

# Sensoriamento Remoto em agricultura



Antonio Roberto Formaggio  
Ieda Del'Arco Sanches

oficina de textos

# Sensoriamento Remoto em **agricultura**

Antonio Roberto Formaggio  
Ieda Del'Arco Sanches

oficina de textos

Copyright © 2017 Oficina de Textos

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil desde 2009.

**Conselho editorial** Arthur Pinto Chaves; 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 e projeto gráfico** Malu Vallim

**Diagramação** Douglas da Rocha Yoshida

**Preparação de figuras** Alexandre Babadobulos

**Preparação de textos** Hélio Hideki Iraha

**Revisão de textos** Renata de Andrade Sangeon

**Impressão e acabamento** Rettec artes gráficas e editora

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

---

Formaggio, Antonio Roberto  
Sensoriamento remoto em agricultura / Antonio  
Roberto Formaggio, Ieda Del'Arco Sanches. --  
São Paulo : Oficina de Textos, 2017.

Bibliografia.  
ISBN 978-85-7975-277-3

1. Agricultura - Sensoriamento remoto I. Sanches,  
Ieda Del'Arco. II. Título.

17-07384

CDD-630

---

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Sensoriamento remoto : Agricultura 630

Todos os direitos reservados à **Editora Oficina de Textos**

Rua Cubatão, 798

CEP 04013-003 São Paulo SP

tel. (11) 3085-7933

www.ofitexto.com.br

atend@ofitexto.com.br

# agradecimentos

Todo livro é feito de um conjunto de contribuições provenientes de inúmeras pessoas e instituições, e nós também temos uma lista enorme delas, que, ao longo dos últimos dois anos, ofereceram suas inestimáveis parcelas para que este livro pudesse ser concretizado.

Agradecemos aqui a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, com generosidade, disponibilizaram seu tempo para revisar os textos, oferecer sugestões valiosas, emprestar materiais, trocar ideias para a busca do melhor resultado e auxiliar na adaptação de algumas figuras incluídas (especial gratidão à Fernanda Formaggio Pinto, por sua dedicação e entusiasmo).

Queremos registrar nossa gratidão ao nosso amigo Alfredo José Barreto Luiz (Embrapa Meio Ambiente), por ter suscitado a centelha inicial de juntar os materiais e trabalhá-los visando gerar o presente livro. Também o agradecemos por suas inestimáveis participações em projetos, trabalhos de campo e coautorias e por sua sempre entusiástica participação e parceria nos últimos quase 20 anos de atividades em conjunto.

Muitos dos dados apresentados neste livro foram coletados durante o Projeto MoBARS (Monitoring Brazilian Agriculture by Remote Sensing), patrocinado pelo CNPq e pela Capes, através do Programa Ciência sem Fronteiras (Projeto nº 402.597/2012-5), instituições às quais agradecemos sobremaneira.

Não podemos deixar de agradecer ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe/MCTIC), por todos os suportes e inumeráveis apoios, que permitiram a concretização das pesquisas e desenvolvimentos na área de Observação da Terra/Sensoriamento Remoto da equipe de agricultura dessa instituição.

Acima de tudo, agradecemos a Deus por ter sempre nos dado entusiasmo, otimismo e disposição para a busca dos melhores resultados em prol da construção de capacitação dos pós-graduandos, para a realização de projetos e para a disponibilização de metodologias e conhecimentos na área de sensoriamento remoto em agricultura para o nosso país.

*Os autores*

São José dos Campos, 6 de março de 2017

# apresentação

*José Carlos Neves Epiphânio*

Há anos a agricultura brasileira vem apresentando sucesso inquestionável, sendo responsável por parte substancial do desempenho da economia nacional e sustentando níveis muito positivos na balança comercial. Para atingir tais níveis de desempenho, o avanço científico e tecnológico, associado a aspectos de gerenciamento, empreendedorismo, logística etc., tem que ser contínuo, especialmente num mundo globalizado e competitivo. Quando se pensa mais em longo prazo, a agropecuária terá que responder à demanda de uma população crescente, porém num ambiente já bem mais restrito e comprometido. Tal resposta deverá ser de forma altamente produtiva, mas num inequívoco contexto de compromisso com o ambiente. De resto, como se tem conduzido a agropecuária brasileira.

Uma característica importante da agricultura brasileira é sua diversidade. Abrange culturas básicas para alimentação humana, produção de fibras, produção de grãos para alimentação animal, produção de energia, café, citros, pastagens, animais de pequeno e grande porte para consumo interno e exportação, entre outros. Obviamente, tal diversidade ocorre numa grande variedade de ambientes, regimes climáticos e sistemas de manejo.

Outra característica da atividade agropecuária é a necessidade de informação contínua e precisa para diversos fins: condição das culturas, localização dos campos de cultivo, medição da área, estimativas de produção, sucessão entre as culturas, dinâmicas diversas que ocorrem no meio agrícola, uso da água, relações ambientais e climáticas, comercialização etc.

Tendo em conta as dimensões do território nacional, a distribuição e a dinâmica com que se dão as diversas atividades agropecuárias, é importante que o país disponha e utilize-se das melhores e mais avançadas tecnologias de estudo e monitoramento das culturas e atividades agropecuárias. Sem dúvida, o uso de satélites para o monitoramento de grandes extensões territoriais é fundamental, especialmente quando os satélites se aliam aos meios de georreferenciamento espacial.

---

É nesse contexto que *Sensoriamento Remoto em agricultura*, de autoria de Antonio Roberto Formaggio e Ieda Del'Arco Sanches, vem a lume. Os autores, pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), têm trabalhado há muitos anos nesse campo, não só ministrando disciplinas dessa área no curso de pós-graduação em Sensoriamento Remoto, como também pesquisando o tema e orientando alunos. Essas disciplinas e orientações muito contribuíram para a formatação e a organização do livro. Os autores reúnem aqui essa experiência e conhecimentos acumulados. Apresentam todo o percurso das pesquisas envolvendo o uso do sensoriamento remoto na agricultura, desde as pesquisas mais básicas voltadas ao entendimento do comportamento das culturas ao longo do espectro eletromagnético. Passam pelas pesquisas para estabelecer um método para a previsão de safras (por exemplo, o projeto Previsão de Safras por Satélite – Prevs –, em conjunto com o IBGE), pelas pesquisas para desenvolver métodos mais objetivos e estatísticos para a avaliação da extensão da área dos cultivos e pelo desenvolvimento dos métodos de monitoramento da cana-de-açúcar de forma sistemática.

O livro preenche uma lacuna importante no rol das obras de sensoriamento e geoprocessamento existentes. Todos aqueles que militam nas áreas de agropecuária, meio ambiente, levantamento de safras e logística de distribuição de culturas, bem como estudantes de pós-graduação, pesquisadores e professores ligados à agricultura, muito aproveitarão dos conhecimentos aqui contidos e apresentados de forma clara e ilustrada.

# sumário

## INTRODUÇÃO

- I.1 Contextualização – 13
  - I.2 Antecedentes – 18
  - I.3 Satélites disponíveis – 23
  - I.4 Calendário agrícola, fenologia e séries multitemporais – 26
  - I.5 Sistemas e *softwares* de processamento de imagens – 29
- QUESTÕES – 31

## 1 SISTEMAS SENSORES E SENSORIAMENTO REMOTO AGRÍCOLA – 33

- 1.1 Níveis de coleta de dados – 34
  - 1.2 Características das plataformas orbitais – 37
  - 1.3 Resoluções dos sensores – 42
  - 1.4 Sistemas de sensoriamento remoto – 49
  - 1.5 Satélites de órbitas quase polares – 50
  - 1.6 Satélites de órbitas geoestacionárias – 52
  - 1.7 Perspectivas – 54
- QUESTÕES – 55

## 2 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE CULTURAS AGRÍCOLAS – 59

- 2.1 Interação da REM com os materiais – 61
  - 2.2 Comportamento espectral da vegetação agrícola – 67
  - 2.3 Propriedades refletivas das folhas verdes – 68
  - 2.4 Propriedades refletivas de dosséis – 75
  - 2.5 Variáveis biofísicas das culturas agrícolas – 84
- QUESTÕES – 93

## 3 ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO × AGRICULTURA – 95

- 3.1 Índices intrínsecos ou simples – 100
- 3.2 Índices que utilizam a linha do solo – 100
- 3.3 Índices atmosféricamente corrigidos – 104
- 3.4 O índice NDWI – 105
- 3.5 O índice ideal – 108
- 3.6 Influências da relação angular do sistema fonte-alvo-sensor nos índices espectrais de vegetação – 109
- 3.7 Índices de bandas estreitas (hiperespectrais) – 110

- 
- 3.8 O índice *red-edge* – 112
  - 3.9 Avaliação dos índices para a estimativa de variáveis bioquímicas das plantas – 113
  - QUESTÕES – 119
  
  - 4 INTERPRETAÇÃO VISUAL DE IMAGENS OBTIDAS POR SENSORES REMOTOS ORBITAIS PARA ANÁLISE DE ALVOS AGRÍCOLAS – 121
    - 4.1 Tonalidade – 122
    - 4.2 Cor – 125
    - 4.3 Forma – 129
    - 4.4 Tamanho – 130
    - 4.5 Padrão – 130
    - 4.6 Sombra – 132
    - 4.7 Textura – 133
    - 4.8 Localização geográfica (características da região) – 135
    - QUESTÕES – 135
  
  - 5 DINÂMICA AGRÍCOLA E SENSORIAMENTO REMOTO – 139
    - 5.1 Trajeto Mogi Guaçu-Mococa – 143
    - 5.2 Dinâmica do comportamento espectro-temporal de alvos agrícolas – 144
    - 5.3 Culturas anuais – 145
    - 5.4 Culturas semiperenes – 155
    - 5.5 Culturas perenes – 157
    - 5.6 Espécies florestais plantadas – 159
    - 5.7 Pastagem e feno – 160
    - QUESTÕES – 165
  
  - 6 MONITORAMENTO AGRÍCOLA VIA SENSORIAMENTO REMOTO – 169
    - 6.1 Mapeamento de áreas agrícolas e identificação de espécies ou tipos de cultura – 170
    - 6.2 Acompanhamento do desenvolvimento de culturas (avaliação qualitativa) – 175
    - 6.3 Avaliação quantitativa – 175
    - 6.4 Outras questões – 181
    - QUESTÕES – 182

---

## 7 SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL

APLICADO AOS ALVOS AGRÍCOLAS – 187

7.1 Sensores hiperespectrais – 189

7.2 Processamento e análise de dados hiperespectrais – 191

7.3 Aplicações – 194

QUESTÕES – 202

## 8 SENSORIAMENTO REMOTO PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO – 205

8.1 Dados de satélites em agricultura de precisão – 208

8.2 Estimativa da população de plantas – 211

8.3 Estimativa de produtividade – 211

8.4 Necessidade de aplicação de fertilizantes e de defensivos – 212

8.5 Alerta de ataque de pragas – 215

8.6 Uso de SIG em agricultura de precisão – 215

8.7 Sistema GPS – 219

8.8 VANTs na agricultura de precisão – 220

8.9 Perspectivas da agricultura de precisão – 223

8.10 Agricultura de precisão no Brasil – 224

QUESTÕES – 225

## 9 PERSPECTIVAS FUTURAS DA AGRICULTURA BRASILEIRA E MUNDIAL – 227

9.1 Sensores de contato e sensores proximais – 234

9.2 Sensores de campo – 236

9.3 Sensores subaéreos – 237

9.4 Sensores aéreos – 237

9.5 Sensores orbitais – 238

9.6 Sensores orbitais hiperespectrais – 239

9.7 Sensores termais – 240

9.8 Sensores micro-ondas (radar) – 241

9.9 A necessidade de sistemas *all-weather* – 243

9.10 A necessidade de sistemas baseados em amostragem – 243

9.11 Constelações de pequenos satélites – 244

9.12 Perspectivas e cenários futuros – 247

QUESTÕES – 251

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS – 255

SOBRE OS AUTORES – 285

# introdução

## I.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A agricultura desempenha papel insubstituível em todos os países, em razão de ser a principal provedora de alimentos, fibras e matérias-primas para energia (biocombustíveis), além de propiciar muitos outros tipos de benefícios diretos e indiretos para a sociedade.

De acordo com dados da FAO (2009), as terras agrícolas cobrem cerca de 1,53 bilhão de hectares do planeta, ao passo que as pastagens cobrem em torno de 3,38 bilhões de hectares, aproximadamente 12% e 26% das terras livres de gelo, respectivamente.

