

Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão**

Luciano Shozo Shiratsuchi*¹, Ziany Neiva Brandão*², Luiz Eduardo Vicente*³, Daniel de Castro Victoria*⁴, Jorge Ricardo Ducati*⁵, Ronaldo Pereira de Oliveira*⁶, Marina de Fátima Vilela*⁷

¹PhD. em Agronomia: Ciência do Solo, Embrapa Agrossilvipastoril

²DSc. em Recursos Naturais: Sistema Água-Solo-Planta-Atmosfera, Embrapa Algodão

³DSc. em Geografia, Embrapa Monitoramento por Satélite

⁴DSc. em Ciências: Energia Nuclear na Agricultura, Embrapa Monitoramento por Satélite

⁵PhD. em Ciências Físicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

⁶PhD. em Agricultura de Precisão, Embrapa Solos

⁷DSc. em Sensoriamento Remoto, Embrapa Cerrados

*E-mails: luciano.shiratsuchi@embrapa.br, ziany.brandao@embrapa.br, luiz.vicente@embrapa.br, daniel.victoria@embrapa.br, ducati@if.ufrgs.br, ronaldo.oliveira@embrapa.br, marina.vilela@embrapa.br

**Projeto financiado pela Embrapa enquadrado no Macroprograma 1 - Grandes Desafios Nacionais

Resumo: A agricultura de precisão (AP) oferece uma infinidade de benefícios potenciais em rentabilidade, produtividade, sustentabilidade, qualidade da cultura, proteção ambiental, qualidade de vida, segurança alimentar e desenvolvimento econômico rural. A AP utiliza abordagens científicas e modernas, combinadas com os conhecimentos tradicionais e tecnologias de informação para uma produção agrícola inteligente. Nesse sentido, as técnicas de sensoriamento remoto, onde as informações da lavoura são obtidas de forma não-destrutiva, rápida e por vezes à distância, têm se tornado de fundamental importância na obtenção e tratamento dos dados de campo. Técnicas de sensoriamento remoto (SR) desempenham um papel importante no campo em diagnósticos como a estimativa da produtividade, avaliação nutricional, detecção de pragas e doenças, previsão do tempo e avaliação da necessidade hídrica das plantas obtidas em sítio específico. Assim, o objetivo deste trabalho foi apresentar aspectos teóricos e as principais técnicas de SR utilizadas atualmente nas lavouras de alta produtividade.

Palavras-chave: efeito da refletância, sensores, índices de vegetação, monitoramento de culturas

Remote Sensing: Basic concepts and applications in Precision Agriculture

Precision Agriculture (PA) offers a myriad of potential benefits in terms of profitability, crop yield, sustainability, quality, environmental protection, quality of life, food security and rural economic development. The AP uses modern and scientific approaches, combined with traditional knowledge and information technologies for an intelligent agricultural production. In this sense, the remote sensing techniques, which the crop information are obtained in a non-destructive, very quick and sometimes at a distance, have become very important to obtaining and processing of field data. Remote sensing (RS) play an important role in the field, especially in diagnostics as yield estimate, nutritional assessment, detection of pests and diseases, weather forecast and assessment of plants water requirement in site-specific. Thus, the objective of this work was to present the theoretical aspects and the main SR techniques currently used in farms of high productivity.

reflectance effects, sensors, vegetation indices, crop monitoring

1. Introdução

O sensoriamento remoto (SR) se caracteriza pela obtenção de informações de um objeto sem existir um contacto físico com o mesmo, e muitas vezes à longas distâncias. As primeiras medições por SR foram realizadas através de câmeras acopladas em aeronaves, balões, pipas, foguetes e até passaros. Atualmente, imagens de sensores remotos podem ser obtidas a partir de diversas plataformas, como satélites, aeronaves, veículos aéreos não tripulados (VANTs), máquinas agrícolas autopropelidas, etc.

Várias aplicações podem ser abordadas através de SR, dentre elas, se destacam: (a) a estimativa da biomassa e produtividade da cultura; (b) o monitoramento de estresse hídrico e do vigor nas plantas e (c) a avaliação do estágio fenológico (BRANDÃO, 2009).

Uma das primeiras aplicações dos dados obtidos remotamente tem sido a detecção de diferenças na refletância, relacionadas à densidade da cobertura vegetal. A radiometria espectral é uma das mais importantes áreas do SR, podendo ser efetivada por meio de medidas realizadas em laboratório ou em campo. Ela identifica a intensidade com que cada material, seja um tipo de solo, de rocha ou de vegetação, reflete a radiação eletromagnética

em diferentes comprimentos de onda do espectro (BRANDÃO et al., 2008). Assim, dados da refletância têm sido associados às características das plantas como o índice da área foliar, a biomassa ou a fração radiativa interceptada fotossinteticamente. Na agricultura, as propriedades da refletância em cada faixa do espectro eletromagnético podem ser melhor avaliadas através de combinações matemáticas de diferentes bandas espectrais (ATZBERGER, 2013). Essas transformações são medidas da atividade da vegetação utilizadas em especial as faixas do visível e infravermelho próximo (NIR - *Near Infrared*) e são denominados de índices de vegetação (IVs).

Para entender como os IVs são criados, é preciso uma melhor compreensão da resposta espectral da vegetação. Na Figura 1a, pode ser observado o comportamento da refletância para a vegetação verde saudável, sendo fundamentalmente determinado pela clorofila, que reflete em todo o espectro visível, mas tem seu ápice na faixa da luz verde (500-600 nm), e cuja absorção é máxima nas faixas espectrais da luz azul (400-500 nm) e da luz vermelha (600-700 nm) (BRANDÃO et al., 2008). As clorofilas *a* e *b* regulam o comportamento espectral da vegetação de maneira mais significativa em comparação com outros pigmentos (Figura 1b). No NIR

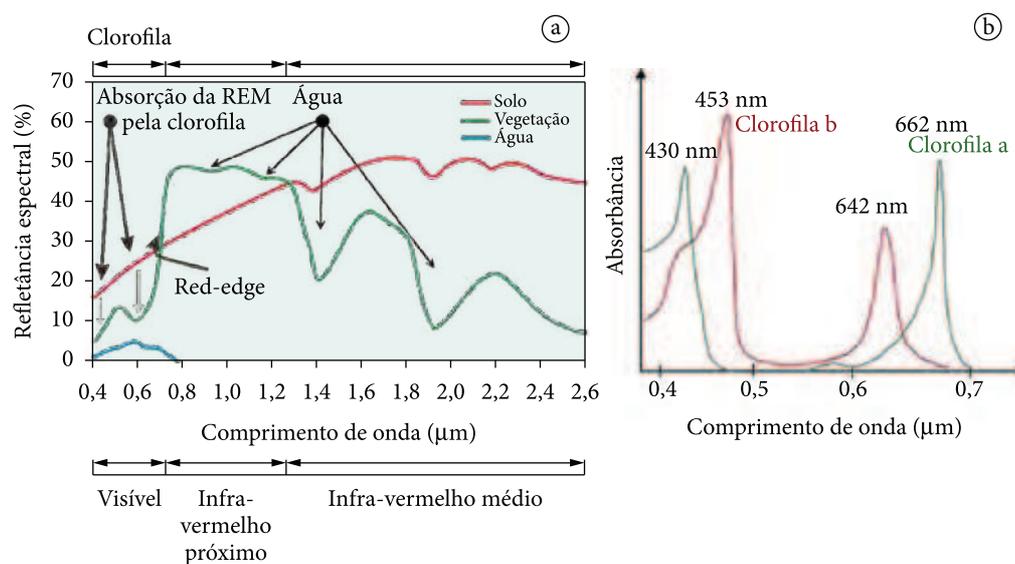


Figura 1. (a) Curvas características da refletância da água, solo e vegetação verde, apresentando faixas espectrais de absorção da radiação eletromagnética associadas a pigmentos e água. (b) Comprimentos de onda de absorbância das clorofilas *a* e *b*.

(750-1300 nm), dependendo do tipo de planta, a radiação solar é refletida numa proporção de 30 % a 80 % dos raios incidentes.

