

Séries temporais de NDVI do sensor SPOT Vegetation e algoritmo SAM aplicados ao mapeamento de cana-de-açúcar

Luiz Eduardo Vicente⁽¹⁾, Daniel Gomes⁽¹⁾, Daniel de Castro Victoria⁽¹⁾, Edlene Aparecida Monteiro Garçon⁽¹⁾, Édson Luis Bolfe⁽¹⁾, Ricardo Guimarães Andrade⁽¹⁾ e Gustavo Bayma Siqueira da Silva⁽¹⁾

⁽¹⁾Embrapa Monitoramento por Satélite, Avenida Soldado Passarinho, nº 303, Fazenda Chapadão, CEP 13070-115 Campinas, SP. E-mail: vicente@cnpm.embrapa.br, danielgomes@cnpm.embrapa.br, daniel@cnpm.embrapa.br, edlene@cnpm.embrapa.br, bolfe@cnpm.embrapa.br, ricardo@cnpm.embrapa.br, bayma@cnpm.embrapa.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar o mapeamento de área de cana-de-açúcar por meio de série temporal, de seis anos de dados do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), oriundos do sensor Vegetation, a bordo do satélite “système pour l’observation de la Terre” (SPOT). Três classes de cobertura do solo (cana-de-açúcar, pasto e floresta), do Estado de São Paulo, foram selecionadas como assinaturas espectro-temporais de referência, que serviram como membros extremos (“endmembers”) para classificação com o algoritmo “spectral angle mapper” (SAM). A partir desta classificação, o mapeamento da área de cana-de-açúcar foi realizado com uso de limiares na imagem-regra do SAM, gerados a partir dos valores dos espectros de referência. Os resultados mostram que o algoritmo SAM pode ser aplicado a séries de dados multitemporais de resolução moderada, o que permite eficiente mapeamento de alvo agrícola em escala mesorregional. Dados oficiais de áreas de cana-de-açúcar, para as microrregiões paulistas, apresentam boa correlação ($r^2 = 0,8$) com os dados obtidos pelo método avaliado. A aplicação do algoritmo SAM mostrou ser útil em análises temporais. As séries temporais de NDVI do sensor SPOT Vegetation podem ser utilizadas para mapeamento da área de cana-de-açúcar em baixa resolução.

Termos para indexação: análise temporal, modelo linear de mistura espectral, previsão de safras, sensoriamento remoto agrícola.

NDVI temporal series from the SPOT Vegetation sensor and SAM algorithm applied to sugarcane mapping

Abstract – The objective of this work was to assess sugarcane area mapping using six-year-old time series of normalized difference vegetation index (NDVI) data from the Vegetation sensor on board of the “système pour l’observation de la Terre” (SPOT) satellite. Three land cover classes (sugarcane, pasture, and forest), from the state of São Paulo, Brazil, were selected as reference spectral-temporal signatures, which were used as endmembers for spectral classification with the algorithm spectral angle mapper (SAM). Based on this classification, sugarcane areas were mapped by applying thresholds on the sugarcane rule image from the SAM, generated from values from the reference spectra. Results show that the SAM algorithm can be applied to time series of moderate resolution multi-temporal data, allowing for the efficient mapping of an agricultural crop in a mesoregional scale. Official data from sugarcane areas for the microregions of the state of São Paulo are well correlated ($r^2 = 0.8$) with the data obtained with the evaluated method. SAM is a useful algorithm for time series analysis. NDVI time series from the SPOT Vegetation sensor can be used for low-resolution sugarcane area mapping.

Index terms: temporal analysis, linear spectral mixture model, crop forecasting, agricultural remote sensing.

Introdução

Nas últimas três décadas, a cultura da cana-de-açúcar tem se expandido no Brasil, o que torna o país o maior produtor mundial desta commodity, com produção em torno de 8 milhões de hectares para a safra de 2010/2011 (Avaliação da safra agrícola de cana-de-açúcar, 2010). A região Centro-Sul se

destaca em área plantada, principalmente no Estado de São Paulo, que passou de 2,57 milhões de hectares, em 2003, para 4,45 milhões de hectares em 2008 (Rudorff et al., 2010). Esta dinâmica está relacionada às perspectivas favoráveis da demanda por álcool combustível no mercado interno e externo, e aos preços competitivos do açúcar brasileiro no mercado internacional.

A elevação da produção paulista de cana-de-açúcar, que atualmente responde por 55,3% da produção brasileira (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012), pode ser atribuída ao aumento da produtividade e, principalmente, à expansão da área de cultivo. Neste sentido, instituições e órgãos de pesquisa tem elaborado estudos para gerar estimativas de área plantada diferenciadas, o que pode ser exemplificado pelos dados da safra de 2010/2011, os quais variaram em até 25%, ou seja, 4,4 milhões de hectares (Avaliação da safra agrícola de cana-de-açúcar, 2010), 5,2 milhões de hectares (Brasil, 2011), 5,3 milhões de hectares (Instituto de Pesquisas Espaciais, 2011) e 5,8 milhões de hectares (Caser et al., 2011).