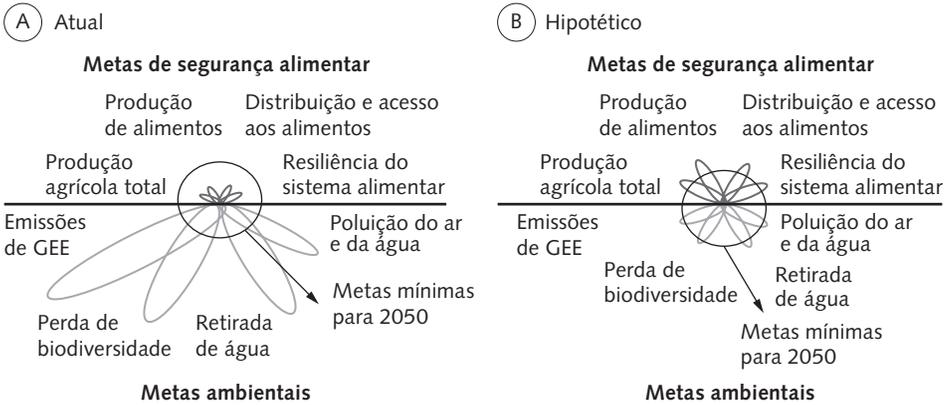
Essas áreas agropecuárias compreendem a mais larga fatia de terras ocupadas do planeta e correspondem às terras mais férteis e aptas para serem cultivadas, e praticamente todo o restante refere-se a desertos, montanhas, tundras, cidades, reservas e outras terras não aptas para agricultura.

Conforme Foley et al. (2011) e Faostat (2015), cerca de 62% das terras usadas para agropecuária vêm sendo destinadas à produção de alimentos humanos, 35%, à alimentação animal (que posteriormente resultará em alimentos humanos, embora menos eficientemente que as culturas alimentícias, nas formas de carnes e de produtos diários), e 3%, à produção de bioenergia.

Recentes estudos internacionais desenhando cenários para décadas futuras mostram que, até o ano de 2050, para atender às demandas de segurança alimentar, de governan-



ça e de sustentabilidade, será necessário praticamente duplicar os atuais níveis de produção agrícola do planeta, ao mesmo tempo que a chamada *pegada ambiental* da agricultura precisará ser encolhida drasticamente (Foley et al., 2011; The Royal Society, 2016). A Fig. I.1 ilustra de forma esquemática os citados desafios.



**FIG. I.1** Metas a serem cumpridas visando à segurança alimentar e à sustentabilidade ambiental para um cenário futuro centrado no ano de 2050: (A) avaliação qualitativa sobre como os sistemas agrícolas atuais podem ser mensurados em relação aos citados critérios em comparação com o conjunto de metas; (B) situação hipotética na qual as referidas metas teriam sido atingidas. No topo de ambas as figuras, são destacadas quatro metas-chave para a segurança alimentar: aumentar a produção agrícola total; elevar o suprimento de alimentos (inclusive considerando que as produções agrícolas nem sempre equivalem apenas a alimentos); melhorar a distribuição e o acesso aos alimentos; e ampliar a resiliência do sistema alimentar como um todo. Na parte de baixo, são ilustradas quatro metas-chave ambientais: reduzir as emissões de gases do efeito estufa pelas terras agrícolas; reduzir as perdas de biodiversidade; eliminar progressivamente as retiradas de água; e diminuir as poluições do ar e da água pela agricultura  
Fonte: adaptado de Foley et al. (2011).

Como realçado, uma das metas importantes é o aumento da geração de alimentos, e, como se sabe, para elevar a produção agrícola há apenas dois caminhos possíveis: (a) pelo aumento da área plantada ou (b) via ganhos de produtividade das lavouras.

No entanto, ambas as alternativas apresentam limitações, que vão desde a questão de disponibilizar novas terras sem causar desmatamento até as preocupações com adicionais emissões de gases do efeito estufa.

No Brasil, a agricultura tem sido, há séculos, um dos principais pilares da economia, por constituir uma atividade cuja produção se destina ao suprimento nacional e



Dessa forma, áreas correlatas e imprescindíveis ao sensoriamento remoto incluem a Geomática, a Cartografia, a Estatística, a Computação, o processamento digital de imagens, o reconhecimento de padrões e a inteligência artificial.

## 1.2 ANTECEDENTES

O sensoriamento remoto para uso em agricultura vem sendo estudado desde a década de 1970. Para uma determinada cultura agrícola ou para um conjunto de culturas numa determinada área de interesse, que pode variar do nível de município, Estado, país ou continente, as estatísticas agrícolas envolvem basicamente as estimativas relacionadas com duas variáveis principais: a quantidade de área plantada e a produtividade.

O país pioneiro no uso de dados de satélites para sensoriamento remoto na agricultura foi os Estados Unidos, a partir do lançamento do primeiro satélite da série Landsat (inicialmente denominado ERTS, sigla de Earth Resources Technology Satellite), no início da década de 1970, com o desenvolvimento do projeto Lacie (Large Area Crop Inventory Experiment) (MacDonald; Hall; Erb, 1975), envolvendo a Agência Espacial Norte-Americana (Nasa), a National Oceanic and Atmospheric Administration (Noaa) e o Departamento de Agricultura Norte-Americano (Usda).

O objetivo desse projeto pioneiro foi avaliar quais seriam as potencialidades e viabilidades do uso de imagens do sensor Multispectral Scanner System (MSS), do satélite Landsat-1, que possuía quatro bandas espectrais entre 500 nm e 1.100 nm e 80 m de resolução espacial, para a estimativa da área de trigo cultivada globalmente. Destaca-se que, enquanto os dados Landsat foram utilizados para estimar a *área plantada*, modelos de produtividade baseados em dados meteorológicos foram usados para estimar o rendimento por unidade de área.

Em sequência ao Lacie, o Usda e a Noaa deram continuidade aos estudos sobre as potencialidades do sensoriamento remoto orbital não apenas para o trigo (como no Lacie), mas também para outros cereais de interesse global, por meio do projeto AgRISTARS (Agricultural and Resources Inventory Surveys through Aerospace Remote Sensing). As metodologias envolvidas em ambos os projetos relacionavam-se com a medição da área plantada das culturas de interesse, buscando estimar a produção total por meio da multiplicação da área plantada pela produtividade por unidade de área.

Desde a década de 1970, os Estados Unidos têm sido o país que mais desenvolvimentos realiza no tópico relacionado com a obtenção de *estatísticas agrícolas auxiliadas por dados de sensoriamento remoto*, sendo o National Agricultural Statistics Service (Nass) o organismo norte-americano responsável por esses avanços.



### I.3 SATÉLITES DISPONÍVEIS

Entre os dados de sensoriamento remoto de maior potencial para aplicações em agricultura estão as imagens obtidas por sensores e satélites semelhantes aos da série Landsat, um programa de satélites de observação da Terra de origem norte-americana (via Nasa e USGS) que começou com o inicialmente denominado ERTS-1, posteriormente Landsat-1, lançado em 1972.

Desde então, sete outros satélites se sucederam, estando em órbita atualmente o Landsat-8, lançado em 11 de fevereiro de 2013, cujo principal sensor é o OLI (Operational Land Imager), uma evolução dos sensores anteriores, o MSS (Multispectral Scanner System), o TM (Thematic Mapper) e o ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), sendo os dois últimos do tipo *push broom*, com 7.000 detectores por banda, em nove canais espectrais, com faixa de recobrimento de 185 km e repetitividade temporal de 16 dias.

O Tirs (Thermal Infrared Sensor), que é um imageador térmico, também faz parte da carga útil do Landsat-8, e vislumbra-se que poderá suportar aplicações emergentes, como estimativas de evapotranspiração para usos em manejo de água.

Outro sensor que tem demonstrado excelente potencial para aplicações em agricultura é o Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo das plataformas Terra (EOS-AM1) e Aqua (EOS-PM1), ambas componentes do programa Earth Observation System (EOS), da Nasa, concebidas para estudos e monitoramento da biosfera terrestre. A órbita da plataforma Terra é norte-sul, cruzando o equador terrestre às 10h30 (horário local), ao passo que a órbita da plataforma Aqua é ascendente, cruzando o equador às 13h30 (horário local).

O Modis é um espectrorradiômetro imageador com 36 bandas operando entre 400 nm e 14.400 nm, com cobertura global e resoluções geométricas da ordem de 250 m (bandas 1 e 2), 500 m (bandas 3 a 7) e 1.000 m (bandas 7 a 36), sendo indicado principalmente como opção para estudos e monitoramentos de grandes áreas, ou seja, em escalas regionais e continentais.

Os dados Modis são disponibilizados prontos para uso, ou seja, georreferenciados e corrigidos para efeitos atmosféricos, na forma de diferentes produtos elaborados a partir dos dados originais, como o MOD09 (reflectância espectral de superfície para as bandas 1 a 7), o MOD13 (índices de vegetação NDVI e EVI) e o MOD15 (índice de área foliar e fração absorvida de radiação fotossinteticamente ativa) (Justice et al., 2002; Myneni et al., 2002).

Em virtude do amplo campo de visada (*field of view*, FOV), de 110°, representando uma largura nominal de 2.330 km em cada faixa imageada, sua periodicidade é da ordem de dois dias, podendo haver até mesmo recobrimentos diários para áreas em latitudes maiores do que 30°.



principalmente por ela ser de ciclo semiperene, enquanto grande parte das outras culturas tem diferentes durações de ciclo e diferentes comportamentos fenológicos.

Aliando a multitemporalidade das imagens, possível em virtude da repetitividade de obtenção dos dados orbitais, com o conhecimento do ciclo fenológico, pode-se identificar a cana em imagens orbitais com excelentes níveis de acerto.

O Canasat fornecia mapeamento e estimativas de área de cana-de-açúcar disponível para colheita antes do início de cada ano-safra, porém foi interrompido em 2013. Para mais detalhes sobre esse projeto, são indicados os trabalhos de Rudorff; Sugawara (2007) e Rudorff et al. (2010).

## **I.4 CALENDÁRIO AGRÍCOLA, FENOLOGIA E SÉRIES MULTITEMPORAIS**

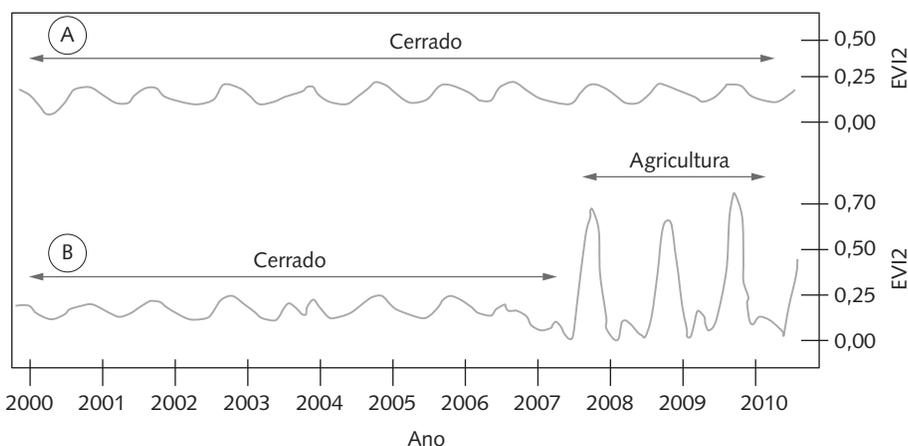
As culturas agrícolas apresentam uma característica muito interessante quando se fala do uso de dados de sensoriamento remoto para agricultura, que é sua dinâmica de comportamento fenológico.

A sucessão de diferentes quantidades de cobertura e biomassa verde sobre a superfície do solo ao longo do ciclo da cultura exerce marcada influência no comportamento espectral registrado nas imagens, com a consequente definição de diferentes padrões, em função dos tipos de cultivo, épocas de plantio, períodos de maior vigor vegetativo, épocas de amadurecimento, épocas de colheita etc.

Quando se observam superfícies vegetadas, de vegetação natural ou agrícola, por sensores remotos, é importante levar em conta o comportamento espectral dessas superfícies ao longo dos comprimentos de onda utilizados pelos sensores.

No espectro da vegetação ao longo da faixa entre 400 nm e 2.500 nm, verifica-se que, no visível (400 nm a 700 nm), há forte influência dos pigmentos foliares, que absorvem a radiação eletromagnética; já na faixa entre 700 nm e 1.300 nm, correspondente ao infravermelho próximo, ocorre predominância de reflexão, em virtude da estrutura interna das folhas; e, por último, na faixa do infravermelho de ondas curtas (1.300 nm a 2.500 nm), existe predominância de absorção por causa do conteúdo de umidade interna nas folhas.

A dinâmica fenológica ao longo do ciclo de uma cultura agrícola é elemento de significativa relevância para a extração de informações de interesse agrícola a partir de imagens orbitais, uma vez que destaca o perfil da cultura no decorrer do tempo. Ao mesmo tempo que variam as quantidades de folhas e de recobrimento vegetal sobre a superfície do solo, as respostas espectrais também vão acompanhando essas variações e sendo registradas nas imagens captadas ao longo do ciclo.



**FIG. I.5** Exemplos de perfis temporais EVI2: (A) área de cerrado; (B) área em que o cerrado foi substituído por agricultura anual

Fonte: adaptado de Freitas et al. (2011).

## I.5 SISTEMAS E SOFTWARES DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS

A forma digital dos dados é o fator que possibilita o uso de computadores para processar as imagens com o objetivo principal de representar com a necessária qualidade porções bem definidas do espaço terrestre, utilizando-se de processamentos matemáticos, estatísticos e probabilísticos dos dados.

Uma imagem digital é constituída por colunas e linhas de pixels, e cada ponto pode ter sua localização caracterizada por um par de coordenadas espaciais (x, y).

