

# Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte

Laerte Guimarães Ferreira\*, Nilson Clementino Ferreira e Manuel Eduardo Ferreira

Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento, Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Cx. Postal 131, 74001-970, Goiânia, Goiás, Brasil. \*Autor para correspondência. E-mail: laerte@iesa.ufg.br

**RESUMO.** Levantamentos sistemáticos da cobertura vegetal no Brasil, à escala de semidetalhe, incluem aqueles realizados no âmbito dos projetos Radam e RadamBrasil, no período de 1971 a 1977, tendo por base imagens de radar aerotransportadas e, mais recentemente, os mapeamentos, com base em imagens Landsat 7 ETM<sup>+</sup>, dos remanescentes da cobertura vegetal nos biomas brasileiros (projeto MMA/PROBIO), concluídos em 2006. Nestes pouco mais de 30 anos, muitas mudanças ocorreram, tanto na cobertura vegetal do país quanto no sensoriamento remoto orbital. Neste artigo de revisão, apresentamos, do ponto de vista conceitual e tecnológico, a evolução e o estado-da-arte dos sistemas sensores e discutimos algumas das técnicas mais utilizadas para decodificar (ex. em parâmetros biofísicos etc.) e classificar a resposta espectral da vegetação. Da mesma forma, apresentamos as principais iniciativas, históricas ou em curso, voltadas ao monitoramento da cobertura vegetal dos biomas brasileiros.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto da vegetação, sistemas sensores, monitoramento dos biomas brasileiros.

**ABSTRACT. Remote sensing of vegetation: evolution and state of the art.**

Systematic surveys of the vegetative cover in Brazil include the semi-detailed mappings conducted within the scope of the Radam and RadamBrasil projects, between 1971 and 1977, based on side-looking airborne radar images, and more recently, the assessments, based on Landsat 7 ETM<sup>+</sup> imagery, of the remnant vegetation cover of the Brazilian biomes (MMA/PROBIO), finished in 2006. In a little more than 30 years, many changes have occurred, both in vegetation cover as well as in orbital remote sensing. In this review article, we discuss, from a conceptual and technological perspective, the evolution and the state of the art of imager sensors, as well as some of the enhancement techniques utilized for decoding (e.g., in biophysical parameters, etc.) and classifying the spectral response of vegetation. Likewise, we present the main current (pioneering) initiatives for land cover monitoring of the Brazilian biomes.

**Key words:** remote sensing vegetation, sensor systems, monitoring brazilian biomes.

## Introdução

O primeiro grande levantamento sistemático da cobertura vegetal no Brasil remonta à década de 1970, quando, com o intuito de conhecer principalmente a cartografia, a vegetação, a geologia e a natureza dos solos da Amazônia e do Nordeste brasileiros, teve início o Projeto Radam (junho de 1971), baseado em um método pouco convencional à época: o imageamento por radar de visada lateral (*Side-Looking Airborne Radar* – SLAR). Em julho de 1975, a responsabilidade pelo mapeamento integrado dos recursos naturais passou a ser do projeto RadamBrasil, que expandiu o levantamento de radar para o restante do território nacional (Allevato, 1979).

Em 2006, o Ministério do Meio Ambiente, no âmbito do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (PROBIO), concluiu o mapeamento (à escala de

1:250.000) dos remanescentes da cobertura vegetal nos biomas brasileiros (Floresta Amazônica, Mata Atlântica, Cerrado, Pantanal, Caatinga e Campos Sulinos), tendo por base imagens Landsat ETM<sup>+</sup>, obtidas em 2001 e 2002, e analisadas por métodos de classificação automática e interpretação visual.

Muitas mudanças separam estes dois grandes levantamentos que, até o momento, são as principais iniciativas voltadas a uma gestão territorial mais integrada, eficiente e sustentável. Em nível de paisagem, há muito menos cobertura vegetal – o Cerrado, por exemplo, foi reduzido a aproximadamente 55% da sua cobertura vegetal original. Quanto ao sensoriamento remoto, este passou a ser predominantemente orbital e, na era da internet, acessível a qualquer pessoa. Em fato, passou a ser um pouco mais Brasileiro, com o lançamento, em outubro de 1999, do *China-Brazil Earth Resources Satellite*

(CBERS 1), munido de três sensores concebidos para o monitoramento da cobertura vegetal em diferentes escalas. Entre estes, destaca-se o CCD (*Charge Coupled Device*), com 20 m de resolução, uma banda pancromática e bandas no azul, verde, vermelho, infravermelho próximo (Epiphany, 2005). O CBERS-2, há três anos em órbita, tem sido utilizado nas mais diversas aplicações, como, por exemplo, monitoramento da exploração madeireira na Amazônia (Martins e Souza Filho et al., 2006), monitoramento da produção agrícola em Goiás com fins de arrecadação fiscal (Barbalho et al., 2005) e mapeamento de fitofisionomias em áreas de Cerrado (Bezerra et al., 2007). Em função do sucesso obtido com esses dois primeiros satélites, em 2007 foi lançado o CBERS-2B (cuja expectativa é de que seja seguido dos CBERS 3 e 4), o qual, além dos sensores CCD e WFI (*Wide Field Imager*, com duas bandas – vermelho e infravermelho – de 260 m de resolução), também traz o sensor HRC (*High Resolution Camera*), com resolução espacial de 2,5 m.

O propósito deste artigo é o de discutir, com base em uma revisão sistemática, a evolução do sensoriamento remoto da vegetação, tanto nos seus aspectos de desenvolvimento e aplicação (*remote sensing applications*) quanto científicos (*remote sensing science*).

## Material e métodos

Este artigo tem como eixo norteador o uso das imagens orbitais em estudos da cobertura vegetal, conforme os seguintes aspectos principais: (1) a evolução dos sistemas sensores, (2) técnicas de realce da resposta espectral da vegetação e (3) o monitoramento de desmatamentos. O material de análise é a vasta literatura disponível, principalmente aquela publicada em periódicos indexados e arbitrados, bem como os vários dados e resultados obtidos pelos autores ao longo dos últimos anos.

## Resultados e discussão

### Sistemas sensores: concepções, avanços e perspectivas

O início do sensoriamento remoto orbital remonta aos primeiros voos espaciais tripulados na década de 1960 e ao lançamento, em 1972, do *Earth Resource Technological Satellites* (ERTS-1), posteriormente denominado Landsat 1, cuja série, hoje no seu sétimo satélite, é certamente o programa mais bem-sucedido de sensoriamento remoto para fins de mapeamento e monitoramento sistemático da superfície terrestre (Salovaara et al., 2005; Woodcock et al., 2001). Com o lançamento dos Landsats 4 e 5, em julho de 1982 e março de 1984, respectivamente, o programa Landsat

entra em sua segunda geração. A principal inovação é o sensor TM (*Thematic Mapper*), cujas características, como resolução espacial média (~30 m), bandas distribuídas nas regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, resolução temporal de 16 dias e imagens de 8 bits, tornaram-se um padrão de referência para sensores ópticos até os dias atuais, como é o caso do sensor Aster<sup>1</sup> e até do próprio programa CBERS. A importância do programa Landsat foi reconhecida pelo Congresso Americano, que aprovou, em outubro de 1992, o *Land Remote Sensing Policy Act*, o qual autorizou o desenvolvimento do Landsat 7<sup>2</sup> e uma nova política de distribuição de dados, que tornou possível uma cena Landsat custar hoje em torno de 400 dólares, ou, aproximadamente, 10% do seu valor em 1985, quando o programa Landsat foi privatizado e passou a ser operado pela *Earth Observation Satellite Company* (Eosat), atual *Space Imaging*<sup>3</sup>. O sensor *Enhanced Thematic Mapper* (ETM<sup>+</sup>), lançado a bordo do Landsat 7, em abril de 1999, trouxe poucas, mas importantes inovações em relação ao sensor TM, entre estas, uma banda pancromática de 15 m e a preocupação, sem precedentes em sensores de uso geral, com a qualidade e calibração dos dados. Desde maio de 2003, em função de problemas técnicos, 24% das cenas ETM<sup>+</sup> (principalmente em direção às bordas) apresentam falhas de recobrimento.