Algumas regiões do estado apresentam melhores condições para o cultivo da cana-de-açúcar, em razão das condições edafoclimáticas favoráveis e da logística privilegiada, como facilidade de estocagem, rodovias e portos. Além disso, o tamanho do mercado consumidor é elemento crucial para a expansão (Walter et al., 2008). Ao analisar a área plantada de cana-de-açúcar, entre 1996 e 2008, Olivette et al. (2010) concluíram que o grande avanço do cultivo, na área territorial paulista, ocorreu, majoritariamente, sobre as pastagens, e que a retração de áreas de algumas culturas foi compensada pelo processo de adensamento e o aumento da produtividade.

No entanto, este rápido desenvolvimento do setor sucroalcooleiro tem sido questionado em virtude dos potenciais impactos ambientais e sociais, que incluem: substituição de policultivos; degradação de ecossistemas florestais, principalmente das áreas para preservação permanente e reserva legal; emissões de gases de efeito estufa decorrentes das queimadas; assoreamento e contaminação de cursos d'água. Os critérios internacionais de sustentabilidade da produção de biocombustível, sob discussão na União Europeia, evidenciam a importância das pesquisas e dos estudos sobre a sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar (Walter et al., 2008). Além dos gases de efeito estufa, outros fatores são cruciais para assegurar a sustentabilidade da produção de biocombustível, com destaque para as alterações no uso e na cobertura da terra, ao se considerar os impactos diretos e indiretos sobre as questões socioeconômicas e ambientais. Isso já foi feito em estudos recentes, como o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar (Manzatto et al., 2009).

Assim, a geração de bases geoespaciais que subsidiam a análise da dinâmica espaço-temporal do setor sucroenergético, como área plantada, área colhida, regiões de expansão, intensificação ou retração deste cultivo, é relevante para as tomadas de decisões gerenciais do setor e para a consolidação do Brasil na liderança mundial em biocombustíveis. Técnicas com uso de imagens de sensoriamento remoto e classificadores digitais têm sido aplicadas com sucesso para algumas culturas agrícolas (Yi et al., 2007; Rudorff et al., 2010). Ao se considerar as exigências de cobertura de grandes áreas e os longos períodos anuais intersafras, o uso de dados de sensores remotos de resolução moderada possibilita o monitoramento de culturas agrícolas com grande eficiência e baixo custo operacional (Fernandes et al., 2011). Portanto, pode-se destacar o eficiente uso de classificadores de séries temporais, com base em modelos lineares de mistura espectral (MLME) (Shimabukuro & Smith, 1991), aplicados a índices de vegetação, como o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), o índice de água por diferença normalizada (NDWI) e o índice de vegetação realçada (EVI) (Rembold & Maselli, 2006; YI et al., 2007).

Tradicionalmente, modelos lineares de mistura espectral, como o "spectral angle mapper" (SAM), do tipo não restritivo ("unconstrained"), são voltados para a análise da informação espectral de bandas contínuas e demandam profundo conhecimento dos diferentes tipos de alvos presentes na imagem, de modo que a relação linear do modelo possa fornecer valores matematicamente mais próximos de soma 1 (Heinz & Chang, 2001). Assim, sua utilização está associada ao mapeamento semiquantitativo de dados hiperespectrais (Schowengerdt, 1997; Vicente & Souza Filho, 2011). No caso de abordagens de larga escala com sensores de resolução moderada, esses critérios de conhecimento de cena e contiguidade espectral são difíceis de se obter, mas são eficientes na identificação e na classificação de alvos (Williams & Hunt Junior, 2002). Entretanto, esse tipo de algoritmo aplicado à informação espectral oriunda de séries temporais ainda é pouco explorado, sobretudo no que tange ao sensor "Système pour l'observation de la Terre" (SPOT) Vegetation aplicado ao mapeamento de alvos agrícolas tropicais. Uma das vantagens desse método encontra-se na capacidade de exploração do conhecimento das propriedades físico-químicas dos

alvos, sumarizados pelos índices espectrais no tempo, o que fornece relação direta com estádios fenológicos dos cultivos, em contraposição a outros componentes da cena, por meio da definição de diferentes espectros de referência.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o mapeamento de área de cana-de-açúcar por meio de série temporal, de seis anos de dados do NDVI, oriundos do sensor Vegetation, a bordo do satélite SPOT.

Material e Métodos

O Estado de São Paulo (Figura 1) representa 55% da área de cana-de-açúcar plantada no país, enquanto Minas Gerais, o segundo maior produtor, corresponde a 8% da produção nacional (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012).

Foram utilizados dados do NDVI, derivados do produto VGT-S10, que é uma síntese de imagens obtidas durante dez dias pelo sensor Vegetation, a bordo do satélite SPOT. O produto VGT-S10 combina dados diários, após realização da correção atmosférica e geométrica, de todos os segmentos de vegetação, com uso do algoritmo “maximum

value composite” (MVC). Este algoritmo seleciona os melhores valores de reflectância, o que gera uma única imagem com a menor interferência de nuvens possível. A resolução radiométrica final é de 8 bits em níveis de cinza e a resolução espacial é de 1 km.

Estas imagens estão sendo utilizadas dentro do projeto internacional “GEONETCast for and by developing countries – DevCoCast”, que possibilitou a instalação de uma antena na Embrapa Monitoramento por Satélite, em Campinas, para captar dados de diversos sensores orbitais, entre eles o SPOT Vegetation (Embrapa Monitoramento por Satélite, 2012). No entanto, a série estudada é composta de dados gerados antes da instalação desta antena, que foram adquiridos por meio do site da empresa The Image Processing and Archiving Centre, que disponibilizaram as imagens no formato geotiff.

