adaptado para estabelecer o sistema padrão das cores do solo. A figura 3.6 mostra esse sistema. O brilho é a intensidade da cor com escala de 10 a zero que corresponde de branca a preta situada no eixo central da roda de cor. O matiz descreve a cor localizada na superfície da roda de cores no sistema da cor Munsell. A pureza é o grau de mistura das cores complementares que diminui a pureza quando a cor se afasta da superfície direcionada ao centro da roda e se aproxima a cor complementar no lado oposto da roda. Por exemplo, na descrição de um perfil do solo, geralmente encontram-se os dados de descrição pelo sistema Munsell da roda de cores como:

2,5 YR 3/6.

- YR – Y = Yellow (amarelo) e R = Red (vermelho);
- 2,5 YR – 25% de R e 75% de Y;
- 3 – 3 são 30% de valor da saturação (a preta = 0 ou 0%; a branca = 10 ou 100%) nesse caso, 3 significa cinza-escuro;
- 6 – 6 são 60% da pureza de cor na escala da pureza (sem cor = 0 ou 0%; a cor pura = 10 ou 100%).

A figura 3.6 mostra o sistema Munsell da roda de cores. As cores começam em Red (R), passam por *Yellow* (Y), *Green* (G), *Blue* (B), *Purple* (P) e voltam para *Red* (R). A roda é subdividida em dez escalas de cor: R RY Y YG G BG B BP P PR. As dez cores são ainda mais subdivididas em cinco escalas entre si. A figura 3.7 mostra as variações das cores em tridimensionais baseadas nesse sistema. A tabela 3.1 mostra as porcentagens de cores e suas apresentações entre essas escalas de cor.

A tonalidade é visualizada como a reflectância do espectro da cor dominante que corresponde à reflectância da faixa do comprimento da onda detectada pelo sensor de satélite nas faixas de visível a infravermelho próximo (0,4 a 1,0  $\mu\text{m}$ ). O valor refere-se ao brilho relativo da cor ou intensidade de reflectância que é em função da quantidade total da luz refletida. No caso de não refletir nenhuma radiação, o valor é zero e a cor é preta. Pureza é a cor na sua intensidade máxima que se situa em uma determinada faixa de cor na superfície da roda de cores.

A cor da superfície do solo, que é diferente da cor do material parentesco do fundo, pode ser utilizada para prognosticar o processo da formação do solo e também para identificar os processos de erosão ou desertificação pela deposição excessiva de sais minerais. Obukhov e Orlov (1964) observaram que quase todos tipos de solos são intimamente ligados com as reflectâncias das características espectrais das cores. Reflectância mínima ocorre na faixa espectral de violeta azul que varia de 13% da reflectância nos perfis de solos profundos com cor escura, tais como os solos ocupados

Tabela 3.2 – Faixas de tamanho da textura de solos das classes classificadas por ISSS e USDA.

ISSS									
		0,002	0,02	0,2	2,0	(mm)			
Argila	Limo			Fina	Grossa	Cascalho			
		Argila							
Argila	Limo	Areia					Cascalho		
			Muito fina	Fina	Média	Grossa	Muito grossa		
		0,002	0,05	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	(mm)
USDA									

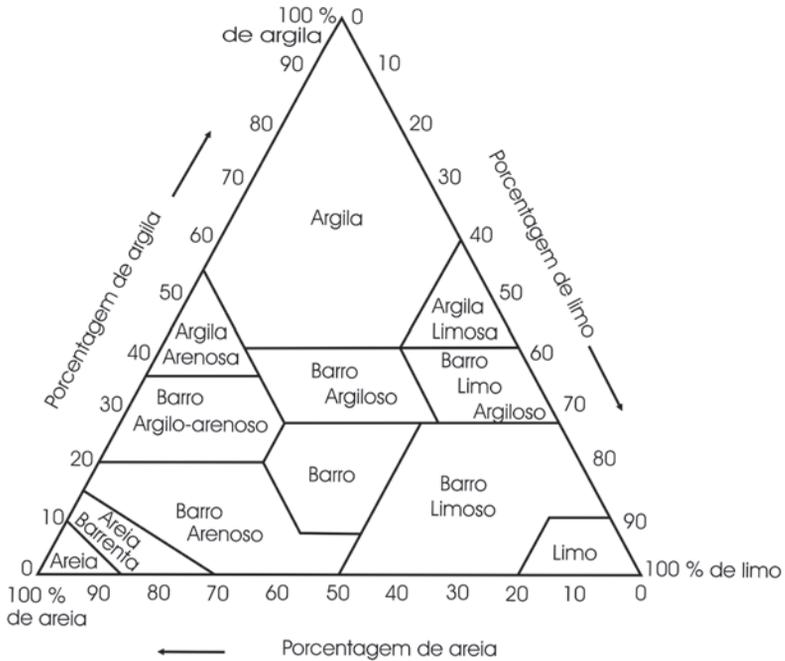


Figura 3.8 – Denominações das diferentes combinações de areia, limo e argila, representadas pelo triângulo textural baseado na classificação do USDA. Fonte: (KLAR, 1984).

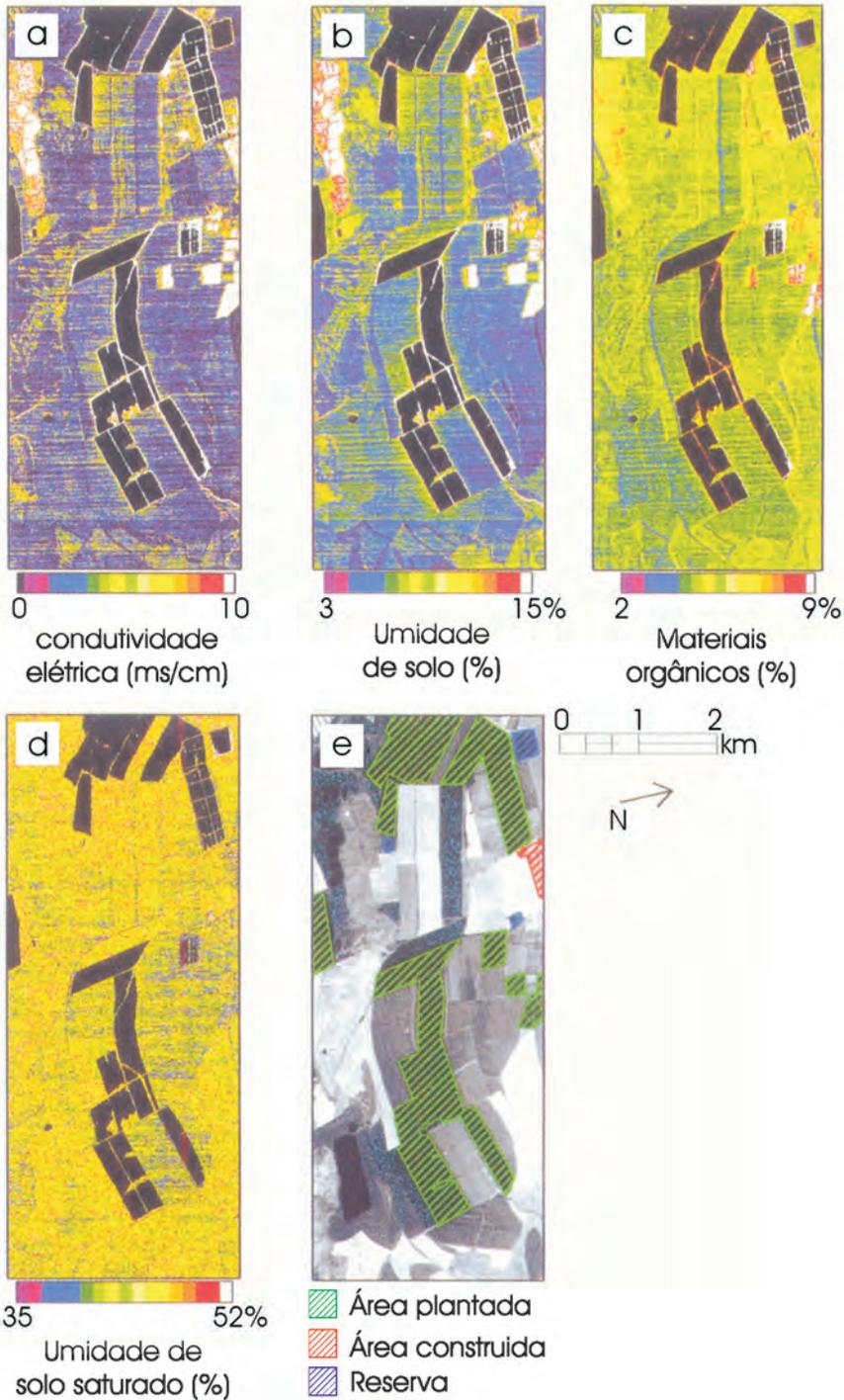


Figura 3.12 – Distribuição espacial de propriedades de solo na região de Zvaim Heights, Israel, mapeada com os dados de sensores hiperespectrais a bordo do avião DAIS-7915: a. condutividade elétrica; b. umidade de solo; c. materiais orgânicos; d. umidade de solo saturado, e. mapa base. Fonte: (BEN-DOR et al., 2002).



# Capítulo

## Características espectrais de vegetação

---

## 4.1 Introdução

A reflectância da radiação solar pela copa da vegetação envolve as reflectâncias conjunturais de vários fatores, incluindo estrutura da planta, estágio de crescimento, propriedades físicas e químicas de solos na superfície e condições atmosféricas. A heterogeneidade da paisagem criada pela natureza mãe, apesar de ser fascinante, complica a identificação e interpretação da reflectância da radiação dos seres criados por ela. Mas graças à singularidade de cada ser vivo que se manifesta pela sua assinatura espectral eletromagnética é possível extrair as informações distintas que se repetem em um padrão de forma reconhecível. As características de reflectância de solos já foram discutidas no Capítulo 3. Nesta seção, serão apresentadas as características de reflectâncias de uma única folha e uma copa da vegetação pelos espectrorradiômetros em laboratórios e campos. As suas identificações e classificações pelas imagens digitais de fotografias aéreas e satélites serão apresentados no Capítulo 14.

## 4.2 Estrutura de uma folha

A figura 4.1 mostra a anatomia do corte transversal de uma folha. A epiderme envolve uma folha por meio de uma camada de células simples sem espaços intercelulares, com exceção dos estômatos. O citoplasma das células epidérmicas é incolor, contendo pouco cloroplasto a nenhum. Do lado de fora, a epiderme tem uma cutícula à prova de água que contém cutina, material inerte e resistente à degradação enzimática provocada por microorganismos. É um material protetor que, em alguns casos, aumenta de espessura quando a planta é submetida a tensões. Folhas de plantas de cebola têm uma camada de cutina espessada quando submetidas a déficit de água, inclusive adquirindo coloração mais cinza. Entre a camada superior e a inferior das células da epiderme, encontram-se as células que compõem o mesófilo onde se encontra a clorofila. A clorofila é o centro de fabricação de matérias secas pelo processo fotossintético com a absorção de luz na faixa visível (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ). As células paliçádicas são alongadas e dispostas logo abaixo, em ângulo reto, da epiderme superior. As células lacunosas localizadas entre o parênquima paliçádico e a epiderme inferior estão irregularmente dispostas, surgindo cavidades cheias de gases e ligadas aos estômatos. O transporte de água até as folhas é feito por vasos que se ramificam por meio do mesófilo, e fazem parte do sistema vascular da planta.

a alongamento dos caules. Os resultados foram correlacionados com um índice chamado Relative Depth Index (RDI) para localizar os picos de absorção máxima. Observaram que dois picos de absorção máxima ocorreram nas bandas 0,965 a 1,085  $\mu\text{m}$  e 1,192 a 1,282  $\mu\text{m}$ . Apontaram que as faixas espectrais de absorção máxima da água da plantação de trigo descolaram comparando-se com os picos de absorção ocorridos nas faixas de 1,45  $\mu\text{m}$  e 1,95  $\mu\text{m}$  observadas anteriormente.

## 4.5 Fatores fisiológicos que afetam as reflectâncias espectrais de uma folha

As características fisiológicas de uma folha que afetam as reflectâncias das diferentes faixas de comprimentos das ondas de energia eletromagnética da radiação solar são apresentadas a seguir.

### 4.5.1 Maturidade de folha

Comparando-se as folhas maduras bem estruturadas e esponjosas com as novas compactas, as maduras absorvem 5% mais na faixa VIS e refletem 15% mais na faixa NIR (figura 4.3). As transmitâncias e reflectâncias múltiplas nas várias camadas de folhas de uma copa da vegetação resultam a reflectância máxima de 75% na faixa NIR. A figura 4.5 mostra o aumento da reflectância da energia eletromagnética na faixa de 0,75 a 1,35  $\mu\text{m}$  quando a folha do algodão aumenta sua idade e a posição da folha fica mais longe do ápice. A reflectância também aumenta quando a área total de folhas da copa de vegetação aumenta. Um índice chamado índice de área foliar (Leaf Área Index – LAI) é usado para medir a área total das folhas. O LAI é definido como a soma da área total das folhas em uma área da superfície do solo de um metro quadrado. O aumento chega a um valor constante quando o LAI alcança um valor máximo. O aumento da reflectância na faixa NIR é o resultado das transmitâncias, absorções e reflectâncias múltiplas das folhas.

### 4.5.2 Pigmentos

Uma folha madura e saudável absorve cerca de 70% a 90% da radiação solar na faixa de 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$  por causa da presença dos pigmentos, incluindo carotenóides (caroteno e xantofila, cor amarela), clorofila (cor verde) e antocianina (cor vermelha). Mas existe um pequeno pico de reflectância na faixa de 0,55  $\mu\text{m}$ , que se manifesta em cor verde no estágio do crescimento vegetativo e em cor amarela na maturação (COLWELL, 1985).

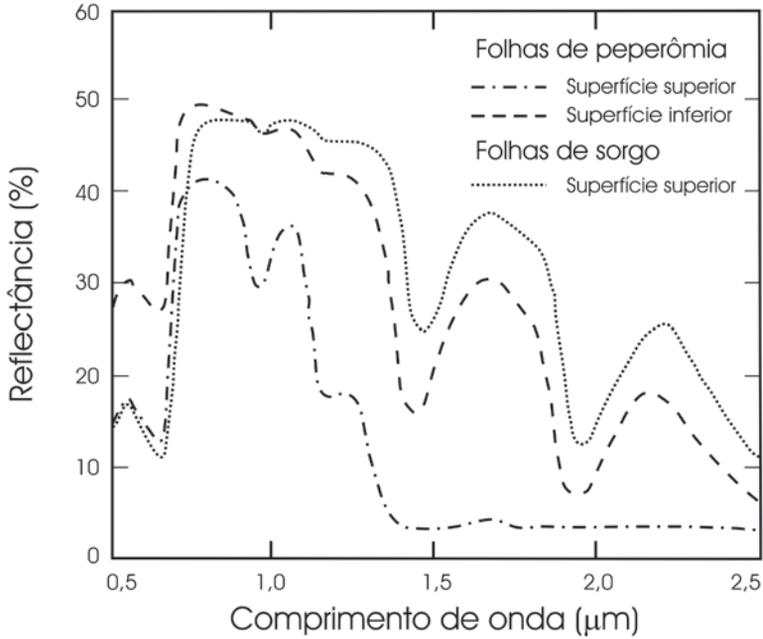


Figura 4.11 – Alta absorção na faixa de 1,35 a 2,5  $\mu\text{m}$  das superfícies superior e inferior da folha de peperômia, comparada com a superfície superior de sorgo. Fonte: (GAUSMAN; ESCOBAR; KNIPLING, 1977b).

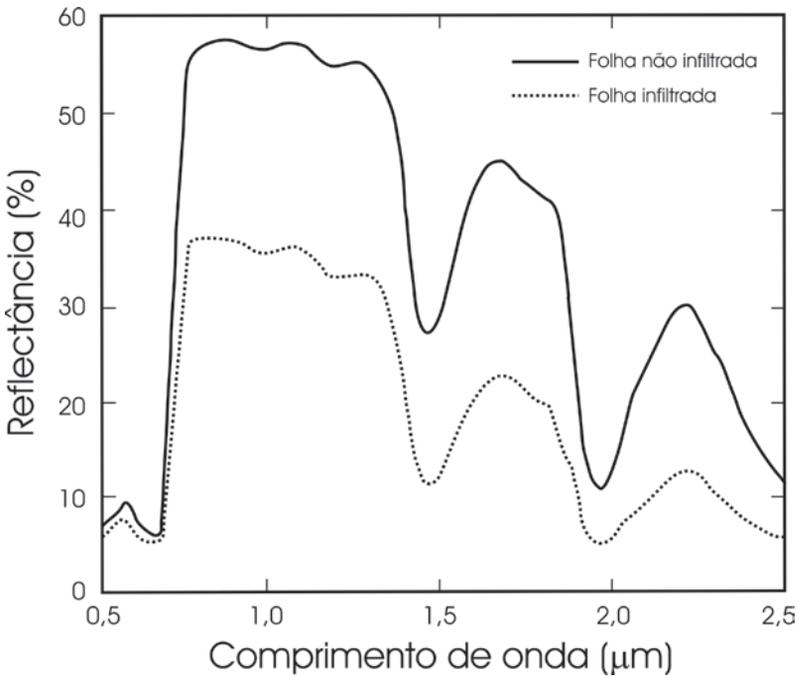


Figura 4.12 – Redução da reflectância na faixa de 0,5 a 2,5  $\mu\text{m}$  das folhas de citros infiltradas por água, comparando com as folhas não infiltradas. Fonte: (WOOLLEY, 1971).



# 5

## Capítulo

**Aplicações em geologia**

## 5.1 Introdução

O Sensoriamento Remoto Geológico é definido como a técnica de análise de dados obtidos pelo sensoriamento remoto que monitora ou mensura as características físicas e ou químicas do ambiente geológico estático ou dinâmico. As aplicações de sensoriamento remoto nas várias sub-disciplinas de Ciência Geológica foram revisadas extensamente por Williams (1985). Bell, Campbell e Robinson (1999) apresentaram uma revisão geral de exploração dos recursos geológicos planetários do sistema solar usando as técnicas de sensoriamento remoto. Este capítulo concentra várias aplicações das disciplinas nas áreas mais ligadas com o meio ambiente do planeta Terra. Por causa dos avanços rápidos das tecnologias espaciais e das técnicas de processamento e análise das imagens e dos dados digitais de sensoriamento remoto ao longo das últimas três décadas, alguns exemplos das aplicações nas Ciências de Geologia são apresentados neste capítulo.

Teoricamente, os minerais têm suas assinaturas singulares no espectro da energia eletromagnética, os materiais presentes no planeta Terra podem ser identificados por suas reflectâncias nas várias bandas-chave de comprimento da onda da energia eletromagnética que são concentradas nas faixas de visível, infravermelho próximo, infravermelho termal e microonda.

## 5.2 Geomorfologia

O mapeamento geológico é a principal ferramenta empregada pelos geólogos para entender a natureza do planeta Terra. Em uma determinada área envolve apresentação das informações de geomorfologia, litologia e estrutura tectônica das rochas. No mapa geomorfológico encontram-se as características e naturezas das formas da superfície do planeta. O mapa litológico apresenta as características litológicas e idade estratigráfica das rochas e o mapa de estrutura tectônica apresenta os arranjos das estruturas tectônicas das rochas. As experiências e as pesquisas no mapeamento geológico são apresentadas nesta e nas duas seções seguintes.

A geomorfologia é definida como a ciência que trata a configuração geral da superfície do planeta, especificamente o estudo de classificação, descrição, natureza, origem, evolução dinâmica das paisagens e suas inter-relações nas estruturas baixas, mudanças geológicas históricas registradas pelas fisionomias dessas superfícies. O termo é especificamente aplicado à interpretação genética das paisagens, mas também envolve os resultados gerados pelos processos de erosão e deposição dos minerais. Os mapas geomorfológicos fornecem dois tipos de informações: feições de relevos tridimensionais e fisionomias espaciais e temporais. A geração do mapa de fisionomia tridimensional necessita dos dados de estereoscópio adquiridos por fotografias aéreas, mas não do mapa de fisionomia espacial. O mapa de fisionomia espacial fornece a variação espacial dos contrastes ou padrões de tipos de solos e vegetação que podem ser gerados pelos dados digitais e imagens via sensoriamento remoto obtidos pelo avião ou satélite dependendo da resolução exigida.

## 5.5 Geologia econômica

Os geólogos são responsáveis pela exploração de recursos minerais e energéticos. A maioria dos estudos utiliza as fotografias aéreas e as imagens de alta resolução espacial para diagnosticar os padrões de formas lineares que são diretamente ligadas à geomorfologia e indiretamente ligadas às estruturas geológicas. As imagens de infravermelha termal podem ser aplicadas para levantamento e mapeamento das áreas geotérmicas e vulcões.

Salas (1975) observou que os depósitos de minas têm alta correlação com os cruzamentos dos principais lineamentos baseados na imagem de Landsat. Posteriormente, um estudo conjunto do grupo geológico do governo Mexicano e da Unidade do Levantamento Geológico dos Estados Unidos (US Geological Survey) confirmou que a região tem depósitos de minas de cobre e molibdênio na região de Sorona, no México (RAINES et al., 1980). Keighley (1980) localizou o depósito aluvial de minas de estanho em Rondônia, no Brasil, usando as imagens compostas do Landsat. Os granitos que contêm estanho ocorrem em um complexo de domos e anéis com diâmetro variando de 1 a 18 km ao longo da fragilidade das zonas tectônicas fracas, estendendo-se a uma distância de 2.000 km do leste da Bolívia ao leste do Rio Xingu na região de 45°N e 65°W. Na década 1980, a produção desses depósitos minerais foi de 6.000 toneladas de estanho por ano com o valor de US\$ 100 milhões. A estimativa da reserva indica que a produção pode ser dobrado no futuro.

Miller (1977) demonstrou o uso da análise visual na interpretação das imagens do Landsat para exploração de petróleo nos países com carência de mapas geológicos detalhados tais como Sudão e Kenya. Definiu os lineamentos observados nas imagens de Landsat como parte de um sistema de fratura regional localizada no extremo norte da Lamu Embayment. Associou essas fraturas com a rachadura da greta no leste da África e interpretou como uma falha imatura de junção tripla com um braço abrindo para o Cocho Rudolfo (Rudolf Trough) e outro estendendo para a Bacia Ogaden para exploração de petróleo. Posteriormente, a mina de petróleo foi explorada pela companhia de Óleo Chevron. Ford (1980) utilizou as imagens adquiridas pelo SEASAT SAR a bordo do satélite SEASAT para exploração de depósitos de hidrocarbonatos na região sul das montanhas Apalaquianas. A imagem na figura 5.9 mostra as formas topográficas com os lineamentos distintos. A possibilidade de depósitos de hidrocarbonatos é favorável nas zonas de fraturas porosas, particularmente nos cruzamentos dos lineamentos. A figura 5.10 mostra a imagem retificada do Landsat MSS banda 6 que tem a mesma área da imagem do radar adquirida pelo SAR do SEASAT. Os lineamentos das montanhas Apalaquianas são idênticos, mas a imagem do radar mostra claramente os contrastes dos relevos na região norte.

é muito árido e a topografia acentuada, com o surgimento das rochas bem evidentes que facilitam a interpretação das imagens Landsat TM. As zonas de alta alteração hidrotérmica, associadas com a mina de ouro, foram identificadas e delineadas com boa precisão e os resultados mostraram que a mina tem uma concentração de ouro que varia de dezenas a centenas ppm.

Mostafa e Bishta (2005) extraíram os dados de densidade e intersecção dos lineamentos das rochas na região de Gharib-Dara localizada no Deserto, Nordeste do Egito utilizando os dados de Landsat ETM+, fotografias aéreas e mapas existentes. Observaram que os lineamentos das rochas foram freqüentemente interrompidos e localizaram as minas de Urano por meio da correlação entre a alta contagem de radioatividade e a densidade de cruzamento dos lineamentos.

## 5.6 Engenharia geológica

As imagens adquiridas pelo sensoriamento remoto são freqüentemente usadas para atualizar os mapas geológicos pelos engenheiros especialistas. As imagens são utilizadas como uma ferramenta importante para planejamento, investigação, detecção das fisionomias distintas e não-distintas da superfície e suas ligações entre os pontos de observação em campo. Infelizmente, somente as imagens sozinhas não resolvem os problemas em uma investigação geológica, mas são essenciais, se as investigações exigidas forem completas. Inúmeras aplicações podem ser feitas com as informações adquiridas pela técnica de sensoriamento remoto, tais como: monitoramento, identificação e acompanhamento das áreas designadas aos depósitos de lixos líquidos e sólidos, lixos radiativos, aterros, mineração superficial, materiais de construção e posse de terra. A combinação certa da interpretação das imagens e dos dados coletados em campo permite que se alcance o objetivo em curto prazo e de forma mais econômica. Kim et al. (2005) usaram os dados de interferômetros obtidos pelos sensores do SAR, banda L diferencial a bordo do satélite JERS 1 para monitorar a taxa de abaixamento nos terrenos costeiros causada pelo aumento do nível do mar e delinear as áreas de risco de inundação para as propriedades locais que podem receber a recompensação pela perda das propriedades. Os dados de taxa de abaixamento foram validados com os dados dos sensores extensômetros magnéticos obtidos nas 42 estações instaladas na área de estudo. O valor de correlação entre os dados obtidos pelo SAR e os obtidos em campo foi 0,87 e o valor de erro padrão da média, Root Mean Square Error (RMSE), foi de 1,42 cm. Sugeriram que os dados de SAR interferômetros diferenciais têm alta potencialidade de aplicações na área de Engenharia Geológica.



# CE

**Capítulo**

**Recursos hídricos**

---

## 6.1 Introdução

Os processos hidrológicos variam rapidamente no espaço e no tempo. Esses processos envolvem os fluxos de água em formas líquida, sólida e gasosa que ocorrem na atmosfera, na superfície e no subterrâneo. As medições dos fluxos de água em um sistema geosfera-biosfera-atmosfera tinham sido alcançadas principalmente pelas medições pontuais em campo e por meio da simulação numérica. As estações hidrometeorológicas, cujas superfícies não podem ser amplamente observáveis, freqüentemente não representam as mudanças espaciais dos processos hidrológicos e resultam em incertezas para aplicações das medições.

As informações de sensoriamento remoto via satélite fornecem os dados de observação com alta freqüência temporal e alta resolução espacial que cobrem uma imensa área e podem ser usados para complementar as áreas com poucos dados de medições em campo disponíveis. Geralmente, os dados coletados na superfície não coincidem bem com os dados via satélite por causa das medições na superfície que são pontuais e os coletados via satélite que são os valores médios espaciais de uma área ocupada por um *pixel* que varia de acordo com a resolução espacial. Uma alternativa é a extrapolação espacial dos dados pontuais da observação na superfície da região inteira por meio da correlação entre os dados observados em campo e os dados sensoriados via satélite. Apesar de os dados via satélite apresentarem menor acurácia, fornecem melhor estimativa em grande área com maior eficiência e menor custo.