Em linhas gerais, nestes pouco mais de 30 anos, a evolução do sensoriamento remoto, marcada por sensores cada vez mais confiáveis e temáticos, deu-se por quatro caminhos principais: o surgimento dos sensores orbitais de micro-ondas, os sensores de resolução espacial submétrica, os sensores hiperespectrais e os sensores de alta resolução temporal.

As primeiras imagens de radar orbitais datam de 1991, com o lançamento do ERS-1 (*European Remote Sensing*). Em função das características da radiação de micro-ondas (i.e., penetração no dossel vegetal, sensibilidade à forma e estrutura do dossel e alta sensibilidade às variações de umidade), estas imagens, bem como aquelas obtidas por meio de outros satélites com sistemas de micro-ondas, como o Radarsat 1 (*Radar Satellite* da Agência Espacial Canadense, lançado em agosto de 1995), o ERS-2 (lançado em abril de 1995), o JERS-1 (*Japan Earth Resource Satellite*, lançado em fevereiro de 1992), o Envisat (*Environmental Satellite*, da Agência Espacial Europeia, lançado em março de 2002) e, mais recentemente, o ALOS (*Advanced Land*

<sup>1</sup> Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, desenvolvido pela Agência Espacial Japonesa e lançado a bordo do satélite americano Terra (para maiores informações, ver Souza Filho, 2003).

<sup>2</sup> O Landsat 6, lançado em outubro de 1993, não alcançou a órbita necessária e nunca entrou em operação.

<sup>3</sup> Esta privatização ocorreu durante o segundo governo Reagan, tendo sido revogada no início do governo Clinton. Desde então, o programa Landsat é responsabilidade do United States Geological Survey (USGS).

*Observing System*, da Agência Espacial Japonesa, lançado em janeiro de 2006), têm sido principalmente utilizadas para obtenção de parâmetros como biomassa, área foliar, altura do dossel e mapeamento da vegetação em áreas alagadas (Kasischke *et al.*, 1997; Almeida Filho *et al.*, 2007). Estudos preliminares também demonstram que estas imagens podem ser úteis na discriminação de tipos de fisionomias de Cerrado, cuja organização em diferentes estratos (herbáceo, arbustivo e arbóreo) é bastante favorável à interação com a radiação de micro-ondas, principalmente aquela de comprimentos mais longos (ex. banda L) (Sano *et al.*, 2001). Da mesma forma, uma melhor discriminação destas fisionomias pode ser obtida a partir da integração de dados ópticos e de radar (Sano *et al.*, 2005).

Contraopondo-se às imagens de radar, resultado do retroespalhamento da radiação eletromagnética de comprimentos longos (1 mm a 1 m), estão as imagens ópticas, geradas a partir da reflexão da radiação eletromagnética no visível, infra-vermelho próximo e infravermelho de ondas curtas. Enquanto nas imagens de radar o que importa são as características físicas e macroscópicas da superfície (principalmente rugosidade, textura, estrutura e umidade), no sensoriamento óptico, o conjunto de respostas espectrais é resultado de interações microscópicas, determinado pela composição atômico-molecular dos materiais (ex. variação no teor de clorofila de uma folha, fazendo-a mais ou menos verde) (Ponzoni, 2001).

Em um dos extremos deste espectro óptico – radar, situam-se as imagens orbitais hiperespectrais, ainda muito recentes e restritas a aplicações científicas ou militares, cujo primeiro sensor orbital, o Hyperion, com 220 bandas no intervalo de 400 a 2.500 nm, foi lançado a bordo do satélite Earth Observer 1, em novembro de 2000. Entre os vários resultados obtidos com este sensor, destacam-se os estudos sobre os efeitos de secas prolongadas na capacidade da floresta Amazônica de reter CO<sub>2</sub> (Asner *et al.*, 2004) e o monitoramento de variedades de cana-de-açúcar (Galvão *et al.*, 2005). Outra experiência hiperespectral, lançada em outubro de 2001 pela Agência Espacial Europeia, foi o sensor Chris (*Compact High Resolution Imaging Spectrometer*), com 19 bandas na região do visível e infravermelho próximo (400 a 1.050 nm), utilizado com sucesso em estimativas de produtividade agrícola e medidas de eficiência fotossintética (Sabrina *et al.*, 2005; Smith *et al.*, 2005). O futuro do imageamento hiperespectral é bastante promissor, e atualmente a NASA está avaliando a possibilidade de lançar o sensor Flora, cujo objetivo é disponibilizar informações de alta resolução espacial (45 m) da vegetação global quanto a composição, processos e

produtividade de ecossistemas e resposta destes às variações climáticas e mudanças na cobertura da terra (Asner *et al.*, 2005a). Da mesma forma, a Agência Espacial Canadense planeja o lançamento do sensor hiperespectral HERO (*Hyperspectral Earth Resources Observer*) com vistas a aplicações em inventário florestal (identificação de espécies etc.), determinação de bioindicadores (clorofila, nitrogênio e água) e monitoramento marinho, costeiro e de águas continentais (aporte de sedimentos, nutrientes etc.) (Goodenough *et al.*, 2004).

Em função de limitações físicas e tecnológicas, ainda temos que optar entre alta resolução espectral ou espacial (o Hyperion, por exemplo, tem resolução de 30 m). E o desenvolvimento de sensores com resoluções espaciais cada vez maiores tem sido igualmente impressionante. Do sensor MSS (*Multispectral Scanner System*), a bordo do Landsat 1, com 80 m de resolução, passando pelo sensor HRV (*High Resolution Visible Imaging System*) do satélite Francês SPOT (*Satellite pour l'Observation de la Terre*), em 1984, com 10 m, chegamos à impressionante resolução de 0,6 m do satélite Quickbird! Ao contrário dos sensores hiperespectrais, ainda de caráter experimental e pouco difundidos, as imagens de alta resolução espacial se tornaram, a partir de setembro de 1999, com o lançamento do satélite Ikonos (*Space Imaging*), a grande sensação do sensoriamento remoto comercial. Pelos elevados custos destas imagens (tanto para aquisição quanto para processamento), estas têm sido preferencialmente utilizadas em estudos bastante específicos, como aqueles desenvolvidos no âmbito do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (Asner *et al.*, 2002; Hurtt *et al.*, 2003).

Ao todo, já são nove satélites em operação com sensores de resolução espacial > 2,5 m, sendo que em 2007, a *Digital Globe* (atual proprietária do Quickbird) lançou o *WorldView I*, com resolução de 50 cm e período de revisita de, aproximadamente, 1,7 dias. Agora em 2008, um consórcio entre o Governo Alemão e a iniciativa privada lançou uma constelação de cinco microssatélites (*Rapid Eye*) que começa a fornecer imagens diárias para qualquer localidade na superfície terrestre, com resolução de 6,5 m e seis bandas espectrais (azul, verde, vermelho, *red-edge*, infravermelho próximo e pancromático) (Weir *et al.*, 2005). É interessante observar a existência de uma banda *red-edge* (a primeira em sensores multiespectrais), cujo estreito intervalo espectral compreendendo a transição vermelho/infravermelho é particularmente útil na detecção de estresse foliar. Não por outro motivo, a série *Rapid Eye* é principalmente voltada para o rico mercado da agricultura de precisão, com vistas ao mapeamento e monitoramento agrícola. Pelos mesmos