As imagens foram empilhadas e recortadas pelo limite do Estado de São Paulo, tendo-se gerado uma série temporal composta por 252 imagens adquiridas entre 1/1/2004 e 31/12/2010.

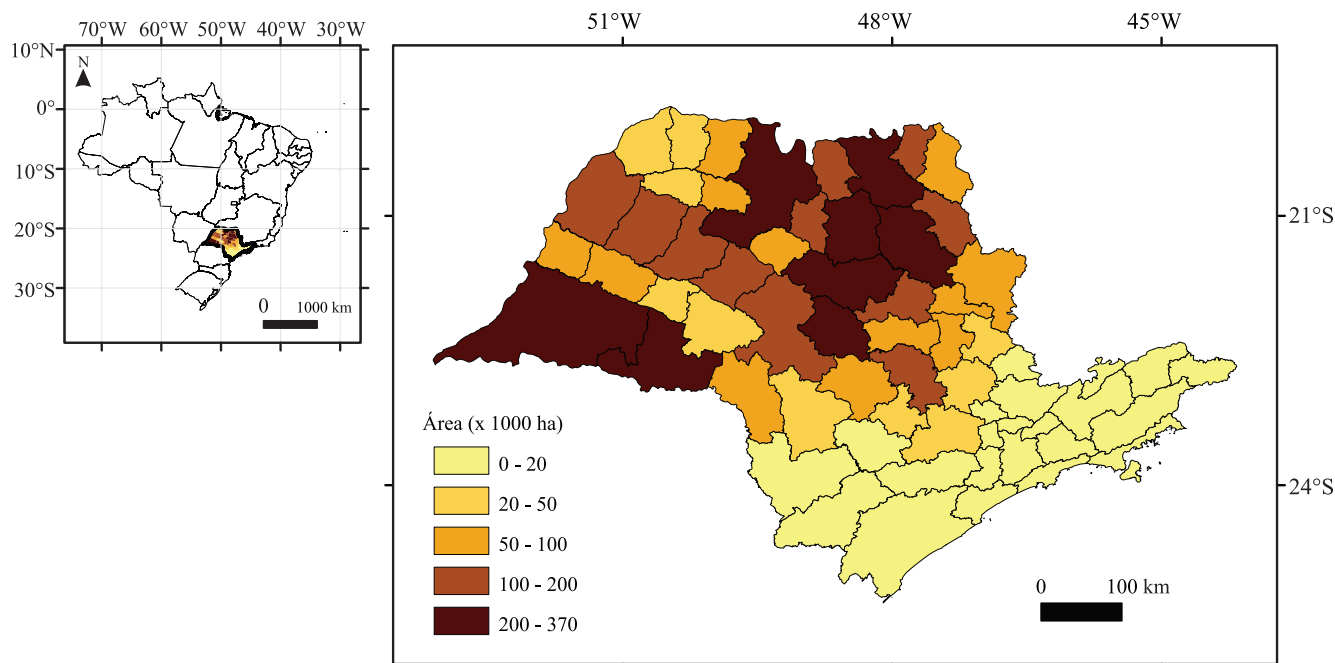


Figura 1. Localização da área de estudo e distribuição da área de cultivo de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012).

As etapas do processamento e da classificação das imagens do sensor SPOT Vegetation estão descritas na Figura 2. Ressalta-se que, por terem sido utilizadas imagens de seis anos de dados, na geração da máscara de cana-de-açúcar, a área da cultura mapeada por sensoriamento remoto foi comparada à área plantada média dos seis anos analisados (2004 a 2009).

Os membros extremos foram selecionados a partir das classes de cobertura do solo mais relevantes na área de estudo: cana-de-açúcar, pasto e floresta. O critério de escolha dos membros extremos se baseou nas classes mais abundantes dos alvos na área avaliada, ao se considerar a resolução espacial do sensor (em torno de 1 km) e as premissas de análise espectral, nas quais, para este tipo de MLME, busca-se maior participação de um material no pixel (Williams & Hunt Junior, 2002). Assim, quanto maior for o número de membros extremos e a sua abundância na cena, melhor será a identificação dos alvos sob investigação. Neste caso, os referidos alvos são dominantes na área de estudo.

Para cada uma destas classes, foram selecionados cinco alvos de controle, que representam áreas onde a cobertura do solo se manteve inalterada ao longo de todo o período estudado. Estes alvos foram plotados na série temporal SPOT Vegetation, da qual, para cada classe, foram extraídas assinaturas espectro-temporais médias, que serviram como membros extremos (Figura 3). Os alvos de controle

para cana-de-açúcar foram identificados a partir de análise visual do mapeamento CanaSat (Rudorff et al., 2010) e das séries temporais “moderate-resolution imaging spectroradiometer” (MODIS) (Freitas et al., 2011) disponíveis no Instituto de Pesquisas Espaciais (2011). Os pixels das classes de floresta foram obtidos em unidades de conservação.