A ciência do sensoriamento remoto hidrológico estuda os recursos hídricos utilizando os dados espectrais da energia eletromagnética emitida ou refletida nas várias faixas de comprimento da onda desde  $0,3 \mu\text{m}$  até as microondas. Nas aplicações dessas, o entendimento das propriedades da superfície e seus efeitos nas respostas espectrais são prioritários para poder se aplicar corretamente os dados obtidos via satélite.

A interpretação da imagem envolve a identificação e o delineamento dos padrões de redes hidrológicas que correspondem às características geomorfológicas, linhas de drenagem e tipos da cobertura da superfície. A análise geoidrológica da imagem é uma das mais difíceis técnicas de interpretação dos dados de sensoriamento remoto. Ben-Dor et al. (2004) usaram os dados obtidos pelos sensores hiperespectrais a bordo em um avião para monitorar as taxas de infiltração nos solos compactos e desagregados com as chuvas simuladas em laboratório. Uma equação da correlação entre a taxa de infiltração e as condições físicas do solo foi aplicada para estimar a taxa de infiltração em campo. Mas essa taxa é afetada por um conjunto de vários fatores, além das condições de agregados, incluindo umidade do solo, composições químicas, usos do solo e as condições físicas e químicas no subsolo, e outros. Portanto, é necessário usar os dados hiperespectrais, incluindo as microondas para melhorar suas estimativas. Geralmente, as propriedades subterrâneas são interpretadas pela observação das características das respostas espectrais das energias eletromagnéticas obtidas na superfície. As técnicas de monitoramento de umidade do solo são apresentadas no Capítulo 9. As técnicas de identificação,

## 6.3 Estimativa de profundidade e área da superfície da água

O delineamento da localização e extensão espacial de superfície da água pode ser feito com boa acurácia utilizando os dados obtidos nas faixas de infravermelho próximo e microondas. A acurácia de estimativa da área ocupada pela água depende da resolução espacial, ângulo de visada do sensor e ângulo zenital solar. A superfície da água limpa com alguns metros de profundidade absorve quase totalmente a energia solar na faixa de infravermelho próximo. Portanto, as áreas com as reflectâncias na faixa de infravermelho próximo ao redor de zero são provavelmente ocupadas pela água. Além de utilizar uma única faixa de infravermelho próximo para delinear a área de superfície ocupada pela água, vários índices de vegetação calculados pelas várias combinações de bandas espectrais são freqüentemente usados com boa acurácia. As assinaturas espectrais da reflectância na faixa de visível podem fornecer algumas informações sobre as condições físicas das lagoas, rios e terra úmida.

A estimativa de profundidade da água usando os dados de sensoriamento remoto depende da intensidade da energia eletromagnética refletida que é afetada pelos parâmetros, tais como, claridade da água, atenuação da profundidade, reflectância do fundo, rugosidade da superfície da água, materiais orgânicos e inorgânicos em suspensão. Várias bandas espectrais foram usadas para estimativa da profundidade da água. Kumar, Palit e Bhan (1997) usaram a banda de 0,77 a 0,80  $\mu\text{m}$ . Warne (1972) usou a banda 0,5 a 0,6  $\mu\text{m}$  e Yi e Li (1988) usaram 0,47 a 0,54  $\mu\text{m}$ . Considera que a energia da radiação solar na banda espectral de 0,44 a 0,54  $\mu\text{m}$  é transmitida pela água clara e penetra na água até 20 metros de profundidade. Portanto, a estimativa de profundidade de água pela reflectância na faixa de visível é viável nas condições de água limpa e até a uma profundidade de cerca de 20 m por meio da correlação estatística entre os dados registrados via satélite e coletados em campo. As técnicas de regressão que estimam a profundidade da água em função de reflectâncias das várias bandas na faixa visível foram apresentadas por vários pesquisadores com resultados satisfatórios (BENNY; DAWSON, 1983; STOVE, 1985; BARAN, 1993).

Correa e Avila (2002) mapearam a profundidade da água na região costeira do Coral Alacranes localizado na Península Yucatan do Golfo México utilizando as imagens do Landsat TM. A equação (6.2) foi aplicada para estimar a profundidade da água com a calibração dos dados em vários níveis de profundidade obtidos pelo batímetro. A figura 6.3 mostra o mapa do batímetro do Coral Alacranes produzido por Correa e Alvia (2002). Apontaram que o erro de estimativa de profundidade da água aumentou quando a profundidade aumentou. Também o erro aumentou quando a variação da topografia no fundo aumentou. O erro padrão da média do mapa gerado pela classificação supervisionada foi em torno de 10% que é considerado aceitável. Tripathi e Rao (2002) apresentaram um modelo de estimativa de profundidade da água da Baía Kakinada, na Índia em função linear da reflectância da banda 1 (0,52 a 0,59  $\mu\text{m}$ ) do satélite Indiano Indian Remote Sensing Satellite-1D Multispectral Linear Imaging Self Scanning Sensor-III (IRS-1D LISS-III) com resolução espacial de 23,5 m e

governo. A diferença é grande. Mas após a aplicação do modelo SIG que incluiu as possíveis áreas de inundação com as pequenas manchas de água identificadas nos três dias após a ocorrência da inundação máxima. Os resultados mostraram que o modelo estimou as áreas inundadas com 96,7% de acurácia que é considerada satisfatória. Sugeriram que para melhorar a sua acurácia, as imagens SAR devem ser adquiridas no dia do pico da inundação com a aplicação do modelo sugerido.



Figura 6.7 – Modelo de delineamento das áreas inundadas em função de elevação e distância. Fonte: (BRIVIO et al., 2002).

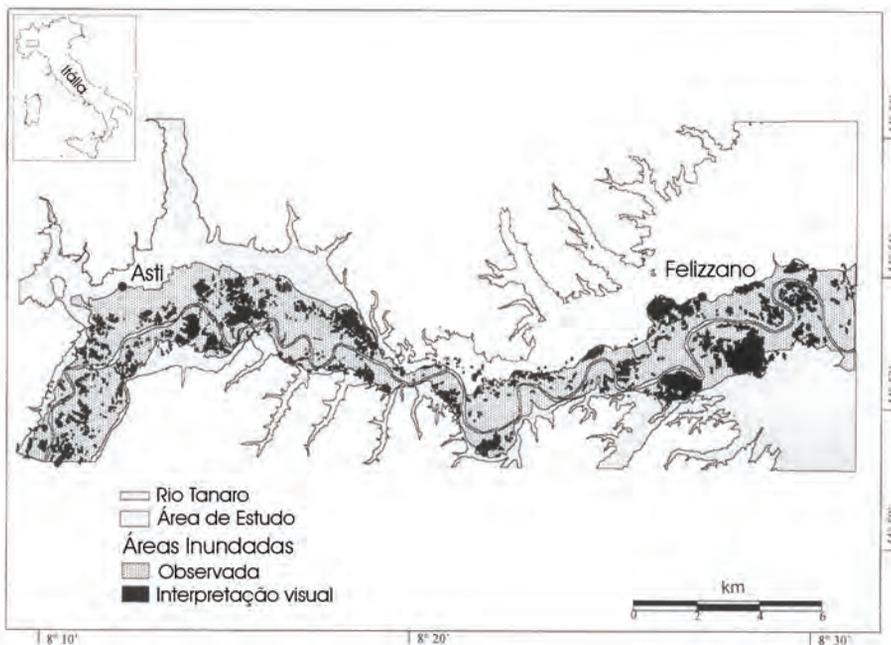


Figura 6.8 – Comparação das áreas de inundação da Bacia do Rio Tanara na Itália ocorrida em dia 6 de novembro de 1994 estimadas pela imagem SAR (áreas de cor preta) e reportadas pelo governo (áreas de cor cinza). Fonte: (BRIVIO et al., 2002).



Figura 6.11 – Os tributários entrelaçados da Bacia do Rio Alto Paraguai que formaram um leque complexo no Pantanal, MS, Brasil. Fonte: (LIU; AYRES. 2005).



Figura 6.12 – Milhares de pequenas lagoas formadas durante a estação de seca no Pantanal, MS, Brasil. Fonte: (LIU; AYRES. 2005).



Figura 6.13 – Regate de bovinos na área de inundação na região Nabileque do Pantanal, MS, Brasil. Fonte: (LIU; AYRES. 2005).

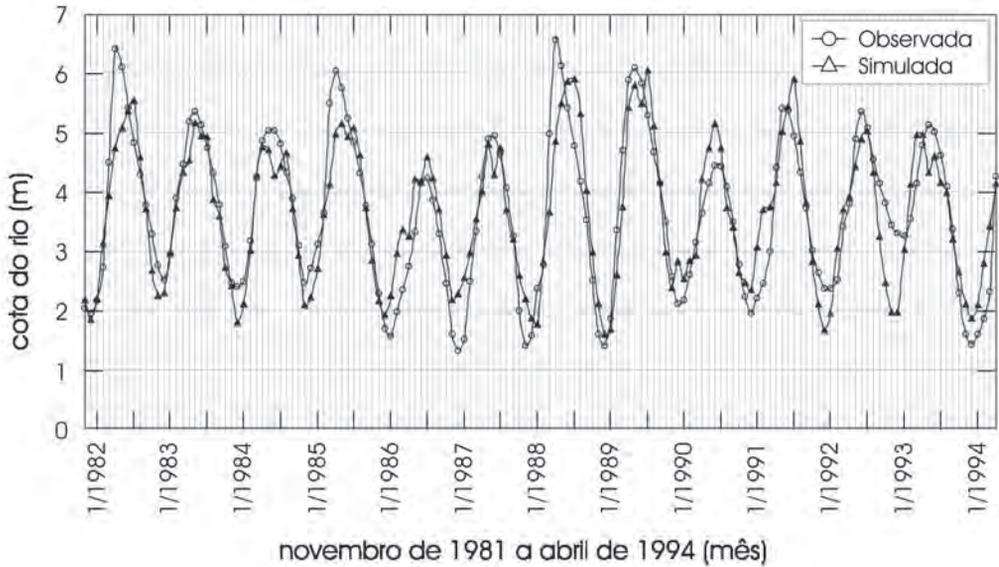


Figura 6.14 – Comparação das cotas observadas e simuladas usando os dados de cota, precipitação e NDVI do período de julho de 1981 a julho de 1994 da estação Ladário (19,1°S; 57,5°W), MS, Brasil. Fonte: (LIU; AYRES, 2005).

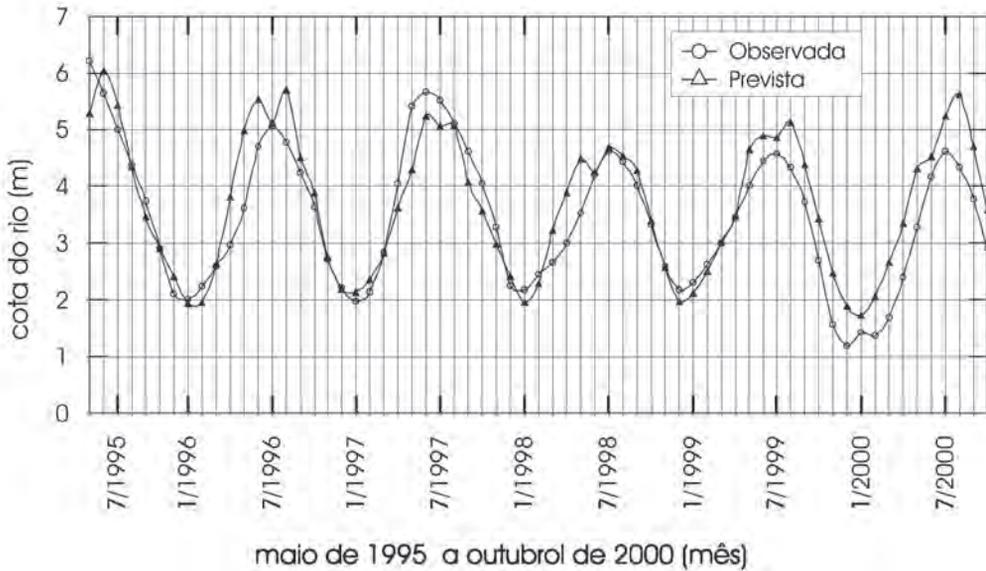


Figura 6.15 – Comparação das cotas observadas e previstas usando os dados de cota, precipitação e NDVI do período de novembro de 1994 a outubro de 2000 da estação Ladário (19,1°S; 57,5°W), MS, Brasil. Fonte: (LIU; AYRES, 2005).

Em seguida, a equação (6.6) de estimativa de área Inundada proposto por Hamilton, Sippel e Melack (1996) foi aplicada para prever a extensão da área inundada da BAP. Visando à equação (6.6) tem a tendência de prever a cota máxima anual com um a três meses de atraso, um modelo de previsão da ocorrência de cota máxima anual pela equação (6.8) foi sugerido para corrigir este erro.



# Capítulo

## Índices de vegetação

---

## 7.1 Introdução

Nas aplicações de sensoriamento remoto, os cientistas desenvolveram os índices de vegetação para monitorar e quantificar as condições e distribuições espaciais das vegetações, usando os dados digitais de reflectâncias espectrais da radiação eletromagnética. Os índices de vegetação são obtidos das várias combinações matemáticas das reflectâncias em várias faixas espectrais da radiação eletromagnética. Em princípio, o objetivo é utilizar os índices de vegetação para condensar as informações espectrais e discriminar o que é vegetação e não vegetação, avaliar as condições de crescimento das culturas, ocorrências de doenças, pragas, secas e geadas, e diversos eventos catastróficos meteorológicos. As aplicações de índices de vegetação no monitoramento e na discriminação de usos do solo na superfície terrestre têm várias vantagens. Citam-se as seguintes:

- a) os dados compactos de índices de vegetação são calculados com os dados de reflectâncias das várias faixas espectrais da energia de radiação eletromagnética;
- b) os valores relativos compensam a variação de intensidade da radiação;
- c) corrigem parcialmente os efeitos das variações locais das condições atmosféricas e das variações de ângulo de visada de sensores e ângulos solares, considerando se esses efeitos na variação da reflectância recebida pelos sensores nas bandas que compõem os índices são da mesma magnitude.

Bannari, Morin e Bonn (1995) apresentaram uma revisão extensa dos índices de vegetação gerados com os dados de satélite. Apontaram que mais de quarenta índices de vegetação foram desenvolvidos durante os últimos 20 anos para tentar explorar as aplicações das reflectâncias espectrais no monitoramento da vegetação. Em geral, a resposta espectral da superfície de vegetação envolve uma mistura complexa de vegetação, os efeitos ambientais, brilho, cor e umidade do solo e efeitos das variações espacial e temporal das condições atmosféricas. Na primeira etapa, os índices de vegetação são fundamentados somente nas combinações lineares ou nos dados brutos da reflectância de zero a 100%, correspondendo à escala de nível de cinza de zero a 255. Na segunda etapa, os índices de vegetação são fundamentados no conhecimento dos fenômenos físicos que explicam as interações entre radiação eletromagnética, atmosfera, cobertura da vegetação e superfície do solo. As pesquisas mostram que a segunda geração de índices de vegetação são menos sensíveis aos efeitos atmosféricos e aos brilhos da superfície do solo. Portanto, os índices gerados pela simulação, fundamentado nas equações de transferência da radiação sob as diferentes condições atmosféricas ideais, são mais corretos. Mas tais índices conservam ou não a sua sensibilidade quando aplicados às condições atmosféricas das outras regiões? Somente as pesquisas feitas nas várias regiões podem confirmar esse argumento.

### 7.2.9 Índice de razão ajustado por solo

Major (1990) propôs um ajuste no índice de razão por solo chamado índice de razão ajustado por solo (Soil Adjusted Ratio Vegetation Index – SARVI), que é calculado pela equação (7.16).

$$\text{SARVI} = \frac{\text{NIR}}{(\text{VIS} + b/a)} \quad (7.16)$$

Os valores de a e b são os coeficientes obtidos com as reflectâncias do solo. Os valores de a e b variam de acordo com as condições do solo seco ou úmido e a variação do ângulo zenital solar.

### 7.2.10 Índice de vegetação ajustado por solo transformado

Baret, Guyot e Major (1989) propuseram uma modificação do SAVI introduzindo dois coeficientes. O índice é chamado índice de vegetação ajustado por solo transformado (Transformated Soil Adjusted Vegetation Index – TSAVI), que é calculado pela equação (7.17). Os valores dos coeficientes a e b na equação (7.17) são obtidos pela regressão linear simples que correlaciona NIR em função de VIS calculado pela equação (7.18) sob a condição do solo nu. O valor do a é a declividade da linha do solo nu e o valor de b é a intercepção na coordenada do NIR da linha do solo nu.

$$\text{TSAVI} = \frac{a(\text{NIR} - a\text{VIS} - b)}{\text{VIS} + a\text{NIR} - ab} \quad (7.17)$$

$$\text{NIR} = a\text{VIS} + b \quad (7.18)$$

Em seguida, TSAVI foi modificado por Baret e Guyot (1991) que é calculado pela equação (7.19).

$$\text{TSAVI} = \frac{[a(\text{NIR} - a\text{VIS} - b)]}{[(\text{VIS} + a(\text{NIR} - b) + 0,08(1 + a^2))]} \quad (7.19)$$

Os valores de a e b também são obtidos pela equação (7.18). Baret e Guyot (1991) apontaram que os valores de a e b da linha do solo nu podem ser determinados usando-se as imagens com os pixels de solo nu. O valor do TSAVI varia de zero na superfície do solo nu a aproximadamente 0,7 nas florestas densas. O TSAVI é o melhor indicador de vegetação quando a cobertura da vegetação é esparsa e também mais sensível à presença de vegetação em senescência (CYR, 1993).





# Capítulo

## Balanco de energia da superfície terrestre

---



## 8.1 Introdução

A superfície recebe diariamente a energia da radiação solar. Uma parte da radiação é refletida pela superfície (albedo); a segunda parte aquece o ar (fluxo de calor sensível ao ar, manifestado pela temperatura do ar); a terceira parte aquece a terrestre (fluxo de calor sensível ao solo, manifestado pela temperatura do solo) e a última parte evapora a superfície terrestre (fluxo de calor latente, manifestado pela evapotranspiração). Neste capítulo, serão apresentados os métodos de estimativas de albedo, temperatura da superfície terrestre e evapotranspiração via satélite e os conhecimentos básicos para facilitar as aplicações e as validações dos métodos.

Atualmente, a previsão diária do tempo local em 24 horas alcança uma acurácia acima de 90%. Os fatores que contribuem com o resto da incerteza de 10% são principalmente as quantificações imprecisas dos fluxos de balanço de energia da superfície terrestre que são afetados pelos parâmetros biofísicos locais variando drasticamente em espaço e tempo. Portanto, para quantificar precisamente os fluxos de balanço de energia da superfície, é preciso entender melhor as evoluções espacial e temporal dos parâmetros biofísicos, tais como rugosidade e estrutura da superfície, propriedades físicas e químicas do solo, topografia, geomorfologia e usos do solo e os seus efeitos manifestados pelo microclima. Tem havido grande esforço dos pesquisadores da área de modelagem numérica em previsão do tempo e das mudanças climáticas para melhorar seu modelo nas quantificações de parâmetros biofísicos e dos fluxos de balanço de energia a fim de aumentar a acurácia de previsão. Por causa dos dados meteorológicos coletados na superfície terrestre que são freqüentemente insuficientes em escala espacial, a maioria dos sistemas operacionais dos modelos de previsão do tempo usa os dados dos parâmetros biofísicos e fluxos de energia da superfície em uma resolução espacial de 50 até 200 km. Avanços recentes na área de sensoriamento remoto via satélite fornecem os métodos alternativos de estimativas desses parâmetros, usando os dados diários globais com uma resolução espacial de 1,1km adquiridos pelos sensores NOAA AVHRR. Portanto, este capítulo tenta explorar aplicações dos dados de sensoriamento remoto na quantificação dos parâmetros, incluindo: albedo, temperatura da superfície e os fluxos de balanço de energia para monitorar as variabilidades bioclimáticas e melhorar as acurácias dos modelos de previsão do tempo.

## 8.2 Estimativa de albedo

O albedo ( $\alpha$ ) é definido como a reflectância da radiação solar pela superfície terrestre que cobre a faixa do comprimento da onda eletromagnética de  $0,4 \mu\text{m}$  a  $3 \mu\text{m}$  (visível ao infravermelho médio). Atualmente, os dados de NOAA AVHRR são largamente utilizados para estimativas do albedo. Por serem as bandas dos sensores de NOAA AVHRR estreitas, um algoritmo, chamado Método de Banda Larga (Broad Band Method), que combinou canal 1 ( $0,58$  a  $0,68 \mu\text{m}$ ) e canal 2 ( $0,725$  a  $1,10 \mu\text{m}$ ) do NOAA AVHRR, é desenvolvido para a obtenção do albedo.

Tabela 8.1 – Lista de valores de albedo das várias superfícies terrestres.

Natureza da superfície	Valor de albedo	Fonte
Floresta Amazônica	0,134	Culf et al., 1994
Pastagem Amazônia	0,180	Culf et al., 1994
Neves	0,540	Knap et al., 1999
Gelos	0,19	Knap et al., 1999
Neves frescas	0,95	Oke, 1987
Neves velhas	0,40	Oke, 1987
Gelos do mar	0,30 - 0,45	Oke, 1987
Gelos glaciais	0,20 - 0,40	Oke, 1987
Água (ângulo zenital pequeno)	0,03 - 0,10	Oke, 1987
Água (ângulo zenital maior)	0,10 - 1,00	Oke, 1987
Floresta decídua sem folhas	0,15 - 0,20	Oke, 1987
Floresta decídua com folhas	0,05 - 0,15	Oke, 1987
Floresta conífera	0,05 - 0,15	Oke, 1987
Pomares	0,15 - 0,20	Oke, 1987
Tundras	0,18 - 0,25	Oke, 1987
Culturas agrícolas verdes saudáveis	0,06 - 0,15	Oke, 1987
Pastagens com folhas longas (1m)	0,16	Oke, 1987
Pastagens com folhas curtas (0,02m)	0,26	Oke, 1987
Desertos	0,20 - 0,45	Oke, 1987
Solos nus úmidos e escuros	0,05	Oke, 1987
Solos nus secos e claros	0,40	Oke, 1987
Asfaltos	0,05 - 0,20	Oke, 1987
Concretos	0,10 - 0,35	Oke, 1987
Tijolos	0,20 - 0,40	Oke, 1987
Pedras	0,20 - 0,35	Oke, 1987
Telhados com tinta e cascalhos	0,08 - 0,18	Oke, 1987
Calhas	0,10 - 0,35	Oke, 1987
Ferros enferrujados	0,10 - 0,16	Oke, 1987
Vidro limpo com ângulo zenital < 40°	0,08	Oke, 1987
Vidro limpo com ângulo zenital 40° - 80°	0,09 - 0,52	Oke, 1987
Pinturas brancas de gelo ou neve	0,50 - 0,90	Oke, 1987
Pinturas de vermelho, marrom ou verde	0,20 - 0,35	Oke, 1987
Pinturas pretas	0,02 - 0,15	Oke, 1987
Áreas urbanas	0,10 - 0,27	Oke, 1987

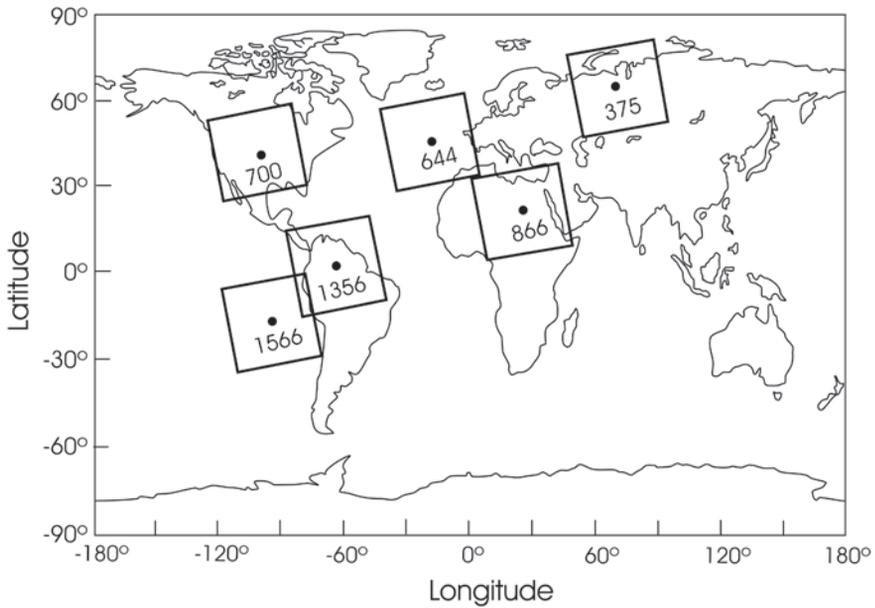


Figura 8.2 – As seis regiões típicas do globo que representam as superfícies oceânicas, terrestres, neves, desertos, oceano subtropical e terrestre tropical para estimativa de albedo pelo modelo de Hucek e Jacobowitz (1995).

Tabela 8.2 – Lista dos valores dos coeficientes do modelo regional da superfície dependente da estimativa de albedo pela equação:  $\alpha = a_0 + a_1C1 + a_2C2$  do Método da Banda Larga. Fonte: (HUCEK; JACOBOWITZ, 1995).

Região	375	644	700	866	1356	1566	644/700
Superfície	neves	oceânica	terrestre	deserto	terrestre	oceânica	costeira
$a_0$	-0,86	3,48	2,65	2,20	3,31	3,52	3,28
$a_1$	0,1398	0,3617	0,4022	0,4439	0,3994	0,5474	0,4529
$a_2$	0,6991	0,4496	0,4112	0,3511	0,3984	0,2552	0,3557

Tabela 8.3a – Lista dos valores dos coeficientes do modelo regional da cena dependente da estimativa de albedo nas condições de céu claro pela equação:  $\alpha = a_0 + a_1C1 + a_2C2$  do Método da Banda Larga. Fonte: (HUCEK; JACOBOWITZ, 1995).