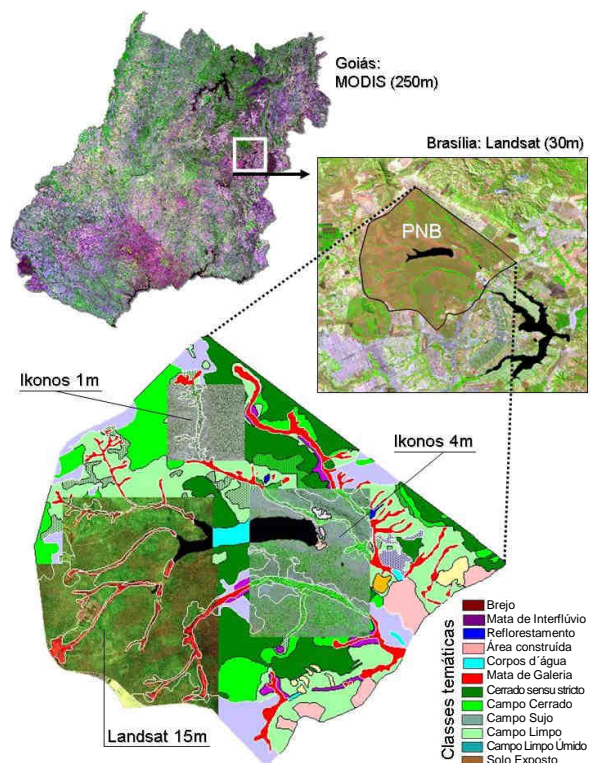
motivos, uma banda *red-edge* também estará presente no *WorldView II*, com lançamento previsto para 2009, o qual trará ainda uma nova banda amarela (haja vista que folhas amareladas, i.e., refletindo radiação de comprimentos de onda entre o verde e o vermelho, denotam a ocorrência de estresse hídrico, deficiência de nutrientes, presença de pragas etc.) e uma banda costeira (azul) para monitoramento da qualidade da água (Stoney, 2006).

Com poucas exceções, o uso de imagens de radar, hiperespectrais ou de resolução métrica/submétrica está restrito a estudos localizados e sem continuidade temporal. Mapeamentos de grandes extensões territoriais e no domínio temporal (i.e., diários, semanais, quinzenais ou mensais), por outro lado, só se tornaram possíveis a partir dos satélites NOAA – AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), cujas séries temporais de longa duração (Rodenick et al., 1996) possibilitaram, por exemplo, constatar que a vegetação das altas latitudes do Hemisfério Norte, pelos efeitos de um possível aquecimento global, está apresentando significativas variações fenológicas, com um período de crescimento mais longo (Myneni et al., 1997).

Outro importante marco no monitoramento da vegetação em escala global, e do próprio sensoriamento remoto quantitativo, diz respeito ao sensor Modis (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), lançado a bordo do satélite Terra, em dezembro de 1999, e a bordo do satélite Aqua, em maio de 2002. Este sensor, carro chefe do *Earth Observing System* (EOS – NASA), combina características dos sensores AVHRR e do Landsat TM, ao mesmo tempo que traz importantes avanços como, por exemplo, maior número de bandas, com maior resolução espectral e mais bem posicionadas (menos sujeitas à contaminação atmosférica e mais sensíveis à vegetação fotossinteticamente ativa) e resolução espacial de 250, 500 e 1000 m (Justice et al., 1998). Os dados Modis, de elevada acuidade e precisão radiométrica e espacial, e continuamente calibrados, são distribuídos gratuitamente na forma de diferentes produtos<sup>4</sup>, entre os quais se destaca o produto MOD13 (índices de vegetação).

A profusão e a diversidade de tipos de sensores têm sido acompanhadas de maior sinergismo no uso dos dados (Figura 1), bem como de novos paradigmas quanto a processamento, acesso e aplicações das imagens disponíveis, os quais também têm direcionado o desenvolvimento de novos instrumentos que precisam conciliar inovações com a garantia de continuidade no fornecimento de dados (Bryant et al.,

2003). Um exemplo nesse sentido é o *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM), que tem por objetivo lançar, em julho de 2011, o Landsat 8, cujo sensor OLI (*Operational Land Imager*) trará apenas duas inovações em relação ao ETM<sup>+</sup>: uma banda azul adicional (433 a 453 nm), para monitoramento costeiro e de aerossóis, e uma banda entre 1.360 e 1.390 nm para detecção de nuvens Cirrus (que, por serem de difícil percepção, comprometem em muito a qualidade das imagens). Da mesma forma, o lançamento dos satélites NPP (*NPOESS Preparatory Project*), em 2009, e NPOESS (*National Polar-Orbiting Operational Environmental Satellite System*), em 2010, garantirão, por meio do instrumento VIIRS (*Visible Infrared Imager/Radiometer Suite*), a continuidade dos dados Modis (Townshend e Justice, 2002).



**Figura 1.** Exemplo de sinergismo empregado no processo de atualização do mapa de classes de cobertura da terra no Parque Nacional de Brasília. Especificamente, foram utilizadas imagens ETM<sup>+</sup> (30 m) e Ikonos (4 m), reamostradas para 15 m e 1 m, por meio do uso das respectivas bandas pancromáticas. Em âmbito regional, também tem sido comum o uso combinado de imagens Landsat e Modis.

Ainda com respeito à continuidade de dados e constituição de séries históricas de longa duração, importantes para o entendimento e acompanhamento de fenômenos naturais e antrópicos, principalmente os de abrangência global, um esforço considerável também tem sido dedicado ao desenvolvimento dos chamados algoritmos de translação, cujo objetivo é

<sup>4</sup> Para uma lista completa (e descrição) dos produtos MODIS, acessar <<http://edcdaac.usgs.gov/modis/dataproducts.asp>>.

fazer com que dados de diferentes instrumentos sensores (ex. AVHRR e Modis) possam ser comparados de forma operacional e conforme determinados intervalos de confiança (Miura *et al.*, 2006).

A manutenção dessas séries históricas, por outro lado, tem exigido atenção especial quanto ao armazenamento e à recuperação de dados. Só no âmbito do programa Landsat, o *National Satellite Land Remote Sensing Data Archive* já acumula, distribuídos ao longo de 33 anos, 2.8 *pentabytes* de dados.

Toda esta revolução tem sido também caracterizada (e tornada possível) por uma maior cooperação entre países, entre governo e iniciativa privada etc. (Birk *et al.*, 2003). Recentemente, foi criado o Geoss (*Global Earth Observing System of Systems*)<sup>5</sup>, um verdadeiro consórcio transnacional (65 países até o momento, incluindo o Brasil) com o objetivo de buscar soluções conjuntas para problemas comuns (ex. aquecimento global, catástrofes naturais, desmatamento de florestas tropicais), tendo por linhas de ação a disponibilidade e compartilhamento de dados e o aumento na capacidade de uso destes (fortalecimento de comunidades de usuários etc.). Também emblemático é o próprio *Google Earth* que, em pouco mais de um ano, trouxe o sensoriamento remoto para dentro de nossas casas e agora, por meio de uma parceria com a NASA, está disponibilizando imagens de aplicações científicas, como índices de vegetação, séries históricas Landsat e AVHRR etc. (Butler, 2006).

#### Realce espectral: decodificando e classificando respostas

Imagens de satélites são, em fato, um conjunto de dados em formato matricial, cujos vetores *x*, *y* (localização) e *z* (valores radiométricos) são passíveis das mais variadas transformações algébricas para fins de realce espectral e/ou espacial (com a geração ou não de novos vetores, i.e., novos conjuntos de dados) e análises estatísticas. No caso de estudos envolvendo a vegetação, duas transformações espectrais são particularmente importantes: os índices de vegetação, largamente utilizados como intermediários na obtenção de parâmetros biofísicos e no acompanhamento da dinâmica sazonal e fenológica; e os chamados modelos de mistura espectral que, ao decomporem o sinal do pixel em seus vários constituintes (solos, vegetação, água etc.), facilitam o mapeamento de classes e variações fitofisionômicas, bem como de importantes fatores abióticos, controlando estas distribuições (ex. delimitação de áreas sujeitas a inundação, transferência de sedimentos etc.).

#### Índices de vegetação

Os índices de vegetação são, provavelmente, a maneira mais simples e eficiente de se realçar o sinal verde ao mesmo tempo que minimizam as variações na irradiância solar e os efeitos do substrato do dossel vegetal (Jackson e Huete, 1991). A lógica por trás dos índices de vegetação baseia-se no fato de que a energia refletida no vermelho e infravermelho próximo é diretamente relacionada à atividade fotossintética da vegetação, bem como na suposição de que a utilização de duas ou mais bandas espectrais pode, substancialmente, minimizar as principais fontes de ruídos que afetam a resposta da vegetação: (1) variações na irradiância solar; (2) efeitos atmosféricos; (3) contribuições da vegetação não-fotossinteticamente ativa; (4) contribuições do substrato (ex. solo); e (5) efeitos da composição e estrutura do dossel.