As variações nas assinaturas espectro-temporais estão relacionadas aos ciclos fenológicos dos alvos. Como exemplo, a assinatura da cana-de-açúcar apresenta pronunciados picos associados às fases de crescimento e às fortes depressões nos valores de NDVI durante a colheita. O mesmo não ocorre com as florestas e as pastagens, que apresentam variação de NDVI menos intensa ao longo da série, mas com valores absolutos distintos. Apesar de apresentar variação temporal anual, assim como a assinatura da cana-de-açúcar, a amplitude da variação é menor, uma vez que, em áreas de pastagem, não se espera a presença de grandes áreas de solo exposto durante parte do ano, diferentemente da cana-de-açúcar no período de colheita. Dessa forma, o NDVI do pasto varia de 110 a 200 dentro do ano.

O SAM é um método de classificação supervisionada que verifica a semelhança entre as assinaturas espectrais (“endmembers”) de alvos de referência e as assinaturas espectrais dos pixels de uma imagem, para expressar o valor da semelhança em ângulos (Kruse

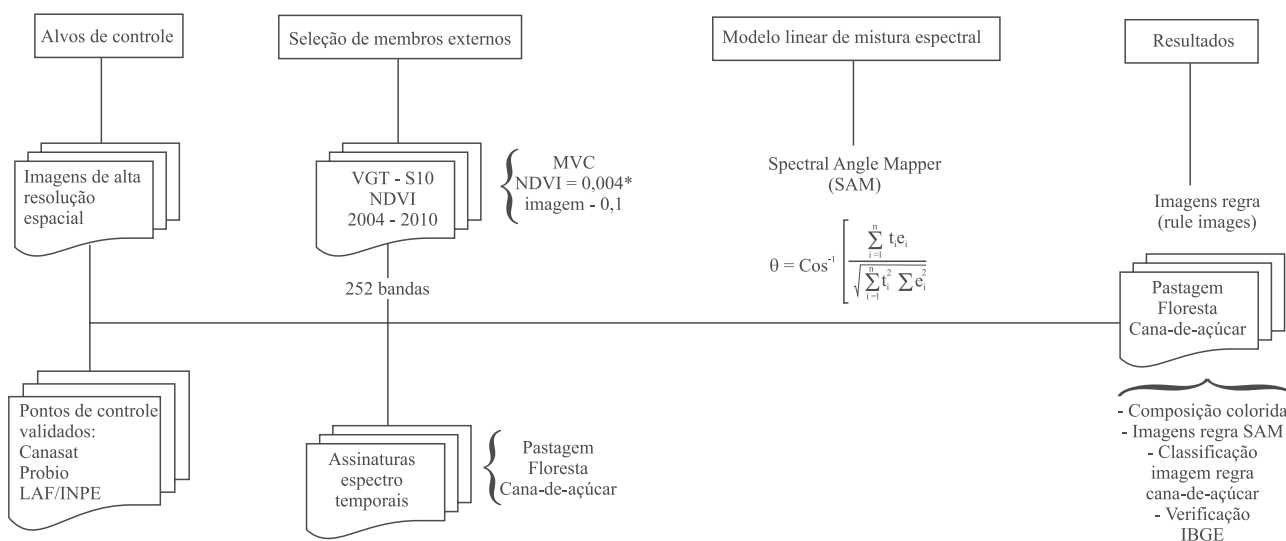


Figura 2. Fluxograma de etapas do processamento e da classificação das imagens do sensor Spot Vegetation. MVC, maximum value composite; NDVI, índice de vegetação por diferença normalizada.

et al., 1993). Originalmente desenvolvido para análise mineralógica em dados hiperespectrais, este método pode ser adaptado, também, para análises de dados espectro-temporais (Rembold & Maselli, 2006; Yi et al., 2007).

No presente trabalho, o SAM foi testado em uma abordagem espectro-temporal, na qual as feições detectáveis correspondem não apenas às bandas espectrais de absorção ou reflectância, mas a períodos de altos ou baixos valores aferidos de uma variável biofísica que muda ao longo do tempo. Neste caso específico, os valores do NDVI constituíram a variável biofísica, o que permitiu estimar a quantidade de vegetação fotossinteticamente ativa (VFA). A abordagem espectro-temporal permitiu o monitoramento das condições fenológicas da vegetação, especialmente nas áreas de cultivo onde as variações do NDVI, ao longo do tempo, foram mais evidentes.

A verificação da máscara de cana-de-açúcar foi realizada ao se comparar a área identificada nas imagens com os dados oficiais de área plantada de 2009, oriundos da Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012).