Nos comprimentos de ondas acima de 1300 nm, o conteúdo de água das folhas influencia a interação com a radiação. A água no tecido foliar absorve especialmente nas faixas em torno de 1450 nm e 1950 nm, sendo comprimentos de onda úteis à determinação do conteúdo hídrico das folhas (PEÑUELAS et al., 1997).

2. Índices de vegetação no monitoramento de culturas

Inúmeros IV já foram desenvolvidos para diferentes finalidades. Pesquisadores no mundo inteiro usam as características de absorção associadas com constituintes bioquímicos para avaliar as culturas em estudo. Assim, diferentes índices são utilizados na agricultura e são otimizados para avaliar um processo de interesse (BRANDÃO, 2009). Por exemplo, alguns índices espectrais foram propostos para capturar os processos fotoquímicos associados com a atividade da fotossíntese tal como o *uso da eficiência da luz* (ϵ) ou estimar o conteúdo de pigmentação da folha (clorofila) (DAUGHTRY et al., 2000; BRITO et al., 2011), enquanto que outros foram projetados para obter o índice de área foliar (IAF).

A escolha do comprimento de onda mais adequado está relacionada às características que se deseja avaliar. Algumas vezes pode surgir o efeito de confusão, pois a refletância do dossel no NIR é fortemente dependente das propriedades estruturais (por exemplo, IAF), enquanto no visível é sensível às propriedades bioquímicas (por exemplo, clorofila) (ZARCO-TEJADA et al., 2001). Para reduzir esse efeito, muitos estudos recentes demonstraram que a quantidade de clorofila da folha pode ser estimada através da combinação de diferentes índices espectrais. Assim, os IVs podem ser divididos em índices sensíveis à concentração do pigmento (clorofila) e índices estruturais, que podem ou não ser imunes à influência das propriedades óticas do solo (HABOUDANE et al., 2004; BRANDÃO, 2009).

A Tabela 1 apresenta alguns dos índices de vegetação mais utilizados. Tucker (1979) estudou diferentes combinações lineares das bandas do verde, vermelho e NIR para monitorar

propriedades como a biomassa, conteúdo de água na folha e conteúdo de clorofila. Ele validou o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) desenvolvido por Rouse et al. (1973), que é um IV estrutural, muito utilizado para monitoramento agrícola, por apresentar forte correlação linear com o crescimento das culturas. Por outro lado, a razão simples entre o NIR e o canal vermelho fornece uma alta correlação com o desenvolvimento das plantas e com seus estágios de crescimento, sendo esse um dos primeiros IV estudados (BIRTH; McVEY, 1968).

O SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*) (Huete, 1988), foi criado visando amenizar o efeito de solo e se baseia no princípio de que a curva de vegetação tende a aproximar-se da curva de solo para baixas densidades de vegetação, passando por uma mistura de respostas espectrais para densidades médias e quase nenhuma influência do solo para densidades altas de vegetação. O SAVI consiste na própria fórmula do NDVI, acrescida de uma constante L, que varia de 0 a 1, dependendo do grau da maior ou menor cobertura do solo, respectivamente. Seguindo o mesmo princípio vieram duas modificações do SAVI: o TSAVI (*Transformed SAVI*) (BARET; GUYOT; MAJOR, 1989), o MSAVI (*Modified SAVI*) (Qi et al., 1994) e o OSAVI (*Optimized SAVI*) (Rondeaux et al., 1996).

Outros índices bastante utilizados são os que se propõem a reduzir os efeitos atmosféricos com a utilização da faixa do azul do espectro eletromagnético (B - *Blue*), como os IVs SARVI e EVI (Tabela 1).

Estimativas de biomassa de áreas florestadas através de SR podem ser realizadas mediante a utilização de dados coletados em campo, aeronave ou dados orbitais. Usando qualquer método, o interesse é sempre a obtenção das relações para o índice de área foliar (IAF) e biomassa. O IAF é um importante parâmetro biofísico da vegetação, sendo definido como a área foliar total projetada por unidade de área de terreno (m^2/m^2) (DAUGHTRY et al., 1992).

Sua importância deve-se à relação com a biomassa vegetal e por caracterizar a arquitetura do dossel, fornecendo informações importantes sobre o vigor da cobertura vegetada e justificando a diversidade de estudos em SR envolvendo estimativas deste parâmetro. Estas estimativas permitem uma avaliação das condições fisionômicas e fisiológicas dos

Tabela 1. Índices de vegetação comumente utilizados no monitoramento de culturas.

Descrição	Índice	Referência
Características Estruturais		
SR (<i>Simple Ratio</i>)	$SR = R_{NIR} / R_R$	Birth e McVey (1968)
NDVI (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$NDVI = (R_{NIR} - R_R) / (R_{NIR} + R_R)$	Rouse et al. (1974)
GRVI (<i>Green-Red Vegetation Index</i>)	$GRVI = (R_G - R_R) / (R_G + R_R)$	Tucker (1979)
SAVI (<i>Soil Adjusted Difference Vegetation Index</i>)	$SAVI = (1 + L)(R_{NIR} - R_R) / (R_{NIR} + R_R + L)$	Huete (1988)
SARVI (<i>Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index</i>)	$SAVI = \frac{(1 + L) \left[(R_{NIR} - (R_R - \gamma(R_B - R_R))) \right]}{[L + R_{NIR} + (R_R - \gamma(R_B - R_R))]}$	Kaufman e Tanre (1992)
MSAVI (<i>Modified SAVI</i>)	$MSAVI = \frac{1}{2} \left[2R_{NIR} + 1 - \sqrt{(2R_{NIR} + 1)^2 - 8(R_{NIR} - R_R)} \right]$	Qi et al., 1994
RDVI (<i>Renormalized Difference Vegetation Index</i>)	$RDVI = \sqrt{(R_{NIR} - R_R) / (R_{NIR} + R_R)}$	Roujean e Breon (1995)
EVI (<i>Enhanced Vegetation Index</i>)	$EVI = 2,5(R_{NIR} - R_R) / (1 + R_{NIR} + 6R_R - 7,5R_B)$	Huete et al. (1997)
OSAVI (<i>Optimized SAVI</i>)	$OSAVI = (1 + 0,16)(R_{NIR} - R_R) / (R_{NIR} + R_R + 0,16)$	Rondeaux et al., 1996
MSR (<i>Modified SR</i>)	$MSR = [(R_{NIR} / R_R) - 1] / \sqrt{1 + (R_{NIR} / R_R)}$	
Propriedades Bioquímicas		
SIPI (<i>Structural Insensitive Pigment Index</i>)	$SIPI = (R_{NIR} - R_B) / (R_{NIR} + R_R)$	Peñuelas et al., 1995
GARI (<i>Green Atmospherically Resistant Vegetation Index</i>)	$GARI = \frac{R_{NIR} - [R_G - \gamma(R_B - R_R)]}{[R_{NIR} + (R_G - \gamma(R_B - R_R))]}$	Gitelson et al., 1996
TVI (<i>Triangular Vegetation Index</i>)	$TVI = \frac{1}{2} [120(R_{NIR} - R_G) - 200(R_R - R_G)]$	Broge e Leblanc (2001)
GCI (<i>Green Chlorophyll Index</i>)	$GCI = [R_{NIR} / R_G] - 1$	Gitelson et al., 2003
MCARI1 (<i>First Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index</i>)	$MCARI1 = 1,2 [2,5(R_{NIR} - R_G) - 1,3(R_{NIR} - R_G)]$	Haboudane et al. (2004)
MCARI2 (<i>Second Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index</i>)	$MCARI2 = \frac{1,2 [2,5(R_{NIR} - R_R) - 1,3(R_{NIR} - R_G)]}{\sqrt{2(R_{NIR} + 1)^2 - 0,5 - 6(R_{NIR} - 5\sqrt{R_R})}}$	Haboudane et al. (2004)

dosséis e análises quantitativa e qualitativa das trocas energia/matéria ocorridas nos mesmos (HABOUDANE et al., 2004).

O uso de dados orbitais constitui-se em um método indireto e não destrutivo para estimativa do IAF. De maneira geral é esperado que quanto maior o IAF, menor o valor de radiância espectral referente às regiões do visível (380 a 720 nm) e do infravermelho médio (1300 a 3000 nm), devido à maior disponibilidade de pigmentos fotossintetizantes absorvendo Radiação Eletromagnética (REM) incidente e quantidade de água, respectivamente, e maior valor na região do infravermelho próximo, devido ao múltiplo espalhamento entre folhas.