Região	375	644	700	866	1356	1566	644/700
Superfície	neves	oceânica	terrestre	deserto	terrestre	oceânica	costeira
$a_0$	3,8995	1,78	2,17	2,60	2,95	2,34	2,77
$a_1$	0,0520	1,3302	0,3999	0,3896	0,2331	1,2062	0,3779
$a_2$	0,7423	-0,6250	0,4333	0,3873	0,5025	-0,5504	0,4168

de tais medidas é precária ( maior que 2 °K ) e não permite um grande avanço em relação ao uso de valores climatológicos. A principal fonte de erro na técnica de microondas resulta da variação da emissividade da superfície devido à velocidade do vento e à absorção do vapor de água, em que a temperatura representa um efeito de segunda ordem. Um grande avanço na medida da Tst foi feito com o lançamento do primeiro AVHRR a bordo do satélite da série de TIROS N. Esse primeiro instrumento tinha um canal extra em 3,7 μm e permitiu que a técnica de absorção diferencial fosse utilizada para derivar a correção da absorção do vapor de água na atmosfera. O uso dessa técnica foi restrito ao período da noite, pelo fato de o canal de ondas curtas receber influência da radiação solar refletida durante o dia. O AVHRR com 5 canais a bordo dos satélites meteorológicos NOAA, incluindo os chamados canais segmentados, ou janela dividida (10,8 μm e 11,9 μm ), permitiu a determinação da Tst durante o dia. Pelo fato de o canal 3,7 μm ser afetado por muito ruído, seu uso ficou bastante limitado e os canais tipos das janelas divididas tornaram-se referências para a determinação da Tso durante os últimos 15 anos. Os métodos de estimativa de Tst e Tso desenvolvidos ao longo dos últimos anos são apresentados a seguir.

#### 8.4.1 Estimativa de temperatura da superfície oceânica

As temperaturas da superfície terrestre (Tst) e as temperaturas do oceano (Tso) podem ser adquiridas por meio dos sensores das bandas de infravermelho termal (Thermal Infra Red – TIR). A base física de estimativa da temperatura de superfície fundamenta-se no princípio de que toda matéria emite uma radiação eletromagnética e possui um espectro contínuo e singular. A estimativa de emissão é feita em referência a um corpo negro. Um corpo negro é considerado como um objeto capaz de absorver toda a radiação incidente para qualquer que seja o comprimento de onda. Pelo fato de a emissividade da superfície nem sempre se comporta como um corpo negro e a maioria menor que uma unidade, a energia na faixa de TIR captada pelos sensores de satélite, chamada temperatura de brilho, deve ser convertida pela equação de Stephan-Boltzman, que requerer os dados de emissividade de superfície específica. A equação (8.41) representa a equação de Stephan-Boltzman.

$$T_b = \varepsilon \sigma T_v^4 \quad (8.41)$$

Em que:

T<sub>b</sub> = temperatura de brilho em W m<sup>-2</sup>;

ε = emissividade;

σ = constante Stephan-Boltzman = 5,6697 x 10<sup>-8</sup> W m<sup>-2</sup> °K<sup>4</sup>;

T<sub>v</sub><sup>4</sup> = temperatura verdadeira em °K.

A estimativa da Tso via satélite é viável por causa da emissividade do oceano ser relativamente constante próximo à unidade como o corpo negro. Com uma correção adequada das interferências atmosféricas, a acurácia da estimativa de Tso via satélite pode alcançar um erro menor que 1°C. Os quatro métodos mais usados são apresentados em seguida.

As três espessuras óticas podem ser obtidas pelas três bandas termais bem selecionadas ou três ângulos de uma banda pelos sensores ângulos múltiplos. Uma combinação de multiespectrais e multiângulos, tal como os dados de ERS 1 ATSR também podem ser aplicados. Uma combinação de duas bandas de Split-Window centralizadas nas 11 e 12  $\mu\text{m}$  no ângulo nadir ( $0^\circ$ ) e uma banda de 12  $\mu\text{m}$  no ângulo de  $50^\circ$  são consideradas como a melhor opção.

#### 8.4.6 Método de janela dividida local

Baseado no método de Janela Dividida, Becker e Li (1990a) introduziram o método chamado Janela Dividida Local, que incorpora o parâmetro de emissividade local para a estimativa de temperatura da superfície terrestre ( $T_{st}$ ). Apresentaram uma equação (8.47) com os coeficientes obtidos por uma técnica de regressão estatística que chamado como o mínimo quadrado ajustado (least-squares fitting), utilizando os dados de 2.160 casos diferentes que cobrem quatro classes de condições atmosféricas, 12 valores de  $T_{st}$ , cinco valores médios de emissividade variando de 0,90 a 1,0 e nove valores da diferença de emissividade entre bandas 4 e 5.

$$T_{st} = A_o + P[(T_4 + T_5)/2] + M[(T_4 - T_5)/2] \quad (8.47)$$

Em que:

$T_{st}$  = temperatura da superfície terrestre;

$T_4$  e  $T_5$  = temperatura de brilho de canal 4 e canal 5 do NOAA AVHRR, respectivamente;

$A_o$  = 1,274;

$P$  =  $1 + 0,15616 (1 - \epsilon) / \epsilon - 0,482 (\Delta\epsilon/\epsilon^2)$ ;

$M$  =  $6,26 + 3,98 (1 - \epsilon) / \epsilon + 38,33 (\Delta\epsilon/\epsilon^2)$ ;

$\epsilon$  = emissividade da superfície terrestre;

$\epsilon$  =  $(\epsilon_4 + \epsilon_5)/2$ ;

$\Delta\epsilon$  =  $\epsilon_4 - \epsilon_5$ .

A partir daí, vários métodos de estimativa da temperatura da superfície terrestre baseada no método de Janela Dividida Local foram desenvolvidos. (PRATA; PLATT, 1991; KERR; LAGOUARDE; IMBERNON, 1992; COLL et al., 1994; FRANÇA; CRACKNELL, 1994). Para aplicar o método de Janela Dividida Local via satélite na estimativa de  $T_{st}$ , são necessários dados de emissividade ( $\epsilon$ ) de bandas espectrais correspondendo aos canais 4 e 5 do NOAA AVHRR. A obtenção de emissividade em função de NDVI pela correlação obtida no campo já foi discutida na seção anterior. Mas as equações propostas por Kerr, Lagouarde e Imbernon (1992), Griend e Owe (1993), Valor e Caselles (1996) e Vázquez, Reyes e Arboledas (1997) são obtidas sob as condições específicas: em superfícies com vegetação, sem dados de umidade no solo e baseadas na única banda larga (8 a 12,5  $\mu\text{m}$ ). Portanto, as funções sugeridas não podem ser aplicadas universalmente.

Vázquez, Reyes e Arboledas (1997) apresentaram uma comparação dos métodos de Kerr, Lagouarde e Imbernon (1992), Ulivieri et al. (1994) e Price (1984) e concluíram que o método de Kerr, Lagouarde e Imbernon (1992) mais simples,

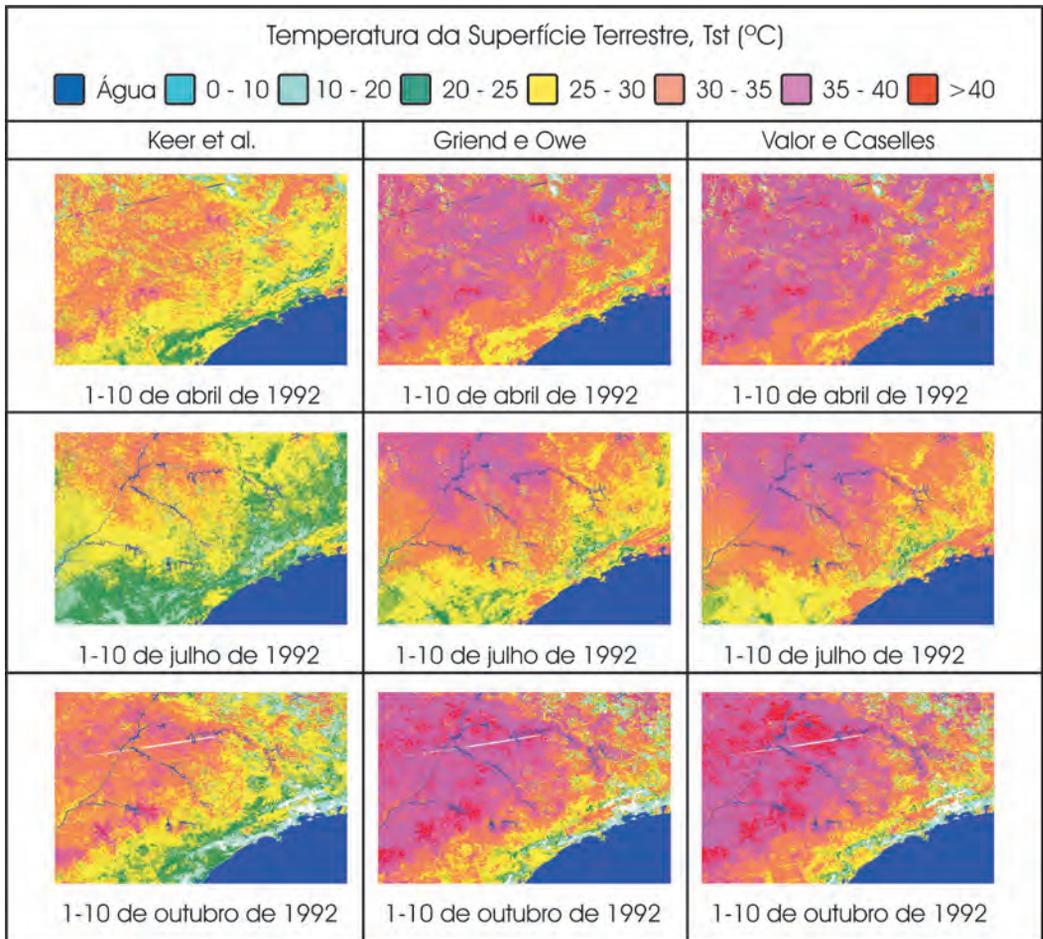


Figura 8.13 – Mapas de distribuição de Tst da região do Estado de São Paulo gerados nos meses de abril, julho e outubro de 1992 pelos três métodos utilizados: método de Kerr, Lagouarde e Imbernon (1992), de Griend e Owe (1993) e de Valor e Caselles (1996). Fonte: (LIU; TSAY, 1998).

que o valor médio dos valores de Tst próximo aos de Tar representa melhor ou não. Medições de Tst e emissividade em campo serão necessárias para identificar melhor qual é o método mais adequado.

Observaram que os valores de Tst estimados pelo método de Kerr são próximos aos de Tar observados e os de Griend e Owe e de Valor e Caselles são mais altos. Vázquez, Reyes e Arboledas (1997) compararam vários algoritmos de estimativa de temperatura da superfície terrestre utilizando o método de Janela Dividida e concluíram que o algoritmo, que integra o NDVI diretamente na equação de Janela Dividida proposto por Kerr, Lagouarde e Imbernon (1992), é o mais simples e com uma acurácia próxima a dos outros que exigem dados locais de emissividade. Portanto, as pesquisas nas medições de emissividade e Tst em campo em diferentes escalas espaciais devem ser realizadas para a melhoria da avaliação dos métodos.

### 8.5.1 Radiação solar líquida recebida

A energia da radiação solar situa-se na faixa de 0,4 a 3  $\mu\text{m}$ , chamada radiação onda curta, e concentra-se na faixa de 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ . Por causa das absorções e espalhamentos pelos constituintes atmosféricos, vários fenômenos óticos atmosféricos, tais como céu avermelhado, céu azul, espalhamento Rayleigh e espalhamento Mie, são observados. Geralmente, o céu avermelhado é observado quando a radiação na faixa visível é reduzida por causa do aumento da distância da passagem da radiação solar ao atravessar a atmosfera e chegar à superfície. O fenômeno de céu avermelhado geralmente ocorre quando a elevação do Sol é baixa, nos casos do pôr-do-sol ou do sol nascente, os raios solares passam a uma longa distância horizontal atravessando a atmosfera. Os raios das ondas mais curtas, tais como as azuis, são refletidos e espalhados completamente. Somente os raios das ondas mais longas, como as ondas vermelhas, chegam à superfície terrestre. Portanto, o céu fica vermelho no pôr-do-sol. Nas condições de atmosfera poluída, o Sol fica vermelho também por causa dos diâmetros dos poluentes serem maiores que os comprimentos das ondas mais curtas que resultam um bloqueio das ondas curtas deixando as ondas mais longas passarem.

Espalhamento Rayleigh ocorre quando a radiação é espalhada pelas moléculas dos aerossóis, vapor da água e partículas presentes na atmosfera. O espalhamento Rayleigh ocorre quando os diâmetros das partículas menores que os comprimentos das ondas de radiação solar estão livres das partículas com diâmetros acima de 0,4  $\mu\text{m}$ . Isto resulta na transmissibilidade da atmosfera para o azul maior que a violeta, apesar de o espalhamento da violeta ser maior que o azul. Portanto, o céu azul significa o céu limpo. Espalhamento Mie ocorre quando a maioria dos diâmetros das partículas atmosféricas ficam entre 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ , os raios da radiação nas faixas visíveis são espalhadas substancialmente. Isto resulta em céu menos azul, torna-se branco, como nos casos de uma nuvem constituída de gotículas da água ou partículas de gelos.

A radiação líquida recebida pela superfície terrestre controla a redistribuição da energia entre a superfície terrestre, a atmosfera e o solo, que é um componente importante no balanço de energia da superfície terrestre. Os dados globais dos componentes de radiação líquida na equação (8.50), incluindo radiações onda curta e onda longa, não ficam disponíveis regularmente. A maioria dos dados é obtida pelos experimentos locais específicos. Recentemente, vários métodos utilizando dados de satélites foram desenvolvidos para estimar os fluxos de radiação na superfície.

#### 8.5.1.1 Estimativa de radiação solar incidente

Os fluxos de radiação onda curta são importantes no balanço de energia da superfície do planeta Terra. A obtenção desses dados para o monitoramento das mudanças climáticas globais e para a previsão do tempo em escala global via satélite é um assunto muito atraente. No ano de 1995, Pinker, Frouin e Li (1995) fizeram uma revisão dos métodos de estimativa de Radiação Solar Onda Curta Direta (Direct Shortwave Solar Radiation – DSSR) e Radiação Solar Onda Curta Direta Líquida

- Estimativa do fluxo de calor na superfície do solo

$$Q_z = A(\omega) k(\omega/D)^{1/2} e^{-z(\omega/2D)^{1/2}} \text{sen}\{[\omega t - z(\omega/2D)^{1/2}] + \pi/4\} \quad (8.81)$$

Na superfície do solo, a profundidade é de zero, aplicando-se  $z=0$  na equação (8.81), obtém-se:

$$Q_0 = A(\omega) k(\omega/D)^{1/2} \text{sen}[\omega t + \pi/4] \quad (8.82)$$

- Variações diurna e sazonal da temperatura do solo

Decréscimo de amplitude da temperatura do solo quando a profundidade aumenta. A figura 8.16 mostra as variações diurnas e anuais da temperatura do solo em várias profundidades (OKE, 1987). A temperatura diurna na profundidade de 10 mm alcança o valor máximo ao redor de 14h e o valor mínimo ao redor de 4h. A temperatura diurna na profundidade de 0,8 m fica quase invariável. A temperatura anual do Hemisfério Sul na profundidade de 10 mm alcança o valor máximo de 20 °C em janeiro e o mínimo de 2 °C em fevereiro e na profundidade de 10 m, varia pouco de 2 °C a 3 °C.

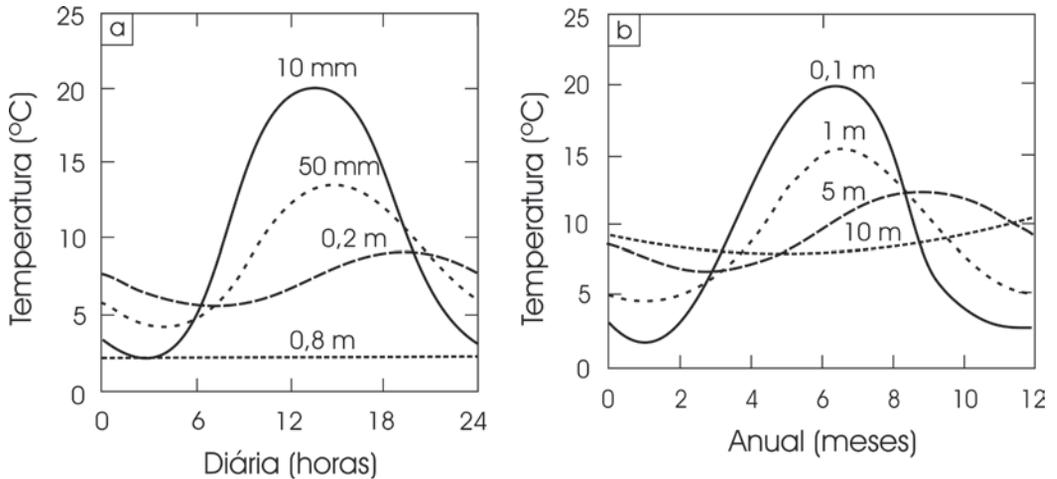


Figura 8.16 – Variações diurnas e anuais da temperatura no solo em várias profundidades. Fonte: (OKE, 1987).

O tempo de atraso entre duas profundidades pode ser estimado pela equação seguinte:

$$t_2 - t_1 = \frac{(z_2 - z_1) [P/D\pi]^{1/2}}{2} \quad (8.83)$$

Em que:

- $t_2$  e  $t_1$  = o tempo em que a temperatura máxima ou mínima é detectada na profundidade  $z_2$  e  $z_1$  respectivamente;
- $P$  = período da oscilação em segundo;
- $D$  = difusividade térmica.

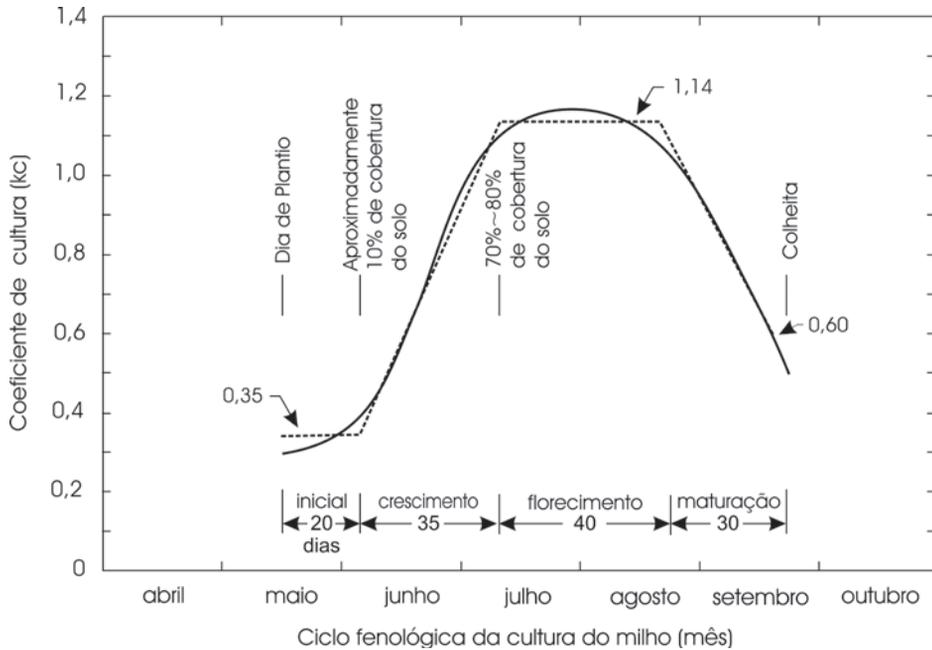


Figura 8.17 – Curva de kc da cultura do milho. Fonte: (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

## 8.6.2 Fatores que afetam a evapotranspiração

- Fatores meteorológicos:

Os efeitos dos fatores meteorológicos, tais como radiação, temperatura, umidade do ar, vento e pressão na perda de água pela ET, são um conjunto do efeito complexo das interações entre esses fatores. Isto torna difícil separá-los por ordem de importância, pelas complicadas relações entre eles. Para facilitar o entendimento de cada fator que afeta a ET, será considerado somente o efeito de um determinado fator meteorológico mantendo os demais fatores em estados inalterados:

a) radiação – O processo fotossintético que fabrica matéria seca das vegetações requer a energia de radiação solar na faixa visível. Por outro lado, a radiação solar torna-se um fator de considerável importância por fornecer um calor latente de 589,4 cal/g de água a 25 °C, passando do estado líquido ao estado vapor, pela transpiração, para manter sua temperatura dentro da faixa ótima do crescimento;

b) temperatura – Como as temperaturas do ar e da água dependem da radiação solar incidente na superfície, espera-se uma estreita relação delas com as taxas de evapotranspiração. A temperatura da superfície da água governa a taxa de ET em que as moléculas de água de fase líquida passam para a fase gasosa e entram no ar. A taxa de ET aumentam quando aumentar as temperaturas do ar e da água;

• Brisa marítima

Durante o dia, a superfície terrestre aquece mais rápido que a superfície do mar. O ar mais quente na superfície terrestre começa a subir. Isto resulta o ar mais frio e denso da superfície marítima, que sopra à direção terrestre, conhecido como brisa marítima (figura 8.18a). A velocidade da brisa marítima pode alcançar de 2 a 5 m s<sup>-1</sup>, penetrando até 30 km no litoral e soprando até 1 a 2 km em altitude. Ao contrário, durante a noite, a superfície terrestre esfria mais rápido que a superfície marítima. O ar mais frio e denso drena a direção do mar que resulta a brisa terrestre (figura 8.18b). A velocidade da brisa terrestre alcança 1 a 2 m s<sup>-1</sup>. Geralmente, o avanço da frente da brisa marítima causa a ascendência do ar que reforça mais a instabilidade da atmosfera. Porém, as nuvens cúmulos podem ser desenvolvidas e imigram para o mar e até se dissipam como a chuva. A brisa marítima pode continuar e atravessar a noite se o ar no litoral for ascendente e o ar sobre o mar se manter mais frio que o ar do litoral. A continuação da brisa marítima atravessando a noite é por falta da inversão térmica que geralmente ocorre nas noites com céu claro e vento fraco. A brisa marítima refresca o ambiente na região do clima quente.

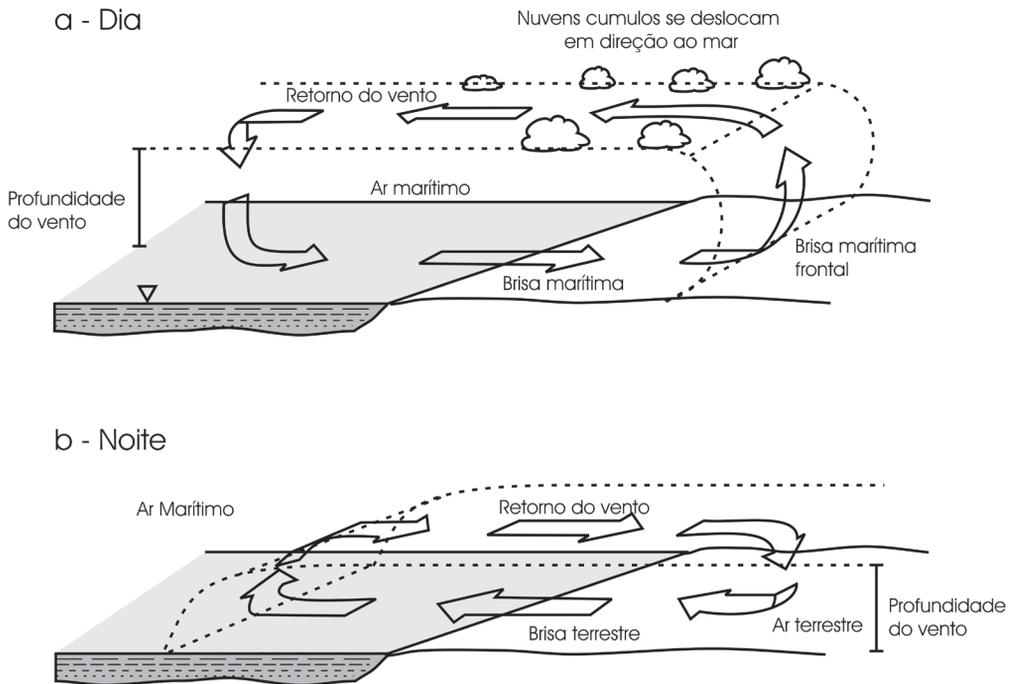


Figura 8.18 – a. Brisa marítima durante o dia; b. Brisa terrestre durante a noite. Fonte: (OKE, 1987).

### Noite

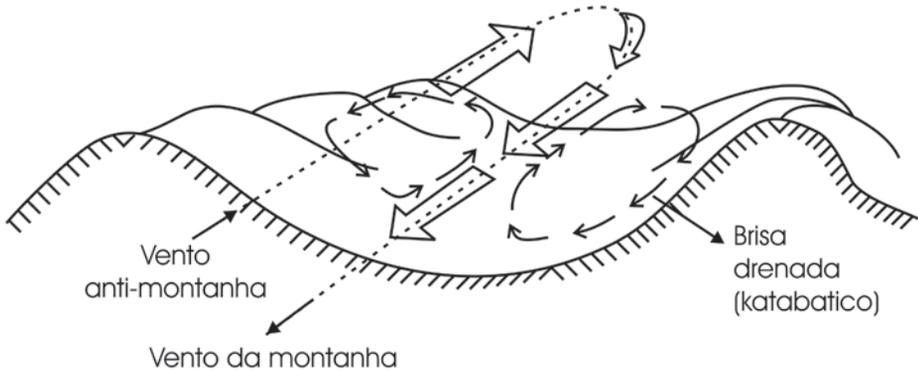


Figura 8.20 – Vento da montanha na noite. Fonte: (OKE, 1987).