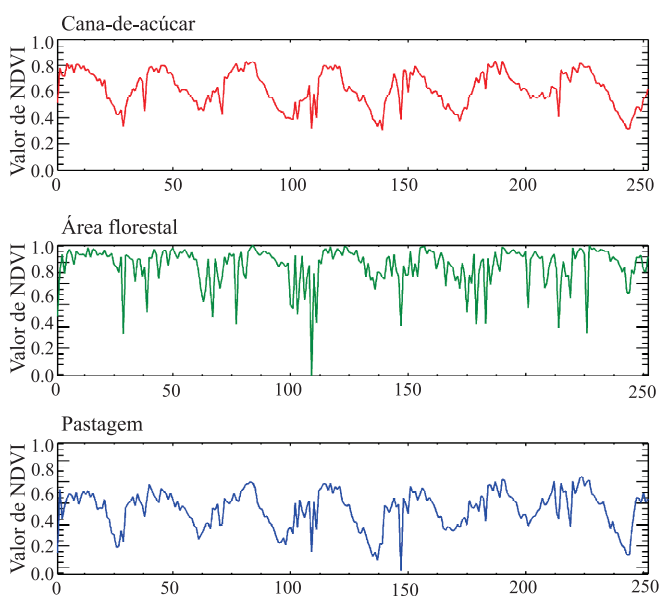


Figura 3. Assinaturas espectro-temporais do sensor SPOT Vegetation utilizadas como membros extremos, para classificação com o algoritmo “spectral angle mapper” (SAM). NDVI, índice de vegetação por diferença normalizada.

Resultados e Discussão

Para cada classe analisada, o classificador SAM gerou uma imagem regra (“rule image”) com valores que expressaram a semelhança entre os pixels da imagem classificada e as assinaturas de referência (valores em radianos – α). Quanto menor for o valor atribuído a um pixel, maior será a semelhança com a assinatura de referência.

A composição colorida das imagens regra do SAM mostrou que o alvo de floresta foi superestimado, cobrindo, inclusive, áreas urbanas. Os alvos de cana-de-açúcar e pastagem se misturaram mais entre si, mas muito pouco com as florestas. Contudo, pôde-se observar que estas áreas de mistura apresentaram valores tendentes ora para cana-de-açúcar, ora para pasto (Figura 4). De fato, a partir da comparação entre as imagens regra das três classes, foi possível identificar as áreas do Estado de São Paulo em que as assinaturas temporais foram mais semelhantes às da cana-de-açúcar do que às de outras classes. Ou seja, foi possível definir uma máscara das áreas plantadas com cana-de-açúcar em que o valor da imagem regra foi superior ao valor das imagens regras das outras classes (Figura 5).

O SAM permitiu que as métricas fenológicas das fases de estabilização e senescência, de uma determinada safra, fossem avaliadas, em conjunto, com as métricas das fases de estabelecimento e desenvolvimento da safra do ano seguinte. Esta sequência de fases fenológicas foi tratada como a feição espectral diagnóstica que guiou o mapeamento das áreas de cana-de-açúcar. Na análise dos dados de uma série temporal anual, as curvas espectro-temporais de cana-de-açúcar apresentaram grande confusão com as curvas de outros alvos, como, por exemplo, pastagem (Xavier et al., 2006). No entanto, a análise da série temporal interanual permitiu diferenciar melhor a classe de cana-de-açúcar, possivelmente por permitir a agregação de informações relacionadas ao contraste de ciclos ocorridos em diferentes anos, conforme observado por Hall-Beyer (2003). Dessa maneira, o SAM conseguiu identificar as áreas em que as variações do ciclo fenológico ocorreram de modo regular ao longo dos anos, tendo as classificado como áreas de cana-de-açúcar. Áreas de pastagens, que apresentaram ciclo fenológico com duração semelhante ao da cana-de-açúcar, tiveram maior variação nos valores mais baixos dos ciclos anuais (Figura 3). Esta variação

pode ser atribuída ao fato de as áreas de pastagens não serem colhidas e, por isso, não apresentarem solo exposto após a fase de senescência, ao contrário das áreas de cana-de-açúcar.

A resolução espacial da imagem do SPOT Vegetation é baixa para utilização em classificação de áreas agrícolas em escala maior (Carreiras et al., 2006). Assim, os resultados obtidos por meio desta imagem são apropriados para análises regionais, de baixa escala (Verbeiren et al., 2008; Fernandes et al., 2011). Por este motivo, a comparação entre os resultados obtidos pela análise das imagens e os dados da PAM foram agregados para as microrregiões do Estado de São Paulo. Esta limitação espacial foi compensada pela qualidade da série temporal de dados NDVI do SPOT Vegetation, que estimam a fenologia da vegetação, ao longo do tempo, de maneira mais eficiente que as imagens de melhor resolução espacial, como as geradas pelo sensor MODIS (Fensholt et al., 2009).

A análise das imagens regra, obtidas pelo procedimento do SAM, permitiu gerar a máscara que mostrou grande concentração do plantio de cana-de-açúcar ao norte e ao oeste do Estado de São Paulo, nas microrregiões de Ribeirão Preto e Assis, respectivamente (Figura 5). A área mapeada nestas microrregiões apresentou boa correlação com a área plantada média entre 2004 e 2009 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012) (Figura 6), e a regressão linear entre a área plantada e a área identificada na máscara foi significativa ($p = 2,2 \cdot 10^{-16}$) com $r^2 = 0,8$. A exceção foi a microrregião de São Joaquim da Barra, onde o procedimento baseado nos dados do SPOT Vegetation superestimou, consideravelmente, a área plantada, em comparação à média do período estudado (500 mil hectares frente aos 304 mil hectares levantados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). As estimativas obtidas por sensoriamento