Quando um sensor registra cenas de sensoriamento remoto, podem ocorrer diferentes tipos de interferência, o que diminui significativamente a qualidade das imagens.

Os tipos mais comuns de ruído relacionam-se com influências atmosféricas, presença de nuvens, problemas de funcionamento de detectores, distorções introduzidas durante o processo de registro (tanto as inerentes à plataforma como as inerentes à rotação terrestre, esfericidade e relevo), entre outros.

Para diminuir as interferências que em geral prejudicam a análise de imagens, existem métodos de processamento digital que melhoram consideravelmente a qualidade e favorecem as classificações e interpretações.

Além da correção das distorções, o processamento digital permite diferentes tipos de realce, filtragem, composição de bandas espectrais e classificação (Fig. I.6).



## SISTEMAS SENSORES E SENSORIAMENTO REMOTO AGRÍCOLA

Os sistemas de sensoriamento remoto são conjuntos compostos de plataformas e sensores e que captam a radiação eletromagnética (REM) emitida e/ou refletida pelos objetos da superfície terrestre.

Os sensores remotos são dispositivos capazes de detectar, em determinadas faixas do espectro eletromagnético, a energia eletromagnética proveniente de um objeto, transformá-la em um sinal elétrico e registrá-la, de tal forma que esse dado possa ser armazenado ou transmitido em tempo real, para posteriormente ser convertido em informações que descrevam as feições dos objetos que compõem a superfície terrestre (Moraes, 2015).

As variações de energia eletromagnética associadas aos diferentes objetos podem ser coletadas por sistemas sensores imageadores ou não imageadores.

Os sistemas imageadores fornecem como produto uma imagem da área observada, podendo ser citados como exemplos os *scanners* e as câmeras fotográficas. Por sua vez, os sistemas não imageadores fornecem os dados em formato numérico ou na forma de gráficos, sendo denominados radiômetros ou espectrorradiômetros.

Os principais elementos de um sistema de sensoriamento remoto são a fonte de REM, a atmosfera, os alvos terrestres (vegetação, áreas urbanas, plantações, corpos d'água), a plataforma que carrega os sensores (satélites, no caso dos sistemas orbitais), os sensores, a estação de recepção, o



desses dados, surgindo daí uma imprescindível ferramenta, que é o Processamento Digital de Imagens (Boxe 1.2).

**BOXE 1.1 TIPOS DE TECNOLOGIAS DE SENSORES REMOTOS SEGUNDO A DIMENSIONALIDADE ESPECTRAL (PANCROMÁTICA, MULTIESPECTRAL, HIPERESPECTRAL, ULTRAESPECTRAL)**

Nos tempos passados, o sensoriamento remoto era realizado com base em dados de câmeras, dependentes da existência de filmes fotográficos. Por volta de meados do século XX, com o surgimento dos satélites artificiais, foi desenvolvida a tecnologia dos imageadores, os quais não dependiam dos filmes fotográficos e podiam ter um número maior de bandas espectrais. Enquanto a tecnologia das câmeras fotográficas pode ser chamada de *pancromática*, a tecnologia dos imageadores corresponde à *multiespectral*.

Em meados da década de 1980, surgiu uma evolução da tecnologia multiespectral, possibilitando imageadores que podiam obter imagens em centenas de bandas estreitas, os denominados *sensores hiperespectrais*.

Atualmente, os progressos tecnológicos já permitem antever o próximo avanço na área dos sensores, que receberão o nome de *ultraespectrais* e poderão coletar dados em milhares de bandas espectrais.

Cada tecnologia tem suas vantagens e desvantagens, e, assim, cada uma é mais apropriada para uso conforme as demandas de especificidades dos casos necessitem. Os dados multiespectrais do ETM+ ou do OLI/Landsat têm grande utilidade para os objetivos do sensoriamento remoto em agricultura.

Já os dados hiperespectrais permitem a obtenção de espectros praticamente contínuos de cada *pixel*, possibilitando extrair informações até mesmo da composição química dos materiais da superfície terrestre.

No caso dos dados ultraespectrais, vislumbram-se possibilidades informativas extremamente detalhadas sobre os alvos da superfície terrestre.

Vislumbra-se também que os desenvolvimentos em curso permitirão a disponibilidade cada vez maior de dados hiperespectrais com coberturas globais, a partir de sensores em plataformas orbitais, nas porções espectrais do visível, do infravermelho próximo e de ondas curtas.

Contudo, é preciso tratar os diferentes tipos de dados conforme suas características e possibilidades.



frequências múltiplas (combinação de duas ou mais bandas de frequência), polarização simples (VV, HH ou HV) e polarização múltipla (combinação de dois ou mais modos de polarização).

O Quadro 1.1 ilustra os principais satélites de sensoriamento remoto utilizados para a observação da Terra, inclusive para agricultura.

Como exemplos de sistemas de baixa resolução que têm sido usados para aplicações em agricultura, podem ser citados os sensores AVHRR/Goes e Vegetation 1 e 2/Spot, principalmente.

Os sistemas imageadores de média resolução mais empregados para usos agrícolas têm sido o MSS, o TM, o ETM+ e o OLI, da série Landsat, o HRV/Spot e o Modis (Terra e Aqua), além do WFI/CBERS e do Liss/satélites indianos.

Por sua vez, os sistemas imageadores de alta resolução têm sido disponibilizados desde o final da década de 1990, sendo o Ikonos e o RapidEye os mais conhecidos e usados.

## **1.6 SATÉLITES DE ÓRBITAS GEOESTACIONÁRIAS**

Conforme expõe Jensen (2007), uma das maiores mantenedoras mundiais de satélites é a National Oceanic and Atmospheric Administration (Noaa), agência americana que opera duas séries de satélites de sensoriamento remoto: Geostationary Operational Environmental Satellites (Goes) e Polar-orbiting Operational Environmental Satellites (Poes).

Ambos os tipos baseiam-se em tecnologia de varredura multiespectral. Os serviços meteorológicos utilizam os dados gerados pelos sensores desses tipos de satélite principalmente para objetivos de previsão do tempo. Frequentemente, nos noticiários diários, são vistas imagens Goes mostrando padrões de tempo da América do Norte e do Sul.

O sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), que equipa tais satélites, foi desenvolvido para objetivos meteorológicos, mas pesquisas sobre as mudanças climáticas globais têm utilizado os dados do AVHRR para mapear a vegetação global e também as características da superfície dos mares.

Ainda segundo Jensen (2007), o AVHRR é um sistema de varredura perpendicular à faixa de varredura do satélite, a qual abrange um ângulo de  $\pm 55,4^\circ$  a nadir. O Ifov de cada banda é de aproximadamente 1,4 milirradiano, produzindo então uma resolução espacial de  $1,1 \text{ km} \times 1,1 \text{ km}$ .

Como o AVHRR possui bandas espectrais no vermelho e no infravermelho próximo e provê informações globais de alta repetitividade, permite a obtenção de

# dois

## COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE CULTURAS AGRÍCOLAS

O sensoriamento remoto apresenta-se, crescentemente, como uma tecnologia de potencial no monitoramento da agricultura, para estimativas de parâmetros biofísicos de interesse usados em modelos agrometeorológicos e para diversos outros usos.

Como se sabe, um sistema de sensoriamento remoto é composto, basicamente, de uma fonte de radiação eletromagnética (REM) + um sistema plataforma/sensor + objetos sensoriados.

Um dos princípios básicos do sensoriamento remoto é que a extração das informações a partir dos produtos gerados pelos sensores remotos é, em geral, baseada nos peculiares comportamentos de reflectância de cada alvo em distintas regiões do espectro eletromagnético.

É conhecido o fato de que toda matéria reflete, absorve, transmite ou emite REM de forma específica, conforme suas características próprias. Por exemplo, a razão pela qual uma folha vegetal parece verde aos olhos humanos é que a clorofila, um pigmento interno das folhas, absorve a REM da faixa espectral do visível nos comprimentos de onda azul e vermelho, porém a reflete no verde.

As regiões do espectro eletromagnético têm diferentes nomenclaturas, abrangendo desde os raios gama, passando pelos raios X, ultravioleta (UV), luz visível (V) e infravermelho (IV), e indo até as ondas de rádio, desde os menores até os maiores comprimentos de onda dessas radiações.



## 2.2 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO AGRÍCOLA

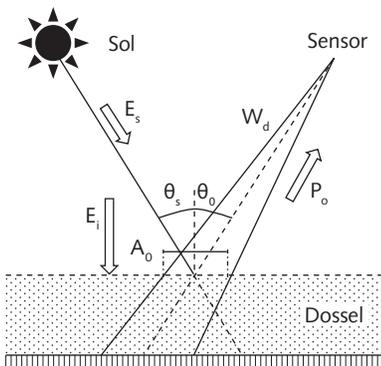
O sensoriamento na região espectral compreendida entre o visível e o infravermelho de ondas curtas (400 nm a 2.500 nm) é baseado em medições remotas da REM refletida pelos alvos da superfície terrestre. Assim, as informações coletadas pelos sensores necessitam ser interpretadas com base no pressuposto de que diferentes alvos apresentam distintos comportamentos espectrais.

Para um uso otimizado dos dados de sensoriamento remoto, é essencial que se tenha um adequado entendimento sobre como atuam fatores que interferem nas respostas espectrais dos objetos sensorizados. Entre tais fatores, destacam-se: a maneira pela qual a REM é coletada (sensores, plataformas, bandas espectrais), a presença da atmosfera terrestre, e as interferências das geometrias de iluminação e de observação.

Pode-se considerar que um dossel de vegetação é constituído por elementos de espalhamento muito grandes em comparação com os comprimentos de onda da REM de interesse, tendo como fundo a superfície do solo. A radiação incidente será espalhada por componentes das plantas, como as folhas, as hastes, as flores etc., e, dessa maneira, uma parte dessa radiação espalhada deixará o dossel na direção para cima.

Se, como indicado na Fig. 2.6, um dossel for observado sob o ângulo zenital  $\theta_o$  por um sensor de ângulo sólido de visada  $W_d$ , uma quantidade de potência radiativa  $P_o$  ( $A_o, \theta_o, \lambda$ ) emanando da área  $A_o$  atingirá a abertura do sistema sensor e será captada pelo detector. Essa potência origina-se dos componentes do dossel e da fração do solo vista diretamente pela abertura do sistema sensor.

Assume-se que, na maioria dos casos, as folhas do dossel são os elementos refletores dominantes em comparação com os demais componentes da planta. Sob luz solar direta, observam-se as folhas irradiadas diretamente ou uma parte delas que



**FIG. 2.6** Detecção da radiação do dossel de uma cultura sob um ângulo zenital de visada  $\theta_o$ , com um ângulo sólido  $W_d$ , sendo  $E_s$  = irradiância difusa,  $E_i$  = irradiância solar direta,  $\theta_s$  = ângulo zenital solar,  $\theta_o$  = ângulo zenital de observação,  $A_o$  = área visada pelo sensor,  $W_d$  = ângulo sólido de visada e  $P_o$  = potência radiativa que atingirá a abertura do sistema sensor

Fonte: adaptado de Bunnik (1978).



a luz entra no dossel em ângulos tais que numerosas folhas são encontradas e a reflectância é alta. Próximo ao meio-dia, o número de folhas diretamente encontradas pela REM solar é menor, causando uma menor reflectância no infravermelho próximo. Dessa forma, conforme Jackson et al. (1979), a orientação de fileiras tem um efeito menor na reflectância do infravermelho próximo do que na reflectância do visível, em razão de o infravermelho próximo, tendo muito maior transmitância entre as folhas, produzir efeito de sombreamento menor em relação ao visível.

## 2.5 VARIÁVEIS BIOFÍSICAS DAS CULTURAS AGRÍCOLAS

A partir deste ponto, passa-se a discorrer sobre as relações entre as variáveis espectrais e as variáveis agronômicas, conforme têm sido abordadas pela literatura específica sobre esse tema.

Em geral, as principais variáveis de sensoriamento remoto utilizáveis para a estimativa de variáveis agronômicas são índices espectrais de vegetação baseados em bandas localizadas no vermelho e no infravermelho próximo.

Uma das variáveis agronômicas de maior interesse tem sido o IAF, que é um dos indicadores de dosséis mais utilizados em trabalhos relacionados com sensoriamento remoto multiespectral de culturas agrícolas. Segundo Loomis e Williams (1969), trata-se do melhor parâmetro que tem sido usado para a mensuração da densidade de cobertura vegetal.

Magalhães (1985) pondera que o IAF corresponde à área foliar existente em relação à superfície ocupada pelas plantas ou pela comunidade vegetal. A capacidade de ocupação do terreno pelas partes aéreas das plantas pode ser estimada por meio da determinação da área foliar existente em uma dada superfície de terreno.

O IAF descreve a dimensão do sistema assimilador de uma comunidade vegetal. Em alguns casos, em que outras partes da planta além das folhas, como caules, pecíolos e brácteas, contribuem de maneira substancial para a fotossíntese, estas devem ser adicionadas à área foliar no cálculo dos parâmetros da análise do crescimento.