Em SR, os sensores utilizados podem ser divididos em duas categorias: passivos ou ativos. Sensores passivos registram a energia eletromagnética refletida ou emitida pelo alvo, como a radiação solar refletida ou radiação termal emitida. São exemplos de sensores passivos os sensores multiespectrais a bordo de diversos satélites como o *Operational Land Imager* (OLI) a bordo do satélite Landsat 8 e a *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo dos satélites TERRA e AQUA. Já os sensores ativos proporcionam fonte própria de energia eletromagnética, como os radares, sonares, sensores ativos de dossel (como o *Crop Circle e Greenseeker*) e LiDAR. Este último sistema (LiDAR - *Light Detection and Ranging*) dispara pulsos de laser sobre o terreno e identifica os respectivos retornos, tornando possível saber com precisão as coordenadas X, Y e Z de pontos no terreno. Isso permite gerar “nuvens de pontos” (Figura 2), que podem ser utilizados para levantamentos topográficos (ZANARDI et al., 2013) e estudos de biomassa em florestas plantadas (SILVA et al., 2013) e manejo de florestas nativas (ARAUJO et al., 2013).

Imagens de sensores remotos apresentam diferentes resoluções: espacial, espectral, temporal e radiométrica. A resolução espacial diz respeito à dimensão do terreno que é representada pelo menor elemento em uma imagem, o pixel. Estão disponíveis imagens em que o pixel representa áreas de 1 km² ou maiores (baixa resolução espacial), as quais podem ser aplicadas para estudos de grandes regiões como avaliação da temperatura do oceano, condições atmosféricas globais etc. Também é possível obter imagens com resolução espacial na ordem de centímetros,

a partir de plataformas aerotransportadas ou de sensores orbitais de alta resolução. A partir da Figura 3 é possível compreender o efeito da resolução espacial nas imagens de sensores remotos.

A resolução espectral diz respeito ao número e ao tamanho dos intervalos de comprimento de onda (bandas) do espectro eletromagnético mensurado. De acordo com a faixa do espectro, os alvos na superfície terrestre respondem de maneira distinta, o que confere diferentes aplicações para cada uma das bandas dos sensores multiespectrais.

Sensores multiespectrais possuem bandas em diferentes faixas do espectro eletromagnético, cobrindo a faixa do visível, infravermelho próximo, médio e termal (Tabela 2). Também existem sensores com um número elevado de bandas contíguas, capazes de coletar informações do espectro eletromagnético de maneira contínua, os sensores hiperespectrais.

A resolução temporal diz respeito ao intervalo de tempo necessário para a obtenção de imagens de um mesmo local. Plataformas orbitais como o

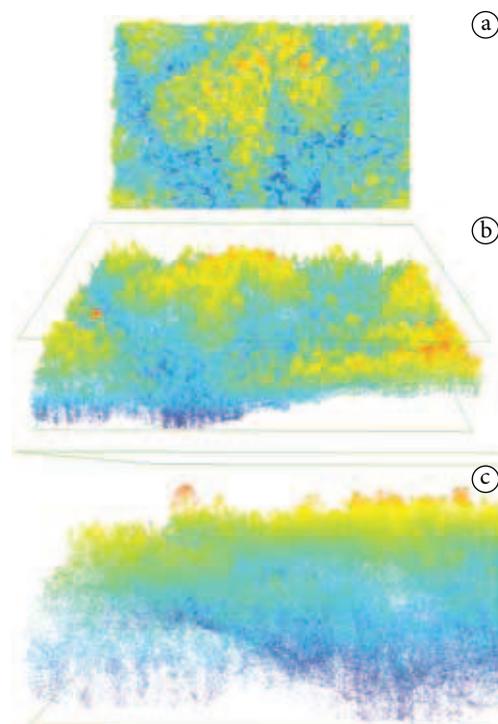


Figura 2. a) Vista superior de nuvem de pontos LIDAR da Floresta Estadual do Antimary, AC, b) visão oblíqua da mesma região e c) visão lateral aproximada. É possível identificar a forma de algumas copas de árvores. Dados LIDAR são provenientes do projeto Paisagens Sustentáveis, parceria da Embrapa com o Serviço Florestal Americano (USFS).

Landsat ou o Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS) possuem tempo de revisita de 16 e 26 dias, respectivamente. Outros sensores com menor resolução espacial, como o MODIS ou AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) são capazes de obter imagens diariamente (EMBRAPA, 2009). Também estão disponíveis sistemas baseados em uma constelação de satélites, que permitem aliar alta resolução espacial com alta resolução temporal.

A resolução radiométrica diz respeito à forma e a precisão de como a radiação eletromagnética medida pelo sensor remoto. O sensor multiespectral (MSS) do satélite Landsat 1 quantificava a radiação eletromagnética recebida em 64 níveis ou seja, uma resolução radiométrica de 6 bits (6 bits $\rightarrow 2^6 = 64$). O sensor OLI, a bordo do satélite Landsat 8 apresenta resolução espacial de 12 bits, resultando em imagens com 4096 níveis de cinza, um aumento significativo diante de seu

antecessor, Landsat-7, com resolução de 8 bits (256 níveis de cinza).

Dentre os diversos sistemas de imageamento existentes, os satélites da série Landsat merecem um destaque especial. O programa Landsat lançou seu primeiro satélite no início dos anos 1970 (Landsat 1 entrou em operação em 1972) e desde então vem gerando imagens da superfície terrestres, sendo que a partir do satélite Landsat 4 foram introduzidos os sensores TM, com 30 metros de resolução espacial. Em abril de 2008 todo o acervo das imagens Landsat foi disponibilizado ao público.

3. Aplicações do Sensoriamento Remoto

Imagens e produtos de SR possuem diversas aplicações nos mais variados campos. Dados

Tabela 2. Bandas espectrais do sensor *Operational Land Imager (OLI)* e *Thermal Infrared Sensor (TIRS)* a bordo do satélite Landsat 8.

Banda	Comprimento de onda (μm)	Resolução espacial (m)	Aplicações
1 - Aerosol e costal	0,43 a 0,45	30	Estudos em áreas costeiras e de aerossóis na atmosfera
2 - Azul	0,45 a 0,51	30	Mapeamento de águas costeiras Diferenciação entre solo e vegetação Diferenciação entre vegetação coníferas e decídua
3 - Verde	0,53 a 0,59	30	Reflectância de vegetação verde sadia
4 - Vermelho	0,64 a 0,67	30	Absorção de clorofila Diferenciação de espécies vegetais
5 - Infravermelho próximo (NIR)	0,85 a 0,88	30	Levantamento de biomassa Delineamento de corpos d'água
6 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR1)	1,57 a 1,65	30	Medidas de umidade da vegetação Diferenciação entre nuvens e neve
7 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR2)	2,11 a 2,29	30	Mapeamento hidrotermal
8 - Pancromática	0,50 a 0,68	15	Fusão de imagens para obtenção de maior resolução espacial
9 - Cirrus	1,36 a 1,38	30	Detecção de nuvens do tipo cirrus
10 - Infravermelho termal (TIRS) 1	10,60 s 11,19	100	Temperatura da superfície
11 - Infravermelho termal (TIRS) 2	11,50 a 12,51	100	Temperatura da superfície

*Bandas 10 e 11, do sensor TIRS, são obtidas com resolução espacial de 100 metros e reamostradas para 30 metros no produto final. FONTE: adaptado de Perguntas frequentes sobre as missões Landsat (UNITED..., 2013) e Tutorial de Geoprocessamento SPRING (http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_sen.html)