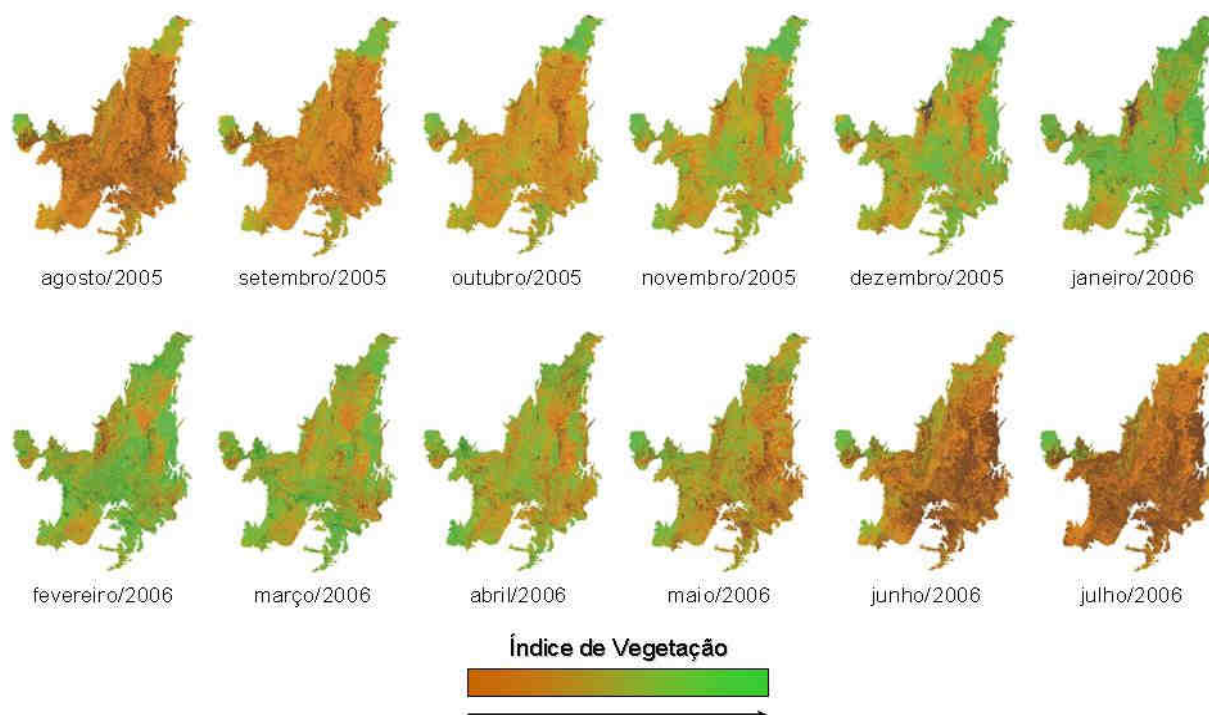
Um dos índices de vegetação mais utilizados tem sido o chamado índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). Sua simplicidade e sua relativa alta sensibilidade à densidade da cobertura vegetal tornaram possíveis comparações espaciais e temporais da atividade fotossintética terrestre, bem como o monitoramento sazonal, interanual e variações de longo prazo dos parâmetros estruturais, fenológicos e biofísicos da vegetação em escala global (Wang *et al.*, 2003).

Embora extremamente útil na estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação, o NDVI apresenta problemas de saturação em áreas densamente vegetadas e não-linearidade nas relações com o índice de área foliar (LAI) e com a fração de radiação fotossinteticamente absorvida (fPAR). O NDVI é também seriamente afetado pela geometria de aquisição (Sol-alvo-sensor), a estrutura do dossel vegetal, efeitos atmosféricos e substrato (ex. solo) (Goward *et al.*, 1991; Moody e Strahler, 1994). Nesse sentido, Huete *et al.* (1997) propuseram o índice de vegetação realçado (EVI), o qual, comparativamente ao NDVI, é menos sensível às contaminações do substrato e da atmosfera (Liu e Huete, 1995; Miura *et al.*, 1998; Miura *et al.*, 2001) e responde melhor às variações fisionômicas e estruturais no dossel (Gao *et al.*, 2000).

No âmbito do sensor Modis, os produtos MOD13 (índices de vegetação), produzidos a cada 16 dias com resoluções de 250, 500 e 1.000 m, incluem tanto a continuidade do NDVI quanto o EVI (Huete *et al.*, 2002).

No Brasil, os índices de vegetação em geral, e mais recentemente os índices de vegetação Modis, têm sido largamente empregados no monitoramento da dinâmica sazonal e fenologia da cobertura vegetal na floresta Amazônica (ex. Huete *et al.*, 2006) e bioma Cerrado (ex. Ferreira e Huete, 2004; Ferreira *et al.*, 2006) (Figura 2).

<sup>5</sup> Para maiores informações acessar <<http://www.earthobservations.org/index.html>>.



**Figura 2.** Dinâmica sazonal do bioma Cerrado retratada por meio das imagens Modis índices de vegetação (MOD13Q1 NDVI).

Para o Cerrado, vários estudos também demonstram a utilidade dos índices de vegetação Modis para o mapeamento das distintas fisionomias existentes (ex. Ferreira *et al.*, 2004) e para responder aos parâmetros biofísicos (ex. Ferreira *et al.*, 2003; Ratana *et al.*, 2005).

#### Modelo linear de mistura espectral

Independentemente das resoluções espaciais dos sensores remotos, sejam estas de 60 cm (ex. Quickbird), 30 m (ex. Landsat) ou 250 m (ex. Modis), os pixels de uma imagem de satélite tendem a apresentar uma mistura espectral, resultado de uma combinação da reflectância dos alvos naturais ou artificiais contidos neste (dois ou mais alvos). Normalmente, um pixel apresenta uma mistura, em menor ou maior proporção, de alvos contendo cobertura vegetal, solo e água (ou sombra).

Esta ausência de pixels puros no sensoriamento remoto é provocada por uma série de fatores, tais como a própria dimensão dos alvos na superfície terrestre, os quais podem ser menores ou maiores do que o limite espacial do pixel. Fatores espúrios à obtenção das imagens pelo sensor também contribuem para esta impureza, em particular a contaminação atmosférica, a variação na geometria de aquisição dos dados pelo sensor, assim como as diferenças de iluminação na superfície, pelos aspectos topográficos da região

(sombra) (Shimabukuro e Smith, 1995).

Frente a este problema de mistura espectral, uma técnica bastante utilizada é o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) ou *Linear Spectral Unmixing*. Tal modelo, na verdade de “desmistura”, visa isolar a contribuição espectral de cada alvo presente no pixel, permitindo que uma imagem de satélite seja analisada numa escala de *subpixel* (Schowengerdt, 1997; Schweik e Green, 1999). A técnica garante que os pixels sejam realçados de acordo com a maior ou menor proporção de um determinado alvo abordado pelo modelo, e não necessariamente identificados como pertencentes a determinada classe temática.

O MLME se baseia no pressuposto de que um espectro misturado pode ser modelado pela combinação linear de espectros puros, conhecidos por *endmembers* (Roberts *et al.*, 1998). Dessa forma, para qualquer imagem, e sendo as respostas espectrais dos componentes puros conhecidas, as proporções destes podem ser estimadas (de forma individual) por meio da geração das chamadas Imagens Fração (Shimabukuro e Smith, 1991; Schowengerdt, 1997; Shimabukuro *et al.*, 1998) (Figura 3).