Segundo Asrar et al. (1984), o IAF é um importante parâmetro do dossel vegetal. A magnitude e a duração do IAF estão fortemente relacionadas com a capacidade do dossel em interceptar radiação fotossinteticamente ativa; portanto, o IAF está correlacionado com a fotossíntese do dossel e com a acumulação de matéria seca, em situações nas quais não predomina o estresse (água, doenças, pragas etc.).

As medições diretas da área foliar, como explicam os autores, são extremamente tediosas, e o desenvolvimento de uma técnica rápida e simples via sensoriamento remoto para avaliar a área foliar seria, sem dúvida, uma grande contribuição.



Com relação ao milho, as relações temporais entre o NDVI e a fitomassa foram menos evidentes (Figs. 2.22B,D), possivelmente devido às dificuldades encontradas nas medições, como assinalam os autores. A diminuição nos valores do NDVI ocorreu em virtude da clorose (amarelecimento) das folhas e da associada queda de folhas; a redução na densidade de clorofila resultou no decréscimo do NDVI.

Finalizando, os autores afirmam que o fenômeno de trajetória (indicado pelas setas nos gráficos da Fig. 2.22) nas relações entre o NDVI e a fitomassa com o tempo mostra a íntima relação das variáveis de reflectância no vermelho e no infravermelho próximo com o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

Kimes et al. (1981) encontraram tendências muito similares às encontradas por Tucker, Elgin Jr. e McMurtrey III (1979) para as relações entre o NDVI e as fitomassas fresca e seca, corroborando-lhes as indicações e concluindo que o sensoriamento remoto *in situ* pode ser aplicado como técnica não destrutiva para estimar variáveis agrônomicas do milho altamente relacionadas com o status fisiológico do dossel dessa cultura.

## QUESTÕES

2.1) O que se entende pelo termo *deslocamento da borda vermelha* (borda vermelha ou *red edge*) quando se fala de comportamento espectral de vegetação?

**Resposta:** A região espectral entre 680 nm e 700 nm, denominada borda vermelha (*red edge*), é uma das mais sensíveis a estresses na vegetação. Essa região corresponde ao aumento súbito de reflectância que ocorre na curva espectral da vegetação ao passar do vermelho para o infravermelho próximo (ver Fig. 2.7).

Assim, ao analisar espectros da vegetação, quando se verificam deslocamentos desse segmento (ou seja, da transição vermelho/infravermelho próximo) em direção a comprimentos de onda menores, tem-se a ocorrência do fenômeno designado como *deslocamento da borda vermelha para o azul* (em inglês, *blue shift of the red edge*), perceptível quando é plotada a curva de reflectância  $\times$  comprimento de onda.

Estresses severos da vegetação, causados, por exemplo, por desidratação foliar, provocam o aparecimento desse fenômeno. Nessa mesma linha, quando o objetivo é estimar o conteúdo de clorofila foliar, a técnica denominada determinação da posição da borda do vermelho (em inglês, *red edge position determination*, REPD) tem se mostrado útil, em virtude de a posição dessa borda possuir relação com os níveis de nitrogênio e de clorofila nas folhas.

Cho e Skidmore (2006) apresentam uma inovadora técnica para a extração da posição da borda do vermelho com base em dados hiperespectrais.

# três

## ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO × AGRICULTURA

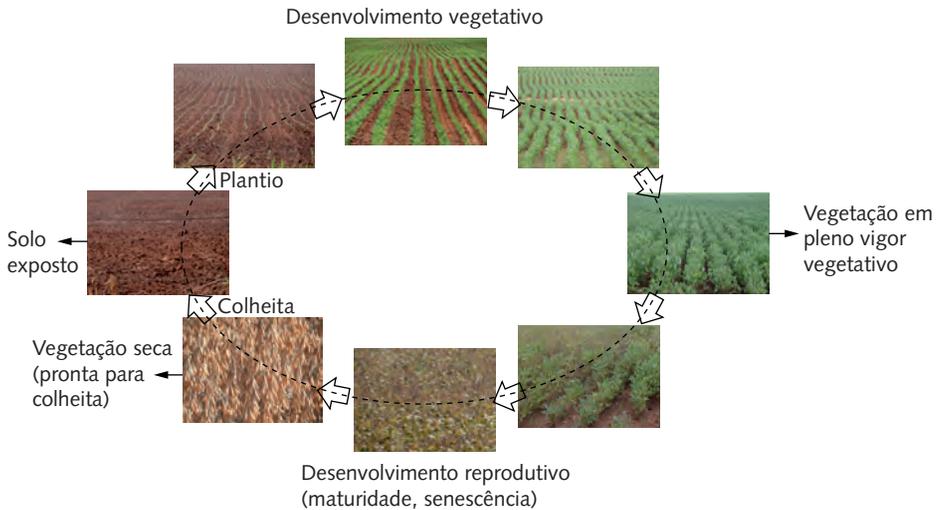
Entre as principais contribuições dos dados de sensoria-  
mento remoto para objetivos e aplicações em agricultura,  
situam-se aquelas relacionadas com o monitoramento e a  
estimativa de parâmetros biofísicos das culturas agrícolas.

Nesse sentido, os índices espectrais de vegetação (IVs)  
desempenham papel de primeira linha como meio para  
caracterizar a dinâmica temporal e o vigor da vegetação agrí-  
cola (Boxe 3.1).

Os fundamentos envolvidos nas interações entre a radia-  
ção eletromagnética e a vegetação, os quais possibilitam o  
funcionamento desses índices, foram expostos no Cap. 2, que  
trata sobre o comportamento espectral de culturas.

Os IVs podem ser definidos como formulações matemá-  
ticas desenvolvidas a partir de dados espectrais obtidos por  
sensores remotos, principalmente nas bandas do vermelho  
e do infravermelho próximo, visando permitir avaliações e  
estimativas da cobertura vegetal de uma área, em termos  
de parâmetros como área foliar, fitomassa, porcentagem de  
cobertura do solo e atividade fotossintética.

Essas transformações matemáticas podem ser interpreta-  
das como medidas semianalíticas da atividade da vegetação  
e têm sido largamente utilizadas em razão de conseguirem  
representar com fidedignidade variações da folhagem verde  
não somente em termos sazonais, mas também ao longo da  
superfície terrestre, com o objetivo de detectar variabilida-  
des especializadas.



**FIG. 3.1** Ilustração esquemática das principais fases de desenvolvimento de uma cultura agrícola de ciclo curto (soja)

Conforme ilustrado na Fig. 3.2, dependendo de como aumente o número de camadas foliares (uma a sete camadas), as respostas espectrais serão proporcionalmente expressas em diminuições na banda do vermelho (A) e em aumentos no infravermelho próximo (B). As variações nessas duas bandas constituem focos de fornecimento de informações sobre a fitomassa via uso dos IVs.

Quais são as suposições básicas necessárias para o funcionamento dos IVs? A mais básica delas é de que alguns tipos de formulação matemática usando dados espectrais sensoriados remotamente podem conter informações úteis sobre a vegetação sensoriada.

O pressuposto seguinte é de que as respostas espectrais de pixels que contêm solos expostos (não vegetação) formarão uma linha, denominada *linha do solo* (Fig. 3.3), quando tais respostas forem distribuídas em diagramas de dispersão (banda do vermelho  $\times$  banda do infravermelho próximo). A linha do solo é considerada a de vegetação zero.

Acima da linha do solo estarão as linhas correspondentes a pixels com vegetação. No diagrama representado na Fig. 3.3, quanto mais distante (para cima) da linha do solo uma isolinha estiver, maior será a quantidade de fitomassa correspondente.

Na linha do solo (Fig. 3.3), há que se considerar que, quanto mais espectralmente escuros forem os solos, ou seja, quanto menores forem as reflectâncias no vermelho e no infravermelho próximo, mais próximos de (A) esses solos estarão represen-



Conforme Qi et al. (1994), essas classes de IV são um pouco mais sensíveis às mudanças na quantidade de vegetação do que o Gemi e, por outro lado, menos sensíveis aos efeitos atmosféricos e aos ruídos dos solos do que o Gemi.

Por sua vez, Gitelson, Kaufman e Merzlyak (1996) propuseram outro índice com o objetivo de diminuir os efeitos atmosféricos, denominado *green atmospherically resistant vegetation index* (Gari), cuja formulação corresponde a:

$$Gari = \{NIR - [Green - (Blue - Red)]\} / \{NIR + [Green - (Blue - Red)]\} \quad (3.14)$$

em que:

*Blue*, *Green*, *Red*, *NIR* = valores dos pixels nas bandas azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, respectivamente.

Deve-se ressaltar que os procedimentos de adequadas correções atmosféricas produzem melhorias significativas em dados de sensoriamento remoto e são indicados para a obtenção dos melhores resultados possíveis com o uso de IVs.

### 3.4 O ÍNDICE NDWI

Um índice que não é classificado dentro das categorias até aqui expostas é o *normalized difference water index* (NDWI), proposto por Gao (1996), cujo principal objetivo é o sensoriamento remoto da água líquida contida na vegetação.

Enquanto o NDVI é baseado no uso de uma banda espectral no vermelho (próximo a 660 nm) e outra no infravermelho próximo (próximo a 869 nm) (ver Eq. 3.2), o NDWI utiliza duas bandas espectrais no infravermelho próximo, centradas aproximadamente em 860 nm e em 1.240 nm, nas quais a radiação eletromagnética incidente sobre o dossel da vegetação interage em profundidades similares, uma vez que ambas estão no infravermelho próximo. No caso das bandas utilizadas no NDVI, isso não ocorre, em razão de uma banda estar localizada no vermelho e outra no infravermelho próximo.

Dessa forma, pode-se considerar que o NDWI é uma quantificação das moléculas de água líquida presentes no dossel vegetal, as quais interagem com a radiação solar incidente, sendo que, inclusive, as bandas espectrais usadas nesse índice são menos sensíveis aos efeitos de espalhamento atmosférico do que os comprimentos de onda usados no NDVI.



tir mapear e monitorar variáveis importantes das culturas, incluindo os estresses (causados por água, insetos ou poluição, entre outros), a produção agrícola, a produtividade, os sequestros de carbono, a fenologia e a maturação das culturas (Boxe 3.2).

O sensoriamento remoto é considerado uma indispensável ferramenta que pode amplificar significativamente a eficácia dos métodos tradicionais de monitorar o meio ambiente, em razão de sua capacidade em cobrir rapidamente grandes áreas e com coberturas repetidas, fornecendo as informações espaciais e temporais necessárias para o manejo sustentável.

Vários avanços tecnológicos associados a diminuição de custos e melhoria em resoluções e qualidade dos dados têm sido obtidos nas últimas décadas e muitos outros estão por vir. O potencial do sensoriamento remoto na agricultura é muito grande, e muitos IVs têm sido desenvolvidos visando estudar a vegetação agrícola.

### **BOXE 3.2 O SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL DOS PIGMENTOS VEGETAIS**

A dinâmica das concentrações de pigmentos pode ser considerada diagnóstica de uma amplitude de propriedades e processos fisiológicos das plantas (Blackburn, 2007).

Pode-se considerar que os mais importantes dos pigmentos são as clorofilas (*a* e *b*), uma vez que desempenham o papel de controlar a quantidade de radiação solar que a folha absorve; portanto, a concentração foliar de clorofila controla o potencial fotossintético e, conseqüentemente, a produção primária.

Na estrutura molecular da clorofila está presente uma grande proporção de nitrogênio, e, assim, a determinação do conteúdo de clorofila provê significativo indicador indireto do *status* nutritivo das plantas.

Além disso, a clorofila geralmente diminui na presença de estresses e durante a fase de senescência. Portanto, medições dos conteúdos de clorofila total, de clorofila *a* e de clorofila *b*, individualmente, podem proporcionar informações úteis sobre as interações planta-ambiente.

Carotenoides (isto é, carotenos e xantofilas) e antocianinas também são pigmentos importantes na fisiologia das plantas. As propriedades de absorvância espectral dos pigmentos são manifestadas nos espectros de reflectância das folhas, o que oferece a oportunidade de usar medições da radiação refletida como metodologia não destrutiva para quantificar os pigmentos.

# quatro

## INTERPRETAÇÃO VISUAL DE IMAGENS OBTIDAS POR SENSORES REMOTOS ORBITAIS PARA ANÁLISE DE ALVOS AGRÍCOLAS

A interpretação visual de imagens obtidas por sensores remotos orbitais pode ser definida como um processo de extração de informações sobre os alvos da superfície terrestre (*e.g.*, talhão de cana-de-açúcar, pastagem, plantação de seringueira) tendo como base a resposta espectral desses alvos, a partir de imagens adquiridas por sensores a bordo de satélites. Exemplos de aplicação são dados no Boxe 4.1.