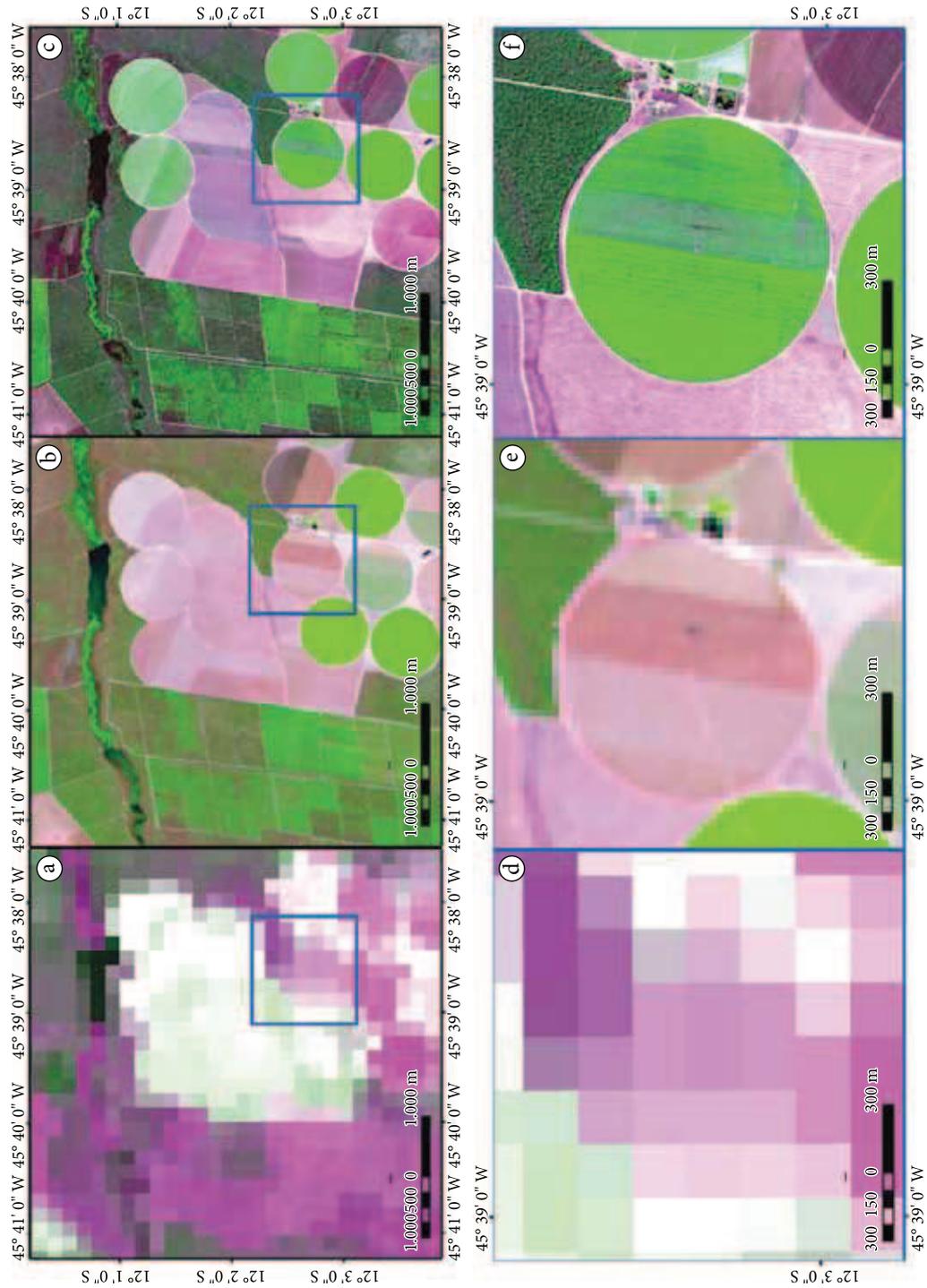


Figura 3. Região de agropecuária no Município de Luiz Eduardo Magalhães (BA), com imagens de baixa (A e D), média (B e E) e alta (C e F) resolução espacial no ano de 2011. A e D, imagem do satélite Terra/Modis (“Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer”) MOD9Q1h13v10 de agosto de 2011, bandas 2 e 3, com resolução espacial de 250 m; B e E, imagem do satélite Landsat 5 (“Land remote sensing satellite”) TM220/068 de novembro de 2011, bandas 5, 4 e 3, com resolução espacial de 30 m; e C e F, imagem do satélite GeoEye 1 de outubro de 2011, bandas verde, vermelho e infravermelho fusionadas com a banda pancromática, com resolução espacial abaixo de 2 m. (Fonte: BATISTELLA; BOLFE, 2012).

de sensores com baixa resolução espacial são utilizados para avaliar a temperatura dos oceanos em escala global, sendo muito utilizados em estudos climáticos, de eventos como *El Niño*, e modelos de previsão meteorológica e do clima. Outras aplicações incluem estudos para fins de planejamento urbano, analisando a expansão e a ocupação das terras. Para tais, normalmente são utilizadas imagens com maior resolução espacial, dependendo do tema a ser estudado. Avaliações da expansão da área urbanizada podem ser realizadas utilizando imagens com 30 m de resolução espacial (HUPP; FORTES, 2013). Já imagens com maior resolução podem ser utilizadas para a quantificação da urbanização viária (ALVAREZ; GALLO, 2012) e sua relação com a temperatura da superfície (GALLO; ALVAREZ; GARÇON, 2013); planejamento de sistemas de mobilidade urbana (SCHMITT et al., 2013) além de outras aplicações diversas.

O SR é muito utilizado em aplicações relativas a estudos de uso e cobertura das terras e de características da vegetação. Neste campo são realizados diversos estudos e aplicações, como a avaliação das alterações no uso e cobertura das terras em diversos locais (QUARTAROLI et al., 2006; RODRIGUES et al., 2012; BATISTELLA et al., 2002 dentre outros), a avaliação de parâmetros biofísicos e de evapotranspiração da vegetação (ANDRADE et al., 2009, 2012; FACCO et al., 2012) e estudos da abrangência de áreas agrícolas e de sua dinâmica temporal (Figura 4) (JOHANN et al., 2012; VICTORIA et al., 2012; VICENTE et al., 2012).

Sendo assim, as imagens de sensores remotos apresentam diferentes características que fazem com que sejam úteis às mais variadas aplicações, desde estudos globais, programas de monitoramento contínuo em grandes áreas, até estudos pontuais em escalas detalhadas como o ambiente urbano ou a agricultura de precisão (AP).

Nos últimos anos, a produção agrícola tem passado por grandes mudanças. O gerenciamento dos módulos de produção em fazendas atualmente não é mais baseado em aplicações uniformes de insumos nas culturas, pois os elevados custos de produção desafiam essas estratégias. Baseado nisso é que o conceito de AP se adequa, pois considerando a variabilidade espacial do meio

agrícola, a AP pode reduzir os custos de produção e aumentar a produtividade, fazendo-se o uso muitas vezes de automação e alta tecnologia voltadas à produção agrícola (McKINION et al., 2001; BRANDÃO et al., 2008).

Dados obtidos por sensoriamento remoto (SR) têm sido utilizados como ferramenta auxiliar nessa nova estratégia de gerenciamento que considera a variabilidade espacial dos fatores que interferem na produtividade das culturas. A utilização de SR na AP vem facilitar o diagnóstico especializado para subsidiar tomadas de decisão no manejo agrícola. No suporte a gestão operacional no manejo por sítio específico podem-se resaltar o delineamento e a classificação das zonas de manejo (ZM) dentro do talhão (McBRATNEY et al., 2005), estas sendo definidas como áreas contíguas e associadas a uma classe de manejo específico (TAYLOR; McBRATNEY; WHELAN, 2007). Questionadas para regiões de grande variabilidade temporal (SCHEPERS et al., 2005) as ZM encontram respaldo nos dados de SR.