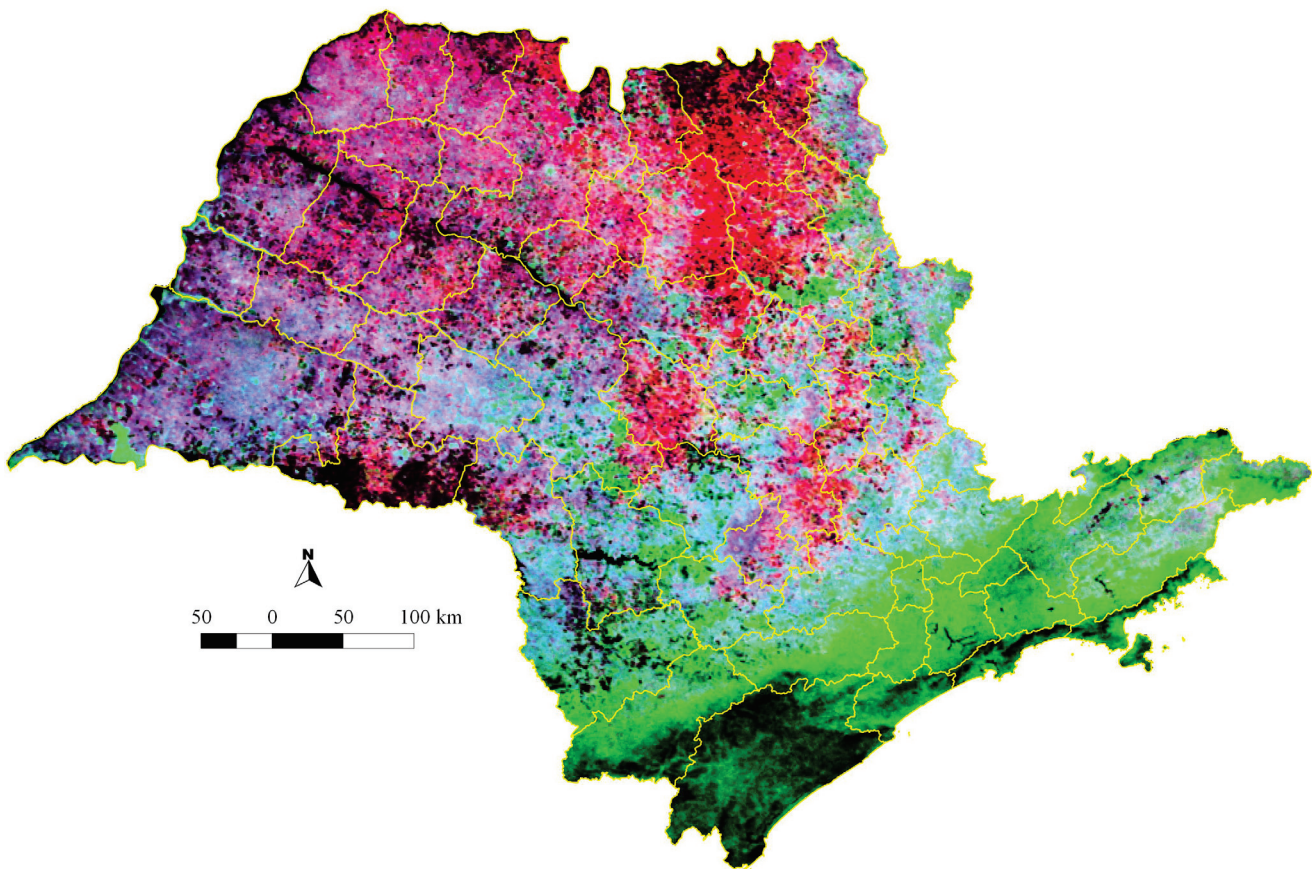


Figura 4. Composição colorida obtida a partir de imagens regra do “spectral angle mapper” (SAM): cana-de-açúcar, canal vermelho (Red); Floresta, canal verde (Green); e Pastagem, canal azul (Blue). Microrregiões do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, delineadas na linha contínua.