### **BOXE 4.1** APLICAÇÕES POTENCIAIS DA INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE NA AGRICULTURA

Na área de agricultura, são inúmeras as aplicações potenciais da interpretação de imagens de satélite. Pode-se citar como exemplos:

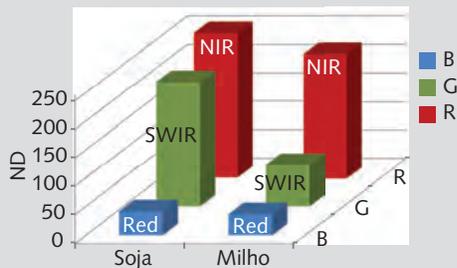
- \* Mapeamento de áreas agrícolas
- \* Identificação de espécies cultivadas
- \* Identificação de época de plantio e colheita
- \* Identificação de tipo de manejo adotado (*e.g.*, colheita de cana-de-açúcar com ou sem queimada)
- \* Monitoramento da intensificação agrícola (*e.g.*, identificação de áreas que produzem duas safras ao ano – 1ª e 2ª safras)
- \* Mapeamento de áreas irrigadas por pivô central

Para facilitar o processo de interpretação visual de imagens orbitais, são levados em consideração alguns elementos básicos, como a tonalidade, a cor, a forma, a textura, a sombra, o padrão, o tamanho e a localização geográfica. É como montar

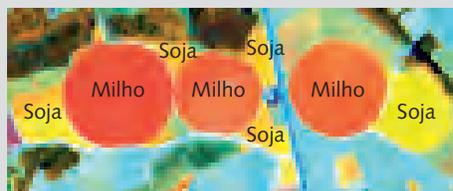


#### BOXE 4.2 COMPOSIÇÃO COLORIDA RGB NIR-SWIR-RED

Nas imagens em composição colorida RGB NIR-SWIR-Red, comumente utilizada para estudos agrícolas, a vegetação verde sadia (e.g., milho em pleno vigor vegetativo) aparece em tons de vermelho, pois tem alta reflectância no NIR. No entanto, algumas plantas, como a soja em pleno vigor vegetativo, aparecem em tons de amarelo. Isso é explicado pela alta reflectância no NIR e também no SWIR (embora menor que no NIR) e pelo fato de a mistura das cores vermelha e verde resultar em amarelo, segundo o sistema aditivo de cores. No gráfico ao lado são apresentados valores de número digital (ND) para as bandas do NIR, do SWIR e do vermelho (Red), exemplificando a resposta espectral de talhões de soja e de milho em pleno vigor vegetativo na composição colorida citada.



Landsat-8/OLI – RGB 564 (NIR-SWIR-Red)



Valores de número digital (ND) para as bandas do NIR, do SWIR e do vermelho (Red), com a resposta espectral de talhões de soja e de milho em pleno vigor vegetativo na composição colorida RGB NIR-SWIR-Red

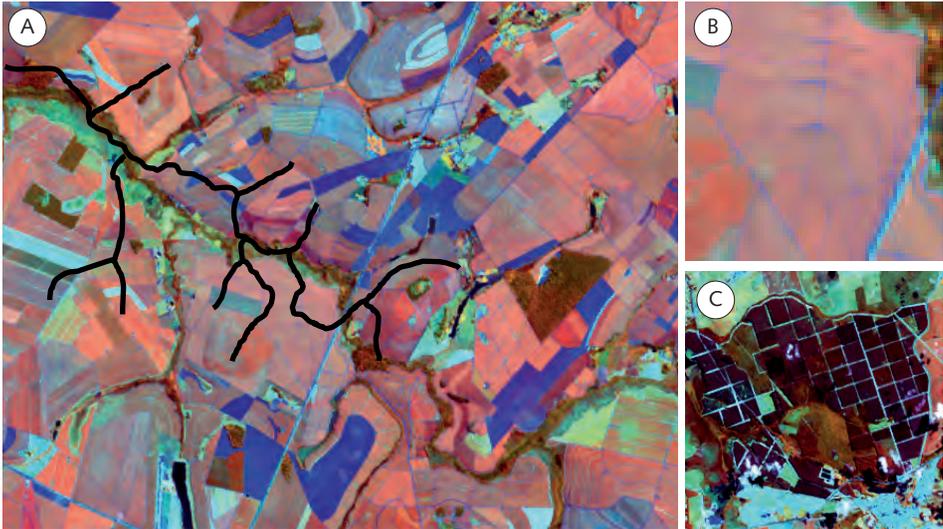
Variações de cor (matiz) da imagem podem também representar diferenças de idade ou de fases fenológicas de plantas de uma mesma espécie. Por exemplo, considerando a composição colorida RGB 564 (NIR-SWIR1-Red, sensor OLI), talhões mais velhos de eucalipto apresentam plantas mais altas e aparecem mais escuros nas imagens quando comparados aos talhões com plantas mais novas (menores) (Fig. 4.9A). Por sua vez, plantas de trigo, quando começam a maturar, perdem a coloração vermelha intensa na imagem (Fig. 4.9B).

### 4.3 FORMA

A forma diz respeito às feições dos alvos terrestres. Existem dois tipos de forma: irregulares, que são indicadores de alvos naturais, como matas, lagos, rios e nuvens;



ções de citros (Fig. 4.12C). Café plantado em linhas circulares em áreas de pivô de irrigação possuem padrão típico (Boxe 4.3).



**FIG. 4.12** Recortes da cena de uma imagem OLI/Landsat-8 na composição colorida falsa cor RGB 564 (NIR-SWIR1-Red) em que três padrões são identificados: (A) drenagem (traçado em preto, que lembra os vasos sanguíneos do corpo humano), (B) talhão de cana-de-açúcar (presença de carregadores) e (C) plantação de citros (áreas quadriculadas)

## 4.6 SOMBRA

A sombra pode ajudar a identificar diferentes alvos nas imagens de satélite, separando, por exemplo, áreas ocupadas com silvicultura (floresta plantada) de áreas com floresta natural.

Nas áreas de florestas plantadas, as árvores são do mesmo tamanho (mesma espécie), o dossel é mais homogêneo. Nas áreas de mata natural, as árvores são de diferentes espécies, com copas de diferentes alturas, e as copas das árvores mais altas fazem sombra nas mais baixas. Esse sombreamento faz com que o talhão tenha um aspecto diferente na imagem de satélite (textura rugosa), conforme pode ser observado na Fig. 4.13A,B.

A sombra pode também prejudicar a interpretação de imagens, visto que a visualização dos alvos pode ser comprometida pelo sombreamento causado pelo relevo, em regiões de declive, ou pela presença de sombra de nuvens (Fig. 4.13C).



## 4.8 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA (CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO)

A localização geográfica está relacionada ao entendimento ou à familiarização com a região referente à imagem a ser interpretada. Quanto maior for o conhecimento sobre a área em questão, maior será a quantidade de informações que poderão ser extraídas a partir da interpretação das imagens.

Algumas informações relevantes no processo de interpretação de imagens de alvos agrícolas são os tipos de culturas tradicionalmente plantadas na região analisada, o calendário agrícola dessas culturas, o ciclo fenológico das culturas, o tipo de solo e as práticas culturais adotadas. Muitas dessas informações podem ser obtidas na internet, nos sites do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (e.g., Sistema IBGE de Recuperação Automática – Sidra), da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) (e.g., Agritempo) e do Instituto Agrônômico (IAC) (e.g., Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas – Ciiagro).

### QUESTÕES

4.1) Na Fig. 4.15 são apresentados recortes de imagens de três bandas de faixas espectrais distintas. Dada a informação de que os alvos destacados (setas amarelas) constituem área com vegetação verde, identificar qual a faixa espectral (visível, NIR ou SWIR) correspondente a cada imagem. Explicar sua resposta.

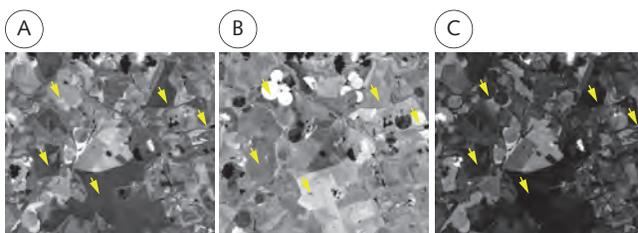


FIG. 4.15 Recortes de imagens de três bandas de faixas espectrais distintas

**Resposta:** (A) SWIR, (B) NIR e (C) visível. Considerando as faixas espectrais do visível, do NIR e do SWIR, a vegetação verde reflete mais no NIR e absorve mais no visível. Nas imagens em tons de cinza, quanto mais energia eletromagnética um alvo refletir, mais claro ele aparecerá na imagem; por outro lado, quanto menos energia ele refletir (quanto maior for sua absorção), mais escuro aparecerá na imagem. Nas três imagens apresentadas, os alvos destacados aparecem mais claros em (B) e mais escuros em (C). Portanto, (B) corresponde ao NIR, e (C), ao visível, restando níveis intermediários de tons de cinza para o SWIR (A).

# cinco

## DINÂMICA AGRÍCOLA E SENSORIAMENTO REMOTO

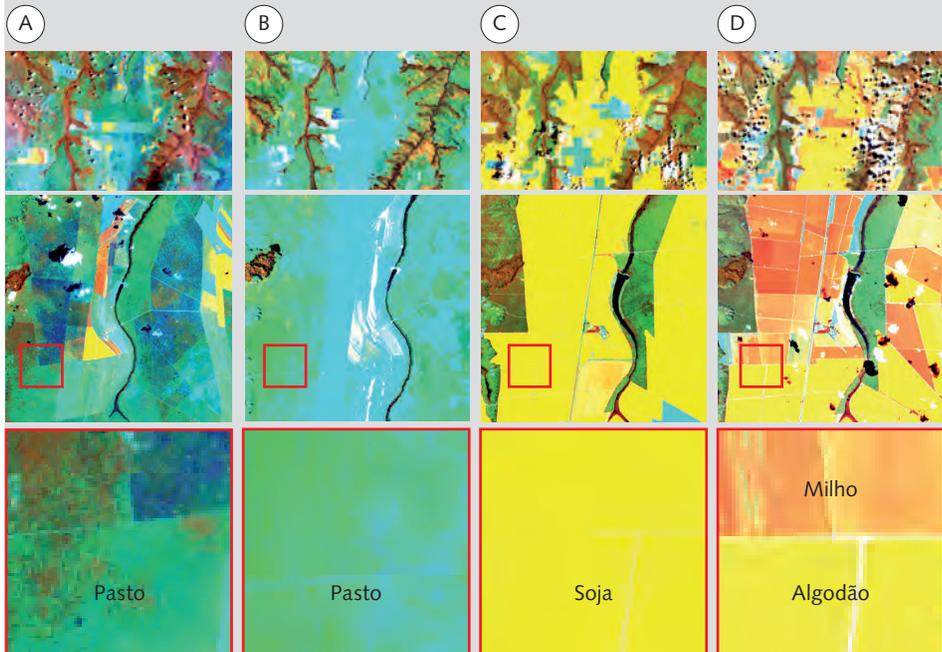
Para melhor compreender a dinâmica agrícola atual, é preciso conhecer um pouco do histórico de desenvolvimento da agricultura no Brasil. Até a década de 1950, o crescimento da produção agrícola brasileira ocorreu pela expansão da área cultivada. A partir da década de 1960, o aumento da produção também foi possível pelo desenvolvimento e disseminação de novas tecnologias e práticas agrícolas, como melhoria genética de sementes e uso de insumos químicos e mecanização, fase essa conhecida como Revolução Verde. Desse momento em diante, o Brasil entrou em um processo denominado *modernização da agricultura*, o qual foi intensificado a partir dos anos 1970. Em consequência disso, ocorreu o aumento do cultivo de monoculturas, como cana-de-açúcar e soja. Ainda nesse período, houve a integração entre a agricultura e a indústria pela formação dos chamados *complexos agroindustriais*. A partir da década de 1990, aconteceu a globalização da agricultura, com a internacionalização dos complexos agroindustriais e o crescimento da demanda por produtos agrícolas como fonte de proteína, fibras e matéria-prima para biocombustíveis.