O conteúdo de N nas plantas pode ser avaliado através de métodos indiretos. Um dos métodos mais simples consiste na observação do vigor da coloração verde das plantas e, por conseguinte, na verificação da ocorrência de clorose ou amarelamento das folhas, que indica a falta de N (BRANDÃO et al., 2008). Com base neste conhecimento, pode-se utilizar dados de sensores remotos em níveis de campo, aéreo e orbital para avaliar e estimar o conteúdo de N nas plantas. Sabe-se que a diminuição da concentração dos pigmentos clorofilados, ocasionada pela carência em N, interfere na refletância espectral na região do espectro visível. Brandão (2009), num estudo para diferentes doses de nitrogênio no algodoeiro irrigado (0 Kg ha⁻¹; 90 Kg ha⁻¹; 180 Kg ha⁻¹ e 270 Kg ha⁻¹), percebeu significativo aumento no infravermelho com o incremento de nitrogênio (Figura 5). Ainda nesse trabalho foi observado a saturação do NDVI para os maiores valores do IAF, efeito reduzido quando utilizado o TVI, que apresentou correlações com o IAF superiores a 0,8 para todas as épocas de avaliação. Em um estudo que avaliou cultivos de trigo submetidos a diferentes concentrações de N (0 Kg ha⁻¹; 70 Kg ha⁻¹; 170 Kg ha⁻¹ e 221 Kg ha⁻¹), observaram que os maiores valores de refletância no espectro visível se relacionavam com os tratamentos submetidos

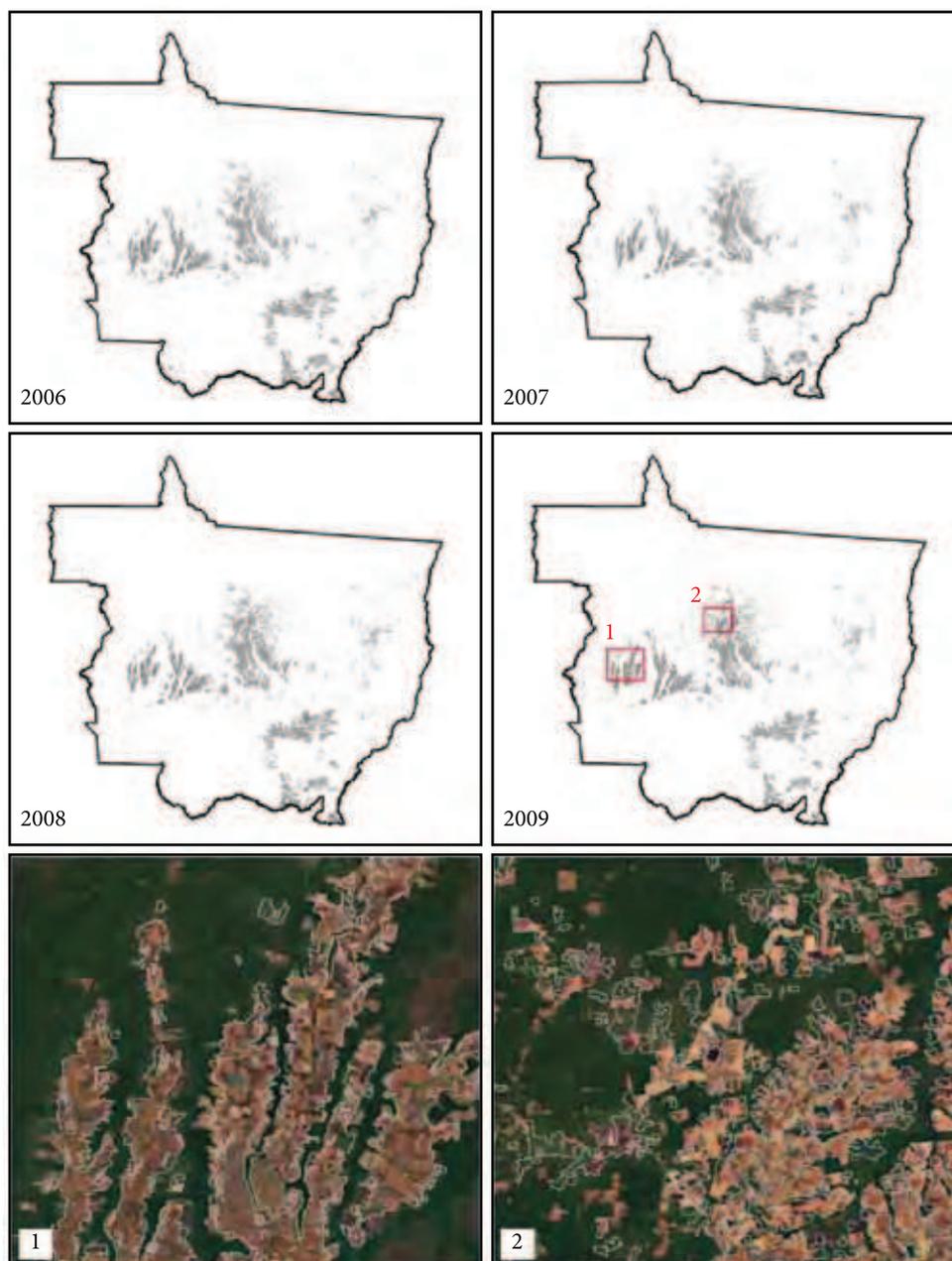


Figura 4. Identificação de áreas agrícolas no estado do Mato Grosso nos anos de 2006 a 2008 e visão aproximada em duas áreas específicas no estado. Fonte: Victoria et al., 2012.

a menores taxas de adubação nitrogenada e que a adição de N implica na diminuição da refletância espectral no visível e no aumento da refletância espectral entre 700 e 1300 nm.

Observado incremento no NDVI acompanhando o aumento da absorção de N, tendo esse IV atingido seu valor máximo de 0,76, na época de pleno florescimento do algodoeiro. Zarco-Tejada et al. (2005), também observaram

que as melhores épocas para predição da produtividade e biomassa são no início da floração e no pleno florescimento, tendo encontrado que os índices relacionados às características estruturais da planta, como o NDVI, RDVI e MTVI1 podem prever melhor o IAF e a produção de biomassa, enquanto que outros IVs como o MSAVI e o MTVI2 mostraram baixo desempenho.

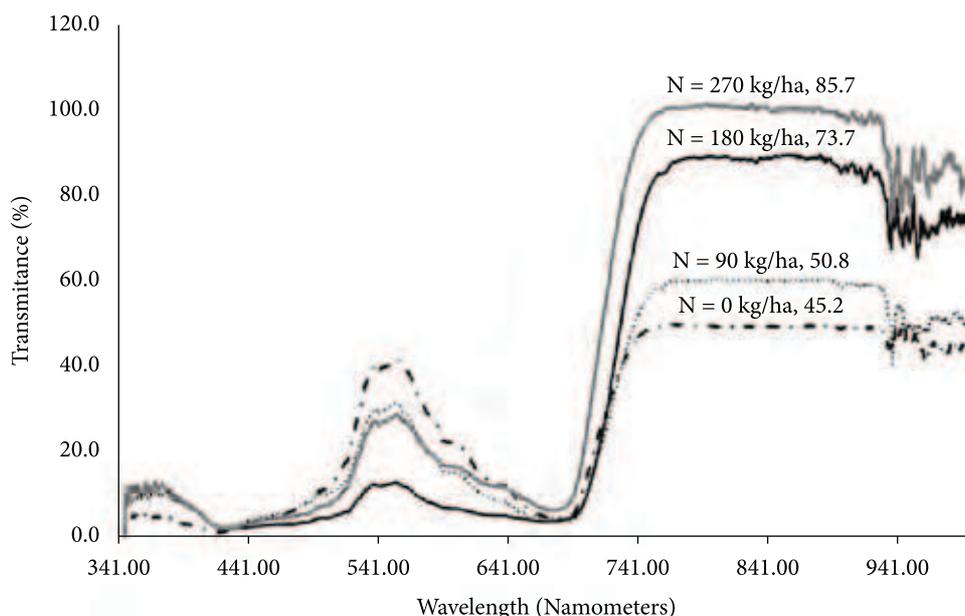


Figura 5. Variação dos espectros de refletância em plantas de algodão saudáveis, obtidas por espectrorradiometria de campo, durante um mesmo estágio fenológico em 2009, Apodi, RN. As plantas estavam totalmente supridas de água e com quatro doses de N (0, 90, 180 e 270 kg ha⁻¹). A magnitude do aumento na refletância acima de 710 nm indica diferenças na biomassa, onde a menor biomassa registrada foi para N=0 kg ha⁻¹ e a maior biomassa para N = 270 kg ha⁻¹. Fonte: Brandão 2009.