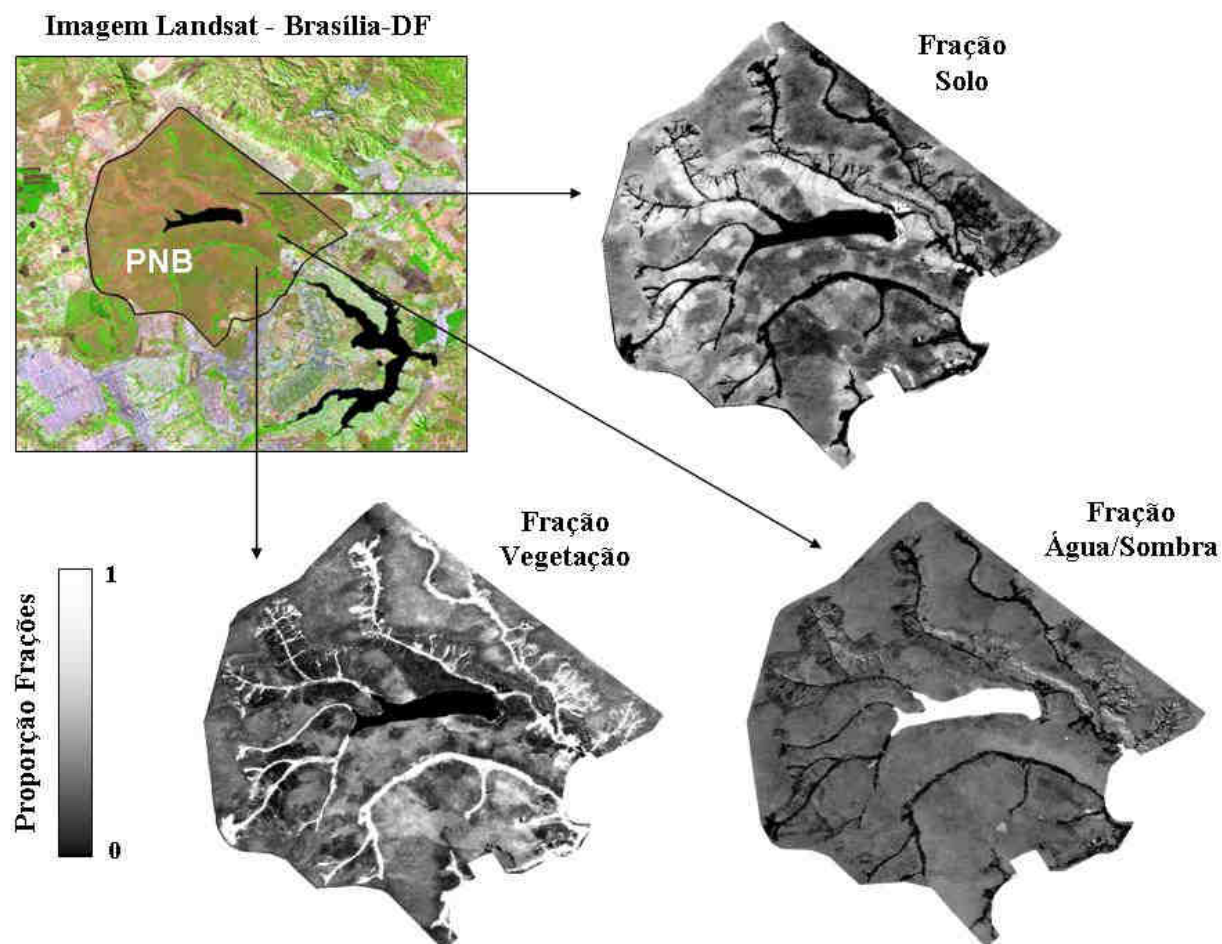
Nos últimos anos, o Modelo Linear de Mistura Espectral vem sendo aplicado com sucesso no mapeamento de remanescentes vegetais (Asner e Lobell, 2000; Rogan *et al.*, 2002), bem como no acompanhamento das mudanças climáticas globais

(Piwowar *et al.*, 1998). No Brasil, esta técnica tem auxiliado no monitoramento de queimadas e desmatamentos, sobretudo na Amazônia (Souza e Barreto, 2000). Da mesma forma, o MLME também é capaz de auxiliar na estimativa de produção de culturas agrícolas, tais como algodão, milho e soja (Lobell e Asner, 2004; Bannari *et al.*, 2006).

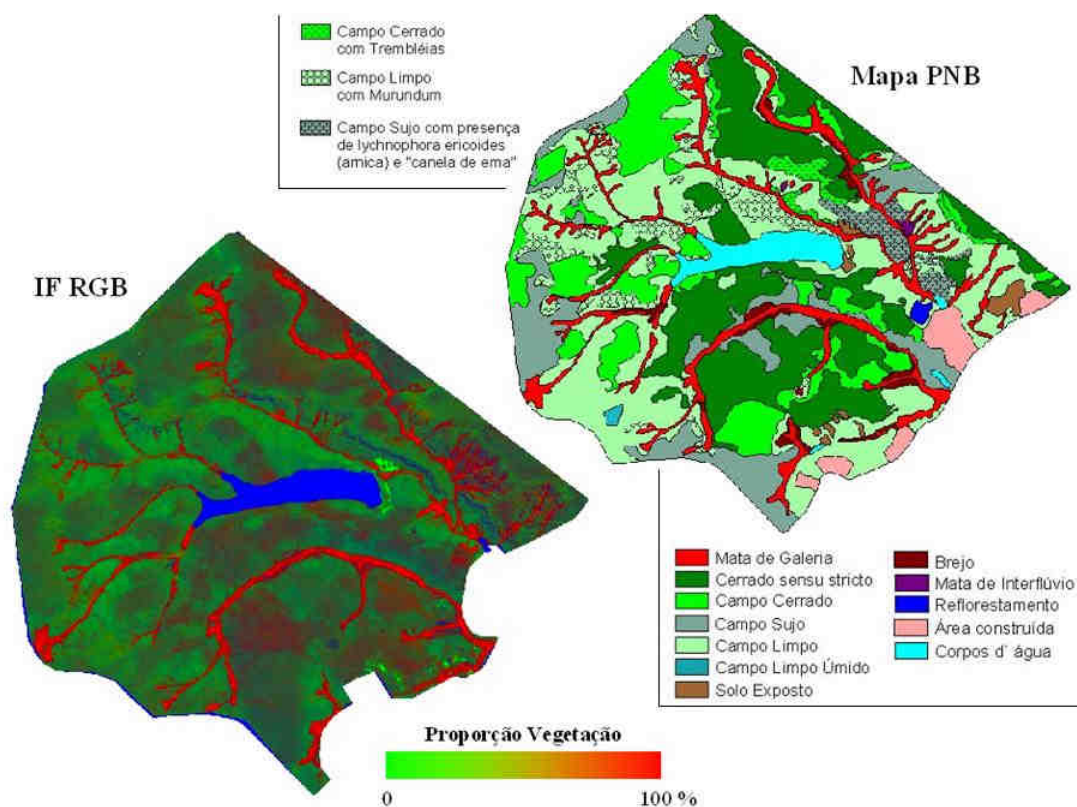
Como exemplo de modelos lineares de mistura espectral mais voltados para o mapeamento e monitoramento da vegetação, dois grupos se destacam: os gerais e os específicos. No modelo geral, normalmente mais simples, busca-se a identificação de alvos básicos na natureza, comuns a qualquer imagem de satélite, como a vegetação fotossinteticamente ativa (verde), o solo exposto e os corpos hídricos (Figura 4).