Mais recentemente, motivado pela crescente demanda por alimentos, por um lado, e pela preocupação com a preservação das áreas de vegetação nativa (pressão para reduzir a expansão de áreas agrícolas sobre essas regiões), por outro, surgiu o processo de intensificação da agricultura. Isso é possível pela adoção de práticas como a irrigação e os



### BOXE 5.1 DINÂMICA AGRÍCOLA BRASILEIRA ENTRE 1990 E 2014

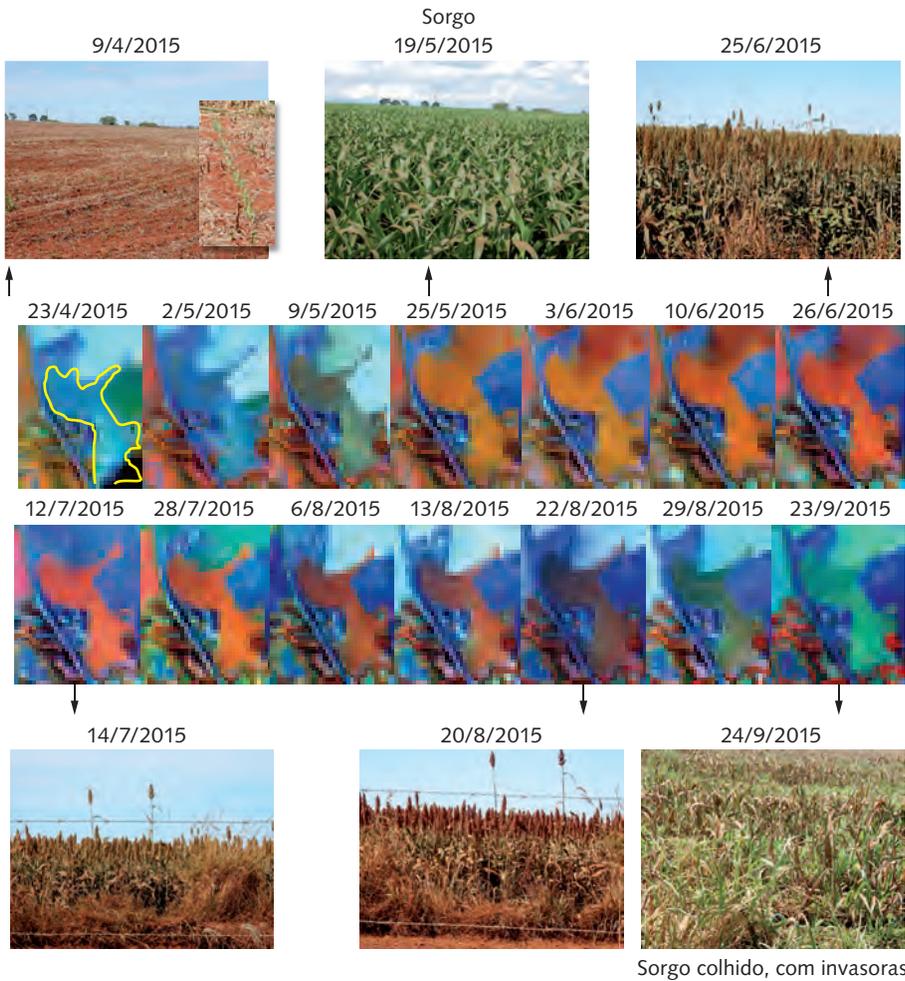
A intensa dinâmica da agricultura brasileira foi demonstrada no trabalho de Luiz, Sanches e Neves (2017). Os autores fizeram um estudo com base nos dados da Pesquisa Agrícola Municipal (PAM), do IBGE, para soja, milho e cana-de-açúcar. No período de 25 anos analisado (1990-2014), a produtividade agrícola aumentou fortemente, a área colhida com soja, milho e cana-de-açúcar aumentou em 106,8%, e a quantidade produzida cresceu 197,4%, impulsionada pela intensificação da agricultura.



Recortes de imagens (composição colorida RGB NIR-SWIR-R) de áreas agrícolas do município de Sapezal (MT). Imagens TM/Landsat-5 (RGB 453) obtidas em (A) 25/12/1991 e (B) 2/6/1992 e imagens OLI/Landsat-8 (RGB 564) obtidas em (C) 9/1/2015 e (D) 17/5/2015. A vegetação verde aparece em matizes de vermelho, marrom, laranja e amarelo, e a vegetação seca (e.g., pastos na época da seca), em matizes de verde

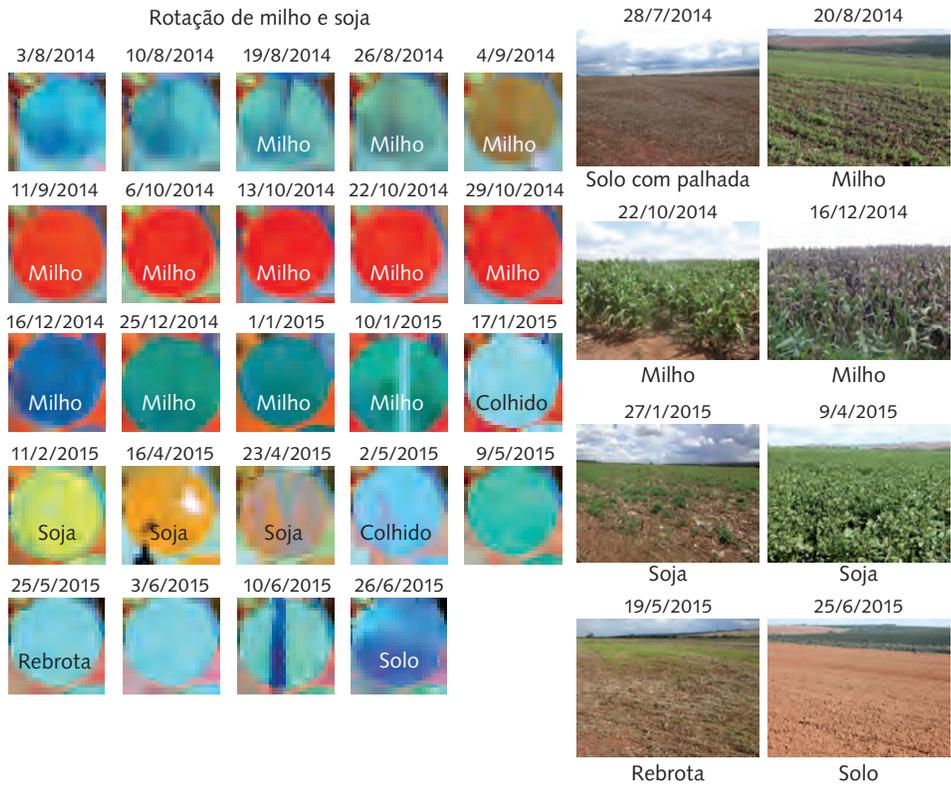
Fonte: Luiz, Sanches e Neves (2017).

Além do aumento de produtividade, a mudança de protagonismo entre as regiões brasileiras foi destacada. Por exemplo, em 1990, 25% do total de milho era produzido nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país; mas, em 2014, o



**FIG. 5.6** Talhão com sorgo: recortes de imagens OLI/Landsat-8, das órbitas/ponto 219/75 e 220/75, na composição RGB 564, e fotos tiradas no campo, ao longo do desenvolvimento da cultura durante o período de 2ª safra

Embora o sorgo tenha sido plantado antes do dia 9/4, conforme mostrado na foto de campo tirada nesse dia, apenas a partir da imagem de 9/5 foi possível verificar, com base na resposta espectral, que havia alguma cultura crescendo nesse talhão. A mudança da fase vegetativa para a reprodutiva não pôde ser facilmente identificada nas imagens adquiridas, ao contrário do que foi observado para os talhões de milho e trigo apresentados anteriormente.

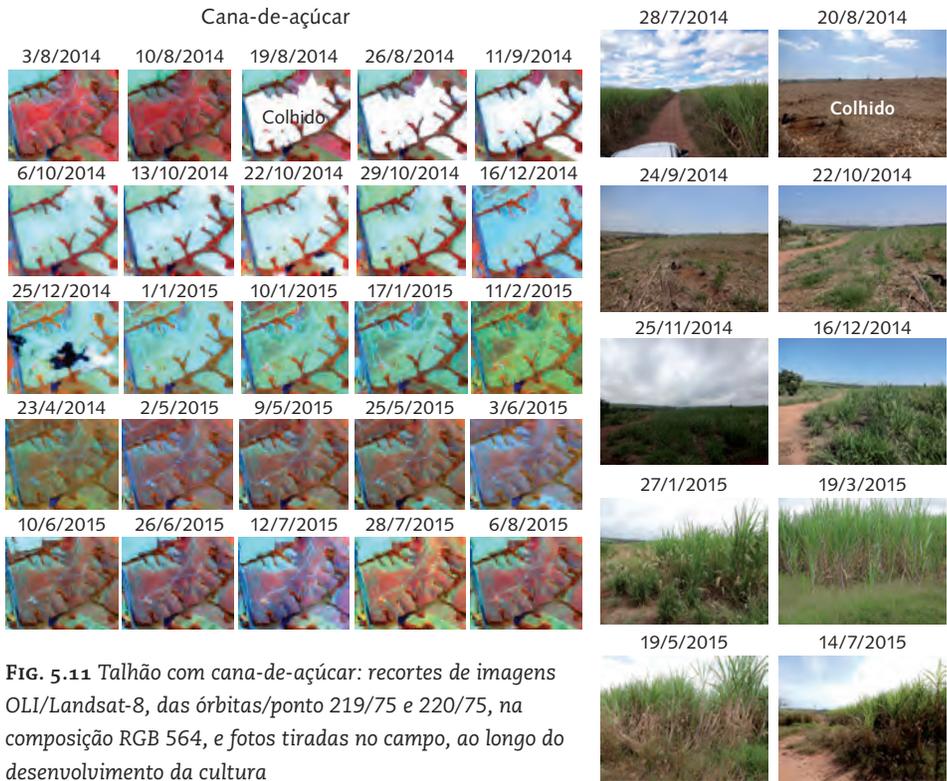


**FIG. 5.9** Talhão com rotação de culturas de milho e de soja sob pivô de irrigação: recortes de imagens OLI/Landsat-8, das órbitas/ponto 219/75 e 220/75, na composição RGB 564, e fotos tiradas no campo

senescência da planta aumenta gradualmente, e a cor das imagens passa de matizes de vermelho para marrom, e em seguida para verde. Quando o milho está pronto para ser colhido, aparece em matiz de verde-escuro na composição RGB 564, pelo fato de as plantas, incluindo as folhas e as espigas, estarem completamente secas (matéria seca reflete bastante no SWIR). Em maio, o plantio da batata tem início. Ao contrário do milho, que foi semeado de uma vez só em toda a área do pivô, a batata foi plantada em partes. Isso fica evidente quando são comparadas as imagens dos dias 25/5/2015 e 28/7/2015.

## 5.4 CULTURAS SEMIPERENES

Analisando as imagens adquiridas ao longo do desenvolvimento de um talhão de cana-de-açúcar (Fig. 5.11), a alteração mais evidente no comportamento espectral é



**FIG. 5.11** Talhão com cana-de-açúcar: recortes de imagens OLI/Landsat-8, das órbitas/ponto 219/75 e 220/75, na composição RGB 564, e fotos tiradas no campo, ao longo do desenvolvimento da cultura

vimento vegetativo, talhões de mandioca aparecem nas cores amarela/laranja na composição OLI RGB 564. A mandioca é uma espécie semiperene, que perde suas folhas durante o desenvolvimento da planta, o que pode ser observado nas imagens adquiridas no final de maio em diante.

Na fotografia tirada no trabalho de campo realizado em 14/7/2015, as plantas estavam quase totalmente sem folhas. Como consequência, a resposta espectral da mandioca nessa fase é dominada pelas hastes das plantas (alta reflectância no SWIR) e pelo solo (alta reflectância no vermelho), o que explica a cor ciano na imagem OLI observada no talhão de mandioca a partir de 12/7/2015. Em algumas partes do talhão analisado (Fig. 5.12), a cor observada é um matiz de marrom, e não ciano, o que corresponde à presença de plantas invasoras.

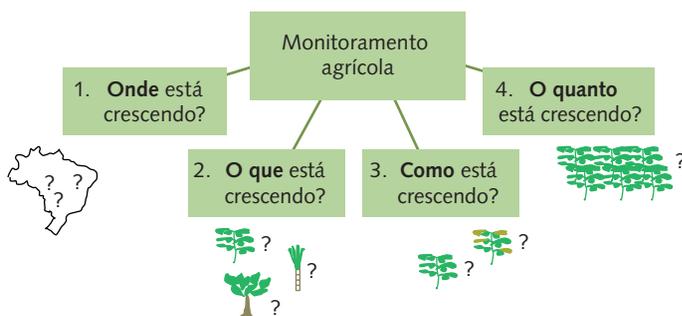
## 5.5 CULTURAS PERENES

Ao examinar uma série temporal (um ano) de imagens OLI de um talhão de laranja (Fig. 5.13), quase nenhuma mudança espectral é observada entre agosto e outubro de

# seis

## MONITORAMENTO AGRÍCOLA VIA SENSORIAMENTO REMOTO

O monitoramento agrícola consiste em acompanhar uma determinada espécie cultivada (e.g., cultura, pastagem, floresta plantada) ao longo de seu desenvolvimento com o intuito de avaliar sua evolução. No monitoramento por sensoriamento remoto, procura-se responder quatro questões-chave (Fig. 6.1): Onde está crescendo? O que está crescendo? Como está crescendo? E o quanto está crescendo?



**FIG. 6.1** Questões-chave a serem respondidas no monitoramento agrícola utilizando sensoriamento remoto

No “onde está crescendo?”, procura-se mapear as áreas cultivadas. No “o que está crescendo?”, o interesse é identificar a espécie cultivada (e.g., soja, milho, algodão) ou o tipo de cultura (e.g., anual ou perene). No “como está crescendo?”, o foco é verificar o desenvolvimento das culturas, ou seja, fazer uma avaliação qualitativa. E no “o quanto está crescendo?”, o



## 6.2 ACOMPANHAMENTO DO DESENVOLVIMENTO DE CULTURAS (AVALIAÇÃO QUALITATIVA)

O “como está crescendo?” busca verificar se a planta está se desenvolvendo normalmente ou se está passando por algum tipo de estresse (*e.g.*, nutricional, hídrico, doença, contaminação). Imagens de índices de vegetação (IVs) (*e.g.*, NDVI) servem para esse propósito, visto que os IVs obtidos de sensores a bordo de satélites servem como indicadores da quantidade de fração da radiação fotossinteticamente ativa que é absorvida pela vegetação. Isso porque a fotossíntese líquida está diretamente relacionada à quantidade de radiação fotossinteticamente ativa que as plantas absorvem. Quanto mais uma planta absorver a luz solar visível durante seu crescimento, mais fotossintetizante e produtiva ela será (*e.g.*, alto valor de NDVI). Por outro lado, quanto menos luz solar a planta absorver, menos fotossíntese será realizada, e, por consequência, a planta terá menor produção (*e.g.*, baixo valor de NDVI).