- Inversão do vale

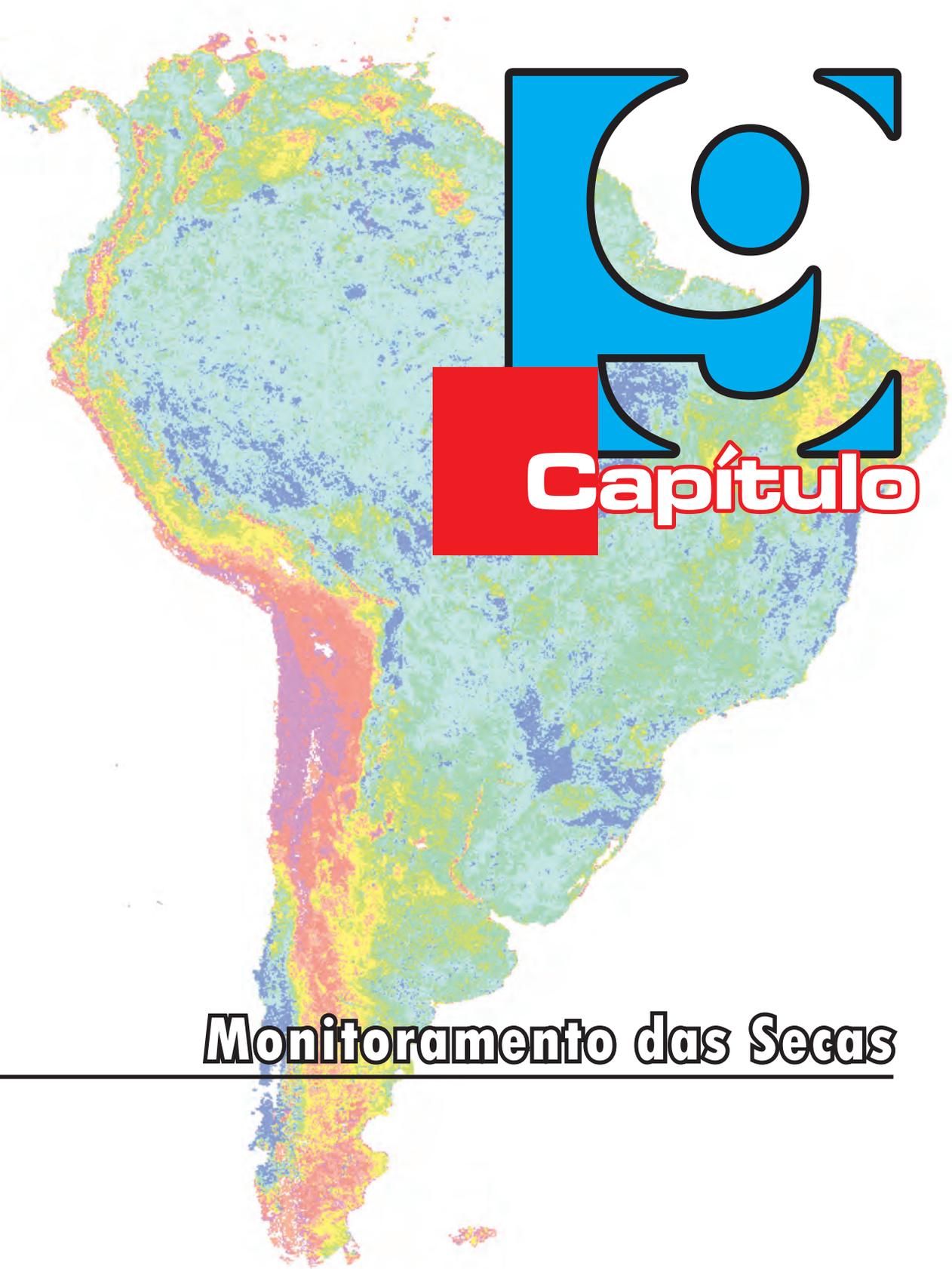
Durante a noite, o ar frio no topo da montanha drena para o vale. Antes de o Sol nascer, a temperatura no fundo do vale é mais baixa, o que resulta em uma inversão térmica. As ondas gravitacionais no topo do poço durante a ocorrência da inversão do vale acontecem quando o ar nas colinas não é mais frio que o ar no fundo e o movimento da drenagem do ar é suficiente para gerar a mistura turbulenta. O ar drenado para o vale fica oscilando e ao se misturar com o ar frio do poço resulta nas misturas turbulentas e forma as nuvens onduladas, conhecidas como as ondas de nuvens gravitacionais.

- Bolsões de geadas

O ar mais frio e denso que se situa nos níveis mais baixos do vale resulta na baixa temperatura do fundo do vale, fato que favorece a ocorrência de geadas, os chamados bolsões de geadas.

- Cinturão térmico

O processo do ar frio drenando para o fundo do vale pode enfraquecer quando o ar nas colinas ficar mais longe do fundo do vale. Existe uma faixa nas colinas em que a temperatura do ar é mais alta que no topo da montanha e também mais alta que no fundo do vale. Essa faixa de temperatura mais alta é chamada cinturão térmico, que fornece as condições mais favoráveis para os habitantes e as culturas mais sensíveis aos danos de geadas.



**CE**



**Capítulo**

**Monitoramento das Secas**

---

## 9.1 Introdução

As faltas irregulares de chuva de uma determinada região podem afetar as atividades humanas e causam os desequilíbrios dos ecossistemas que podem resultar em pânico social e alterações dos recursos de biodiversidade. O fenômeno da seca depende da demanda e da oferta. Pode ocorrer quando o consumo de água ultrapassa a oferta. Portanto, a falta de água pode ocorrer nas regiões que têm água abundante, mas com mau uso. Nesse caso, cabe aos governantes planejar o gerenciamento dos recursos hídricos disponíveis em longo prazo para atender os diversos usos da comunidade para evitar os eventuais pânicos. Este capítulo somente apresenta a ocorrência de secas causadas pelos fenômenos naturais que envolvem as condições meteorológicas e micrometeorológicas, e os critérios de avaliar as secas são estabelecidos com o objetivo voltado para produções agrícolas, no sentido de secas agrícolas. Vários índices de seca são desenvolvidos para indicar a severidade da seca. Citam-se alguns exemplos, índice de Thornthwaite (1948), índice de Palmer (1965), índice de umidade disponível (Moisture Available Index – MAI), por Hargreaves (1975) e Índice de Deficiência de Evapotranspiração, por Doorenbos e Kassan (1979). Recentemente, os índices de vegetação derivados das reflectâncias espectrais baseados nos dados obtidos pelo satélite são largamente usados para monitoramento das ocorrências das secas. (IDSO; JACKSON; REGINATO, 1977; SEGUIN, 1983; KOGAN, 1990). As aplicações dos índices de vegetação via satélite no monitoramento das ocorrências da seca têm suas vantagens, incluindo fornecimento de informações contínuas de altas resoluções espaciais e temporais, e monitoramento em uma área de diversas escalas, como fazenda, município, estado, país, continente até global, dependendo dos dados de satélite disponíveis. Antes de apresentar as aplicações de dados de satélite no monitoramento de seca, os movimentos de água no solo e no sistema de solo-planta-atmosfera, a definição de potencial de água, os cálculos de balanço hídrico e os índices de seca serão introduzidos para facilitar o entendimento dos fenômenos da seca e a validação dos métodos de monitoramento da seca via satélite.

## 9.2 Potencial da água

O potencial da água ( $\psi$ ) pode definir-se como “a capacidade relativa da água de produzir trabalho, comparada àquela da água pura numa mesma temperatura, fora dos campos de absorção” ou ainda “é a energia que gasta para transferir a unidade de massa de água de um estado de referência, onde o potencial da água é zero, para outro estado de energia potencial”. A Sociedade Internacional de Ciências do Solo (International Soil Science Society – ISSS) define o potencial da água do solo como: a quantidade de trabalho que deve desenvolver-se para uma unidade de água pura ser transportada, reversível e isotermicamente, de um ponto de

## 9.4 Características de curvas de umedecimento e secagem do solo

Os solos arenosos retêm menos água nos poros que os argilosos no mesmo potencial de água e esvaziam mais rápido quando diminui o potencial de água. A figura 9.3 mostra as relações entre o potencial de água e a umidade do solo para os solos arenosos, limos e argilosos. Liu (1974) utilizou vários métodos de medições de umidade do solo e potencial de água no solo, incluindo coluna de sucção, tensiômetro, placa de pressão, psicrômetro e umidade de vapor em equilíbrio para obter uma curva que represente a variação de potencial de água com a umidade de água no solo, variando das condições saturadas até completamente seca. Salienta-se, que as medições de potencial de água abaixo de 1.000 bares são raramente encontradas nas literaturas. A figura 9.4 mostra o potencial da água em função da umidade volumétrica do solo obtido por Liu (1974). Esses dados são importantes para converter os dados do potencial da água para dados de umidade do solo volumétrica que são geralmente usados para investigar o movimento de água no solo e o cálculo de balanço hídrico.

### Fenômeno da Histerese

A facilidade do movimento da água no solo depende da estrutura dos canais formados por vários tamanhos de poros. Geralmente, a secagem de água nos poros mais finos é mais difícil que a de água nos poros maiores, por causa da força de absorções entre moléculas de água e a superfície do solo e a força de tensão capilar entre os microporos. A mesma razão para umedecer um solo seco, pois é difícil a água entrar nos poros mais finos por causa do ar, ficando presa nos poros. Portanto, aplicando a mesma pressão para secar e molhar uma amostra de solo, os teores de umidade do solo não são os mesmos. Isto quer dizer, é mais difícil de secar ou molhar totalmente o solo porque os poros finos têm mais resistência de secagem e umedecimento. O teor de umidade do solo é sempre mais alto no processo de secagem que no processo de umedecimento aplicando a mesma pressão. Esse fenômeno é chamado histerese. A figura 9.5 mostra o fenômeno de histerese que ocorre nas várias fases de secagem e umedecimento. O fenômeno de histerese é mais intenso nos solos mais argilosos que os solos mais arenosos.

Do ponto de vista da produção agrícola, os poros saturados com água prejudicam a respiração das raízes e, em conseqüência, prejudicam o desenvolvimento das culturas. Todavia, a água retida na superfície dos microporos, as raízes não têm forcas para extraí-las. Portanto, existe uma faixa de umidade no solo que é ideal para o desenvolvimento das culturas chamada, água disponível no solo (ADS). Essa água para as culturas é calculada pela diferença entre a umidade do solo no ponto de capacidade do campo ( $\theta_{pcc}$ ) e a umidade do solo no ponto de murchamento permanente ( $\theta_{pmp}$ ) que é representada pela equação (9.18). O valor da  $\theta_{pcc}$  é obtido três dias após uma chuva que satura o solo; o excesso de água nos poros

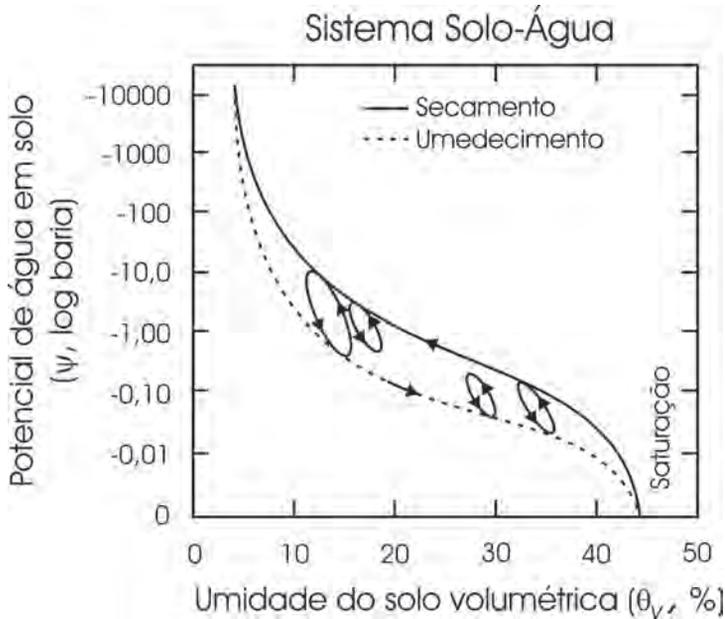


Figura 9.5 – O fenômeno de histerese nos processos de secagem e umedecimento.

é drenado pela gravidade. O valor da  $\theta_{pmp}$  é obtido quando as plantas murchas não se recuperam após a irrigação. O valor de ADS geralmente é representado pela unidade igual à chuva em mm por uma profundidade de raízes para uma determinada cultura. Por exemplo, o solo com uma profundidade de raízes de 1 m com o valor de  $\theta_{pcc}$  igual a 0,48 e o valor de  $\theta_{pmp}$  igual a 0,28, o valor de ADS é igual a  $(0,48 - 0,28) \times 1000 \text{ mm} = 200 \text{ mm}$ .

$$ADS = [\theta_{pcc} - \theta_{pmp}] \times \text{profundidade de raízes} \quad (9.18)$$

Em que:

ADS = água disponível do solo (mm);

$\theta_{pcc}$  = umidade do solo no ponto de capacidade do campo;

$\theta_{pmp}$  = umidade do solo no ponto de murchamento permanente.

## 9.5 Movimento de água no solo

A água movimenta-se no solo proporcionalmente às forças que a retêm nos diversos pontos. O movimento da água pode ocorrer em quatro condições diferentes:

- movimento da água líquida pelo gradiente de potencial da água;
- movimento de vapor da água pelo gradiente de potencial da água;
- movimento da água líquida pelo gradiente de temperatura da água;
- movimento de vapor da água pelo gradiente de temperatura da água.

## 9.10 Balanço hídrico

O balanço hídrico pode ser considerado como uma equação de conservação de massa. A quantidade da entrada e a da saída de água em uma unidade cúbica do solo são iguais em um determinado período do tempo em consideração. A entrada de água inclui chuva, neves, escoamento superficial, escoamento subterrâneo, água subterrânea entrando pelo lençol freático, condensação dos orvalhos na superfície do solo, irrigação, gotejamentos originados de vegetação e outros. A saída inclui ETR, escoamentos superficiais e subterrâneos, drenagem, consumidas pelos animais e crescimentos das plantas, e outros. Em geral, o cálculo do balanço hídrico considera os principais componentes de entrada e saídas. A figura 9.7 mostra as entradas e saídas desses componentes.

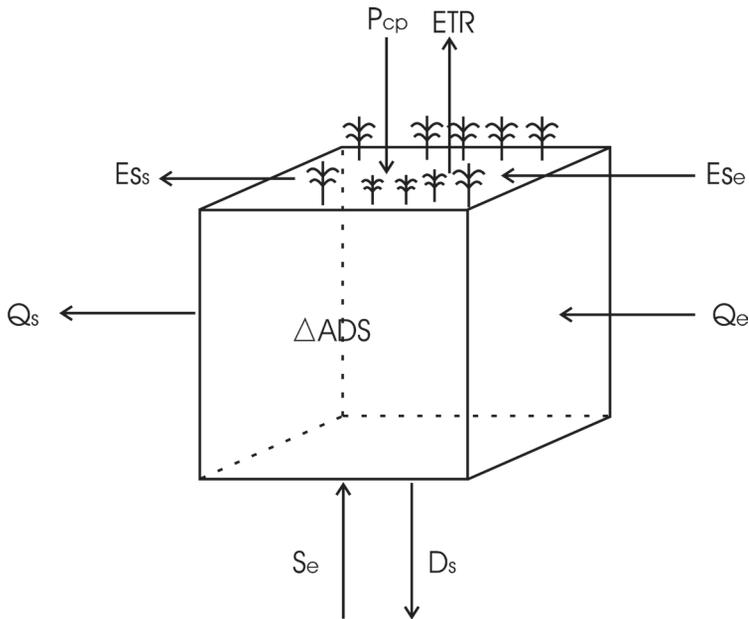


Figura 9.7 – Os principais componentes de entradas e saídas de água em uma determinada unidade do solo, incluem: chuva ( $P_{cp}$ ), evapotranspiração real (ETR), entrada e saída de escoamento superficial (ESe e ESs), entrada e saída laterais de água no subsolo ( $Q_e$  e  $Q_s$ ), drenagem ( $D_s$ ), reabastecimento de água subterrânea ( $S_e$ ) e a água armazenada (Água Disponível no Solo –  $\Delta ADS$ ).

O balanço hídrico é para quantificar o déficit ou o excesso hídrico no solo utilizando um procedimento para calcular a taxa de mudança do teor da umidade no perfil do solo de um período de tempo para outro, tal como um dia, uma semana ou um mês. A taxa de ETR é intimamente ligada ao poder de extração de água no solo. Esse poder varia com a umidade de água no solo abaixo da capacidade máxima de armazenamento da água no solo que se varia com a textura e a estrutura dos diferentes tipos do solo. Diversos métodos de cálculo dos efeitos das propriedades do solo no cálculo da ETR no solo não-saturado e cálculo do balanço hídrico

## 9.11 Monitoramento da umidade do solo via satélite

Quase todas as bandas espectrais da energia eletromagnética são sensíveis à variação da umidade do solo. Mas as informações de umidade no solo são limitadas na camada superficial do solo porque os sensores detectam as energias refletidas e emitidas da radiação de energia eletromagnética pela superfície a menos de 1 mm de profundidade. Apesar de a umidade do solo na camada superficial de certa maneira refletir bem a umidade do solo abaixo dela, não é necessário representar a umidade do solo de um perfil inteiro, especialmente quando as texturas e estruturas do solo variam consideravelmente. Além disso, as energias espectrais refletidas e emitidas variam com a umidade do solo, rugosidade da superfície, geometria da iluminação, matérias orgânicas, textura e estrutura do solo (IDSO; JACKSON; REGINATO, 1977). Esses fatores limitam a estimativa de umidade do solo utilizando os dados obtidos pelos sensores de radiômetro nas bandas do espectro radiação solar e o mesmo pelos sensores de microondas, apesar das energias de microondas penetrarem pouco mais que alguns centímetros. Portanto, as pesquisas são direcionadas para desenvolver os métodos indiretos usando os parâmetros gerados com dados de satélites como indicadores de umidade do solo, tais como: índices de vegetação, variação da amplitude da onda diária de temperatura da superfície e balanço de fluxos de energia da superfície.

### 9.11.1 Umidade do solo inferido pelo NDVI

Huete e Warrick (1990) utilizaram o Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) para estudar a evolução dinâmica da umidade do solo na superfície parcialmente coberta pela vegetação. Liu e Ferreira (1991) utilizaram o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para correlacionar com precipitação, ETP e déficit hídrico utilizando os dados obtidos nas três regiões do Estado de São Paulo, incluindo: Franca, Ribeirão Preto e Pindorama. As correlações foram feitas utilizando uma amostra de 72 observações no caso de dados mensais e uma amostra de 144 observações no caso de dados quinzenais para cada localidade. A tabela 9.10 apresenta os resultados das correlações entre NDVI e déficit hídrico mensais nos cinco níveis de ADSM: 50, 75, 100, 150 e 200 mm da região de Franca para demonstrar as correlações obtidas. Várias correlações foram feitas para vários níveis de ADSM, analisar o efeito da variação de ADSM em diferentes tipos de solo. Nos primeiros quatro casos com os níveis de ADSM de 50, 75, 100 e 150 mm, os valores mais altos de coeficiente de correlação foram 0,80, 0,80, 0,78 e 0,74, respectivamente, obtidos com um mês de atraso do NDVI. Isto quer dizer que o NDVI responde bem ao déficit hídrico do mês anterior. Isto foi observado em todas as três localidades. Mas no nível de ADSM de 200 mm, os valores mais altos foram obtidos nos casos de zero atraso e um mês de atraso em todas as localidades, o que significa que o tempo de atraso é entre zero e um mês. Portanto, para investigar essa dúvida, as correlações foram feitas para os

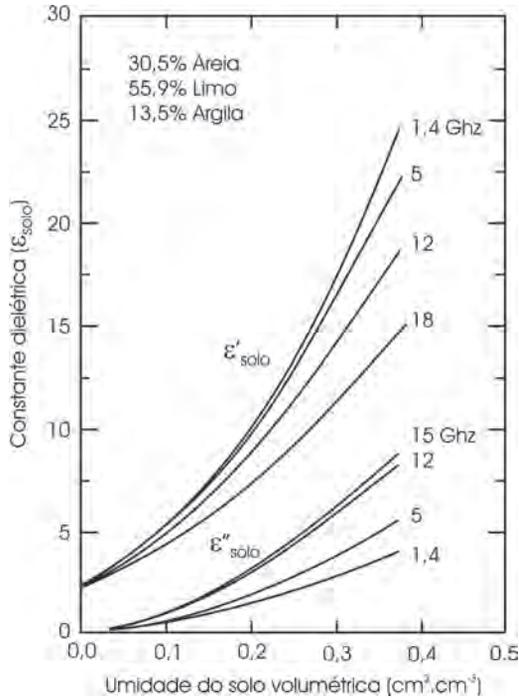


Figura 9.11 – Respostas dos constantes dielétricos da parte real ( $\epsilon'$ ) e da parte imaginária ( $\epsilon''$ ) das quatro frequências das microondas ao aumento da umidade do solo nos solos de limos. Fonte: (ULABY; MOORE; FUNG, 1982).

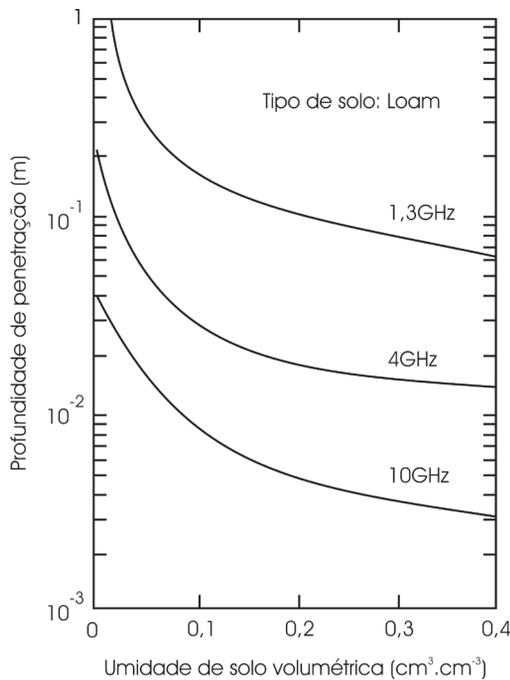


Figura 9.12 – Capacidade de penetração no solo pelos sensores de microondas nas frequências de 1,3 GHz, 4 GHz e 10 GHz no monitoramento da umidade do solo de limos. Fonte: (ULABY; MOORE; FUNG, 1982).

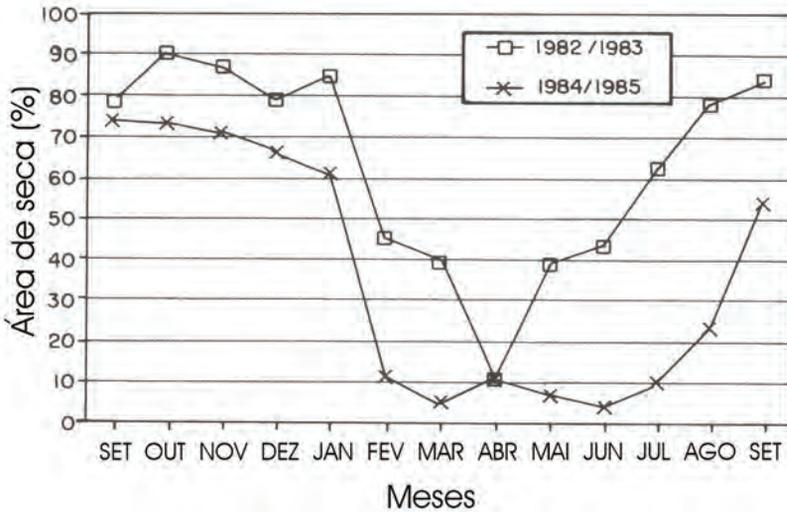


Figura 9.19 – Comparação da evolução da área seca (%) na região Nordeste brasileira de um ano seco (1982/1983) e um ano úmido (1984/1985). Fonte: (LIU; MASSAMBANI; NOBRE, 1994).

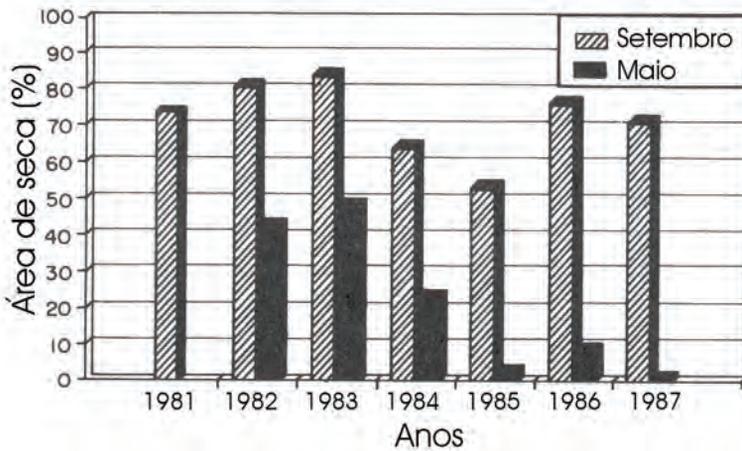


Figura 9.20 – Comparação da evolução da área seca (%) em histograma do mês seco (setembro) e mês úmido (maio) nos anos de 1981 a 1987. Fonte: (LIU; MASSAMBANI; NOBRE, 1994).

### 9.13 Monitoramento das variabilidades climáticas pelos NDVI e VCI

Para inferir um conjunto de estresses ambientais de uma região específica, o índice Vegetation Condition Index (VCI) proposto por Kogan (1990) foi aplicado para o monitoramento da seca nos Estados Unidos com resultados significativos. Liu e Kogan (1996) usaram os dados mensais de NDVI e VCI para monitorar a dinâmica da seca regional na América do Sul e para investigar seu impacto na produção agrícola do Brasil e da Argentina.



Figura 9.32 – Classificação climatológica para a região Nordeste brasileira por HARGREAVES (1975).

### 9.16.3 Imagem de fase do NDVI

A figura 9.33 mostra a imagem de fase de NDVI de cada *pixel*, um ângulo de fase de  $90^\circ$ , ou seja, na sua máxima amplitude. Como um determinado perfil senoidal de NDVI representa um determinado ciclo fenológico da vegetação, a fase na sua máxima amplitude indica o valor máximo de NDVI na superfície de um determinado tipo de vegetação. Portanto, a cor da imagem de fase na figura 9.33 indica o mês em que a vegetação alcança o seu crescimento máximo. A imagem de fase mostra sete diferentes ciclos de crescimento da vegetação com o seu máximo ocorrido em janeiro (roxo) e fevereiro (laranja) no sul, março (azul-claro) no centro, abril (verde-escuro) no norte, maio (verde-claro) e mudando de junho (amarelo) e julho (vermelho) a agosto (azul) nas áreas do leste e noroeste. Nessa distribuição de fase, foi observado que a mudança gradual de cor representa bem a mudança gradual de fase do noroeste e sudeste em junho, ao centro em março e se movimentando ao sul em janeiro. Pela comparação entre a imagem de fase de NDVI na figura 9.33 e a precipitação máxima média mensal (figura 9.34) delineada por Kousky (1979), observa-se que a imagem de fase de NDVI coincide bem com o mapa de precipitação, mas com um mês de atraso. Liu e Ferreira (1991), Di, Rundquist e Han (1994), Potter e Brooks (1998) têm observado um tempo de retardo de um mês do NDVI em resposta à precipitação.

An aerial photograph of a city, likely New York City, showing a river with several bridges, a dense urban area with many skyscrapers, and a large green park area. The image is used as a background for the title.

ii

Capítulo

**Usos do Solo Urbano**

## 10.1 Introdução

Hoje, a industrialização e comercialização concentram-se nas cidades metropolitanas, o que resulta em um crescimento rápido da população urbana. Para resolver os problemas causados por esse crescimento, há a necessidade de se elaborar um plano diretor do desenvolvimento urbano. Para isso, o primeiro passo é obter as informações dos usos atuais do solo para que possam projetar seu controle no futuro. Graças às técnicas de sensoriamento remoto via satélite e Sistema de Informações Geográficas (SIG) (Geographical Information System – GIS), os mapas atuais e históricos de usos do solo com alta resolução espacial podem ser adquiridos para acompanhar suas evoluções. Além disso, as novas técnicas que utilizam as características espectrais, espaciais e temporais dos dados, adquiridas via satélite, permitem uma análise profunda dos fenômenos urbanos, tais como população, qualidade de moradia, usos inadequados do solo, conservação de energia e invasão de terra e fornecem uma ferramenta eficiente para adequação do planejamento na expansão urbana.