No modelo específico, mais complexo, busca-se

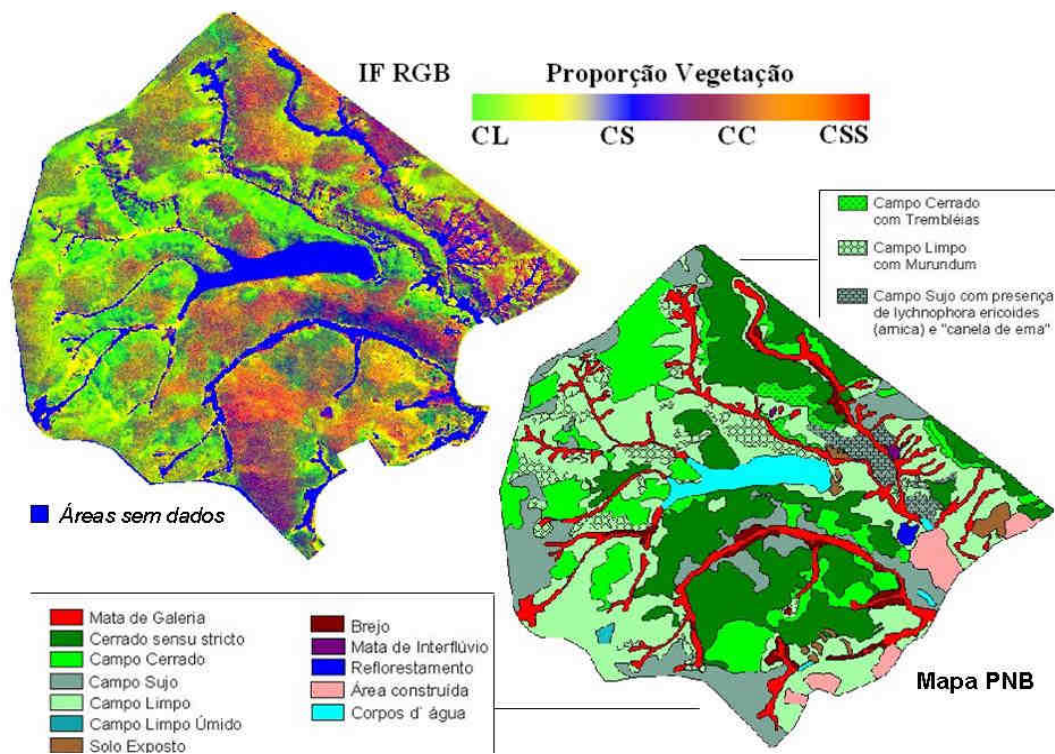
a identificação, na paisagem, de alvos pouco perceptíveis ou diferenciáveis aos métodos automáticos de classificação, em função da própria mistura espectral presente nos pixels e pela grande semelhança espectral de alguns alvos. Exemplos nesse sentido incluem o modelo proposto por Ferreira *et al.* (2007a), o qual assume que as fitofisionomias do bioma Cerrado podem ser modeladas a partir das classes Campo Limpo, Campo Sujo e Cerrado *sensu stricto* (Figura 5), e o modelo aplicado por Miura *et al.* (2003) a uma imagem Hyperion, tendo por base a hipótese de que todas as classes de cobertura do solo em ecossistemas savânicos resultam da combinação, em diferentes proporções, dos *endmembers* vegetação não-fotossinteticamente ativa (seca), vegetação fotossinteticamente ativa (verde) e solo.



**Figura 3.** Exemplos de Imagens Fração para os alvos vegetação, solo e água (ou sombra), obtidos por meio da aplicação do MLME em cena Landsat ETM<sup>+</sup> do Parque Nacional de Brasília (PNB). Valores de pixels próximos a 1 (ver gradiente 0-1) indicam a máxima presença do alvo na respectiva Fração, e vice-versa.



**Figura 4.** Composição com as imagens fração vegetação verde, solo e água comparada ao mapa do Parque Nacional de Brasília (PNB). Modificada de Ferreira *et al.* (2007a).



**Figura 5.** Composição com as Imagens Fração Campo Limpo, Campo Sujo e Cerrado *sensu stricto* comparada ao mapa do Parque Nacional de Brasília (PNB). A legenda correspondente ao gradiente de proporção de vegetação indica as classes Campo Limpo (CL), Campo Sujo (CS), Campo Cerrado (CC) e Cerrado *sensu stricto* (CSS).

Fonte: Ferreira *et al.* (2007a).

### Monitoramento dos biomas brasileiros: iniciativas pioneiras e estágio atual

As primeiras iniciativas para o monitoramento sistemático da cobertura vegetal datam do início da década de 80, quando o Instituto Nacional de Estudos Espaciais (INPE) juntamente com o então Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF) realizaram uma avaliação dos desmatamentos ocorridos na Floresta Amazônica, por meio da interpretação visual de imagens MSS (Landsat 3), constatando uma área desmatada de, aproximadamente, 152.200 km<sup>2</sup> até 1978 (Tardin *et al.*, 1980).

A partir de 1993, começaram a ser utilizadas imagens TM (Landsat 5) obtidas para o ano de 1988, tendo sido estimado, até esta data, um total de 230.324 km<sup>2</sup> de desmatamentos (Skole e Tucker, 1993). Em 1997, no âmbito do Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (Prodes), o INPE passa a utilizar o processo de interpretação auxiliada por computador (Shimabukuro *et al.*, 1998). Em 2000, dados do Prodes indicaram uma área desmatada total de, aproximadamente, 587.727 km<sup>2</sup> (INPE, 2000).

Em 2003, em função dos problemas apresentados pelo sensor ETM+ (Landsat 7), passaram a ser utilizadas imagens obtidas pelo sensor CCD (CBERS-2) e Landsat 5. No mesmo ano, também se iniciou a construção de sistemas para o monitoramento da Amazônia a partir das imagens de resolução moderada obtidas pelo sensor MODIS. Entre estes, destaca-se o Deter (Detecção em Tempo Real), desenvolvido pelo INPE e baseado na interpretação de imagens fração sombra, obtidas a partir da transformação, via modelo linear de mistura espectral, de imagens de reflectância Modis diárias (produto MOD09)<sup>6</sup>. Merece destaque, igualmente, o SIAD (Sistema Integrado de Alerta de Desmatamentos), desenvolvido a partir de uma parceria entre o Sistema de Proteção da Amazônia (Sipam) e a Universidade Federal de Goiás (UFG). O SIAD se baseia nos índices de vegetação Modis (MOD13Q1), produzidos a cada 16 dias, com resolução de 250 m. Outra característica importante do SIAD diz respeito ao fato deste ter sido desenvolvido sobre uma plataforma de sistema de informações geográficas, o que permite que os desmatamentos detectados sejam analisados quanto a suas causas, impactos e tendências (Ferreira *et al.*, 2007b e c). Ainda no âmbito do SIAD, Ferreira *et al.* (no prelo) constataram a possibilidade de utilizar as imagens Modis NDVI para monitorar o grau de

fragmentação da paisagem Amazônica, cujos impactos sobre processos ecológicos e qualidade dos habitats podem ser tão nocivos quanto os próprios desmatamentos (Laurance *et al.*, 1997).

Outro marco importante quanto ao uso de técnicas de realce digital e processamento automático de imagens diz respeito ao sistema CLAS (*Carnegie Landsat Analysis System*), que, a partir de imagens Landsat 7 ETM<sup>+</sup> transformadas em componentes de vegetação fotossinteticamente ativa, vegetação não-fotossintética e solo exposto, possibilitou mapear ocorrências de desmatamento seletivo na Amazônia para os anos de 2000, 2001 e 2002 (Asner *et al.*, 2005b).

Haja vista a facilidade de aquisição e processamento de imagens, os outros biomas brasileiros também estão começando a ser monitorados de forma sistemática quanto à ocorrência de desmatamentos. Nesse sentido, destaca-se o Cerrado, para o qual o SIAD apontou aproximadamente 18.980 km<sup>2</sup> de área desmatada no período de outubro de 2003 a outubro de 2007<sup>7</sup> (Ferreira *et al.*, 2008; Ferreira *et al.*, 2007d).

### Conclusão

A revolução representada pelo *Google Earth*, que em pouco mais de um ano já foi acessado por mais de 200 milhões de pessoas e tornou as imagens de sensoriamento remoto um produto de massa, tem sido acompanhada (e precedida) de outras iniciativas igualmente importantes. O INPE, por exemplo, já disponibilizou, gratuitamente, mais de 300.000 imagens CBERS, algo impressionante em um país em que apenas 75% do território é mapeado à escala de 1:100.000. Junto com a facilidade na obtenção de dados, radiométrica e espacialmente confiáveis, surgem novos desafios e possibilidades. Dispomos, como nunca antes, dos meios (técnicas de realce mais sofisticadas, novos algoritmos e rotinas mais otimizadas etc.) e dos dados (abrangendo uma ampla faixa do espectro, em diferentes resoluções espectrais e espaciais) para entendermos e quantificarmos os mais variados fenômenos afetos e afetados pela cobertura vegetal. Nesse sentido, deve-se também ressaltar os sistemas de informações geográficas (SIGs), cujos avanços se deram de forma concomitante e estreita à evolução do sensoriamento remoto orbital. A análise integrada de dados de sensoriamento remoto e outras informações temáticas têm possibilitado, entre outros, melhor representação, à escala (e unidades) da paisagem, das

<sup>6</sup> Para maiores informações acessar <<http://www.obt.inpe.br/deter/>>.