Aplicações de dados de sensores remotos para a viticultura foram reportadas por Bramley e Proffitt (1999) e Bramley (2009), nas quais foi possível, após um mapeamento detalhado de um vinhedo na Austrália, que revelou quais as áreas de menor vigor, e portanto, com maior potencial de qualidade, colher e vinificar separadamente as uvas, obtendo-se vinhos de preço diferenciado e agregando valor à produção. Nesta linha de trabalho, Ducati, Bombassaro e Dullius (2013) mostram que levantamentos de campo da variação de NDVI em vinhedos são coerentes com os valores de NDVI extraídos de imagens de satélite dos mesmos vinhedos, na mesma época. Estes trabalhos indicam o grande potencial do uso de imagens de satélites para o monitoramento de parcelas agrícolas de pequena extensão, típicas de agricultura de maior valor agregado, como é o caso da fruticultura em geral e da viticultura em particular. Em outro trabalho recente, Echeverria, Ducati e Ferrer (2013) mostraram como variações do NDVI em parreirais de Tannat, no Uruguai, podem ser detectadas em imagens do sensor orbital ASTER, e como é possível correlacionar

tais variações a fatores de solo na extensão dos vinhedos. De fato, imagens de sensores como ASTER e Hyperion cobrem um domínio espectral entre 0,55 nm e 2,5 nm, sendo portanto sensíveis à toda gama de fatores importantes na descrição espectral da reflectância de vegetais. Acresce a isto o fato de que tais sensores, com resolução espacial correspondente a 900 m² por pixel, são adequados a estudos de pequenas áreas, levando em conta que um vinhedo, por exemplo, tem tipicamente um área de alguns hectares (2 a 5 ha), sendo coberto por algumas dezenas de pixels. É possível, então, mapear variações de vigor, com resolução espacial razoável, mesmo em áreas de um hectare.

Variações de NDVI são de grande utilidade na linha de trabalho considerando sensores aéreos para o delineamento e a classificação de ZM na vitivinicultura de precisão e no cultivo de grãos. A caracterização das ZM requer a análise espaço-temporal com dados de múltiplos sensores, sendo o SR uma fonte básica de dados gerados por diferentes tipos de sensores e IVs disponíveis. A integração destes dados tem considerado,

prioritariamente, métodos estatísticos clássicos para a classificação de imagens com base no valor do NDVI, por píxel, aplicado ao delineamento das ZM (SHATAR; McBRATNEY, 2001). Em adição ao NDVI, aplicações de outros IVs vem sendo investigadas com dados de sensores aéreos; em recente casos de estudo, considerando-se também a segmentação de imagens com base em objetos.

O uso de IVs alternativos indicou um grande potencial de aplicação em diferentes regiões agroclimáticas, na Austrália e na Espanha. Entre eles, o PPR (Plant Pigment Ratio) na determinação das variações de proteína nas culturas de grãos (WANG et al., 2004), e o PCD (Plant Cell Density) aplicado na vitivinicultura como indicador da qualidade das bagas (PONS et al., 2013) e do estresse hídrico (GIRON; BELLVERT, 2012). As imagens aéreas utilizadas são obtidas em aproximadamente 2.000 m de altitude, em quatro faixas espectrais distintas; sendo: azul (450-510 nm), verde (530-550 nm), vermelho (630-690 nm) e infravermelho próximo (750-900 nm). O PPR é determinado pela razão das fixas do verde sobre o azul relacionadas com a pigmentação foliar, onde uma maior pigmentação absorvendo mais energia indica um alto valor de PPR (METTERNICHT, 2003). Já as aplicações do índice PCD consideram que vinhas vigorosas e saudáveis tendem a responder com uma forte reflectância na faixa do infravermelho próximo (PROFFIT et al., 2006).

Dentro do conceito de visão computacional (BLASCHKE; STROBL, 2001), a segmentação de imagens com base em objetos representa uma nova técnica promissora no delineamento de ZM (PEDROSO et al., 2010; OLIVEIRA; WHELAN; McBRATNEY, 2013), onde objetos são compostos a partir de pixels vizinhos diretamente associados as unidades de paisagem. WANG (2008) sugere que estes métodos conciliam a extração de características do espaço visível (resoluções espectral e físico (topologia espacial e temporal). Este conjunto de métodos, denominado de GEOBIA (Geographic Object-Based Image Analysis) caracteriza uma subdisciplina da ciência da geoinformação voltada para a segmentação de imagens e a geração de informações compatíveis com análises vectoriais (HAY; CASTILLA, 2008). Estes algoritmos são compostos de duas etapas

comuns: a identificação das descontinuidades na imagem; e a delineamento de regiões visualmente homogêneas e espacialmente contíguas (Figura 6). Em AP, estes algoritmos foram aplicados na robótica de campo (GARCÍA-PÉREZ et al., 2001) e, mais recentemente, em abordagens morfológicas no delineamento de ZM (ROUDIER et al., 2008, OLIVEIRA; WHELAN; McBRATNEY, 2013).

Técnicas de SR foram validadas e tem grande aplicabilidade na área agrícola dentro do conceito de AP, porém o custo e a falta de pessoal treinado ainda limita o uso por parte dos usuários. Uma grande limitação do SR através de sensores passivos orbitais são as nuvens, atmosfera e revisita do imageamento em tempo hábil para a tomada de decisão no manejo agrícola. Nebulosidade se torna crítica principalmente para culturas de verão por que o estágio fenológico da cultura que deve ser imageada geralmente coincide com a época de grande pluviosidade e nebulosidade. Neste cenário onde diversas técnicas validadas para sensores remotos já estão disponíveis os VANTs e os sensores ativos de dossel ou *active crop canopy sensors* (ACS) tem uma grande importância para viabilizar a aplicação destas técnicas no manejo agrônomo sítio-específico de culturas agrícolas em nível de talhão.

Os ACS vêm sendo considerados por alguns como sensores remotos proximais, quando acoplados em máquinas agrícolas autopropelidas (Figura 7). A grande vantagem dos ACS é que eles são ativos e sua luz modulada não é influenciada pela luz do sol, podendo ser utilizados a qualquer hora (noite ou dia). Estes sensores emulam a reflectância do dossel em certos comprimentos de onda selecionados para diferenciar o conteúdo de clorofila e indiretamente a condição nutricional da planta em relação ao nitrogênio (N) (SHIRATSUCHI, 2011).

Utilizando estes sensores é possível o diagnóstico de N da planta e aplicação de fertilizantes nitrogenados em taxas variáveis em tempo real, aplicando o insumo somente onde necessário e na mesma operação, sem necessidade de um mapeamento prévio. Ou seja, o sensor embarcado diagnostica o status de N da planta através dos IV e através de algoritmos específicos como os desenvolvidos por Solari et al. (2008); Dellinger, Schmidt e Beegle et al. (2008) e

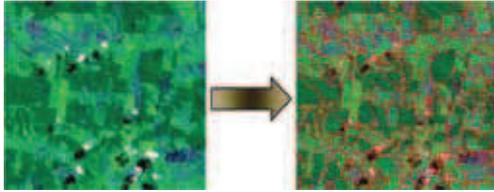


Figura 6. Resultado de uma segmentação com base em objectos subdividindo a imagem em seus elementos de unidade de paisagem (regiões), de forma homogênea e contígua.



Figura 7. Sensores ativos de dossel acoplados em máquinas agrícolas para aplicação em taxas variáveis de nitrogênio em milho.

(<http://www.agleader.com/products/directcommand/optrx-crop-sensors/>)



Figura 8. Sensor ativo de dossel embarcado em VANT. <http://hollandscientific.com/>

SHIRATSUCHI et al.(2011b) calcula-se a dose de fertilizante nitrogenado que deve ser aplicada em tempo real.

Pesquisas no âmbito de fazenda (*on farm research*) mostraram no cinturão do milho americano que em 55 locais durante os anos de 2004 à 2008 a utilização destes ACS superaram em termo econômicos doses uniformes de fertilizantes nitrogenados no ordem de US\$42.ha⁻¹,

produzindo 110 kg.ha⁻¹ a mais de milho, reduzindo o uso de N em 16 kgN.ha⁻¹ (SCHARF et al., 2011). Considerando os preços crescentes dos fertilizantes e a redução do uso de insumos e diminuição do impacto ambiental, espera-se uma grande adoção deste tipo de tecnologia em empreendimentos agrícolas.