## 10.2 Propriedade espectral de usos do solo urbano

Uma imagem composta da combinação de várias bandas espectrais pode ser utilizada para identificar os diferentes objetos, tais como concreto, asfalto, grama, gramas artificiais, telhados, água, florestas e outros, baseando-se nas características espectrais singulares de cada objeto. Na figura 10.1 mostram-se as assinaturas espectrais de vários objetos. Observa-se que a superfície de uma pastagem reflete mais na faixa de infravermelho próximo (50%) e reflete menos na faixa visível (5% a 20%). A grama artificial reflete menor que 8%, mas tem um pico de refletância (20%) do comprimento da onda em torno de  $0,56 \mu\text{m}$  por causa da contribuição da cor verde. A superfície de concreto reflete mais (28% a 32%) e a superfície de asfalto reflete menos (8%) em ambas as faixas de visível e infravermelho próximo. Os solos arenosos e cascalhos e os solos preparados em sulcos e camalhões refletem em torno de 5% a 18% na faixa de visível e 22% na faixa de infravermelho próximo. A superfície de água reflete pouca luz na faixa do visível e quase absorve toda a luz na faixa do infravermelho (0% a 5%). Portanto, as assinaturas espectrais dos diferentes objetos são utilizadas para sua própria identificação.

Para o monitoramento da evolução de usos do solo urbano, as imagens adquiridas devem ser sob mesmas condições físicas, incluindo-se: ângulo de visada dos sensores, ângulo zenital solar, intensidade da radiação incidente, atenuações atmosféricas. Por causa das informações incompletas das características espectrais dos diversos objetos na área urbana, o monitoramento de usos do solo somente é limitado nos principais objetos. Infelizmente, muitos materiais artificiais têm as assinaturas espectrais bem semelhantes o que dificulta a identificação e mesmo

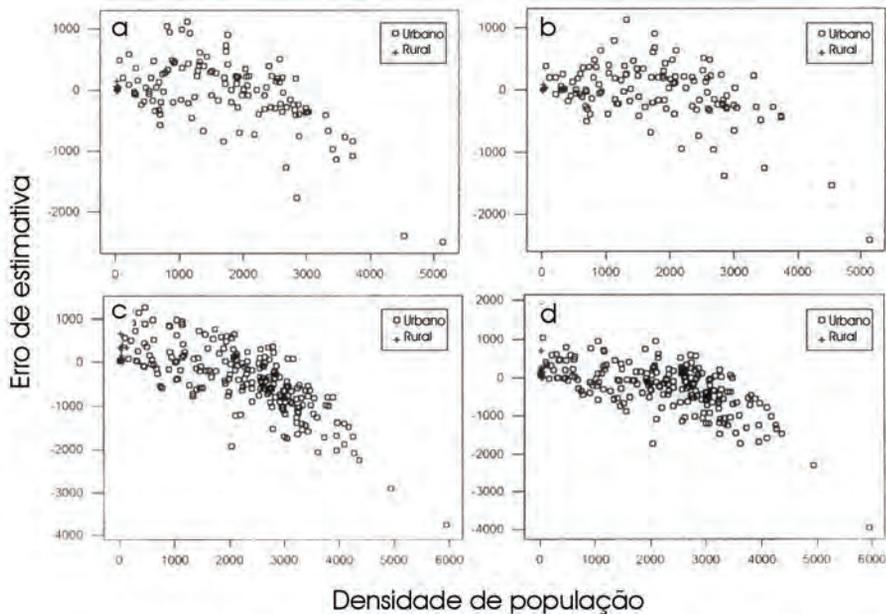


Figura 10.4 – Comparação dos erros de estimativa dos modelos desenvolvidos para Ballarat e Geelong na Austrália: a) modelo da média das bandas em Ballarat; b) modelo de transformação espectral de *pixel* dos distritos em Ballarat; c) modelo de média das bandas em Geelong; d) modelo de transformação espectral de *pixel* dos distritos em Geelong. Fonte: (HARVEY, 2002).

## 10.6 Qualidade da moradia

Na vida moderna, as pessoas exigem mais qualidade de vida. A qualidade de moradia é um dos fatores que pesam mais na avaliação da qualidade de vida. Portanto, a maioria das pessoas prefere morar em bairros nobres das cidades. As imagens de satélite de alta resolução espacial fornecem as informações sobre as condições ambientais das áreas residenciais e suas vizinhanças, além de identificar as diferentes classes de unidade da moradia. Os critérios para discriminar a qualidade da moradia de uma classe da família incluem:

- a) facilidade de estacionamento na rua;
- b) facilidade de carregamento e descarregamento entre o estacionamento e a moradia;
- c) largura das ruas;
- d) distribuição das ruas;
- e) classe das ruas;
- f) manejo dos rejeitos e lixos;
- g) trânsito e tráfego;
- h) riscos de ocorrências dos desastres naturais;
- i) acesso aos prédios;
- j) condições socioeconômicas dos moradores.

LANDSAT e as informações de censo que são complementar uma da outra. Com essa configuração, os limites das localidades urbanas podem ser delineados mais corretamente. Ridd (1995) propôs um modelo chamado Vegetation Impervious Surface Soil (VIS), para classificar *pixel* por *pixel* o uso do solo urbano. O modelo VIS é aplicado para interpretar os dados disponíveis via satélite que representam o ambiente urbano, o ambiente rural ou em urbanização. O modelo estima a composição de um segmento urbano e registra as informações da imagem *pixel* por *pixel*. As informações incluem classes de usos do solo, sistema de drenagem da bacia hidrográfica utilizando uma combinação linear de três elementos de usos do solo: vegetação, solo ou uso intransitável, que é representada pelo triângulo do modelo VIS (figura 10.6).

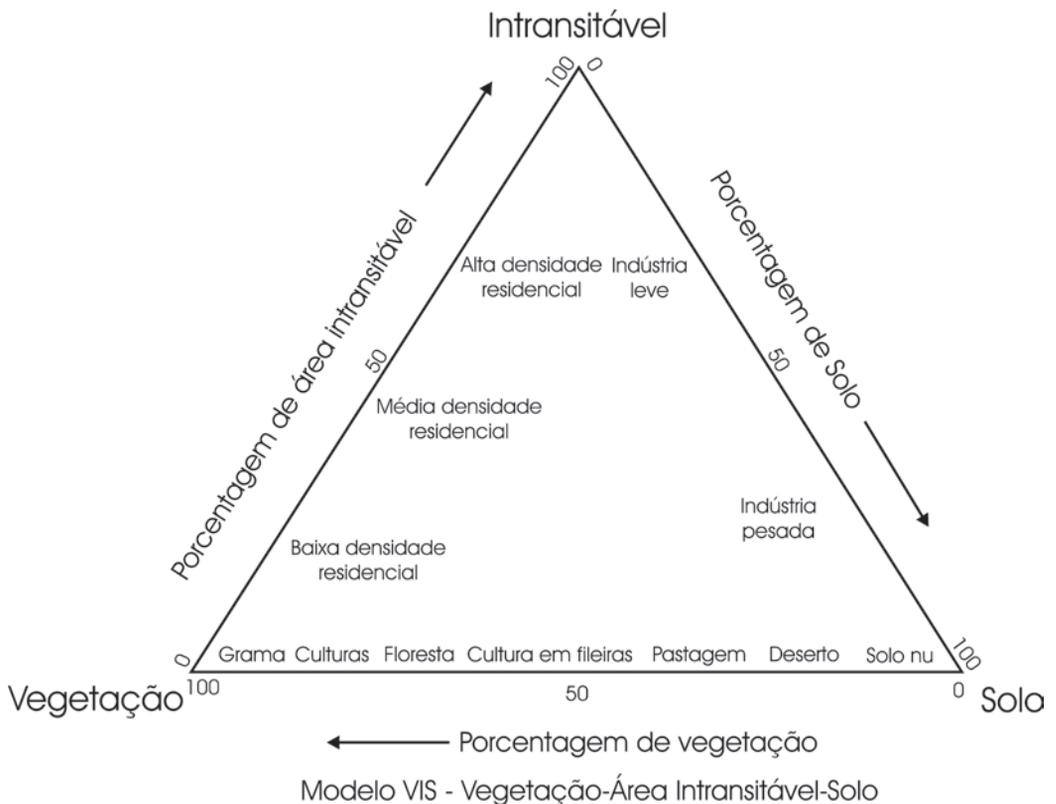
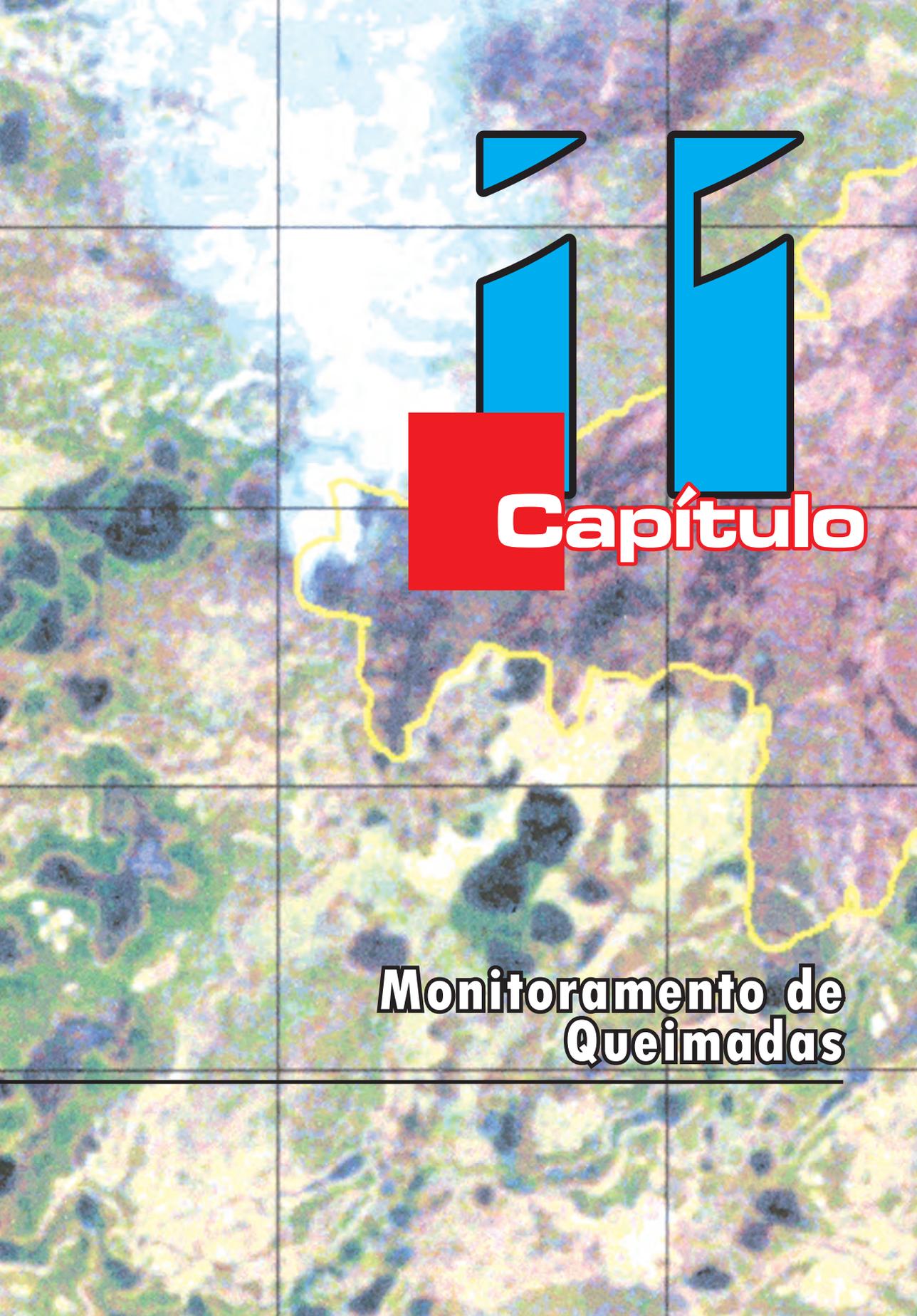


Figura 10.6 – Modelo Vegetation Impervious Surface Soil (VIS) para classificação de uso da terra urbana *pixel* por *pixel*. Fonte: (RIDD, 1995).

O modelo VIS foi aplicado por Phinn et al. (2002) para monitorar a composição do ambiente urbano da cidade de Brisbane, localizada no sudeste da região Queensland, Austrália. A composição do ambiente urbano obtido pelo modelo VIS, baseado nos dados coletados em campo, foi casada com um método mais adequado entre os três métodos da classificação de imagem usados. Três métodos, incluindo classificação de imagem, interpretação de fotografia aérea e modelo de mistura linear constrangida, foram aplicados para o mapeamento do ambiente urbano usando os dados Landsat TM e fotografias aéreas de 1:5.000. Mais do que 900 pontos referenciais, localizados nas quatro faixas: norte, sul, leste e sudoeste, foram usados para coletar os dados de

An aerial photograph of a landscape, possibly a forest or agricultural area, with a grid overlay. A yellow boundary line is drawn on the map, enclosing a central area. The text 'Capítulo' is overlaid on the map, with the 'i' in 'Capítulo' being blue and the 'pítulo' being white with a red outline. A red square is positioned behind the 'i' and the beginning of 'pítulo'.

# Capítulo

**Monitoramento de  
Queimadas**

---

## 11.1 Introdução

No início da década de 1970, o governo brasileiro incentivou a expansão agropecuária na região Centro-Oeste. Desde essa época, os desmatamentos descontrolados resultam em uma crescente fragmentação das florestas. A maioria dos produtores se adapta à técnica de queimadas para limpar seus terrenos ou para replantar as lavouras. Recentemente, a exploração da madeira e o aumento das atividades agropecuárias na Floresta Amazônica e no Centro-Oeste também aceleram a fragmentação florestal. Esses atos de queimadas agravam a poluição do ar e causam impactos negativos ao meio ambiente. As cinzas danificam o aparelho respiratório e o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) agrava o aquecimento do planeta Terra. Os aerossóis das cinzas e os gases emitidos para a atmosfera pelas queimadas deslocam-se milhares de quilômetros das suas fontes e têm seus impactos globais. Portanto, o controle de queimadas é um dos assuntos que estão sendo discutidos nos pactos ecológicos globais dos encontros do Ecology 92 (ECO92) no Rio de Janeiro, Pacto Tóquio em 2000 e Pacto de Desenvolvimento Sustentável, em 2002.

Atualmente, o mundo inteiro está sendo conscientizado da necessidade de buscar técnicas de desenvolvimento sustentável e, ao mesmo tempo, preservar seus recursos ambientais. Muitos valores são conferidos à prevenção dos incêndios florestais. Os prejuízos diretos e indiretos que os incêndios causam com a destruição das florestas e matas, assim como os riscos decorrentes da eliminação de cobertura vegetal nas regiões vulneráveis, justificam plenamente qualquer esforço no sentido da prevenção contra esses danos. É muito difícil a completa prevenção dos incêndios florestais, principalmente quando se trata de fogo causado por raio ou combustão espontânea. No entanto, existem técnicas modernas capazes de simular a quantidade e a qualidade da biomassa, tais como vegetação e madeira e as condições de secagem que fornecem as fontes de combustão, a partir das condições desses elementos e da situação atmosférica reinante para minimizar o risco da ocorrência de incêndios.

No que concerne ao fogo provocado pelo homem, conseguem-se minimizar essas ações por meio da educação, de leis rigorosas e de outros meios, ou pela redução do período de riscos dos incêndios florestais, mediante a retirada prévia do material combustível e uso de técnicas, como: construção de estradas, aceiros, proibição de acesso público a áreas consideradas de risco, entre outras. Portanto, um plano de prevenção de incêndios florestais deve ser cuidadosamente elaborado de modo a proteger o patrimônio natural. Um conjunto de medidas é essencial durante a fase de elaboração e execução desse plano. Devem ser incluídas as técnicas modernas amparadas por monitoramento local e regional, dentre as quais se encontram os diagnósticos meteorológicos por satélite e os prognósticos de tempo a partir de modelagem matemática de escala regional.

Atualmente, as práticas utilizadas para monitoramento de queimadas empregam técnicas de sensoriamento remoto em plataformas orbitais, incluindo os satélites de alta a média resolução espacial de 0,61 m a 30 m e de baixa frequência temporal de 16 a 26 dias, tais como QuickBird, IKONOS, SPOT, CBERS e Landsat,

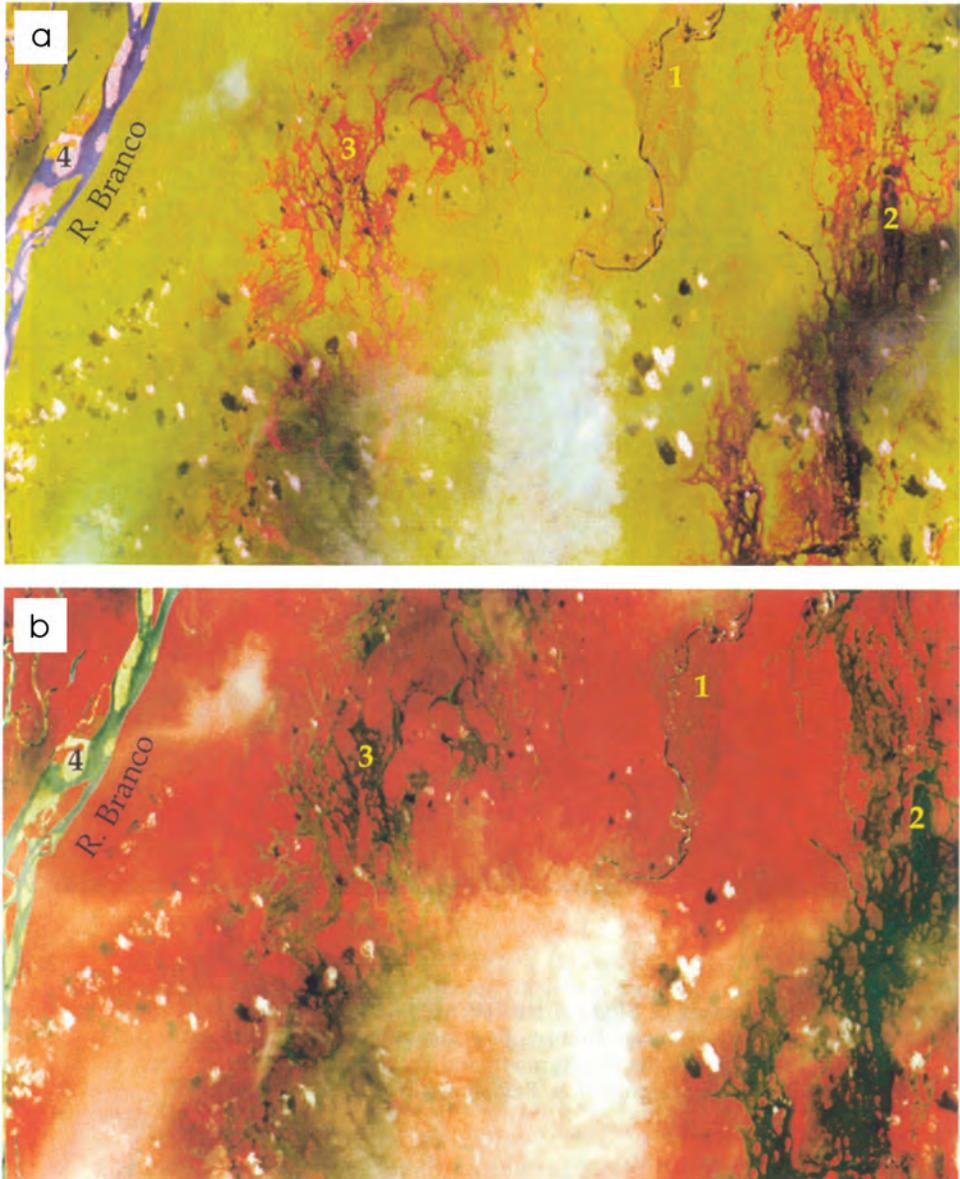


Figura 11.5 – Comparação das áreas de queimadas recentes e um mês depois das queimadas na região Central de Rio Branco, Estado de Roraima, a ocorrência da queimada foi em fevereiro de 1998 utilizando a imagem composta do SPOT 4 HRVIS SWIR/NIR/R (R/G/B). Os números nas imagens indicam: 1. Savana não queimada; 2. Savana recém queimada; 3. Savana queimadas após algumas semadas e 4. Depostos de areias ao longo do rio. Fonte: (PHULPIN et al., 2002).

queimadas na região Central em Portugal durante várias queimadas ocorridas nos anos de 2000 e 2001. O delineamento das áreas de queimadas foi feito pelo método da classificação de ANNs usando os dados de séries temporais inteiras do SAR ERS 2. A acurácia de estimativa de áreas de queimadas alcançou 92,11%. Menges et al. (2004) monitoraram os efeitos das queimadas nos sinais retroespalhamentos do SAR na região da Savana localizado na região norte da Austrália. Observaram que

## 11.5 Modelos de índices de suscetibilidade de risco de ocorrências de queimadas

Bradshaw, Deeming e Byrgan (1978) apresentaram um sistema operacional chamado National Fire Danger Rating System (NFDRS) para prognosticar a suscetibilidade à ocorrência de incêndios florestais nos Estados Unidos. O NFDRS gera os mapas e as informações da suscetibilidade de risco de ocorrência de incêndios florestais baseado no Índice de Suscetibilidade de Risco de Queimadas Florestais (ISRQ). Os mapas de risco regional de incêndios florestais estão sendo divulgados semanalmente em várias regiões dos Estados Unidos fundamentados nos dados gerados pelo modelo NFDRS com grande sucesso. Os dados de entrada para rodar o modelo NFDRS incluem:

- a) combustíveis (coberturas vegetais, clima, topografia e estado hídrico da cobertura viva e morta);
- b) dados históricos de queimadas;
- c) modelo digital de elevação, DEM;
- d) dados de satélite: NOAA, MODIS, DMSP, GOES, Landsat, SPOT, ADEOS-II e outros.

O modelo a ser adotado para a realização dos prognósticos deverá permitir para cada ponto a ser monitorado a avaliação dos seguintes parâmetros:

- a) componente de ignição;
- b) índice de queimada;
- c) componente de liberação de energia;
- d) espalhamento de queimada;
- e) umidade do combustível madeira;
- f) umidade do combustível vegetação (folhagem);
- g) código de estágio da vegetação;
- h) estado do tempo;
- i) código sazonal;
- j) fator de “esverdeamento” da folhagem;
- l) fator de “esverdeamento” da madeira;
- m) índice de seca Keetch-Byrams da região;
- n) índice de risco de incêndio antropogênico;
- o) índice de carregamento de fogo;
- p) índice de ocorrência de causas humanas.



# 1

**Capítulo**

**Previsão de Safra Agrícola**

---

## 12.1 Introdução

“Comer é um direito dos cidadãos”. Esta é uma lei celestial que os antigos imperadores chineses seguiram para governar seus reinos, preocupando-se com a quantidade de alimento produzida e sua distribuição harmoniosa para garantir povos sem fome. A produção de grãos, além de fornecer alimento para os seres humanos, também é usada para estabilizar a criação de animais contra as diversas catástrofes naturais. Portanto, pode-se dizer que a produção agrícola é sempre uma tarefa indispensável nas atividades humanas, desde a existência do homem. A freqüente falta de alimentos no Continente Africano, que resulta em famintos e até mortos, é um desafio sério para os governantes do mundo inteiro. A queda da produção agrícola pode ser causada por vários fatores, tais como: políticas governamentais, decisões de produtores, anomalias climáticas e manejo inadequado. A distribuição inadequada da produção agrícola pode causar fome e pânico no mercado mundial. Portanto, o planejamento adequado e as previsões da produção agrícola são as tarefas desafiantes para agricultores, cientistas, economistas, comerciantes e dirigentes governamentais.

A lei econômica segue um equilíbrio entre demanda e oferta. Qualquer desequilíbrio afeta o preço de um produto, provocando desordem no sistema econômico. Por exemplo, o Brasil e os Estados Unidos são os dois principais países na exportação de soja. É importante apontar que a safra de soja no Brasil ocorre no período que vai de abril a junho e a nos Estados Unidos, de agosto a outubro. A defasagem no fornecimento dos grãos da soja de quatro a seis meses é um fator crucial na flutuação do preço no mercado mundial. A queda ou a supersafra da soja nos Estados Unidos pode afetar o preço da soja no Brasil e vice-versa. Portanto, as previsões precisas das safras de soja no Brasil e nos Estados Unidos são importantes para as projeções da evolução dos preços da soja no mercado mundial. Entretanto, uma política agrícola saudável pavimentará um sistema econômico agrícola estável. Para isso, a previsão de safra agrícola começa desde a decisão governamental até a colocação do produto final no mercado. Do ponto de vista científico, os pesquisadores preocupam-se mais com as previsões das variações da produção agrícola causadas pelos fenômenos naturais, como ocorrências de secas, geadas, excessos de pluviosidade, doenças e pragas, ventanias e furacões. A produção agrícola de uma determinada cultura é estimada multiplicando-se a produtividade pela área plantada. Para isso, a estimativa da produção final de uma cultura depende de dois parâmetros: área plantada e produtividade.