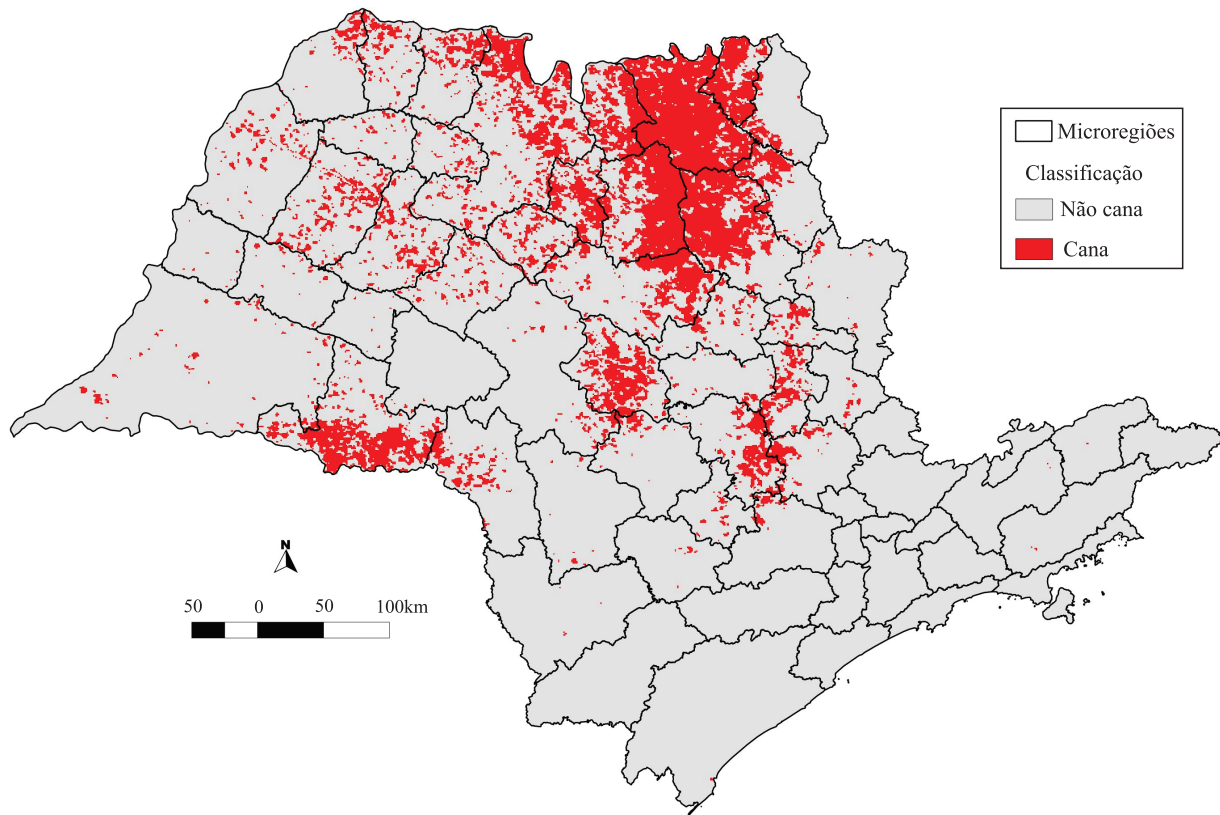


Figura 5. Máscara de área plantada de cana-de-açúcar sobre microrregiões, conforme Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (linhas contínuas), no Estado de São Paulo, gerada a partir de imagem regra do “spectral angle mapper” (SAM).

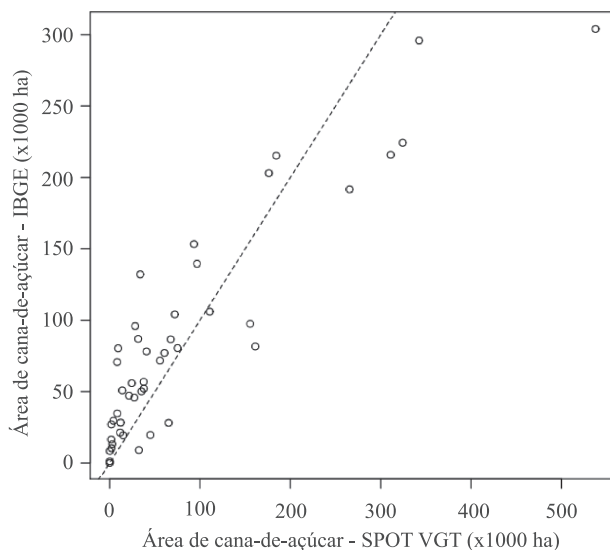


Figura 6. Verificação dos resultados da classificação da imagem regra do “spectral angle mapper” (SAM), de cana-de-açúcar (SPOT VGT), em comparação aos dados de 2004–2009 de área plantada, conforme Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012), por microrregião da área de estudo.

remoto ficaram próximas à reta 1:1, o que indica boa concordância entre as estimativas e os dados oficiais.

A área plantada de cana-de-açúcar, nos últimos anos, no Estado de São Paulo (média de 2004 a 2009) foi de 3,8 milhões de hectares (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012), enquanto a estimativa obtida por sensoriamento remoto foi de 3,6 milhões de hectares, uma subestimativa de, aproximadamente, 180 mil hectares ou 4,6% da área de plantio do estado. Esta subestimativa pode ser considerada pequena quando comparada a resultados obtidos em estudos com abordagem semelhante (Xavier et al., 2006; Yi et al., 2007).

O procedimento detalhado e avaliado no presente trabalho resultou na geração de máscara com as áreas de plantio de cana-de-açúcar dos últimos seis anos. Para estudos futuros, propõe-se verificar e aplicar o mesmo procedimento para diferentes anos, o que permitirá a análise da dinâmica de ocupação das terras desta importante cultura agrícola.

Conclusões

1. Séries temporais do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), oriundas do programa SPOT Vegetation, podem ser utilizadas para o mapeamento de cana-de-açúcar em áreas extensas, em baixa resolução.

2. O algoritmo “spectral angle mapper” (SAM) pode ser aplicado a séries temporais de imagens de satélite de maneira eficiente em mapeamentos de larga escala.

3. O mapeamento realizado apresenta boa concordância com os dados de área plantada de cana-de-açúcar nas microrregiões do Estado de São Paulo.