<sup>7</sup> Dados inéditos, gerados pelo Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento. Para maiores informações e dados, acesse <<http://www.ufg.br/lapig/>>.

distribuições e variações fitofisionômicas. Bonnet *et al.* (2006), por exemplo, tendo por base o mapa de cobertura dos solos para o Estado de Goiás (obtido a partir da classificação e interpretação de imagens Landsat ETM<sup>+</sup> para 2001 e 2002 – Sano *et al.*, 2008), analisaram a distribuição dos remanescentes no âmbito de bacias hidrográficas de 10.000, 50.000 e 200.000 hectares, cujos limites topológicos foram definidos automaticamente a partir de dados topográficos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) via aplicativo ArcGIS / ArcHydro.

Enfim, o enorme conjunto de dados, métodos de análises e aplicações discutido neste artigo tem criado novas possibilidades de entendimento sobre os controles abióticos que determinam certos padrões e gradientes fisionômicos. No âmbito destes processos, que vão muito além das variáveis edáficas e climáticas dos modelos tradicionais, certamente o controle litoestrutural, as unidades de relevo (e processos geomorfológicos) e todas as peculiaridades do Quaternário que moldaram as paisagens atuais devem ser considerados. A necessidade de novos modelos, mais ousados e complexos, que expliquem estas paisagens e indiquem cenários evolutivos, tem encontrado um importante e imprescindível aliado na geomática (ciência relacionada ao sensoriamento remoto, geoprocessamento e cartografia).

### Agradecimentos

Este trabalho se insere no âmbito de várias iniciativas do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás (Lapig/IESA/UFG), entre as quais destacamos: Integração de Informações Espaciais para o Planejamento e Gestão Estratégica do Bioma Cerrado (CNPq/Edital Universal, proc. 481939/2004-0), Sistema Integrado de Alerta de Desmatamentos para a Amazônia Legal (SIAD-AM/convênio Censipam – UFG), Land Use Impacts on the Water Resources of the Cerrado Biome (NASA/LULCC). O primeiro autor deste artigo é bolsista de produtividade do CNPq (1C).

### Referências

ALLEVATO, S.R. Memória central do projeto Radambrasil. *Rev. Bras. Cartogr.*, Rio de Janeiro, n. 25, p. 31-36, 1979.

ALMEIDA FILHO, R. *et al.* Detecting deforestation with multitemporal L-band SAR imagery: a case study in western Brazilian Amazonia. *Int. J. Remote Sens.*, Basingstoke, v. 28, n. 6, p. 1383-1390, 2007.

ASNER, G.P.; LOBELL, D.B. A biogeophysical approach for automated SWIR unmixing of soils and vegetation. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 74, n. 1, p. 99-112, 2000.

ASNER, G.P. *et al.* Estimating canopy structure in an Amazon forest from laser rangefinder and IKONOS satellite observations. *Biotropica*, Washington, v. 34, n. 4, p. 483-492, 2002.

ASNER, G.P. *et al.* Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, Washington, D.C., v. 101, n. 16, p. 6039-6044, 2004.

ASNER, G.P. *et al.* *The Flora mission for ecosystem composition, disturbance and productivity*. Stanford: Carnegie Institution of Washington, 2005a.

ASNER, G.P. *et al.* Selective logging in the Brazilian Amazon. *Science*, Washington, D.C., v. 310, n. 5747, p. 480-482, 2005b.

BANNARI, A. *et al.* Estimating and mapping crop residues cover on agricultural lands using hyperspectral and Ikonos data. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 104, n.4, p. 447-459, 2006.

BARBALHO, M.G.S. *et al.* Imagens CBERS para o monitoramento da segunda safra agrícola de 2004 - Município de Jataí - GO. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2005. p. 805-809.

BEZERRA, H. S. *et al.* Desempenho do satélite Sino-Brasileiro de recursos terrestres CBERS-2 no mapeamento da cobertura da terra no Distrito Federal, Brasil. *Rev. Bras. Geofís.*, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 171-185, 2007.

BIRK, R.J. *et al.* Government programs for research and operational uses of commercial remote sensing data. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 88, n. 1, p. 3-16, 2003.

BONNET, B.R.P. *et al.* Sistema de Reserva Legal Extra-Propriedade no Bioma Cerrado: uma análise preliminar no contexto da bacia hidrográfica. *Rev. Bras. Cartogr.*, Rio de Janeiro, v. 58, n. 2, p. 129-137, 2006.

BRYANT, M.S. *et al.* Data continuity of Earth Observing 1 (EO-1) Advanced Land Imager (ALI) and Landsat TM and ETM. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, New York, v. 41, n. 6, p. 1204-1214, 2003.

BUTLER, D. Virtual globes: the web-wide world. *Nature*, London, v. 439, n. 7078, p. 776-778, 2006.

EPIPHANIO, J.C.N. Joint China-Brazil remote sensing satellites. *GIM Int.*, Lemmer, v. 19, n. 2, p. 68-71, 2005.

FERREIRA, L.G. *et al.* Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: an analysis within the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA). *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 87, n. 4, p. 534-550, 2003.

FERREIRA, L.G.; HUETE, A.R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spatial vegetation indices. *Int. J. Remote Sens.*, Basingstoke, v. 25, n. 10, p. 1837-1860, 2004.

FERREIRA, L.G. *et al.* Optical characterization of the Brazilian Savanna physiognomies for improved land cover monitoring of the cerrado biome: preliminary assessments from an airborne campaign over an LBA core site. *J. Arid Environ.*, London, v. 56, p. 425-447, 2004.