Em relação à área plantada, a projeção antes do plantio depende das políticas governamentais e da decisão própria do agricultor. Após a época do plantio de cada cultura, os dados da área plantada são tradicionalmente obtidos por meio de levantamento no campo, ou nos órgãos financiadores. Embora a coleta dessas informações seja uma tarefa trabalhosa, ela tem um certo grau de confiabilidade. Atualmente, a estimativa da área plantada pode ser feita no estágio do crescimento vegetativo da cultura, que ocorre aproximadamente 30 dias após o plantio com boa acurácia usando os dados de satélite de alta resolução espacial (ALONSON; SORIA; GOZADO, 1991; BAUER et al., 1978; BUSH; ULABY, 1988; AHERN et al., 1979;

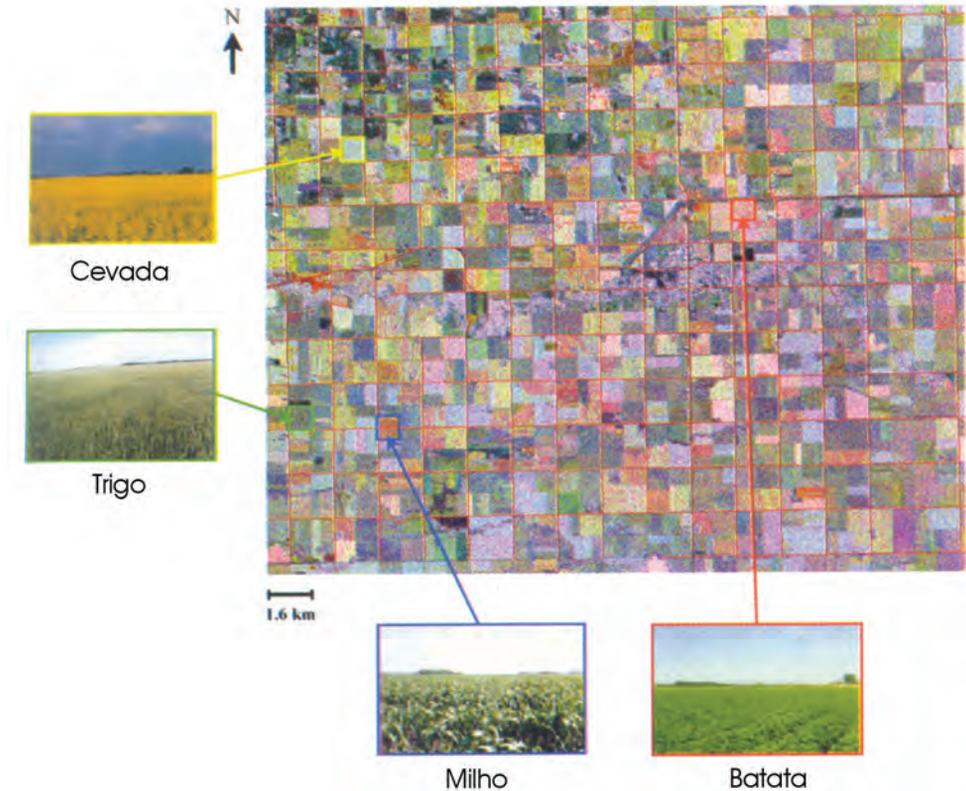


Figura 12.1 – Estimativa de áreas plantadas das culturas de milho, trigo, batata e cevada, baseada na imagem composta multi-temporal de RADASAT1 na região da cidade Carman, localizada no sul da Manitoba, Canadá. As imagens incluem as datas de 22 de julho (vermelha), 5 de julho (verde) e 28 de junho (azul) de 1997. Fonte: (MCNAIRN et al., 2002).

Gómez et al. (2002) apresentaram um método semi-supervisionado para classificar e estimar a área plantada da cultura interessada usando os dados hiperespectrais obtidos pelo espectrômetro HyMap durante os experimentos realizados em Barrax, Albacete, Espanha, durante o período de 1998 a 2000 pelo projeto Digital Airborne Imaging Spectrometer Experiment (DAISEX) financiado pela Agência Espacial Européia. Seis classes de usos do solo foram classificadas, incluindo: milho, trigo, beterraba, cevada, alfafa e solo nu. Um conjunto de 900 amostras foi usado para treinamento e outro de 900 amostras foi usado para validação dos métodos de classificação e estimativa da área. O treinamento supervisionado para classificar a cultura interessada foi combinado com as técnicas não supervisionadas para classificar o resto das classes na imagem. Compararam o método de classificação semi-supervisionada com vários métodos da classificação, tais como K-Means, ISODATA, Vetor da Quantificação Aprendida, Máxima Verossimilhança Gaussiana, Maximização Esperada e Percepção Multicamada. Os resultados mostraram que o método de classificação semi-supervisionada alcança uma acurácia de 96,73%, que é mais alta do que todos os métodos comparados.

$$\text{WDVI} = \text{IRC} - [\text{VISC} (\text{IRS}/\text{VISs})] \quad (12.38)$$

Em que:

- WDVI = índice de vegetação diferença com pesos;  
 IRC = reflectância da banda de infravermelho da cultura;  
 IRS = reflectância da banda de infravermelho do solo;  
 VISC = reflectância da banda de visível da cultura;  
 VISs = reflectância da banda de infravermelho do solo.

As correlações entre WDVI e fração da cobertura da superfície e entre WDVI e LAI das culturas de trigo, cevada, beterraba e batata foram obtidas usando os dados de um período de dez anos (BOUMAN 1992a; BOUMAN; VAN KASTEREN; UENK, 1992). Os valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foram acima de 0,95 para todas as culturas estudadas. Os sinais de retroespalhamentos dos sensores do radar, incluindo HH, HV, VH e VV, são extremamente sensíveis às estruturas das copas das culturas. A sensibilidade é especialmente maior para as culturas com estruturas de copas verticais distintas, alongadas, tais como as culturas cereais (BOUMAN; VAN KASTEREN, 1990). Para as culturas com as estruturas uniformes e as folhas largas, a sensibilidade dos sinais de retroespalhamentos é menor. Por exemplo, para a copa de beterraba, uma boa correlação foi obtida entre os sinais de retroespalhamentos do radar banda X e o teor da água na copa. Portanto, esse teor na copa de beterraba pode ser monitorado usando o radar banda X (ATTEMA; ULABY, 1978; BOUMAN, 1992b). O modelo SUCROS foi validado com os dados de produtividade dessa cultura na região Flevolandia, Holanda. Os resultados mostraram que o erro diminuiu de 19%, obtido pelo modelo SUCROS, para 3%, pelo modelo SUCROS com os *inputs* de dados de WDVI. Bouman (1995) apontou que os dados de radar inferem bem o estado de teor da água na copa no estágio inicial do crescimento, mas não contribuiu bem na estimativa da produtividade final.

### 12.3.4 Modelos de produtividade primária líquida

A produtividade de biomassa também é chamada como produtividade primária líquida, Net Primary Productivity (NPP), que envolve a colheita de todas as partes das matérias secas produzidas pela planta, incluindo todos os órgãos, como raízes, flores, caules, troncos, folhas, frutas e sementes. A produtividade de biomassa é uma medida para avaliar a capacidade de produzir as matérias secas de uma determinada espécie de planta pelo processo fotossintético que converte a energia solar em matéria seca. Diferentes tipos de plantas têm diferentes capacidades na conversão de energia da radiação solar para matéria seca. A produtividade da biomassa é um indicador indireto para inferir a produtividade econômica das culturas que consideram somente a parte econômica da matéria seca produzida, incluindo grãos, como trigo e milho; frutas, como laranja e limão; raízes, como batata e amendoim; e caules, como cana-de-açúcar. Portanto, do ponto de vista da produção agrícola, a produtividade econômica de uma determinada cultura considera somente a parte da produtividade de biomassa, que é diferente da produtividade de biomassa total. Por exemplo, as culturas de colheita

Tabela 12.10a – Lista dos valores dos coeficientes a, b, c e d para calcular a rPAR (a razão de aPARc/aPARs) pelo método de Moreau e Li (1996). aPARs (PAR absorvida pela superfície abaixo da copa) e aPARc (PAR absorvida pela copa da vegetação). Os valores de  $\mu$  (ângulo zenital solar) de 0,1 a 0,5.

rPAR	Coeficiente	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,2$	$\mu = 0,3$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,5$
0,1	a	0,266	0,266	0,266	0,266	0,266
	b	0,228	0,228	0,228	0,228	0,228
	c	0,787	0,787	0,787	0,787	0,787
	d	-3,633	-3,633	-3,633	-3,633	-3,633
0,2	a	0,293	0,266	0,266	0,293	0,293
	b	0,187	0,288	0,288	0,187	0,187
	c	0,818	0,787	0,787	0,818	0,818
	d	-0,1082	-3,633	-3,633	-0,1082	-0,1082
0,3	a	0,293	0,293	0,293	0,293	0,293
	b	0,187	0,288	0,288	0,187	0,187
	c	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818
	d	-0,1082	-0,1082	-0,1082	-0,1082	-0,1082
0,4	a	0,186	0,186	0,186	0,186	0,186
	b	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141
	c	0,912	0,912	0,912	0,912	0,912
	d	0,358	0,358	0,358	0,358	0,358
0,5	a	0,122	0,186	0,186	0,122	0,122
	b	0,124	0,141	0,141	0,124	0,120
	c	1,059	0,912	0,912	1,059	1,059
	d	0,762	0,358	0,358	0,762	0,762
0,6	a	0,121	0,121	0,121	0,121	0,121
	b	0,106	0,124	0,124	0,106	0,106
	c	1,007	1,059	1,059	1,007	1,007
	d	0,819	0,762	0,762	0,819	0,819
0,7	a	0,098	0,121	0,121	0,098	0,098
	b	0,067	0,106	0,106	0,106	0,067
	c	0,886	1,007	1,007	1,007	0,886
	d	0,890	0,819	0,819	0,819	0,890
0,8	a	0,056	0,098	0,098	0,098	0,056
	b	0,033	0,067	0,067	0,067	0,033
	c	0,795	0,886	0,886	0,886	0,795
	d	0,947	0,890	0,890	0,890	0,947
0,9	a	0,004	0,011	0,011	0,011	0,002
	b	0,000	0,006	0,006	0,006	0,0003
	c	0,209	0,741	0,741	0,741	0,306
	d	0,995	0,991	0,991	0,991	0,997

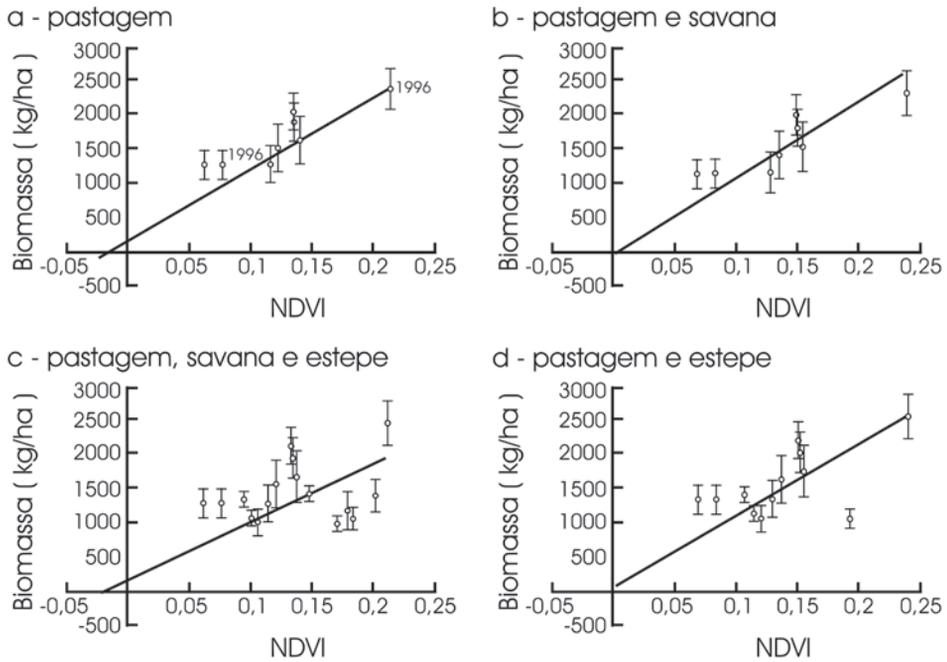


Figura 12.12 – Correlações entre NDVI e biomassa observadas para várias tipos de vegetação: a) pastagem; b) pastagem e savana; c) pastagem, savana e estepe; d) pastagem e estepe na região do Parque Nacional Etiosha em Nimíbia, África. Fonte: (SANNIER; TAYLOR; PLESSIS, 2002).

### 12.3.5 Modelos de previsão de safra agrícola via satélites

Os dados digitais em várias bandas espectrais obtidos pelo sensoriamento remoto fornecem informações da superfície terrestre. As reflectâncias espectrais das bandas de visível, infravermelho próximo, infravermelho termal até microonda, medidas via sensoriamento remoto são utilizadas para identificar tipos de vegetação e monitorar as condições do crescimento das vegetações e os impactos das variabilidades ambientais (GUYOT, 1996; PRÉVOT et al., 1993; MORAN et al., 1994; SEGUIN; COURAULT; GUÉRI, 1994; WIGNERON; KERR; PRÉVOT, 1997). Geralmente, os modelos de estimativa de produtividade são construídos com base nos dados históricos de produtividade e índices de vegetação gerados com os dados de NOAA AVHRR NDVI. Para desenvolver os modelos de índices de vegetação via satélite, fundamentados nas regressões estatísticas, as precauções mencionadas na construção dos modelos estatísticos agrometeorológicos devem ser consideradas. Hayes e Decker (1996) desenvolveram um modelo de previsão da produtividade de milho utilizando a técnica de regressão múltipla baseada nos índices de NDVI e VCI gerados com os dados de Global Vegetation Index (NOAA GVI), com resolução espacial de 20 km para a região de cinturão de milho nos Estados Unidos. Rasmussen (1997) também utilizou a mesma técnica para prever a produtividade de milho na África. Recentemente, Liu e Kogan (2002) apresentaram os modelos de regressão múltipla para estimar as produtividades de soja nos oito principais produtores estaduais e no Brasil. Os modelos

caracterizar o grau de perda da produção. No subsistema de previsão da produtividade, serão desenvolvidos modelos estatísticos agrometeorológicos, modelos de simulação dos processos fisiológicos da cultura e modelos de índice de vegetação gerados com dados de satélite. As estimativas da produtividade obtidas pelos três tipos de modelos desenvolvidos serão comparadas e confirmadas com as informações atualizadas em campo para a obtenção de uma estimativa mais confiável. Previamente à divulgação da informação de previsão, os dados obtidos pelos três subsistemas, as informações obtidas nas várias instituições responsáveis pela operação de previsão e os dados obtidos no campo serão cuidadosamente cruzados e comparados para se obter uma previsão realista.

O sistema operacional requer uma equipe multidisciplinar que possa trabalhar interagindo com as agências e os países envolvidos na mesma tarefa. O sistema de comunicação deve ter alta capacidade de manter os fluxos de dados e informações mais rápidas possíveis servindo para o oferecimento da previsão do alerta em tempo hábil. Os produtos do sistema de alerta abrangem três tipos de informações: resumo executivo, análise regional e/ou nacional e dados atualizados via Internet. Para destacar a notícia de alerta, a primeira página do boletim já apresentará a região mais afetada. As análises das causas e os dados observados são apresentados no texto com informações detalhadas. Após a divulgação do boletim, a atualização da previsão será feita pela Internet. A divulgação da informação gerada pelo sistema de alerta é destinada aos usuários, cujas opiniões serão coletadas e analisadas para alcançar o melhor atendimento. O sistema de alerta é utilizado para oferecer as informações de alerta de seca agrícola regularmente tanto regional como nacional.

## 12.5 Sistema de agricultura de precisão

Novos sistemas de manejo, tais como mecanização, irrigação e controle de capins invasores, doenças e pragas, são atualmente adaptados à produção agrícola pelos grandes produtores. As variações espaciais e temporais dos fatores ambientais dificultam sua eficiência na aplicação dessas novas tecnologias. Os satélites fornecem um fluxo contínuo de dados com altas resoluções espaciais e temporais que podem ser utilizados para quantificação das variabilidades espaciais e temporais dos parâmetros bioclimáticos e para aumentar sua eficiência de aplicações. Portanto, um Sistema de Agricultura de Precisão (SAP), gerenciado pelo SIG, pode ser usado para geração de mapas dinâmicos das condições dos parâmetros ambientais e culturas e para monitorar e gerenciar cada unidade de produção agrícola no campo em tempo real (MORAN; INOVE; BARNES, 1997). Metternicht (2003) utilizou os índices de vegetação derivados com os dados de alta resolução espacial obtidos pela videografia montada no avião registrados pelo GPS para monitorar as condições de crescimento das culturas, incluindo estresses hídricos, danos das estruturas das copas, e mapear as áreas ocupadas pelas diferentes culturas. Recomendou que as imagens de Landsat e SPOT, acompanhadas com as videografias adquiridas pelo avião, podem ser aplicadas para manejo de sistema de agricultura de precisão.

A satellite image of Earth showing a coastline with yellow and green landmasses and blue oceans. A large red square is positioned over the text. The text 'ie' is in blue with a black outline, and 'Capítulo' is in white with a red outline.

# ie

**Capítulo**

**Processamento de  
Dados de Satélites**

---

## 13.1 Introdução

Os dados de satélites fornecem um fluxo contínuo de informações com altas frequências temporais e espaciais sem precedentes e são freqüentemente utilizados pelas diversas disciplinas de especialistas como uma ferramenta poderosa para desenvolver seus métodos de pesquisas e suas aplicações no monitoramento das evoluções dinâmicas do mundo real. Esses usuários sentem, a cada dia, mais necessidade de obter tais dados com maior facilidade e com as qualidades mais compatíveis às suas finalidades de usos. Portanto, diferentes técnicas para tentar eliminar os ruídos e corrigir os efeitos bidirecionais foram desenvolvidas pelos vários grupos de pesquisadores. Isto resulta em uma inconsistência dos dados processados que complica suas aplicações. No início da década de 1990, um método de padrão foi estabelecido por um grupo de especialistas envolvendo NASA, NOAA, USGS e vários especialistas internacionais na área de processamento de dados de satélites, especialmente, para os dados de NOAA AVHRR, coordenado pelo NOAA. As técnicas típicas de processar uma imagem digital bruta registrada pelos sensores de um satélite envolvem os processos de correções radiométricas, atmosféricas e geométricas. Todos estes processamentos de dados digitais são chamados como o pré-processamento de dados de satélites. Neste capítulo, serão apresentadas as técnicas mais usadas para o processamento dos dados de satélites antes que sejam aplicados no monitoramento das evoluções temporais e espaciais dos objetos presentes na superfície terrestre, incluindo o cálculo do horário de passagem dos satélites, calibrações radiométricas, correções de degradação de sensores, correções atmosféricas e geométricas e técnicas de eliminação da contaminação de nuvens.

## 13.2 Horário local de passagem dos satélites

Por causa do deslocamento do satélite de sua órbita original após o lançamento causado pelo atrito atmosférico e a variação do ângulo de inclinação causada pela força magnética do Sol, a hora da passagem do satélite em um local específico deve ser recalculada para cada dia específico e para cada satélite. O ângulo zenital solar varia de acordo com a hora do dia. Portanto, os dados de ângulo zenital solar devem ser calculados corretamente de acordo com a hora certa da passagem do satélite para cada *pixel* específico.

$$T(\text{GMT}) = T_0(\text{horas, minutos}) + [\lambda \text{sign}(\lambda) + \Lambda(j) - \Phi D/R] \times (4 \text{min}/\text{long}) \quad (13.1)$$

Em que:

$T(\text{GMT})$  = o horário da passagem em tempo (Greenwich Meridian Time, GMT);

$T_0$  = hora de passagem pelo equador;

$\text{sign}$  = o sinal do deslocamento para o leste é “+” e para o oeste é “-”;

$\lambda$  = deslocamento em direção de longitude;

$\Lambda(j)$  = órbitas de nordeste a sudoeste produzem uma compensação (*offset*) de longitude ( $\Lambda$ ) relacionada com o aumento da latitude, a partir do plano do equador;

$\Lambda\Phi(j)$  =  $\tan^{-1}[(\cos\alpha \sin\phi / (\sin^2\alpha - \sin^2\Phi)^{1/2}) + D/R \sin^{-1}(\sin\Phi / \sin\alpha)]$ ;

$j$  = aumento de latitude, a partir do equador;

$\alpha$  = ângulo de cruzar o equador;

$\Phi$  = latitude;

$\text{min}$  = minutos;

$\text{long}$  = longitude;

$D$  = número de dias por um ciclo;

$R$  = número da trilha.

O ângulo de visada dos sensores do SPOT HRV pode alcançar até 27° fora do nadir em cada lado da trilha. As três filas de uma passagem rasteiam 6 *pixels* cruzando a trilha. Contando os dois lados: oeste e leste, total de seis passagens é rastreado em uma única passagem. A tabela 13.4 mostra os números das passagens ao redor do nadir. Por exemplo, quando da passagem 1 no nadir do SPOT, os números das trilhas à esquerda são 6, 11 e 16 e à direita, 22, 17 e 12, que são consideradas como as seis filas ao longo de uma passagem. Com as fórmulas apresentadas por Price (1988), as localidades das passagens e horas e data de passagem podem ser calculadas.

### 13.3 Calibrações radiométricas

Todas as operações de pré-processamentos são direcionadas para restaurar as imagens adquiridas com os esforços de remover os efeitos dos ruídos causados pelas interferências atmosféricas e as limitações dos sistemas de satélite, a curvatura do globo, desgastes dos sensores em movimento e degradação dos sensores e deslocamento do satélite no espaço durante o tempo do seu funcionamento. Pelos processos de eliminação desses efeitos, os dados são literalmente restaurados em uma região específica sob condições atmosféricas semelhantes. Mas não se tem certeza de que os valores representam as realidades corretas e deve-se lembrar que as correções podem conter erros também. Todavia, os dados adquiridos têm 5% de erro embutidos, que são originados dos sinais das reflectâncias de alvos adjacentes

após o lançamento. Portanto, para os estudos das variabilidades interanuais, dos dados de NOAA AVHRR, obtidos de vários satélites da série NOAA, as correções radiométricas devem ser feitas. Depois os métodos de Rao e Chen (1995, 1996, 1999 e 2001) foram oficialmente adaptados pelo NESDIS/NOAA, como os métodos de calibrações radiométricas dos satélites da série NOAA. O método de Teillet e Holben é raramente usado pelos usuários.

### 13.3.1.2 Método de Rao e Chen

Rao e Chen (1995, 1996, 1999 e 2001) apresentaram os métodos de correções radiométricas para os satélites de série NOAA, incluindo NOAA 7, 9, 11 e 14 durante o período de 1995 a 2001 que são oficialmente divulgados como os métodos oficiais do NESDIS/NOAA. Os coeficientes de calibração dos canais 1 e 2 propostos por esses autores (1995 e 1999) foram utilizados para corrigir a degradação dos sensores de AVHRR com o tempo de uso (tabela 13.6). Esses coeficientes foram obtidos pela normalização de ângulo zenital solar e pela correção da distância entre o planeta e o Sol. Os coeficientes dos parâmetros de calibrações e os programas para procedimentos das calibrações das séries de NOAA 7 a NOAA 14 e NOAA KLM estão disponíveis na Internet: <<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/k1m/>>.

A tabela 13.7 apresenta as fórmulas para calcular os albedos calibrados e as radiâncias corrigidas dos canais 1 e 2 para os dados de NOAA 7, NOAA 9 e NOAA 11, gravados em formato de nível 1b com uma palavra de 10 bits. Para obter a radiância, multiplica-se o valor do albedo pelo  $100 \pi W_i / F_{io}$ . A tabela 13.8 lista os valores de  $W_i$  e  $F_{io}$ . O  $W_i$  representa largura equivalente da banda e  $F_{io}$  representa irradiância extraterrestre de uma determinada banda.

Tabela 13.7 – Equações para calcular os valores de albedos calibrados (%). Fonte: (RAO; CHEN, 1996).

Satélite	AVHRR	Albedo (%)
NOAA 7	Canal 1	$0,1100 \exp (0,01 \times 10^{-4} d) (C_{10} - 36)$
	Canal 2	$0,1169 \exp (1,20 \times 10^{-4} d) (C_{10} - 37)$
NOAA 9	Canal 1	$0,1039 \exp (1,66 \times 10^{-4} d) (C_{10} - 37)$
	Canal 2	$0,1136 \exp [0,98 \times 10^{-4} d) (C_{10} - 39,6)$
NOAA 11	Canal 1	$0,1060 \exp (0,33 \times 10^{-4} d) (C_{10} - 40)$
	Canal 2	$0,1098 \exp (0,556 \times 10^{-4} d) (C_{10} - 40)$

Tabela 13.8 – Os valores das larguras equivalentes de comprimento da onda,  $W_i$  ( $\mu\text{m}$ ) e irradiâncias solares extraterrestres,  $F_{io}$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) de NOAA AVHRR para calcular as radiâncias corrigidas. Fonte: (RAO; CHEN, 1995).

NOAA	$W_i$ ( $\mu\text{m}$ )		$F_{io}$ ( $\text{W m}^{-2}$ )	
	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2
AVHRR				
NOAA 7	0,108	0,249	177,5	261,9
NOAA 9	0,117	0,239	191,3	251,8
NOAA 11	0,113	0,229	184,1	241,1

empregados para estimar a temperatura da superfície e são mais difíceis por exigir mais dados meteorológicos que fornecem as descrições das condições atmosféricas locais e dados de emissividade em um local específico com boa acurácia.

### 13.4.1 Métodos de correção atmosférica no espectro solar

Os valores de radiância nas faixas de espectros solares obtidos pelos sensores de satélites são afetados por dois processos atmosféricos:

- a) absorções pelos gases e aerossóis atmosféricos;
- b) espalhamentos pelas moléculas e aerossóis.

Geralmente, as bandas espectrais dos sensores de satélites são selecionadas para evitar as faixas espectrais sujeitas a altas absorções atmosféricas. Entretanto, podem ocorrer algumas absorções residuais, que requerem suas correções para tentar melhorar a acurácia. Por causa dos processos complexos de interações entre atmosfera e as duas passagens de energia de radiação (os raios da radiação solar incidente e refletida pela superfície), que envolvem os processos múltiplos de espalhamentos, absorções, reflexões e emissões, é quase impossível de descrever matematicamente esses processos com bases físicas em exatidão. Portanto, as técnicas de modelagem, como o modelo de processos de transferência radiativa, são empregadas para simular esses processos. Um certo erro intrínseco embutido nos métodos de modelagem, que é induzido na técnica de modelagem pela simulação, nunca representa exatamente o mundo real. A tabela 13.15 lista os erros induzidos pela técnica de modelagem (TANRÉ; HOLBEN; KAUFMAN, 1992). Fundamentadas nas informações de magnitude dos efeitos dos constituintes atmosféricos e dos erros intrínsecos da modelagem, podem-se justificar e escolher quais são os modelos de correções atmosféricas que servem para melhorar os dados que serão aplicados com maior eficácia. Às contaminações atmosféricas nos dados de albedo e NDVI, atribuem-se os efeitos invariáveis do espalhamento Rayleigh e da absorção pelo ozônio e os efeitos variáveis das absorções pelo vapor de água e dos espalhamentos pelos aerossóis. O esquema de correção proposto por Tanré, Houlben e Kaufman (1992) é apresentado a seguir.