Com base nos índices, é possível calcular imagens de anomalia de IVs. Por exemplo, a anomalia do NDVI consiste na diferença entre o NDVI médio para um determinado mês de um dado ano e o NDVI médio para o mesmo mês ao longo de um número específico de anos, e o mesmo vale para outros índices. Essa abordagem pode ser utilizada para caracterizar a saúde da vegetação para um determinado mês e ano em relação ao que é considerado normal, como é feito no Crop Monitor/Geoglam (Boxe 6.1). Esse pode ser um bom indicador de seca, visto que na maioria dos climas o crescimento da vegetação é limitado pela água, ou de declínio da saúde da vegetação causada por algum outro motivo, como falta de nutrientes ou doença. É importante ressaltar que o dado sobre anomalia de NDVI serve para dar o alerta caso algo esteja fora do normal, mas não é indicado para identificar o que provocou esse fato, caso em que outras informações são necessárias (dados de precipitação, dados de campo etc.).

## 6.3 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA

A questão “o quanto está crescendo?” busca informações sobre a produção agrícola (safra) e está relacionada à obtenção das estimativas ou estatísticas agrícolas, que englobam a estimativa de área e de produtividade das espécies agrícolas cultivadas.

### 6.3.1 Estimativa de área

A estimativa de área utilizando dados de sensoriamento remoto pode ser feita com base em mapeamentos ou amostragem. Na primeira abordagem, que é bastante utilizada, mapas temáticos são elaborados por classificação visual ou automática



de *double cropping* (plantio durante primeira e segunda safras) ou pela implementação de irrigação (Boxe 6.2); identificar qual tipo de manejo cultural é utilizado em determinada região (e.g., cana-de-açúcar colhida com ou sem queimada); verificar se o vazio sanitário, isto é, o período em que o produtor não pode plantar determinada espécie para controlar certas doenças, está sendo respeitado (e.g., vazio sanitário da soja para evitar a ferrugem asiática); identificar data de plantio de culturas; entre outros.

### **BOXE 6.2 MAPEAMENTO DE ÁREAS COM PIVÔ CENTRAL DE IRRIGAÇÃO UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITE**

A Agência Nacional de Águas (ANA) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) Milho e Sorgo fizeram o levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil, para os anos de 2013 e 2014, utilizando dados de sensoriamento remoto. Os pivôs foram identificados visualmente em imagens de satélite de média (OLI/Landsat-8) e alta (Google Earth Pro) resolução espacial. Foram obtidas preferencialmente imagens do período seco de cada região do país. Dados secundários, tais como outorgas de direito de uso de recursos hídricos e estatísticas censitárias, auxiliaram o mapeamento.

Os resultados mostraram que em 2013 existiam aproximadamente 18 mil pivôs centrais no Brasil, cobrindo uma área de 1,18 milhão de hectares. Em 2014, foram mapeados 19,9 mil pivôs, totalizando uma área de 1,275 milhão de hectares. Os Estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia e São Paulo concentram cerca de 80% da área ocupada por pivôs centrais no país. E, considerando a divisão hidrográfica nacional, as maiores áreas ocupadas por pivôs foram observadas nas regiões hidrográficas do Paraná, São Francisco e Tocantins-Araguaia.

Fonte: ANA e Embrapa/CNPMS (2014, 2016).

## **QUESTÕES**

6.1) Na Fig. 6.6 são apresentados recortes de imagens TM/Landsat-5, ETM+/Landsat-7 e OLI/Landsat-8, em composição colorida RGB NIR-SWIR-Red, cobrindo o período entre 1985 e 2015, correspondente a uma área agrícola localizada no município de Casa Branca (SP). Que tipo de intensificação agrícola ocorreu nessa área e que pode ser detectado com base na interpretação visual dessa série de imagens?

# sete

## SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL APLICADO AOS ALVOS AGRÍCOLAS

Os avanços na tecnologia de construção de sensores, aliados aos avanços mais recentes, a partir de 1990, das telecomunicações e da informática, que melhoraram consideravelmente a capacidade de transmissão, armazenamento e processamento de dados, iniciaram uma nova era do sensoriamento remoto. Na parte de sistemas sensores, houve a evolução dos sistemas de imageamento de quadro para sistemas de varredura mecânica (*whiskbroom*), e em seguida foram desenvolvidos os sistemas de varredura eletrônica (*pushbroom*), que são os detectores do tipo *charge coupled device* (CCD). Com o advento dos detectores CCD, foi possível a construção de sensores hiperespectrais imageadores e, por consequência, o desenvolvimento do sensoriamento remoto hiperespectral (Goetz, 2009).

De forma geral, o termo *sensoriamento remoto hiperespectral* se refere à utilização de sensores de alta resolução espectral (hiperespectral) para a obtenção de informação detalhada sobre alvos (objetos, fenômenos) sem que haja contato direto entre eles, isto é, de forma remota. E o produto gerado pode ser um espectro, se for utilizado um sensor hiperespectral não imageador, como um espectrorradiômetro, ou uma imagem hiperespectral, da qual se podem extrair espectros, se for utilizado um sensor hiperespectral imageador. Embora o termo *remoto* muitas vezes seja automaticamente relacionado aos sensores a bordo de satélites ou aeronaves, muitas vezes é utilizado também para se referir a sensores utiliza-



### BOXE 7.1 DESENVOLVIMENTO DO SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL

Existem quatro pontos importantes para garantir a continuação do desenvolvimento do sensoriamento remoto hiperespectral:

- \* a aquisição de um número maior de medidas acuradas em diferentes regiões e épocas;
- \* a necessidade de treinar estudantes e pesquisadores para trabalhar com esse tipo de dados;
- \* o contínuo avanço de tecnologias computacionais e de sensores;
- \* a necessidade de sistemas imageadores hiperespectrais orbitais capazes de produzir imagens de boa qualidade e resolução.

Os avanços vão surgir à medida que mais pesquisas sejam realizadas por um número maior de pesquisadores, em diferentes regiões do planeta.

Fonte: Goetz (2009).

(HyMap), projetado pela empresa Integrated Spectronics Pty Ltd., que é baseada na Austrália; e o ProSpecTIR-VS, da empresa americana SpecTIR (Tab. 7.1). O Brasil passou a ter acesso direto a essa tecnologia a partir de 2010, quando a empresa brasileira FotoTerra fez uma parceria tecnológica com a SpecTIR e trouxe um sensor ProSpecTIR-VS para ficar permanentemente disponível no país. Antes disso, o acesso para coletar dados hiperespectrais de sensores aéreos em território brasileiro era muito limitado.

**TAB. 7.1** PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE QUATRO SENSORES HIPERESPECTRAIS AEROTRANSPORTADOS

Sensor	Organização (país)	Número de bandas	Características
Aviris	Nasa (EUA)	224	Faixa espectral: 400-2.500 nm 10 nm resolução espectral
Casi	ITRES Research (Canadá)	288	Faixa espectral: 430-870 nm 2-12 nm resolução espectral
HyMap	Integrated Spectronics Pty Ltd. (Austrália)	128	Faixa espectral: 400-2.450 nm 15-20 nm resolução espectral
ProSpecTIR-VS	SpecTIR (EUA)	~360	Faixa espectral: 400-2.500 nm 1-5 nm resolução espectral

Fonte: Ortenberg (2011), Van der Meer et al. (2012) e Staenz e Held (2012).



foram obtidos com um ASD FieldSpec Pro. Diferenças evidentes foram observadas no comportamento espectral das folhas analisadas. Os resultados indicaram que os índices de vegetação *pigments specific simple ratio* (PSSRa e PSSRb) apresentaram maior sensibilidade na detecção dos estádios iniciais da Sigatoka Negra e Amarela, respectivamente.

Martins, Galo e Vieira (2015) aplicaram técnicas de análise espectral (*e.g.*, SAM) para caracterizar a resposta espectral de plantas de café infectadas por nematoides em diferentes estágios. Com o auxílio de um ASD FieldSpec HandHeld, foram adquiridos espectros foliares de plantas saudáveis e infectadas, em laboratório. Com as análises aplicadas, foi possível caracterizar espectralmente quatro condições fitossanitárias do cafeeiro.

### 7.3.2 Detecção de estresse em plantas

Sanches, Souza Filho e Kokaly (2014) exploraram a análise de feições espectrais para detectar estresse em plantas de braquiária e soja perene causado pela contaminação do solo com gasolina e diesel. Uma série temporal de dados de folhas e de dosséis de plantas com diferentes níveis de estresse foi coletada com o auxílio de um ASD FieldSpec Pro FR. Também foi analisada uma imagem do sensor aerotransportado ProSpecTIR-VS. Os parâmetros profundidade, largura e área da feição de absorção da clorofila centrada em 680 nm foram obtidos com a aplicação da técnica de remoção do contínuo. Os melhores indicadores de estresse em plantas foram o índice *plant stress detection index* (PSDI) e a área da feição da clorofila, quando analisados os dados foliares; e o PSDI, quando analisados os dados de dossel (medições obtidas em campo e da imagem).

Moreira, Teixeira e Galvão (2015) avaliaram índices de vegetação calculados com dados multiespectral (Landsat-8) e hiperespectral (Hyperion) para detectar estresse salino em arroz. Foi possível identificar alterações da reflectância dos dosséis de plantas de arroz com diferentes concentrações salinas do solo com os dois sensores analisados. No caso dos índices hiperespectrais estudados, as estimativas foram melhoradas ao associar as regiões ligadas à clorofila com as referentes ao teor de água no dossel.

### 7.3.3 Mapeamento de culturas agrícolas e discriminação de diferentes variedades

Galvão, Formaggio e Tisot (2006) obtiveram bons resultados ao discriminar cinco variedades de cana-de-açúcar com dados Hyperion. Foram testadas razões de reflec-

# oito

## SENSORIAMENTO REMOTO PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO

Um aspecto interessante da agricultura praticada no passado, e em muitas localidades ainda hoje, é que suas práticas baseavam-se geralmente em médias, seja em relação à aplicação de insumos, seja em relação à condição dos solos, e, dessa forma, verificava-se que a questão das variabilidades espaciais não era devidamente levada em conta.

Contudo, essas práticas baseadas em médias estão cada vez mais sendo substituídas, visando racionalizar o emprego de recursos e insumos, simultaneamente à busca de elevação da produtividade e da sustentabilidade ambiental.

A quantidade de novas terras aráveis mundiais já não apresenta o mesmo cenário de abundância do início do século XX, quando ainda havia extensas reservas disponíveis, e, assim, verifica-se hoje que as pressões são crescentes.

Em razão desse cenário, já no início da década de 1990 previa-se que a disponibilidade de terra arável *per capita* no planeta sofreria um declínio do valor de 0,23 ha, aproximadamente, em 2000 para cerca de 0,15 ha por volta de 2050 (Lal, 1991).

Desse modo, como levantado por Seelan et al. (2003), fica realçada a necessidade de introdução de tecnologias modernas, visando melhorar a produtividade das culturas e fornecer informações que permitam melhores e mais rápidas decisões de manejo, bem como de redução de gastos com defensivos químicos e com fertilizantes, buscando aumentar as margens de lucro e restringir a poluição que a agricultura pode causar.



## 8.5 ALERTA DE ATAQUE DE PRAGAS

Nas imagens multi- e hiperespectrais, é possível mapear áreas dentro dos talhões agrícolas nas quais haja determinados níveis de infestação de pragas causadas por insetos e que requerem decisões sobre a aplicação de inseticidas.

Os IVs baseados em faixas espectrais situadas no infravermelho próximo e no vermelho são em geral sensíveis às diminuições de fitomassa provocadas por insetos, quando acima de um determinado nível de infestação.

As áreas cultivadas mostradas em imagens de sensoriamento remoto podem ser classificadas dependendo dos valores dos IVs.

Contudo, mesmo que os dados de sensoriamento remoto possam mostrar quais áreas dos talhões estão afetadas e, portanto, com desenvolvimento prejudicado, nem sempre é possível determinar a causa real do problema, se forem utilizados somente dados de sensoriamento remoto. Esses dados servirão, no entanto, para alertar o fazendeiro sobre determinadas áreas, de modo que seja possível fazer uma verificação mais detalhada e definir se o problema é falta de nutrientes, carência de água, interferência de ervas ou de pragas.