Existem inumeras pesquisas sendo realizadas no intuito de se gerar fórmulas ou algoritmos para traduzirem dados de SR com o uso de VANTs e ACS em doses de insumos, como N, herbicidas, inseticidas, etc (HOLLAND; SCHEPERS, 2010, 2012; SHIRATSUCHI et al., 2011a). Até mesmo a utilização de ACS embarcados em VANTs já estão sendo utilizados como uma forma de mapeamento do status de N em milho (Figura 8).

Estudos sobre o comportamento de diversos IV para determinação de pigmentos foram realizados (LEMAIRE; FRANCOIS; DUFRENE, 2004), porém poucos trabalhos levaram em consideração ACS para cálculo de IVs e interferência do teor de água na determinação de doses de N como o realizado por SHIRATSUCHI et al. (2011a). Este cenário demonstra que um vasto campo de estudos dentro do SR vem sendo aberto e possui ainda grandes desafios principalmente em regiões tropicais, onde a limitação na aquisição de imagens, sistema de produção em plantio direto, custo de equipamentos e pessoal qualificado imperam na adoção destas tecnologias.

Agradecimentos

À Rede de Agricultura de Precisão da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, (EMBRAPA) e parceiros financiadores deste projeto.

Referências

- ALVAREZ, I. A.; GALLO, B. C. **Árvores de Campinas:** quantificação da arborização urbana viária de Campinas. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2012. (Comunicado Técnico).
- ANDRADE, R. G.; BATISTELLA, M.; VICTORIA, D. C.; BARBOSA, R. A.; PAZ, A. R. **Uso de técnicas de sensoriamento remoto no mapeamento da evapotranspiração de pastagens.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2009. 44 p. (Documentos, 75).

- ANDRADE, R. G.; SEDIYAMA, G. C.; PAZ, A. R.; LIMA, E. P.; FACCO, A. G. Geotechnologies applied to the assessment of biophysical parameters of the Pantanal biome. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1270-1278, 2012.
- ARAUJO, L. S.; KELLER, M.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; VICTORIA, D. C.; MORTON, D.; TAKEMURA, C. M.; HUNTER, M. O. Dados LiDAR e análise orientada a objeto no monitoramento de manejo florestal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/capa.html>>. Acesso em: 25 jun. 2013.
- ATZBERGER, C. Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs. **Remote Sensing**, v. 5, n. 2, p. 949-981, 2013. <http://dx.doi.org/10.3390/rs5020949>
- BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. J. **TSAVI**: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS'89); CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 12., 1989, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: IEEE, 1989. p. 1355-1358.
- BATISTELLA, M.; GUIMARÃES, M.; MIRANDA, E. E.; VIEIRA, H. R.; VALLADARES, G. S.; MANGABEIRA, J. A. C.; ASSIS, M. C. **Monitoramento da Expansão Agropecuária na Região Oeste da Bahia**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2002. 39 p. (Documentos, 20).
- BATISTELLA, M.; BOLFE, E. L. Pesquisa, desenvolvimento e inovações geoespaciais para a agropecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 3-7, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900003>
- BIRTH, G. S.; MCVIEY, G. Measuring the colour of growing turf with a reflectance spectrophotometer. **Agronomy Journal**, v. 60, n. 6, p. 640-643, 1968. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1968.00021962006000060016x>
- BLASCHKE, T.; STROBL, J. What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. **GIS Zeitschrift für Geoinformationssysteme**, v. 14, p. 12-17, 2001.
- BRAMLEY, R. G. V. Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development and adoption as a guide to its appropriate application. **Crop and Pasture Science**, v. 60, n. 3, p. 197-217, 2009. <http://dx.doi.org/10.1071/CP08304>
- BRAMLEY, R. G. V.; PROFFITT, A. P. B. Managing variability in viticultural production. **The Australian Grapegrower and Winemaker**, v. 427, p. 11-16, 1999.
- BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C.; FREIRE, E. C.; SILVA, B. B. Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão. In: AZEVÊDO, D. M. P.; BELTRÃO, N. E. M. **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 1309 p. cap. 20. v. 2.
- BRANDÃO, Z. N. **Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto**. 2009. 152 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- BRITO, G. G.; SOFIATTI, V.; BRANDÃO, Z. N.; SILVA, V. B.; SILVA, F. M.; SILVA, D. A. Non-destructive analysis of photosynthetic pigments in cotton plants. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, p. 671-678, 2011.
- BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 6, p. 156-172, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00197-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00197-8)
- DAUGHTRY, C. S. T.; GALLO, K. P.; GOWARD, S. N.; PRINCE, S. D.; KUSTAS, W. D. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. **Remote Sensing Environment**, v. 39, n. 2, p. 141-152, 1992. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90132-4](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(92)90132-4)
- DAUGHTRY, C. S. T.; WALTHALL, C. L.; KIM, M. S.; COLSTOUN, E. B.; McMURTREY III, J. E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, n. 2, p. 229-239, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00113-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9)
- DELLINGER, A. E.; SCHMIDT, J. P.; BEEGLE, D. B. Developing nitrogen fertilizer recommendations for corn using an active sensor. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 6, p. 1546-1552, 2008. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2007.0386>
- DUCATI, J. R.; BOMBASSARO, M. G.; DULLIUS, M. V. Measurements by field radiometry on a Brazilian vineyard. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM GIESCO, 18., 2013, Porto. **Annals...**
- ECHEVERRIA, G.; DUCATI, J. R.; FERRER, M. Implementation of techniques for Remote Sensing as a method to determine the productive potential of a viticultural terroir. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM GIESCO, 18., 2013, Porto. **Annals...**
- EMBRAPA. **Satélites de Monitoramento**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2009. Disponível em: <<http://www.sat.cnpem.embrapa.br>>. Acesso em: 27 jun. 2013.
- FACCO, A. G.; RIBEIRO, A.; PRUSKI, F. F.; MONTEIRO, W. C.; LEITE, F. P.; ANDRADE, R. G.; MENEZES, S. J. M. C. Geoinformation techniques to estimate water balance in eucalyptus. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1270-1278, 2012.
- GALLO, B. C.; ALVAREZ, I. A.; GARÇON, E. A. M. Comparação entre temperatura de superfície e presença de vegetação viária em dois bairros de Campinas-SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/capa.html>>. Acesso em: 25 jun. 2013.

- GARCÍA-PÉREZ, L.; GARCÍA-ALEGRE, M. C.; MARCHANT, J.; HAGUE, T. Dynamic threshold selection for image segmentation of natural structures based upon a performance criterion. In: BLACKMORE, S.; GRENIER, G. (Ed.). *EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE*, 3., 2001. **Proceedings...** p. 193-198.
- GIRON, A. J.; BELLVERT, J. The use of multispectral and thermal images as a tool for irrigation scheduling in vineyards. In: ERENA, M.; LÓPEZ-FRANCOS, A.; MONTESINOS, S.; BERTHOUMIEU, J. P. (Coord.). **The use of remote sensing and geographic information systems for irrigation management in Southwest Europe**. Zaragoza: CIHEAM, 2012. p. 131-137. (Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches, 67).
- GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 289-298, 1996.
- GITELSON, A. A.; GRITZ, Y.; MERZLYAK, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 160, n. 3, p. 271-282, 2003.
- HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY E.; ZARCO-TEJADA, P. J.; STRACHAN, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 3, p. 337-352, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>
- HAY, G. J.; CASTILLA, G. Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA): a new name for a new discipline. In: BLASCHKE, T.; LANG, S.; HAY, G. (Ed.). **Object based image analysis**. Berlin: Springer, 2008. p. 93-112. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-77058-9_4
- HOLLAND, K. H.; SCHEPERS, J. S. Derivation of a Variable Rate Nitrogen Application Model for In-Season Fertilization of Corn. **Agronomy Journal**, v. 102, n. 5, p. 1415-1424, 2010. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2010.0015>
- HOLLAND, K. H.; SCHEPERS, J. S. Use of a virtual-reference concept to interpret active crop canopy sensor data. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 1, p. 71-85, 2012.
- HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5)
- HUPP, C.; FORTES, P. T. F. O. Geoprocessamento como ferramenta para análise da ocupação urbana e relação com áreas de preservação permanente na sede do município de Alegre (ES). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/capa.html>>. Acesso em: 25 jun. 2013.
- JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V.; DUFT, D. G.; LAMPARELLI, R. A. C. Estimation of summer crop areas in the state of Paraná, Brazil, using multitemporal EVI/Modis images. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1270-1278, 2012.
- KAUFMAN, Y. J.; TANRE, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI). **IEEE Transaction Geoscience Remote Sensing**, v. 30, n. 2, p. 261-270, 1992. <http://dx.doi.org/10.1109/36.134076>
- LEMAIRE, G.; FRANCOIS, C.; DUFRENE, E. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 1, p. 1-28, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2003.09.004>
- MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M.; ANCEV, T.; BOUMA, J. Future directions of precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 1-17, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-005-0681-8>
- MCKINION, J. M.; JENKINS, J. N.; AKINS, D.; TURNER, S. B.; WILLERS, J. L.; JALLAS, E.; WHISLER, F. D. Analysis of a precision agriculture approach to cotton production. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 32, n. 3, p. 213-218, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1699\(01\)00166-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00166-1)
- METTERNICHT, G. I. Vegetation indices derived from highresolution airborne videography for precision crop management. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 14, p. 2855-2877, 2003. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160210163074>
- OLIVEIRA, R. P.; WHELAN, B. M.; MCBRATNEY, A. A. A segmentation approach to delineate zones for differential nitrogen interventions. In: STAFFORD, J. V. (Ed.). **Precision agriculture '13**. Wageningen Academic Publishers, 2013. p. 411-418. http://dx.doi.org/10.3920/978-90-8686-778-3_50
- PEDROSO, M.; TAYLOR, J.; TISSEYRE, B.; CHARNOMORDIC, B.; GUILLAUME, S. A segmentation algorithm for the delineation of agricultural management zones. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 199-208, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2009.10.007>
- PEÑUELAS, J.; BARET, F.; FILELLA, I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica** v. 31, p. 221-230, 1995.
- PEÑUELAS, J.; PIÑOL, J.; OGAYA, R.; FILELLA, I. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 13, p. 2869-2875, 1997. <http://dx.doi.org/10.1080/014311697217396n>.