Tabela 13.15 – Lista dos erros induzidos pelas técnicas de modelagem para execução dos processos de correções atmosféricas dos dados obtidos via satélite NOAA AVHRR. Fonte: (TANRÉ; HOULBEN; KAUFMAN, 1992)

Processos de correções atmosféricas que induzem os erros	Canal 1 erro (%)	Canal 2 erro (%)
Erro absoluto na reflectância dos aerossóis pelo acoplamento entre aerossóis e vapor de água	0 - 5	0 - 20
Erro absoluto na reflectância pelo acoplamento entre moléculas e aerossóis	0 - 0,04	0 - 0,015
Erro relativo na transmitância pelo acoplamento entre moléculas e aerossóis	0 - 2	0 - 1,5
Erro absoluto no albedo esférico pelo acoplamento entre moléculas e aerossóis	0 - 0,02	0 - 0,005

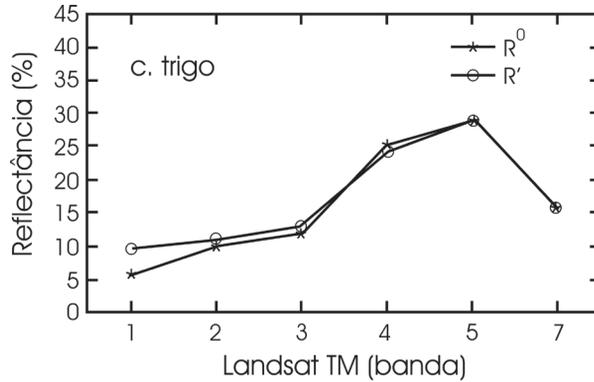


Figura 13.6 – Comparações das reflectâncias geradas pelo modelo de correções atmosféricas ( $R^0$ ) e as reflectâncias medidas na plantação de trigo ( $R'$ ), localizada em Tuscan, leste de Florence, Itália. Fonte: (GILABERT; CONESE; MASELLI, 1994).

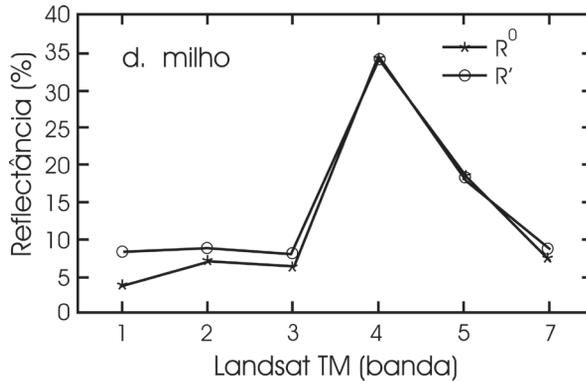


Figura 13.7 – Comparações das reflectâncias geradas pelo modelo de correções atmosféricas ( $R^0$ ) e as reflectâncias medidas na plantação de milho ( $R'$ ), localizada em Tuscan, leste de Florence, Itália. Fonte: (GILABERT; CONESE; MASELLI, 1994).

#### 13.4.1.4 Métodos de correção para o SPOT

Santer et al. (1992) desenvolveram um algoritmo para calibrar as reflectâncias medidas pelos sensores HRVs do satélite SPOT baseadas nas medições de reflectâncias espectrais e as concentrações dos constituintes atmosféricos na região de La Crau no sul da França, realizadas nos meses de março e junho de 1989. As medições incluem: radiâncias incidente e refletida nas bandas espectrais do SPOT pelos espectrorradiômetros, aerossóis em funções de distribuição de tamanho e espessura ótica espectral, transmissões dos gases atmosféricos determinadas pelas medições óticas passivas, radiossondagens e espalhamento Rayleigh pelos gases moleculares. Os dados coletados em campo foram usados para validação do modelo desenvolvido. Para calcular a transmitância atmosférica, a reflectância aparente ( $\rho_i^*$ ) do canal  $i$  foi calculada separadamente pelo efeito de absorção e pelo efeito de espalhamento que é representada pela equação (13.89). Os dados de resposta espectral do filtro interno do SPOT foram fornecidos pelo Centro Nacional de Estudos Espaciais (CNES) da França. Os dados de ozônio e vapor de água foram

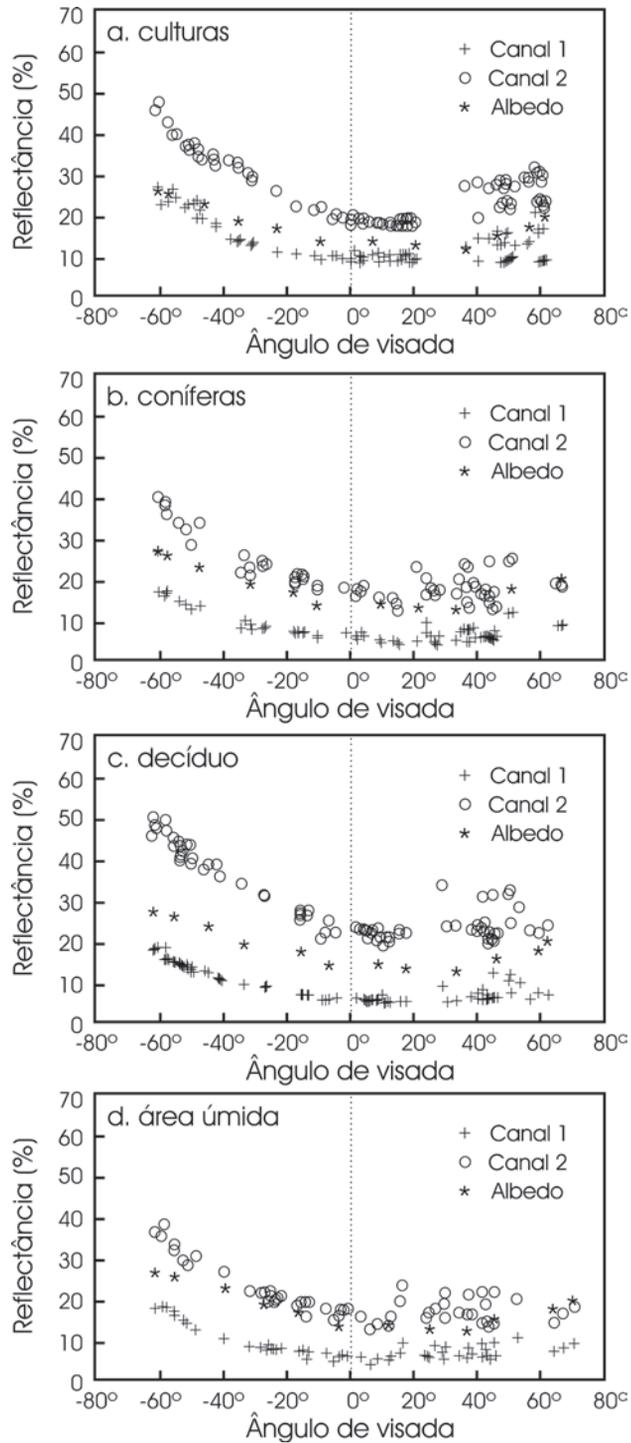


Figura 13.11 – Os efeitos de ângulo de visada do satélite NOAA AVHRR pelas reflectâncias bidirecionais (Bidirectional Radiation distribution Function – BRDF) nos quatro tipos de vegetação: a) plantação de culturas; b) florestas coníferas; c) florestas decíduas; d) áreas úmidas no pico da estação chuvosa, em julho de 1988, da região Central do Canadá. Fonte: (CIHLAR; MANAK; VOISIN, 1994).

A stylized graphic of the number 14. The digit '1' is formed by a blue vertical bar with a red square at its base. The digit '4' is formed by a blue vertical bar with a diagonal line from the top-left to the bottom-right, and a horizontal bar at the bottom. The entire graphic is outlined in black.

# 14

**Capítulo**

## **Classificação de Imagem Digital**

---

## 14.1 Introdução

As imagens digitais dos satélites ambientais são usadas para o monitoramento das evoluções dinâmicas de usos do solo, ecossistemas e dos eventos catastróficos da superfície terrestre. Gallego (2004) resumiu que as imagens geradas pelos satélites podem ser usadas para estimar as áreas de usos do solo em três maneiras:

- a) identificação, classificação, delineamento e estimativa das áreas ocupadas pelas várias classes de usos do solo baseadas nas imagens de satélites. Os dados de observações na superfície terrestre são usados para treinamento no processo da classificação, validação dos métodos de classificação e análise dos *pixels* de mistura;
- b) as imagens de satélites podem auxiliar o levantamento das amostras de várias maneiras, incluindo: definição das unidades das amostras, estratificação das amostras, documentação gráfica para o levantamento em campo e controle de qualidade da coleta de dados em campo.
- c) as técnicas de regressão estatística e os softwares de Sistema de Informações Geográficas (SIG) podem ser aplicados para monitorar e prever as evoluções espaciais e temporais da superfície, combinando as informações de imagens de satélites com as obtidas por meio do levantamento em campo;

Coppin et al. (2004) apresentaram uma revisão dos métodos de detecção das evoluções dinâmicas dos ecossistemas. Apontaram que as técnicas baseadas nos dados multitemporais e multiespectrais, adquiridos pelos satélites, demonstraram a alta potencialidade na identificação, classificação, delineamento, mapeamento e detecção das evoluções de usos do solo. Sugeriram também que as técnicas digitais de detecção da evolução de usos do solo envolvem três aspectos:

- a) os parâmetros, usados para detectar as variabilidades interanuais de ecossistemas, devem ser claramente definidos de acordo com perspectivas diferentes. As imagens digitais e os perfis das reflectâncias espectrais adquiridas devem ser adequados corretamente, permitindo a comparação das mudanças dos ecossistemas ou usos do solo;
- b) o procedimento de pré-processamento dos dados de satélites deve ter uma ligação direta entre as imagens e os perfis temporais dos dados digitais de satélites ou seus derivados e os fenômenos biofísicos dos ecossistemas;
- c) o método de detecção da mudança deve ter um esquema analítico e deve ser validado em campo rigorosamente.

Ferreira e Huete (2004) monitoraram a evolução sazonal da vegetação na região dos cerrados brasileiro usando os índices de vegetação, incluindo NDVI e SAVI obtido pelos dados de NOAA AVHRR LAC. Observaram que ambos os perfis de NDVI e SAVI correspondem bem aos padrões dos ciclos fenológicos dos principais tipos de vegetação dos cerrados, incluindo cerrado, pastagens e culturas agrícolas. Apontaram que o NDVI

Os satélites de GPS transmitem continuamente sinais de frequência de rádio, que podem ser captados pelas antenas receptoras dos usuários. Cada estação receptora é composta, basicamente, de antena, oscilador, circuito de recepção, memória e fonte de alimentação (bateria). Os receptores recebem e armazenam mensagens transmitidas pelos satélites, medem a distância do centro de fase da antena até cada um dos satélites captados e a maioria deles calcula e apresenta as coordenadas do local em sistema de referência predefinido. A acurácia da distância é baseada na equação de distância calculada pela velocidade multiplicada pelo tempo. A velocidade do sinal da energia eletromagnética é próxima à velocidade da luz, cerca de 300.000 km/s. Uma vez que a velocidade do sinal é conhecida, só resta obter o tempo gasto pelo sinal enviado do satélite ao receptor para calcular a distância. Hoje, o uso do GPS é muito requisitado nos processos de mapeamento e georreferenciamento por meio da coleta de dados das coordenadas de um objeto em um local específico a ser mapeado ou identificado na imagem digital. Os GPS de navegação são mais simples e têm a acurácia espacial de 5 a 100 m. Os GPS de topografia, chamado Differential Global Positioning System (DGPS) têm sua acurácia de 1 a 5 m. O GPS geodésico tem a acurácia de 5 cm.

### 14.2.7 Geração de mapa digital

Para gerar um mapa digital, tal como topografia, representado pelas curvas de nível ou redes de drenagem, executam-se as seguintes tarefas: escaneamento da carta cartográfica, georreferenciamento e vetorização. As cartas topográficas e de hidrografia são georreferenciadas no *software* Spring ou outros *softwares* comerciais, a partir da aquisição das coordenadas planas via teclado extraídas das cartas em formato analógico. Seqüencialmente, para cada carta georreferenciada são digitalizadas as cotas equidistantes no formato DEM ou Modelo Numérico do Terreno (MNT), o qual possibilita representar os valores da cota (altitude) no mapa digital.

#### 14.2.7.1 Escaneamento de base cartográfica

Os mapas de base cartográfica, incluindo: hidrologia, limites de município e Estado e curvas de nível de 40 m e 50 m de resolução no território brasileiro, são divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) baseados nos mapas cartográficos em UTM elaborados com os dados levantados em 1966 na escala de 1:100.000 e publicados no ano 1984 pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) do Ministério do Exército do Brasil. A figura 14.5 mostra um exemplo de um mapa da base cartográfica de Palmeiras, MS, abrangendo o Distrito de Palmeiras e o município de Dois Irmãos do Buriti no Estado de Mato Grosso do Sul, na escala 1:100.000, que possibilitou a utilização do referenciamento (coordenadas) original da própria carta topográfica.

georreferenciado. Na figura 14.7, as linhas das curvas de nível representam as cotas com uma resolução de 40 m após o registro do valor da cota de cada curva na tabela de atributos. Na figura 14.8, as informações gráficas de redes de drenagem dos rios são armazenadas em coordenadas vetoriais, com topologia arco-nó que contém atributos específicos. Os atributos de arcos indicam o sentido de fluxo, e os atributos nós indicam a impedância.

A hipsometria trata da representação cartográfica do relevo de uma região em altitude acima do nível do mar, delimitada pelas curvas de nível. Gerada a partir do fatiamento da carta altimétrica, a hipsometria foi dividida em oito intervalos de altitude eqüidistantes de 40 metros. O DEM pode ser gerado baseado no mapa de hipsometria usando o *software* de 3-D disponível no SPRING ou ArcView. A figura 14.9 mostra um mapa topográfico em 3-D gerado com os mapas da base

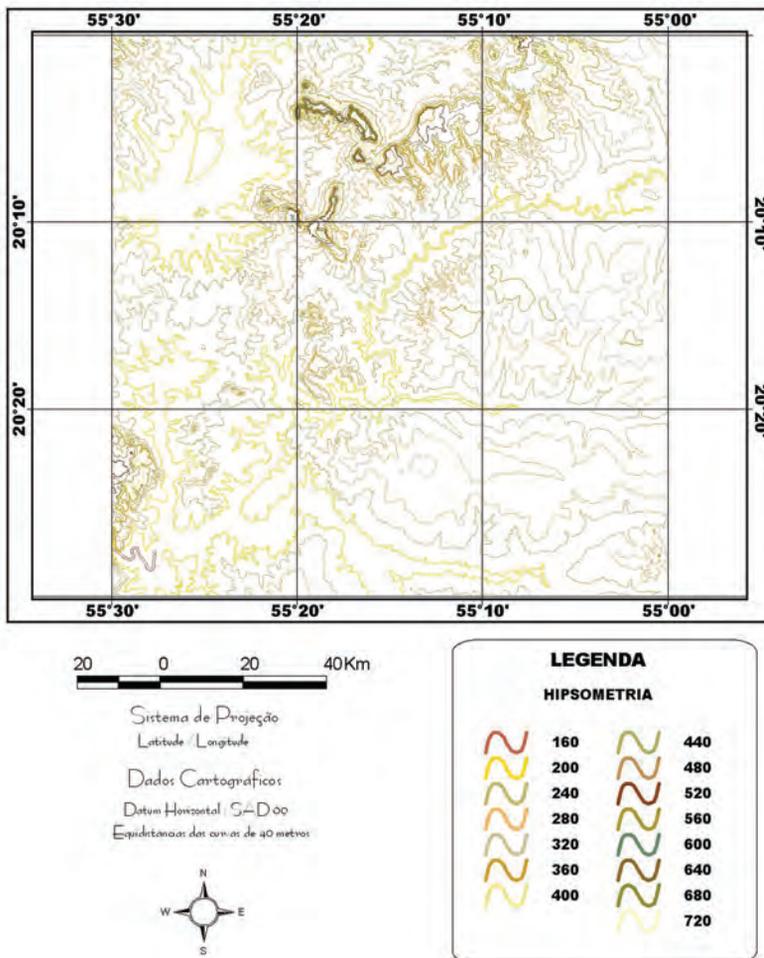


Figura 14.7 – Exemplo do mapa digital de curvas de nível produzido pelo processo de vetorização gerado com os mapas da base cartográfica 1:100.000, articulação MIR- 2550 – Palmeiras, Distrito de Palmeiras e município de Dois Irmãos do Buriti, Estado de Mato Grosso do Sul. Fonte: (LIU et al., 2005).



Figura 14.10 – Um sistema de DGPS tipo Pro XRS e 4.600 LS, Trimble, incluindo: um sensor DGPS montado em cima de um caminhonete, o DGPS e uma estação referencial fixada em uma torre de água localizada na CPAP/EMBRAPA. Fonte: (LIU et al., 2005).

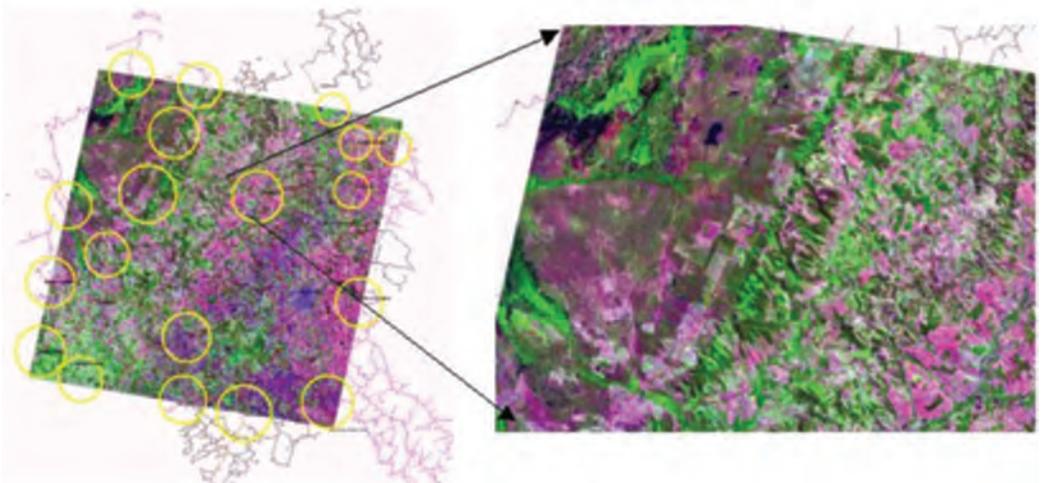


Figura 14.11 – Seleção dos pontos para proceder à coleta de pontos de controle em campo para o georreferenciamento das imagens. Os ciclos são definidos para elaboração de um plano de visita para coleta de pontos. Cartas e imagens usadas: cena Landsat órbita 225 ponto 74, integrando 22 cartas topográficas. Fonte: (LIU et al., 2005).

#### 14.4.4 Reflectâncias espectrais dos solos

As reflectâncias dos solos secos, solos muito úmidos, solos úmidos e solos arenosos são analisadas para facilitar a identificação. As características de reflectâncias espectrais do solo, apresentadas no Capítulo 3, podem ser aplicadas para facilitar a identificação dos tipos de solo. Resume-se que os fatores que mais exercem influência no comportamento espectral do solo são os teores da matéria orgânica, textura, capacidade de troca de cátions (CTC), composição mineralógica, rugosidade e umidade. O aumento da matéria orgânica, teor de argila e CTC apresentam uma correlação negativa com os valores de reflectâncias dos solos. A umidade do solo não acarreta uma mudança na resposta espectral da curva de reflectância do solo, porém os solos úmidos possuem menor reflectância que os secos. As cores vermelha e amarela dos solos estão associadas aos teores das diferentes formas de óxido de ferro. Na faixa do infravermelho próximo, a absorção da radiação está relacionada como o teor de óxido de ferro no solo. Várias bandas-chave que podem ser usadas para identificação do tipo do solo em função da variação das propriedades físico-químicas do solo (FERREIRA; MACHADO; ANDRADE, 2000) são listadas a seguir:

- a) 0,57  $\mu\text{m}$  – monitoramento de matéria orgânica em solos sem cobertura vegetal;
- b) 0,7 e 0,9  $\mu\text{m}$  – monitoramento do conteúdo de compostos de ferro férrico;
- c) 1,0  $\mu\text{m}$  – monitoramento do conteúdo de compostos de ferro ferroso;
- d) 2,2  $\mu\text{m}$  – monitoramento do teor de água no solo.

As áreas de diferentes tonalidades de violeta mostradas na figura 14.15 foram selecionadas para extrair, analisar e identificar as assinaturas espectrais dos quatro tipos de solo: seco, muito úmido, úmido e arenoso. A figura 14.21 mostra as reflectâncias espectrais das oito bandas do Landsat 7 ETM+ dos *pixels* puros de cada tipo do solo. A barras em cada ponto da linha indicam o valor de desvio-padrão (S) dos 10 *pixels* puros de cada tipo do alvo identificado na imagem. A figura demonstra a utilização da variação da reflectância em função da composição mineralógica e o teor de umidade do solo para identificação do tipo do solo dos alvos de solo nu. Nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, os valores de reflectância dos alvos diminuíram em função do teor da umidade no solo na seguinte ordem: solo arenoso, seco, úmido e muito úmido. A alta reflectância do solo arenoso é por causa da menor presença de óxidos de ferro e da textura grossa do solo. O conteúdo de óxido de ferro do solo pode causar uma diminuição da reflectância de até 40% na faixa do visível. Os solos de textura fina, tais como solos argilosos, por causa dos aumentos de matérias orgânicas e umidade de solo, diminuem as reflectâncias. Os solos com baixo nível de areia (< 30% areias) têm baixa reflectância nas bandas 0,4 a 0,86  $\mu\text{m}$ . Os solos de areias puras têm alta reflectância nessa faixa. É importante notar que, na condição natural do campo, a reflectância é afetada pela forma da superfície e pelo tamanho de agregados, não só a composição química dos solos.

fundo que a reflete, penetra na água de novo, sofre de novo espalhamento, absorção e refração e sai da superfície da água. Essa porção da radiação solar que entra na água e sai da água é a que os sensores medem para monitorar as propriedades da água, tais como profundidade e qualidade. A qualidade da água varia em função das presenças de materiais orgânicos e inorgânicos na água.

As áreas de várias tonalidades de azul mostradas na figura 14.16 foram usadas para obter e analisar as reflectâncias das várias superfícies de água, tais como água rasa, água com vegetação submersa rasa, água com vegetação submersa profunda, água profunda, água com vegetação flutuando e água turva com sedimentos. A figura 14.22 mostra as reflectâncias espectrais das oito bandas do Landsat 7 ETM<sup>+</sup> dos *pixels* puros de cada tipo de água. As barras em cada ponto da linha indicam os valores de desvio-padrão (S) dos 10 *pixels* puros de cada tipo de água identificado na imagem. Foram observados que a área com sedimentos apresentou a maior reflectância nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, seguida pela água rasa por causa da alta reflectância do solo no fundo. Esse fato era esperado, visto que um dos fatores que altera mais significativamente a resposta espectral da água é a concentração de sedimentos em suspensão (CAMPANA; EID, 2001). No caso de água limpa e rasa, a luz espalhada pela água é refletida pelo solo no fundo, que é relativamente fácil de ser detectada, o que também justifica os maiores valores de reflectância apresentados pela água rasa e área com sedimentos em relação à água profunda.

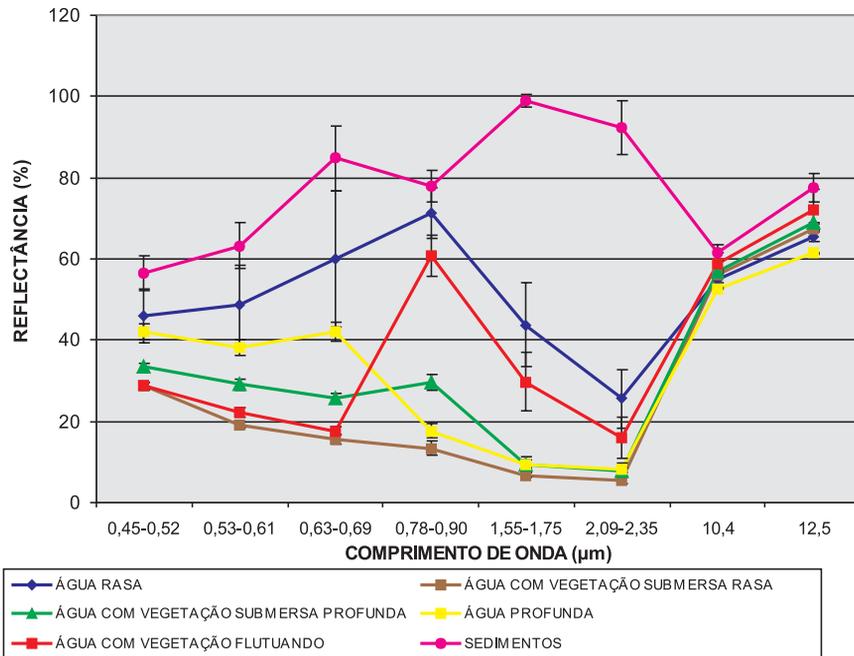


Figura 14.22 – Reflectâncias espectrais (%) de água rasa, água com vegetação submersa rasa, água com vegetação submersa profunda, água profunda, água com vegetação flutuando e área com sedimentos. A barra em cada ponto da linha indica o valor do desvio-padrão (S) dos 10 *pixels* representativos de cada tipo do alvo identificado na imagem. (Imagem usada: Landsat 7 ETM<sup>+</sup> cena 227/74, 7 de novembro de 1999). Fonte: (LIU, 2003).



# GIS

**Capítulo**

**Sistema de Informações  
Geográficas**

---

## 15.1 Introdução

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) é um modelo matemático dinâmico construído com um banco de dados digitais gerenciados para facilitar a atualização e a aplicação dos dados georreferenciados de infinitas camadas de informação no planejamento e na otimização de uma determinada tarefa. O SIG é empregado na integração e análise de dados provenientes de fontes dispersas, como imagens digitais de satélites, mapas digitais de usos e tipos de solo, topográficos, hidrologias, vegetação, floras e faunas, cartas climatológicas, censos socioeconômicos e outros. Para alcançar seu objetivo de aplicações diversas, a construção de um banco de dados digitais georreferenciados é crucial. Os processos incluem a escolha, obtenção e armazenagem de dados, de modo padronizados, em escalas compatíveis para fornecer e facilitar aos usuários a utilização, recuperação e manipulação das várias camadas de dados para atender suas aplicações específicas.