## 8.6 USO DE SIG EM AGRICULTURA DE PRECISÃO

Pode-se dizer que a AP é um sistema composto de um conjunto de elementos constituintes e que o nível de sucesso desse sistema depende da capacidade de integrar e manter em funcionamento, com eficiência, as modernas tecnologias que o compõem, necessitando ser operado em nível de fazenda.

Conforme Burroughs e McDonnell (1998) e Landau, Guimarães e Hirsch (2015), os SIGs são *softwares* compostos de vários módulos dedicados ao armazenamento e ao processamento de dados com localização geográfica conhecida (geoprocessamento), o que possibilita a análise de padrões, a integração de modelos espaciais, o monitoramento, a simulação de precisões e a apresentação de uma grande quantidade de informação em forma de mapas, gráficos, figuras e sistemas multimídia.

É amplamente reconhecida sua importância na organização e na integração espacial de informações de diferentes naturezas, tornando possível relacionar com grande praticidade e precisão uma imensa quantidade de dados, realizar troca de escalas e de projeção cartográfica e relacionar bases de dados multidisciplinares, facilitando, dessa forma, a solução de problemas reais e concretos, assim como a gestão adequada do espaço geográfico.

O uso de SIG, juntamente com o sensoriamento remoto, está aumentando de modo significativo em agricultura, e as aplicações incluem estimativas de produ-



O sistema também possibilita, quando utilizado num implemento pulverizador, por exemplo, identificar os locais de aplicação e, gerar um mapa de aplicações, de modo a evitar que o produto seja aplicado duas vezes em um mesmo lugar ou que não seja aplicado em outros locais da lavoura.

O desenvolvimento da AP, também denominada *manejo específico conforme as necessidades locais*, é possibilitado pela combinação de dados GPS com as habilidades dos SIGs para otimizados manejos e análises de grandes conjuntos de dados georreferenciados, em mapeamentos de campo, amostragens de solos, guiamento de tratores e máquinas agrícolas, avaliações de estado das culturas, aplicações em taxas variáveis, e obtenção de mapas de produtividade.

## 8.8 VANTs NA AGRICULTURA DE PRECISÃO

Segundo Jorge e Inamasu (2014), o termo *Veículo Aéreo Não Tripulado* (VANT), também chamado de *drone*, é mundialmente reconhecido e inclui uma grande gama de aeronaves que são autônomas, semiautônomas ou remotamente operadas.

Em tempos passados, quando havia a necessidade de fotografias aéreas de uma região, era necessário recorrer ao uso de aviões de pequeno porte, o que representava operações de razoável custo e demanda de tempo.

Atualmente, há equipamentos bem menores, como os VANTs, com custos significativamente inferiores, os quais podem ser pilotados remotamente em voos mais próximos do solo, com excelente detalhamento dos dados, e que têm configuração compatível com as necessidades em nível de fazendas.

Os desenvolvimentos relacionados aos VANTs iniciaram-se na década de 1970, principalmente com objetivos militares, e hoje vários países trabalham nos aprimoramentos dessa tecnologia, que apresenta um grande número de aplicações e possibilidades.

Jorge e Inamasu (2014) discorrem sobre os equipamentos usados no Brasil, categorizando-os nos seguintes tipos: avião, helicóptero, multirrotor, e dirigível ou balão. O Quadro 8.1 apresenta as vantagens e as desvantagens dos diferentes tipos de VANT segundo os mesmos autores e também segundo Medeiros (2007).

Os tipos de sensor que podem ser acoplados a VANTs são: as câmeras térmicas, que atuam no SWIR (*short wave infrared*), entre 1,3  $\mu\text{m}$  e 2,5  $\mu\text{m}$ , e podem auxiliar no registro de estresses por carências hídricas em áreas irrigadas; as câmeras multiespectrais, que possuem bandas espectrais e permitem a obtenção de IVs, que podem indicar problemas nutricionais; as câmeras RGB, que, conforme Jorge e Inamasu (2014), possibilitam a detecção de falhas de plantio e do estado de desenvolvimento

# nove

## PERSPECTIVAS FUTURAS DA AGRICULTURA BRASILEIRA E MUNDIAL

O planeta Terra abriga, neste início de século XXI, cerca de 7,2 bilhões de habitantes. A agricultura, por seu lado, é responsável pelo fornecimento de alimentos, fibras e bioenergia para o suprimento das necessidades da comunidade humana que vive no planeta.

Foley et al. (2011) afirmam que atualmente cerca de um bilhão de pessoas estão em condições de subnutrição, ao mesmo tempo que os sistemas agrícolas causam preocupação por defrontarem-se com problemas de degradação dos solos, inseguranças quanto à disponibilidade de água, alterações na biodiversidade e distúrbios climáticos em escala global (Boxe 9.1).

Como ressaltam os citados autores, para atingir níveis satisfatórios quanto à segurança alimentar e às premências de manutenção da sustentabilidade, há a necessidade de aumentar substancialmente a disponibilidade de produtos agrícolas sem, contudo, permitir que a pegada ambiental da agricultura aumente de forma descontrolada.

Conforme a FAO (2011), as áreas com culturas agrícolas cobrem cerca de 1,53 bilhão de hectares, enquanto as áreas de pecuária cobrem cerca de 3,38 bilhões de hectares, coberturas essas que, somadas, equivalem a aproximadamente 38% das extensões livres de coberturas com gelo.

Ou seja, a agropecuária equivale à classe de maior extensão de terras utilizadas do planeta, sendo que essas áreas estão entre as que possuem melhores condições para culti-



## 9.1 SENSORES DE CONTATO E SENSORES PROXIMAIS

Objetivam, em geral, fornecer informações acerca da variabilidade espacial das características das plantas e dos solos nas lavouras.

Os sensores de contato, quando se destinam a obter variáveis pedológicas, por exemplo, possuem uma parte que penetra no solo para medição de acidez, condutividade elétrica e compactação. Quando se pretende avaliar as variações de produtividade, tais sensores são contactados com os grãos durante o processo de colheita.

Já os sensores proximais não entram em contato direto com os objetos de estudo, sendo de natureza óptica, uma vez que os fótons do espectro visível ou do infravermelho incidem no objeto (ou são emitidos por ele) e em seguida direcionam-se para o sensor.

Dessa forma, o princípio físico de funcionamento é o mesmo utilizado pelos sensores a bordo de aeronaves ou de satélites no caso do sensoriamento remoto, sendo apenas a distância do sensor em relação ao alvo a diferença. Por outro lado, o sensoriamento proximal destina-se a aplicações mais *in situ*, ao passo que o sensoriamento remoto convencional visa a áreas extensas.

Sabe-se que o nitrogênio é um dos nutrientes exigidos em maiores quantidades pelas culturas agrícolas; além disso, ocorre uma dinâmica complexa nas trocas desse elemento nutriente entre os solos, as plantas e a atmosfera. Assim, o manejo do nitrogênio nas propriedades agrícolas é proporcionalmente desafiador.

A fitomassa e o teor de clorofila das plantas estão entre os principais indicadores de suficiência ou deficiência de nitrogênio. Desse modo, equipamentos como o clorofilômetro (sensor de contato) e sensores ópticos (sensores proximais) vêm constituindo-se em congruentes meios para avaliar o *status* de nitrogênio nas plantas.

A utilização de sensores para avaliar o estado nutricional do nitrogênio em culturas agrícolas justifica-se pelo fato de, como dito anteriormente, o conteúdo desse nutriente nos solos ter alta variabilidade dinâmica tanto espacial quanto temporalmente e a aplicação de fertilizantes não ser sincronizada com a absorção pela planta; além disso, as precipitações podem causar a sua lixiviação, e as análises de solos para nitrogênio são relativamente caras.

Conforme Jorge e Inamasu (2016), o uso desses equipamentos com o objetivo de otimizar as aplicações nitrogenadas em milho proporcionou economia que variou entre 27% e 71%, além de conferir ganhos ambientais significativos, na medida em que a aplicação otimizada impede a lixiviação do nutriente para os recursos hídricos. Essa economia torna-se ainda mais significativa quando são consideradas plantações com dimensões de milhares de hectares, como as encontradas no Estado de Mato Grosso.



## 9.9 A NECESSIDADE DE SISTEMAS ALL-WEATHER

Em razão do fato de que as coberturas de nuvens interferem fortemente na aquisição de dados orbitais de sensoriamento remoto, principalmente no visível e no infravermelho próximo e de ondas curtas, isso se constitui num fator que necessita ser levado em conta principalmente quando objetivos em agricultura são perseguidos.

Nesse sentido, é de grande interesse que sejam feitos esforços no sentido de que as bandas nas micro-ondas sejam desenvolvidas e exploradas para viabilizarem inventários e monitoramentos de culturas agrícolas.

Sabe-se que em algumas regiões brasileiras de significativa importância agrícola, como as regiões Sul e Sudeste, há grande dificuldade de obtenção de imagens livres de nuvens, principalmente nas épocas de maior produção, como a primavera e o verão, o que prejudica iniciativas de monitoramento por sensoriamento remoto óptico naquelas extensões.

Outra frente de interesse é a possibilidade das constelações de satélites, como está exposto logo à frente, no presente capítulo, propiciando significativos ganhos em termos de melhorias no tempo de revisita e aumentando, assim, as chances de obtenção de imagens livres de nuvens.

## 9.10 A NECESSIDADE DE SISTEMAS BASEADOS EM AMOSTRAGEM

Quando se utilizam dados de sensoriamento remoto para objetivos em agricultura, muitas vezes se pensa em realizar mapeamentos das áreas com culturas agrícolas para, por exemplo, realizar estatísticas agrícolas e previsões de safras.

Contudo, muitas vezes tais metas, quando voltadas a objetivos de mapeamentos, tornam-se praticamente irrealizáveis, principalmente para grandes extensões, como o Estado de São Paulo, uma vez que será muito pequena a possibilidade de obtenção de um conjunto completo de imagens isentas de nuvens numa determinada data cobrindo todo o território do Estado.

No caso do Estado de São Paulo, seriam necessárias cerca de 18 imagens Landsat, em seis órbitas adjacentes, para a total cobertura de toda a extensão estadual (Fig. 9.2).

Um exemplo envolvendo amostragens e o uso de imagens *Landsat-like* para levantamentos agrícolas é o da metodologia amostral denominada MoBARS (Monitoring Brazilian Agriculture by Remote Sensing), na qual, durante o ciclo agrícola da soja, por exemplo, são feitos levantamentos a cada dois meses, determinando a quantidade de áreas com cultura verde em pé.

# sobre os autores

## ANTONIO ROBERTO FORMAGGIO

Engenheiro agrônomo formado pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq/USP), de Piracicaba (SP), mestre em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) e doutor em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas) pela Universidade de São Paulo. Foi pesquisador titular da Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR) da Coordenação de Observação da Terra (OBT) do Inpe, em São José dos Campos (SP), atuando na área de Agronomia, com ênfase em estatísticas agrícolas, principalmente nos seguintes temas: sensoriamento remoto agrícola, geoprocessamento, espectrorradiometria, ciência do solo e modelagem ambiental. Participou de parcerias internacionais e forneceu assessorias para CNPq, Fapesp, Fapeg, Capes, Fapemig e Fapitec/SE, bem como revisorias para periódicos científicos nacionais e internacionais. Atuou como membro dos corpos editoriais da *Revista Brasileira de Ciência do Solo* e da *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*. Foi docente do curso de pós-graduação em Sensoriamento Remoto do Inpe.

## IEDA DEL'ARCO SANCHES

Engenheira agrônoma formada pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq/USP), de Piracicaba (SP), mestre em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) e PhD em *Earth Science* pela Massey University, Palmerston North, Nova Zelândia, com pós-doutorado no Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (IG/Unicamp). Desde 2014, atua como pesquisadora da Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR) da Coordenação de Observação da Terra (OBT) do Inpe, em São José dos Campos (SP), dedicando-se a estudos de sensoriamento remoto da vegetação voltados para a atividade agrícola. É também docente permanente do curso de pós-graduação em Sensoriamento Remoto do Inpe.

Um dos setores econômicos mais bem-sucedidos no Brasil, a agricultura tem apresentado avanços científicos e tecnológicos constantes, melhorando sua eficiência e produtividade. Dentro desse contexto, o Sensoriamento Remoto tem um papel de destaque na previsão de safras, no monitoramento de culturas e na avaliação da extensão de áreas de cultivo, entre outras aplicações.

*Sensoriamento remoto em agricultura* vem preencher uma lacuna na área, ao apresentar de forma clara e didática os conceitos básicos sobre sensoriamento remoto e suas aplicações em agricultura, como comportamento espectral de culturas agrícolas, índices espectrais de vegetação, análise de alvos agrícolas, monitoramento, sensoriamento remoto hiperespectral e agricultura de precisão. A obra também traça a relação entre dinâmica agrícola e sensoriamento remoto e discute as perspectivas futuras da agricultura brasileira e mundial.

Com ilustrações e gráficos didáticos, imagens de satélite com explicações detalhadas e questões resolvidas para o estudo dos temas apresentados, *Sensoriamento remoto em agricultura* é uma obra essencial para pesquisadores e profissionais de agropecuária, meio ambiente, levantamento de safras e logística de distribuição de culturas.

ISBN 978-85-7975-277-3



9 788579 752773