- PONS, J. M.; SERRANO, L.; GONZALES-FLOR, C.; GORCHS, G. Is PCD a reliable indicator of berry quality attributes in water stressed vineyards? *INTERNATIONAL WORKSHOP ON VINEYARD MECHANIZATION AND GRAPE AND WINE QUALITY*, 1., 2013. **Proceedings...** Belgium: ISHS, 2013. p. 85-92. (ISHS Acta Horticulturae, 978).
- PROFFIT, T.; BRAMLEY, R.; LAMB, D.; WINTER, E. **Precision viticulture: a new era in vineyard management and wine production**. Ashford: Winetitles, 2006. p. 6-48.
- QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE A.R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing Environmental**, v. 48, p. 119-126, 1994.
- QUARTAROLI, C. F.; CRISCUOLO, C.; HOTT, M. C.; GUIMARÃES, M. **Alterações no uso e cobertura das terras no Nordeste do Estado de São Paulo no período de 1988 a 2003**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2006. 57 p. (Documentos, 55).
- RODRIGUES, C. A. G.; GREGO, C. R.; ALMEIDA, C. G. F.; FURTADO, A. L. S.; TORRESAN, F. E. **Uso e cobertura das terras em área rural de Guararapes, SP: 1972, 1990 e 2009**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2012. 24 p. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 25).
- RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 2, p. 95-107, 1996.
- ROUDIER, P.; TISSEYRE, B.; POILVÉ, H.; ROGER, J. M. Management zone delineation using a modified watershed algorithm. **Precision Agriculture**, v. 9, n. 5, p. 233-250, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-008-9067-z>
- ROUJEAN, J. L.; BREON, F. M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 3, p. 375-384, 1995.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Texas: Texas A&M University, 1974. (Type III final rep. NASA/GSFC).
- SCHARF, P. C.; SHANNON, D. K.; PALM, H. L.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; KITCHEN, N. R.; MUELLER, L. J. Sensor-based nitrogen applications out-performed producer-chosen rates for corn in on-farm demonstrations. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 6, p. 1683-1691, 2011. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2011.0164>
- SCHEPERS, A. R.; SHANAHAHAN, J. F.; LIEBIG, M. A.; SCHEPERS, J. S.; JOHNSON, S. H.; LUCHIARI, A. Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 1, p. 195-203, 2005. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2004.0195>
- SCHMITT, A.; ROSENFELDT, Y. A. Z.; OLIVEIRA, M. O.; ROSOLEM, G. P. N.; LOCH, C. Proposta de mobilidade coletiva para a Região Metropolitana de Florianópolis pensada a partir de imagens do Satélite GeoEye e banco de dados de software SIG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/capa.html>>. Acesso em: 25 jun. 2013.
- SHATAR, T. M.; MCBRATNEY, A. B. Subdividing a field into contiguous management zones using a k-zones algorithm. In: BLACKMORE, S.; GRENIER, G. (Eds.). *EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE*, 3., 2001. **Proceedings...** p. 115-120.
- SHIRATSUCHI, L. S. **Integration of plant-based canopy sensors for site-specific nitrogen management**. 2011. 157 f. Dissertação (Mestrado)-University of Nebraska, Lincoln, 2011.
- SHIRATSUCHI, L.; FERGUSON, R.; SHANAHAHAN, J.; ADAMCHUK, V.; RUNDQUIST, D.; MARX, D.; SLATER, G. Water and Nitrogen Effects on Active Canopy Sensor Vegetation Indices. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 6, p. 1815-1826, 2011a. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2011.0199>
- SHIRATSUCHI, L. S.; VILELA, M. F.; FERGUSON, R. B.; SHANAHAHAN, J. F.; ADAMCHUK, V. I.; RESENDE, A. V.; HURTADO, S. M. C.; CORAZZA, E. J. Desenvolvimento de um algoritmo baseado em sensores ativos de dossel para recomendação da adubação nitrogenada em taxas variáveis. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Org.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa, 2011b. p. 184-188. (v. 1).
- SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; HUDAK, A.; LIEBERMANN, R.; CARVALHO, S. P. C.; RODRIGUEZ, L. C. E. Utilização da tecnologia LiDAR para estimação da biomassa florestal em povoamentos de Eucalyptus sp. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/capa.html>>. Acesso em: 25 jun. 2013.
- SOLARI, F.; SHANAHAHAN, J.; FERGUSON, R.; SCHEPERS, J.; GITELSON, A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 3, p. 571-579, 2008.
- TAYLOR, J. A.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. Establishing management classes for broadacre grain production. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 5, p. 1366-1376, 2007. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2007.0070>
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

- VICENTE, L. E.; GOMES, D.; VICTORIA, D. C.; GARÇON, E. A. M.; BOLFE, E. L.; ANDRADE, R. G.; SILVA, G. B. S. NDVI temporal series from the SPOT Vegetation sensor and SAM algorithm applied to sugarcane mapping. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1270-1278, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900019>
- VICTORIA, D. C.; PAZ, A. R.; COUTINHO, A. C.; KASTENS, J.; BROWN, J. C. Cropland area estimates using Modis NDVI time series in the state of Mato Grosso, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1270-1278, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900012>
- WANG, M. A multiresolution remotely sensed image segmentation method combining rainfalling watershed algorithm and fast region merging. In: CHEN, J.; JIANG, J.; NAYAK, S. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**. ISPRS, 2008. Part B4. (ISPRS Archives, 37).
- WANG, Z. J.; WANG, J. H.; LIU, L. Y.; HUANG, W. J.; ZHAO, C. J.; WANG, C. Z. Prediction of grain protein content in winter wheat using plant pigment ratio (PPR). **Field Crops Research**, v. 90, n. 2-3, p. 311-321, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2004.04.004>
- ZANARDI, R. P.; SCHNEIDER, A. H.; SALOMONI, T. R.; SALOMONI, C. S.; REISS, M. L. L. Validação da qualidade do perfilamento a LASER aerotransportado da cidade de Porto Alegre. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/capa.html>>. Acesso em: 25 jun. 2013.
- ZARCO-TEJADA, P. J.; MILLER, J. R.; NOLAND, T. L.; MOHAMMED, G. H.; SAMPSON, P. H. Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. **IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing**, v. 39, n. 7, p. 1491-1507, 2001. <http://dx.doi.org/10.1109/36.934080>