A principal função de um SIG é armazenar, recuperar, analisar e gerar mapas desejados em um sistema de *software* implantado no computador para aprimorar o plano de manejo dinâmico. Debinski, Kindscher e Jakubauskas (1999) usaram um modelo SIG construído com os dados de Landsat TM para catalogar os habitats de flora e fauna dos ecossistemas do Parque Nacional de Yellowstone nos Estados Unidos e o utilizaram para previsão das espécies a serem encontradas nos habitats. O Departamento de Pesca e Jogos Esportivos do Estado da Califórnia, USA, apresentou os atlas da biodiversidade do Estado empregando a técnica de SIG para geração do mapa de espécies em extinção (<<http://atlas.dfg.ca.gov/>>, 2005). Os mapas de base cartográfica, que freqüentemente são usados na construção de modelo SIG, constituem diferentes tipos de dados geográficos, como imagens digitais de satélites, mapas de usos do solo, vegetação e modelos numéricos de terreno com seus atributos definidos nas tabelas de cada mapa temáticos. Portanto, um SIG é formado por interface com o usuário, entrada e integração de dados gráficos e tabulares, funções de processamento gráfico e de imagens, visualização e plotagem de dados geográficos. Resume-se a seguir a estrutura de um SIG, que inclui processamento de dados, modelo estático e modelo dinâmico, construído com a integração dos dados dinâmicos espaciais e temporais por meio da modelagem dos processos físicos e matemáticos.

Os três componentes do modelo SIG:

- a) processamento de dados:
  - a1 – entrada de dados digitais;
  - a2 – georreferenciamento de dados;
  - a3 – quantificação e geração de geo-objetos pontuais em matricial;
  - a4 – geração de mapas temáticos;
- b) construção de modelo estático:
  - b1 – seleção de atributos;
  - b2 – geração de índice de cada atributo;
  - b3 – assinar pesos de cada atributo;
  - b4 – geração de mapa de índice de cada tema específico;

localidade de escola, fazendas e redes de drenagens de uma bacia hidrológica, são dados do tipo geo-objetos porque cada elemento é um objeto geográfico, possuindo atributos específicos associados a várias representações gráficas.

Para gerenciar o banco de dados, vários *softwares* comerciais estão disponíveis, como ArcView, ERDAS, ENVI e dominós públicos, tais como SPRING. Isto facilita a preparação de base de dados no Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD). Esses programas geralmente integram as informações geográficas no banco de dados, relacionando os atributos convencionais dos objetos geográficos na forma de tabelas e arquivos. Os dados são organizados na forma de uma “tabela” em que as “linhas” correspondem aos geo-objetos e as “colunas” correspondem aos “atributos”. Cada atributo não-espacial é assinado um identificador único ou rótulo, por meio do qual é feita a ligação lógica com sua respectiva representação gráfica.

### 15.3 Modelo digital de elevação

Os dados de DEM são fundamentais para a construção de modelos de SIG aplicados no planejamento e gerenciamento dos recursos ambientais. Os dados de elevação com alta resolução coletados pelos métodos convencionais, como levantamento topográfico com teodolitos e DGPS, são de alto custo e demorados. As novas técnicas de Interferometria SAR, aplicadas para geração de cartas topográficas, são mais rápidas na coleta e processamento de dados com baixo custo.

Recentemente, ocorreu uma missão sem precedentes na história do sensoriamento remoto. O ônibus espacial Endeavour (Space Shuttle Endeavour) orbitou o globo por 11 dias durante o período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, realizando a Missão Topográfica por Interferometria SAR (Shuttle Radar Topographic Mission – SRTM). Os dados gerados foram coletados pelo sensor de varredura lateral da banda C do SAR. A missão SRTM é o resultado de uma colaboração entre a National Aeronautics and Space Administration (NASA), National Imagery and Mapping Agency (NIMA), German Space Agency (DLR) e Italian Space Agency (ASI), com o objetivo de gerar um modelo digital de elevação da terra usando Interferometria por Radar. O instrumento SRTM consiste de um equipamento espacial de Radar Banda C modificada com um mastro e uma antena adicional para formar um interferômetro com 60 metros de distância em relação à base.

Essa missão gerou um banco de dados do DEM do globo inteiro, considerado o mais completo sobre a topografia do planeta Terra cobrindo 80% das áreas emersas da terra entre 60° N e 56° S. Aproximadamente 12,4 Terabytes de dados brutos (mais de 20 mil CD-ROMs) foram coletados na missão SRTM. Toda a base da SRTM é constituída na forma de imagens de *pixels* de duas resoluções espaciais variando 1 arco-segundo (0,0002777 graus ou cerca de 30 m no equador) a 3 arcos-segundos (0,0008333 graus ou cerca de 90 m). A missão SRTM produziu uma grade ponto com acurácia horizontal de 30 m (podendo chegar a 20 m, dependendo da latitude) e com acurácia vertical de 10 m (podendo chegar a 4 m). Isto significa que objetos com o tamanho de 30 m em diâmetro e de 10 m de altura são registrados pelo Interferômetro SAR do SRTM.



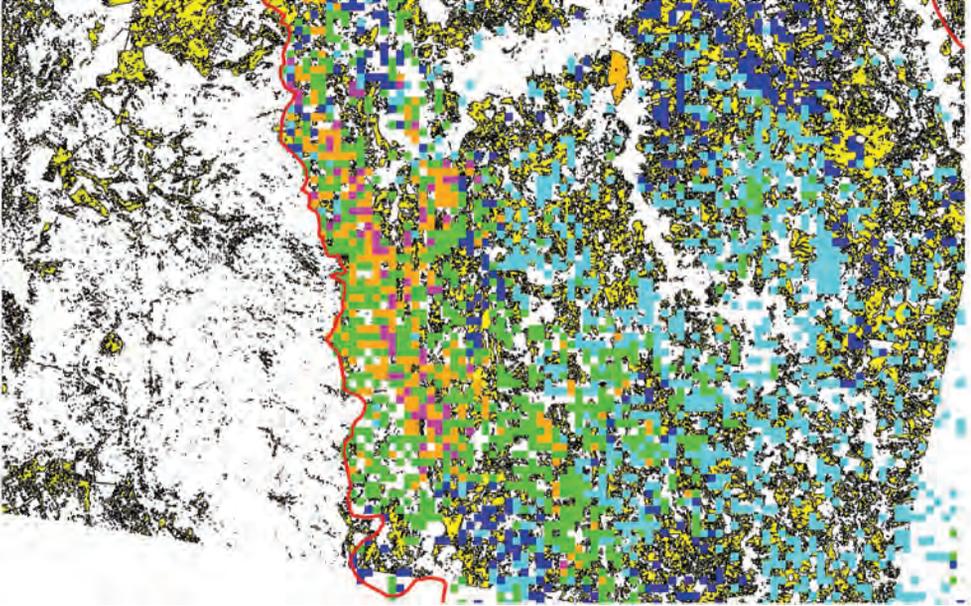


Figura 15.7 – Mapa de áreas de conflito da Bacia do Rio Miranda indicadas pelas cores laranja, vermelha e violeta. Fonte: (LIU, et al., 2005a).

### 15.5.5 Simulação e validação dos modelos TMDL e ReVA

Os modelos WASP, TMDL, QUAL2k e ReVA desenvolvidos por EPA, USA, são recomendados para gerar os métodos alternativos do gerenciamento dos recursos hídricos e do desenvolvimento sustentável da BRM. O modelo fornece um esquema integrado de modelagem em uma bacia hidrográfica, análise dos manejos alternativos de fontes poluentes pontuais e não pontuais e para desenvolvimento socioeconômico regional. Os TMDL, QUAL2k, WASP e ReVA são modelos que coordenam os seis componentes essenciais para analisar o desempenho da bacia hidrográfica, os impactos das atividades humanas e as qualidades de água e solo. São eles:

- banco de dados gerenciado por SIG pelo software ArcView GIS;
- sistemas de desenvolvimento socioeconômico do nível municipal e da bacia de forma integrada;
- ferramentas de avaliação para avaliar qualidade de água e fontes de poluentes acumulados em várias escalas;
- utilidades, incluindo entrada de dados locais, uso da terra e classificação por DEM, delineamento do limite da bacia, manipulação de dados observados da qualidade de água;
- modelos de bacias hidrográficas e qualidade da água, incluindo:
  - WASP
  - Modelo QUAL2K
  - Modelo NPSM (*Non Point Sources Model*)
  - TOXIRROUTE (sub-modelo de materiais tóxicos)
- ferramentas ReVA para interpretação dos resultados gerados por modelos.

### 15.5.6.1 Evolução de usos do solo

Os dados digitais da fotografia aérea do 1966, fornecida pelo DSG, e das imagens de Landsat Cena 225/74 de 1985, 1996 e 2000 podem ser usados para calcular a taxa de desmatamento. O *software* SPRING ou ArcView/ERDAS pode ser usado para classificação de usos do solo, delineamento das áreas de cada classe e para calcular as porcentagens de floresta nativa e áreas ocupadas pelas atividades humanas. Resumem-se as atividades de avaliação dos impactos de desmatamento nas mudanças climáticas regionais a seguir:

- os dados digitais de imagens de CBERS e Landsat do período de 1985 a 2005 da BRM podem ser processados;
- classificação de usos de solo a partir das imagens de CBERS e Landsat;
- delinear as áreas de desmatamento de um período de cada cinco anos;
- validação dos métodos alternativos com os dados observados em campo;
- selecionar um método mais adequado para executar a classificação final;
- delinear as áreas das principais classes de usos de solo;
- geração de mapa de usos atuais de solo.

### 15.5.6.2 Mudança climática regional

Os dados mensais de precipitação e temperatura da estação meteorológica fornecidos pelo Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte (CNPGC)/EMBRAPA, Base Aérea de Campo Grande e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do período de 1982 a presente podem ser usados para analisar a tendência de mudança climática da região do estudo. Os dados cumulativos anuais do NOAA AVHRR NDVI GAC com a resolução espacial de 8 km do período de 1981 a presente, fornecidos pelo GSFC/NASA, podem ser usados para calcular a taxa de mudança de cobertura de vegetação. As correlações entre NDVI x Precipitação e entre NDVI x Temperatura podem ser obtidas para analisar o impacto de desmatamentos nas mudanças climáticas.

Liu et al. (2005b) apresentaram um estudo de impactos de desmatamento nas mudanças climáticas do município de Terenos, MS, do período de 1966 a 2005, usando as imagens de Landsat dos anos de 1985, 1996 e 2000 e as fotografias aéreas de 1966 para delinear as áreas de desmatamento e os dados de NDVI, temperatura e precipitação para analisar as tendências dos impactos. O município de Terenos é um dos 23 municípios dentro da BRM. Os resultados mostraram que a porcentagem de vegetação diminuiu de 68% para 35%; o NDVI anual diminuiu de 7,3 para 6,8 (figura 15.8); a temperatura média anual aumentou de 22,5 °C para 24,6 °C (figura 15.9) e precipitação anual diminuiu de 1.500 a 1.250 mm (figura 15.10). Apontaram que a diminuição de área de verde de 33% da área total do município de Terenos resultou no aumento de temperatura de 2,1 °C e diminuiu a precipitação anual de 250 mm nos últimos 20 anos. Isto demonstrou que os impactos dos desmatamentos na região de Terenos sobre as mudanças climáticas da região foram evidentes.

# 16 Modelo Universal de Previsão de Safra Agrícola (MUPSA)

## 16.1 Introdução

Neste projeto, será desenvolvido, testado e validado um modelo versátil de previsão de safra agrícola chamado Modelo Universal de Previsão de Safra Agrícola (MUPSA). Pode-se adotá-lo para qualquer cultura e em qualquer local, desde que esteja em nível de um *pixel* da resolução espacial dos satélites. O MUPSA serve para atender os satélites do futuro que fornecem informações digitais de alta resolução espectral, espacial e temporal. O termo *mu-p-sa* significa olho de Buda em chinês e foi adotado para indicar que, diante dos "olhos" dos sensores do satélite, nada escapa. Neste estudo, as multifontes de dados com as resoluções espectrais, espaciais e temporais variadas, obtidas por diversos tipos de satélite, e as observações terrestres serão integradas para obter os dados em nível de um *pixel* com as resoluções mais altas possíveis.

O ciclo fenológico e as durações dos estágios de desenvolvimento de uma determinada cultura são dados singulares que podem ser identificados pela curva fenológica do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), controlado pelo relógio biometeorológico que contabiliza os efeitos das variações espaciais e temporais das condições ambientais e dos avanços tecnológicos dos sistemas de manejo das culturas. O MUPSA identifica um tipo de vegetação em função da evolução temporal do NDVI e dos graus dia do crescimento, Growth Degree Day (GDD), acumulados dos estágios fenológicos e informa as condições dos crescimentos e desenvolvimentos fisiológicos de uma determinada vegetação de cada área vigiada por um *pixel* rastreado por satélites. Qualquer fator que afete o crescimento da vegetação pode ser identificado. Portanto, além de prever a safra agrícola, essas informações podem ser integradas para a implantação de um sistema de agricultura de precisão via satélite e de um sistema de manejo sustentável de recursos ambientais gerenciados pelo Sistema de Informações Geográficas (SIG).

O MUPSA aplica o classificador Artificial Neural Networks (ANNs) para identificar uma determinada cultura *pixel* por *pixel*, integrando as evoluções multitemporais e multiespaciais dos parâmetros de multifontes, incluindo multiespectrais, NDVI, GDD, temperatura da superfície (Ts), temperaturas máxima e mínima do ar da superfície (Tamax, Tamin), precipitação (PCP), avanços tecnológicos (AT), índice de área foliar (Leaf Area Index – LAI), radiação fotossintética ativa (Photosynthetic Active Radiation – PAR), fração da radiação fotossintética ativa absorvida pela copa da vegetação (Fractional Photosynthetic Active Radiation – FPAR), produtividade primária bruta (Gross Primary Productivity/Photosynthesis – GPP/PSN) e produtividade primária líquida (Net Primary Productivity – NPP). O MUPSA pode ser desenvolvido paralelamente quando se tiver o domínio das tecnologias aplicando o software ANNs que use os padrões gerados com as cinco assinaturas singulares, incluindo assinatura espectral, espacial, temporal, angular e polarizada, integrando-se NDVI e GDD para a identificação *pixel* por *pixel* de um determinado tipo de vegetação.

Após a identificação dos *pixels* ocupados por uma determinada cultura, é calculada a área plantada total em níveis de município, Estado e nação. Em seguida, o MUPSA estima a produtividade de uma determinada cultura em um determinado município em função de PSN, NDVI, PAR e Ts dos vários estágios do ciclo fenológico, aplicando as técnicas estatísticas de regressão linear múltipla. A PSN de um *pixel* será calculada em função de eficiência fotossintética ( $\epsilon$ ), NDVI e PAR, enquanto a PSN de uma determinada cultura em nível municipal será calculada com o peso de PSN de um determinado *pixel* obtido pela razão da área de curva do NDVI do *pixel* pela área total das curvas de NDVI dos *pixels* ocupados pela mesma cultura plantada no município. Para cada cultura, os principais municípios que representam a produção total de um determinado Estado serão incluídos na construção do modelo estadual. Os modelos estaduais serão incluídos na construção do modelo nacional. O MUPSA de uma determinada cultura será desenvolvido usando os dados dos parâmetros gerados pelos dados orbitais e terrestres do período de 2000 a 2007 e validado com os dados das produções agrícolas do período de 2007 a 2010 publicados pelo IBGE.

Os objetivos do projeto são:

- Primeira etapa (dois anos)
  - Desenvolvimento e validação do MUPSA na estimativa de área plantada de uma cultura, aplicando o classificador ANNs. O modelo integra as informações das evoluções multitemporais e multiespaciais dos parâmetros, incluindo multiespectrais, NDVI, GDD, Ts, Tamax, Tamin, PCP, AT, LAI, PAR, FPAR, GPP/PSN e NPP.
  - Condução dos experimentos para coletar os dados observados de GDD, Ts, Tamax, Tamin, LAI, NDVI, PAR, radiação solar incidente (Rs), radiação solar líquida (RI), PSN,  $\epsilon$ , data do plantio, datas de início e término e durações de todos os estágios do crescimento e ciclo fenológico das principais culturas em diversas plantações próximas às estações meteorológicas para a calibração dos parâmetros gerados por satélites e a validação do método desenvolvido no MUPSA.
  - Testar e avaliar a potencialidade do MUPSA na previsão de safra agrícola para a cultura de soja em nível

Prince (1991a) tratou do valor constante da eficiência fotossintética para uma determinada espécie de pastagem durante o período considerado para calcular a sua produtividade. Além disso, Prince (1991b) apresentou uma lista dos valores de eficiência fotossintética encontrados nas bibliografias (tabela 12.8). Esses valores foram obtidos nos campos experimentais e variam de 0,2 a 4,8 g/MJ, enquanto os valores teóricos variam de 4,5 a 7,6 g/MJ (LEMON, 1969).

No Brasil, ainda não há os valores disponíveis de  $\epsilon_f$  dos principais tipos de vegetação. É importante realizar um experimento para determinar e fornecer os valores de  $\epsilon_f$  dos principais tipos de vegetação que servirão para a estimativa da taxa de fixação de CO<sub>2</sub> via satélites.

## 16.2.2 MUPSA

Todos os métodos existentes de previsão de safra agrícola de certa maneira têm suas vantagens e desvantagens. O MUPSA é um modelo renovador que agrega as tecnologias disponíveis de previsão de safra agrícola com a finalidade de quebrar as barreiras dos métodos desenvolvidos atualmente, que são limitados para algumas culturas específicas e não são aplicáveis para qualquer cultura de interesse em qualquer plantação.

Os métodos de reconhecimento de padrão composto pela superfície multiespectral multitemporal para a estimativa da área plantada funcionam bem sobre as condições ótimas de crescimento e desenvolvimento de uma determinada cultura. As condições do crescimento da cultura podem se alterar enquanto as condições ambientais e os sistemas do manejo da cultura se alterarem, o que pode dificultar a sua identificação. Cada planta tem sua capacidade singular de absorver a energia solar, o gás carbono e a água para fabricar as matérias secas, que se manifesta em diferentes características fisiológicas do crescimento sob diferentes condições climáticas e ambientais. O crescimento de uma planta é afetado pelos fatores climáticos, ambientais e fisiológicos apresentados no fluxograma da figura 12.5. Portanto, uma superfície multiespacial e multitemporal gerada pelo método de classificação ANNs usando o reconhecimento de padrão pode ser afetada pelas variações dos fatores climáticos e ambientais e pela adaptação das novas tecnologias dos sistemas de manejo das culturas. O MUPSA tenta integrar os efeitos das variações temporais e espaciais desses fatores no classificador ANNs para restabelecer os padrões singulares de cada cultura de interesse.

O MUPSA aplica o classificador ANNs para identificar *pixel* por *pixel* uma determinada cultura, integrando as evoluções multitemporais e multiespaciais dos parâmetros multiespectrais, NDVI, GDD, temperatura da superfície (Ts), temperaturas do ar máximo e mínimo da superfície (T<sub>amax</sub>, T<sub>amin</sub>), precipitação (PCP), avanços tecnológicos (AT), índice de área foliar (Leaf Area Index – LAI), radiação fotossintética ativa (Photosynthetic Active Radiation – PAR), fração da radiação fotossintética ativa absorvida pela copa da vegetação (Fractional Photosynthetic Active Radiation – FPAR), produtividade primária bruta (Gross Primary Productivity/Photosynthesis – GPP/PSN) e produtividade primária líquida (Net Primary Productivity – NPP).

Após a identificação dos *pixels* ocupados por uma determinada cultura, será calculada a área plantada total em níveis de município, Estado e nação. Em seguida, o MUPSA será construído para a estimativa da produtividade de uma determinada cultura em nível municipal em função de variáveis independentes, como PSN, NDVI, PAR, Ts e  $\Delta$ NDVI (taxa de mudança de NDVI), dos três estágios do ciclo fenológico aplicando as técnicas de regressão estatística linear múltipla. A PSN de um *pixel* será calculada em função de  $\epsilon_f$ , NDVI e PAR. A PSN em nível municipal será calculada com os pesos de PSN dos *pixels* ocupados por uma determinada cultura obtidos pela razão de um determinado *pixel* pelo número total dos *pixels* do município. Para cada cultura, os principais municípios que representam a produção total de um determinado Estado serão incluídos na construção do modelo estadual. Os modelos estaduais serão incluídos na construção do modelo nacional. O MUPSA de uma determinada cultura será desenvolvido usando os dados dos parâmetros gerados com os dados orbitais e terrestres do período de 2000 a 2007 e validado com os dados das produções agrícolas do período de 2007 a 2010 publicados pelo IBGE.

A produtividade econômica de uma determinada cultura está intimamente ligada à GPP ou à PSN. Atualmente, o sistema de observação do planeta Terra da NASA, chamado Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS), disponibiliza os dados de oito dias de FPAR, taxa de fotossíntese, PSN/GPP e os dados anuais de produtividade primária líquida (Net Primary Productivity – NPP) do globo inteiro aplicando-se a equação (12.42). Os valores de PSN/GPP são calculados com base na estimativa da taxa de fotossíntese em função da PAR gerada com os dados de NDVI. O mapa de distribuição espacial dos diferentes tipos de vegetação do globo terrestre produzido por Landsberg e Gower (1997) foi usado para determinar a variação espacial de eficiência fotossintética ( $\epsilon_f$ ) do globo terrestre em função das características fisiológicas das vegetações, como evapotranspiração, espécies, idades, fatores ambientais, entre outros. Os dados de LAI, NDVI, FPAR, PSN e NPP gerados com MODIS foram validados com os modelos de simulação do fluxo no sistema solo-vegetação-atmosfera, chamado Soil-Vegetation-Atmospheric Transport (SVAT), e com os dados de LAI, FPAR, NDVI, PSN e NPP observados pelas 400 FLUXNETs (16 no Brasil), torres de medições micrometeorológicas espalhadas no mundo inteiro (<<http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet>>, acesso em 29 de outubro de 2008). Os dados de PSN de um *pixel* com a resolução espacial de 1 km x 1 km e a resolução temporal de oito dias do globo terrestre inteiro têm 150 milhões de celulares. A operação diária de calcular a PSN diária ocupa 1,64 Gb/dia. A PSN é calculada em função de radiação líquida incidida (RI), eficiência fotossintética ativa ( $\epsilon_f$ ) e fração de PAR absorvida. O valor de PAR é 0,45 da RI. O valor de  $\epsilon_f$  é calculado em função de  $\epsilon_{\text{max}}$ , Tamin e déficit de pressão de vapor (Vapor Pressure Deficit – VPD). O valor de  $\epsilon_{\text{max}}$  é obtido para cada tipo

ocorrências de alta nebulosidade. Nesse caso, porém, a resolução espacial diminui para 250 m a 1 km.

### 16.3.3.2 Geração da curva de evolução temporal de NDVI

As bandas dos sensores de VIS e NIR variam de um satélite para outro e são listadas na tabela 16.1. Disso resulta que o valor de NDVI varia de um satélite para outro também. Portanto, os valores diferentes de NDVI gerados por diferentes satélites devem ser corrigidos para que seja obtido o valor uniformizado de NDVI com o uso das bandas referenciais de um satélite selecionado, aplicando-se a técnica de regressão linear múltipla. Os dados de VIS e NIR obtidos por satélites podem sofrer interferências atmosféricas. Após a uniformização dos dados de NDVI, o programa de filtragem desenvolvido por Van Dijk et al. (1987) com base no algoritmo 4253H-twice, por sua vez desenvolvido por Velleman e Hoaglin (1981), será usado para suavizar os dados de série temporal de NDVI. No algoritmo 4253H, as medianas de amplitude 4, 2, 5 e 3 são aplicadas sucessivamente para reconstruir a curva do NDVI. A letra H representa-se *Hanning*, que é uma média móvel de três amplitudes, aplicando os três pesos (0,25, 0,50 e 0,25) logo após a aplicação das medianas. Os valores residuais após a aplicação de 4253H foram reprocessados pelo mesmo filtro para evitar a eliminação dos valores significativos, razão pela qual o algoritmo foi chamado 4253H-twice.

### 16.3.3.3 Datas de iniciação e duração do ciclo fenológico determinadas por GDD

Aplicando o relógio biológico da planta, a duração de cada estágio do crescimento pode ser determinada pelo calor acumulado, que é calculado por Graus Dia do Crescimento (Growth Degree Day – GDD). A iniciação e a duração de três estágios do desenvolvimento da cultura, incluindo crescimento vegetativo, florescimento e maturação, são controladas pelo relógio biometeorológico que conta o calor acumulado de cada fase pelo valor de GDD. Dependendo do código genético de cada cultura, certa quantidade de calor é exigida para completar cada fase do desenvolvimento (ROBERTSON, 1968). O GDD, que soma a temperatura diária acima da temperatura de base de uma determinada cultura, é usado para calcular o calor acumulado para cada fase de desenvolvimento. Quando o valor de GDD acumulado atinge o valor exigido de uma determinada fase de desenvolvimento, a planta inicia outra fase em seguida. Geralmente, a matéria seca aumenta linearmente com o tempo, o que permite a estimativa da taxa de crescimento da cultura durante um determinado período de tempo. O aumento da temperatura ao seu limite superior de crescimento tem tendência de aumentar a taxa do crescimento e, ao mesmo tempo, de encurtar sua fase fenológica. Portanto, o valor líquido da matéria seca ou produtividade será alterado. Outro fator, como a seca severa, também pode encurtar sua fase fenológica. Assim, as condições extremas de temperatura e déficit hídrico podem diminuir a produtividade. Aplicando o relógio biometeorológico, as variações anuais do ciclo fenológico causadas pela seca ou pela alta temperatura de uma cultura podem ser identificadas pelos valores de GDD nos três estágios do crescimento. A alta temperatura encurta o ciclo fenológico, enquanto a seca severa diminui a taxa de PSN e encurta o ciclo fenológico e a curva de NDVI também.

### Método do cálculo de GDD

O início e o término dos vários estágios de desenvolvimento de uma determinada cultura são controlados pelos valores de GDD acumulados nas referidas fases de crescimento. Os valores limiares de baixa e alta temperatura devem ser obtidos para calcular o GDD. Doorenbos e Kassam (1979) apresentaram os limites de valores ótimos, mínimos e máximos para várias culturas (tabela 16.3). Vale apontar que os dados listados foram coletados há 30 anos. Os valores limiares de temperatura e o ciclo fenológico das culturas podem se alterar devido aos avanços das tecnologias e do sistema de manejo das culturas e aos melhoramentos dos códigos genéticos. Portanto, esses dados devem ser atualizados com base nos dados obtidos pelas observações em campo.

Tabela 16.3 – Lista de faixa de requerimento de temperatura para o crescimento das culturas anuais e perenes. Fonte: (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

Cultura	Ciclo fenológico (dias)	Faixa de temperatura (°C)
Feijão fresco	60-90	10-27
Feijão seco	90-120	10-27
Vagem fresca	65-100	10-23
Vagem seca	85-120	10-23
Melancia	80-110	18-35
Tabaco	90-120	15-35
Girassol	90-130	15-30
Amendoim	90-140	18-33
Tomate	90-140	15-28
Arroz	90-150	18-35
Soja	100-130	18-30
Trigo de primavera	100-130	10-25
Trigo de inverno	180-250	10-25
Milho	100-140	15-35
Cebola	100-140	10-25