Referências

- AVALIAÇÃO da safra agrícola de cana-de-açúcar. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2010. 14p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/3cana_09.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Assessoria de Gestão Estratégica. **Brasil projeções do agronegócio 2010/2011 a 2020/2021**. Brasília: MAPA, 2011. 58p.
- CARREIRAS, J.M.B.; PEREIRA, J.M.C.; CAMPAGNOLO, M.L.; SHIMABUKURO, Y.E. Assessing the extent of agriculture/pasture and secondary succession forest in the Brazilian Legal Amazon using SPOT VEGETATION data. **Remote Sensing of Environment**, v.101, p.283-298, 2006.
- CASER, D.V.; CAMARGO, A.M.M.P. de; BUENO, C.R.F.; CAMARGO, F.P. de; ÂNGELO, J.A.; OLIVETTE, M.P. de A.; FRANCISCO, V.L.F.S. (Org.). Previsões e estimativas das safras agrícolas do Estado de São Paulo, Ano Agrícola 2010/11, Junho de 2011. **Informações Econômicas**, v.41, p.59-78, 2011.
- EMBRAPAMONITORAMENTOPORSATÉLITE. **GEONETCast**. Disponível em: <<http://www.cnpm.embrapa.br/projetos/geonetcas/index.html>>. Acesso em: 1 set. 2012.
- FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, K.; NIELSEN, T.T.; MBOW, C. Evaluation of Earth observation based long term vegetation trends – intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. **Remote Sensing of Environment**, v.113, p.1886-1898, 2009.
- FERNANDES, J.L.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Sugarcane yields estimates using time series analysis of Spot Vegetation images. **Scientia Agricola**, v.68, p.39-146, 2011.
- FREITAS, R.M. de; ARAI, E.; ADAMI, M.; FERREIRA, A.S.; SATO, F.Y.; SHIMABUKURO, Y.E.; ROSA, R.R.; ANDERSON, L.O.; RUDORFF, B.F.T. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, v.2, p.57-68, 2011.
- HALL-BEYER, M. Comparison of single-year and multiyear NDVI time series principal components in cold temperate biomes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.41, p.2568-2574, 2003.
- HEINZ, D.C.; CHANG, C. Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.39, p.529-545, 2001.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA**: área plantada, área colhida, quantidade produzida e valor da produção da lavoura temporária 1990-2010. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&o=11&i=P&c=1612>>. Acesso em: 1 set. 2012.
- INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS. **CanaSat**: monitoramento da cana-de-açúcar. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/tabelas.html>>. Acesso em: 12 ago. 2011.
- KRUSE, F.A.; LEFKOF, A.B.; BOARDMAN, J.W.; HEIDEBRECHT, K.B.; SHAPIRO, A.T.; BARLOON, P.J.; GOETZ, A.F.H. The spectral image processing system (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v.44, p.145-163, 1993.
- MANZATTO, C.V.; ASSAD, E.D.; BACA, J.F.M.; ZARONI, M.J.; PEREIRA, S.E.M. (Org.). **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55p. (Embrapa Solos. Documentos, 110).
- OLIVETTE, M.P. de A.; NACHILUK, K.; FRANCISCO, V.L.F.S. Análise comparativa da área plantada com cana-de-açúcar frente aos principais grupos de culturas nos municípios paulistas, 1996-2008. **Informações Econômicas**, v.40, p.42-59, 2010.
- REMBOLD, F.; MASELLI, F. Estimation of inter-annual crop area variation by the application of spectral angle mapping to low resolution multitemporal NDVI images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.72, p.55-62, 2006.
- RUDORFF, B.F.T.; AGUIAR, D.A. de; DA SILVA, W.F.; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, v.2, p.1057-1076, 2010.
- SCHOWENGERDT, R.A. Hyperspectral image analysis. In: SCHOWENGERDT, R.A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. 2nd ed. New York: Academic Press, 1997. p.459-471.
- SHIMABUKURO, Y.E.; SMITH, J.A. The least-square mixing models to generate fraction images derived from remote-sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.29, p.16-20, 1991.
- VERBEIREN, S.; EERENS, H.; PICCARD, I.; BAUWENS, I.; VAN ORSHOVEN, J. Sub-pixel classification of SPOT-VEGETATION time series for the assessment of regional crop areas in Belgium. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.10, p.486-497, 2008.
- VICENTE, L.E.; SOUZA FILHO, C.R. de. Identification of mineral components in tropical soils using reflectance spectroscopy and advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. **Remote Sensing of Environment**, v.115, p.1824-1836, 2011.

WALTER, A.; DOLZAN, P.; QUILODRÁN, O.; GARCIA, J.; SILVA, C. da; PIACENTE, F.; SEGERSTEDT, A. **A sustainability analysis of the Brazilian ethanol**. Campinas: Unicamp, 2008. 167p.

WILLIAMS, A.P.; HUNT JUNIOR., E. R. Estimation of leafy spurge cover from hyperspectral imagery using mixture tuned matched filtering. **Remote Sensing of Environment**, v.82, p.446-456, 2002.

XAVIER, A.C.; RUDORFF, B.F.T.; BERKA, L.M.S.; MOREIRA, M.A. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, p.755-768, 2006.

YI, J.L.R.; SHIMABUKURO, Y.E.; QUINTANILHA, J.A. Identificação e mapeamento de áreas de milho na região Sul do Brasil utilizando imagens MODIS. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.759-763, 2007.

Recebido em 9 de setembro de 2011 e aprovado em 27 de agosto de 2012