FERREIRA, M.E. *et al.* Análise comparativa dos produtos

- MODIS Ecologia para o monitoramento biofísico ambiental do bioma Cerrado. *Rev. Bras. Geofis.*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 251-260, 2006.
- FERREIRA, M.E. *et al.* Spectral linear mixture modelling approaches for land cover mapping of tropical savanna areas in Brazil. *Int. J. Remote Sens.*, Basingstoke, v. 28, n. 2, p. 413-429, 2007a.
- FERREIRA, N.C. *et al.* An operational deforestation mapping system using MODIS data and spatial context analysis. *Int. J. Remote Sens.*, Basingstoke, v. 28, n. 1, p. 47-62, 2007b.
- FERREIRA, N.C. *et al.* Deforestation hotspots in the Brazilian Amazon: evidences and causes as assessed from remote sensing and census data. *Earth Interactions*, Washington, D.C., v. 11, n. 1, p. 1-16, 2007c.
- FERREIRA, M.E. *et al.* Desmatamentos no bioma Cerrado: uma análise temporal (2001-2005) com base nos dados MODIS - MOD13Q1. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2007d. v. 1, p. 3877-3883.
- FERREIRA, M.E. *et al.* Cobertura vegetal remanescente em Goiás: distribuição, viabilidade ecológica e monitoramento. In: FERREIRA, L.G. (Org.). *A encruzilhada socioambiental – biodiversidade, economia e sustentabilidade no cerrado*. Goiânia: Editora UFG, 2008. p. 169-186.
- FERREIRA, N.C. *et al.* Assessing the response of the MODIS vegetation indices to landscape disturbance in the forested areas of the legal Brazilian Amazon. *Int. J. Remote Sens.*, Basingstoke (No prelo).
- GALVÃO, L.S. *et al.* Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 94, n. 4, p. 523-534, 2005.
- GAO, X. *et al.* Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 74, n. 3, p. 609-620, 2000.
- GOODENOUGH, D.G. *et al.* Forest information from hyperspectral sensing. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM – IGARSS, 2004, Anchorage. *Proceedings...* Anchorage: IEEE, 2004. p. 2585-2589.
- GOWARD, S.N. *et al.* Normalized difference vegetation index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 35, n. 2, p. 257-277, 1991.
- HUETE, A.R. *et al.* A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.
- HUETE, A.R. *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.
- HUETE, A.R. *et al.* Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophys. Res. Lett.*, Washington, D.C., v. 33, n. L06405, p. 1-4, 2006.
- HURTT, G. *et al.* IKONOS imagery for the large scale biosphere-atmosphere experiment in Amazonia (LBA). *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 88, n. 1, p. 111-127, 2003.
- INPE–Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Estimativas de desmatamentos na Amazônia Brasileira, 1998-1999*. São José dos Campos: INPE, 2000. (Relatório Interno).
- JACKSON, R.D.; HUETE, A.R. Interpreting vegetation indices. *Prev. Vet. Med.*, Amsterdam, v. 11, n. 3, p. 185-200, 1991.
- JUSTICE, D.H. *et al.* The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, New York, v. 36, n. 4, p. 1228-1249, 1998.
- KASISCHKE, E.S. *et al.* The use of imaging radars for ecological applications: a review. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 59, n. 2, p. 141-156, 1997.
- LAURANCE, W.F. *et al.* Biomass collapse in Amazonian forest fragments. *Science*, Washington, D.C., v. 278, n. 5340, p. 1117-1118, 1997.
- LIU, H.Q.; HUETE, A.R. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, New York, v. 33, n. 2, p. 457-465, 1995.
- LOBELL, D.B.; ASNER, G.P. Cropland distributions from temporal unmixing of MODIS data. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 93, n. 3, p. 412-422, 2004.
- MARTINS E SOUZA FILHO, P.W. *et al.* Sensoriamento remoto e recursos naturais da Amazônia. *Cienc. Cult.*, São Paulo, v. 58, n. 3, p. 37-41, 2006.
- MIURA, T. *et al.* Vegetation detection through smoke-filled AVIRIS images: an assessment using MODIS bandpasses. *J. Geophys. Res.*, Washington, D.C., v. 103, n. D24, p. 32.001-32.012, 1998.
- MIURA, T. *et al.* An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 78, p. 284-298, 2001.
- MIURA, T. *et al.* Discrimination and biophysical characterization of Cerrado physiognomies with EO-1 hyperspectral Hyperion. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1077-1082.
- MIURA, T. *et al.* An empirical investigation of cross-sensor relationships of NDVI and red/near-infrared reflectance using EO-1 Hyperion data. *Remote Sensing of Environment*, New York, v. 100, n. 2, p. 223-236, 2006.
- MOODY, A; STRAHLER, A.H. Characteristics of composited AVHRR data and problems in their classification. *Int. J. Remote Sens.*, Basingstoke, v. 15, n. 17, p. 3473-3491, 1994.
- MYNENI, R.B. *et al.* Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, London, v. 386, p. 698-702, 1997.
- PIWOWAR, J.M. *et al.* Temporal mixture analysis of Arctic Sea ice imagery: a new approach for monitoring environmental change. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 63, n. 3, p. 195-207, 1998.

- PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. (Org.). *Sensoriamento remoto: reflectância de alvos naturais*. 1. ed. Brasília: UNB, 2001. v. 1, p. 157-199.
- RATANA, P. et al. Analysis of Cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal-temporal domain. *Earth Interactions*, Washington, D.C., v. 9, p. 1-22, 2005.
- ROBERTS, D.A. et al. Mapping Chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 65, n. 3, p. 267-279, 1998.
- RODERICK, M. et al. Calibrating long-term AVHRR-derived NDVI imagery. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 58, n. 1, p. 1-12, 1996.
- ROGAN, J. et al. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 80, n. 1, p. 143-156, 2002.
- SABRINA, R. et al. Estimation of vegetation photochemical processes from CHRIS-PROBA data. In: ESA CHRIS PROBA WORKSHOP, 3., 2005, Frascati. *Proceedings...* Frascati: Esrin, 2005.
- SALOVAARA, K.J. et al. Classification of Amazonian primary rain forest vegetation using Landsat ETM+ satellite imagery. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 97, n. 1, p. 39-51, 2005.
- SANO, E.E. et al. Assessing JERS-1 synthetic aperture radar data for vegetation mapping in the Brazilian savanna. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, Tokyo, v. 21, n. 2, p. 158-167, 2001.
- SANO, E.E. et al. Synthetic aperture radar (L-band) and optical vegetation indices for discriminating the Brazilian savanna physiognomies: a comparative analysis. *Earth Interactions*, Washington, D.C., v. 9, n. 15, p. 1-15, 2005.
- SANO, E.E. et al. Padrões de cobertura de solos do Estado de Goiás. In: FERREIRA, L.G. (Org.). *A encruzilhada socioambiental – biodiversidade, economia e sustentabilidade no cerrado*. Goiânia: Editora UFG, 2008. p. 91-106.
- SCHOWENGERDT, R. A. *Remote sensing: models and methods for image processing*. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1997.
- SCHWEIK, C.M.; GREEN, G.M. The use of spectral mixture analysis to study human incentives, actions, and environmental outcomes. *Soc. Sci. Comput. Rev.*, Durham, v. 17, n. 1, p. 40-63, 1999.
- SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, New York, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.
- SHIMABUKURO, Y.E.; SMITH, J.A. Fraction images derived from Landsat TM and MSS data for monitoring reforested areas. *Can. J. Remote Sens.*, Ottawa, v. 21, n. 1, p. 67-74, 1995.
- SHIMABUKURO, Y.E. et al. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do Pantanal. *Pesq. Agropecu. Bras.*, Rio de Janeiro, v. 33 (número especial), p. 1729-1737, 1998.
- SHIMABUKURO, Y.E. et al. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon region. *Int. J. Remote Sens.*, Basingstoke, v. 19, n. 3, p. 535-541, 1998.
- SKOLE, D.; TUCKER, C. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. *Science*, Washington, D.C., v. 260, n. 5116, p. 1905-1910, 1993.
- SMITH, A.M. et al. Leaf area index from CHRIS satellite data and applications in plant yield estimation. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 26., 2005, Wolfville. *Proceedings...* Ottawa: Canadian Aeronautics and Space Institute, 2005.
- SOUZA, C.M.; BARRETO, P. An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forest in the Amazon. *Int. J. Remote Sens.*, Basingstoke, v. 21, n. 1, p. 173-179, 2000.
- SOUZA FILHO, C.R. Aster à vista. *Revista Infogeo*, São Paulo, v. 5, n. 29, p. 62-64, 2003.
- STONE, W.E. Guide to land imaging satellites. 2006. Disponível em: <<http://www.asprs.org/news/satellites>>. Acesso em: 12 jan. 2007.
- TARDIN, A.T. et al. *Subprojeto desmatamento: convênio IBDF/CNPq*. São José dos Campos: INPE-Instituto de Pesquisas Espaciais, 1980. (Relatório técnico INPE-1649-RPE/103).
- TOWNSHEND, J.R.G.; JUSTICE, C.O. Towards operational monitoring of terrestrial systems by moderate-resolution remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 83, n. 2, p. 351-359, 2002.
- WANG, Z.X. et al. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research. *Acta Ecologica Sinica*, Amsterdam, v. 23, n. 5, p. 979-988, 2003.
- WOODCOCK, C.E. et al. Monitoring large areas for forest change using Landsat: Generalization across space, time and Landsat sensors. *Remote Sens. Environ.*, New York, v. 78, n. 2, p. 194-203, 2001.
- WEIR, S. et al. Micro-mini-satellites for affordable EO constellations: rapid-eye & DMC. In: IAA SYMPOSIUM ON SMALL SATELLITES FOR EARTH OBSERVATION, 5., 2005, Berlin. *Proceedings...* Berlin: International Academy of Astronautics, 2005. p. 3.

Received on July 07, 2008.

Accepted on September 30, 2008.