



Bragantia

ISSN: 0006-8705

editor@iac.sp.gov.br

Instituto Agronômico de Campinas

Brasil

Mengue, Vagner Paz; Fontana, Denise Cybis
Avaliação da dinâmica espectro-temporal visando o mapeamento dos principais cultivos
de verão no Rio Grande do Sul
Bragantia, vol. 74, núm. 3, julio-septiembre, 2015, pp. 331-340
Instituto Agronômico de Campinas
Campinas, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90842183012>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

re²alyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Avaliação da dinâmica espectro-temporal visando o mapeamento dos principais cultivos de verão no Rio Grande do Sul

Vagner Paz Mengue ^(1*); Denise Cybis Fontana ⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), Avenida Bento Gonçalves, 7712, 91540-220 Porto Alegre (RS), Brasil.

⁽²⁾ UFRGS, Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia, Avenida Bento Gonçalves, 7712, 91540-220 Porto Alegre (RS), Brasil.

^(*) Autor correspondente: vagnergeo@yahoo.com.br

Recebido: 15/dez./2014; Aceito: 22/fev./2015

Resumo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia de baixo custo para o mapeamento das culturas de verão no Estado do Rio Grande do Sul, a partir do comportamento espectro-temporal de índices de vegetação e o Modelo HAND. O estudo foi realizado no Estado do Rio Grande do Sul, e o período foi a safra 2011/2012. Utilizaram-se imagens EVI do Sensor MODIS e dados SRTM. Para avaliar os resultados, foram usados dados de campo e dados do IBGE, além de um mapa referência elaborado com imagens RapidEye. Os resultados da classificação MODIS e os dados do IBGE geraram um coeficiente de correlação (r) de 0,98 para o arroz e 0,89 para a soja. Na validação dos dados coletados em campo, a cultura do arroz irrigado obteve um coeficiente Kappa de 0,66 e a cultura da soja 0,61. Na análise de similaridade *Fuzzy*, a cultura do arroz irrigado obteve uma similaridade de 87% contra 81% da soja. Portanto, o uso de dados multitemporais do sensor MODIS, aliado à delimitação de áreas de inundação, utilizando o modelo HAND, torna possível disponibilizar dados de estimativa de área cultivada das principais culturas de verão no Estado do Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: MODIS, EVI, modelo HAND, agricultura.

Assessment of spectral-temporal dynamics for mapping the main summer crops in the Rio Grande do Sul State

Abstract

This study aimed to develop a low-cost method for mapping summer crops in the Rio Grande do Sul State, from the spectral-temporal behavior of vegetation indices and the HAND Model. The study was conducted in the Rio Grande do Sul State in the 2011/2012 harvest. It was used EVI images from the MODIS sensor and SRTM data. To evaluate the results, we used field data and IBGE data and a reference map elaborated with RapidEye images. The results of the MODIS classification and the IBGE data generated a correlation coefficient (r) of 0.98 for rice and 0.89 for soybeans. Validation with data collected in the field, irrigated rice obtained a Kappa coefficient of 0.66 and soybean, 0.61. In the Fuzzy similarity analysis, the irrigated rice achieved a similarity of 87% and soybean, 81%. Therefore, multi-temporal MODIS data, combined with the delineation of flood areas, using the HAND model, allow to estimate the area planted with the main summer crops in the Rio Grande do Sul State.

Key words: MODIS, EVI, HAND model, agriculture.

1. INTRODUÇÃO

Os cultivos de verão são responsáveis pela maior parte da produção de grãos no Estado do Rio Grande do Sul. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2013), a soja e o arroz irrigado são as principais culturas, responsáveis por 79,51% da área e de 67,62% da produção no Estado. Levantamentos confiáveis sobre a produção agrícola de forma rápida e sistemática proporcionam ao governo formas de aprimorar as políticas

de abastecimento, regular os estoques, a oferta, a demanda e, consequentemente, os preços. O grande desafio para os órgãos oficiais, como o IBGE e a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), é o monitoramento, estimativas e previsão de safras, de forma sistemática em caráter quase continental, com uma variedade enorme de culturas, condições climáticas, edáficas e técnicas de manejo distintas.

O uso de métodos objetivos e acurados, que utilizem conjuntamente dados de superfície e dados orbitais, pode proporcionar melhorias na produção de informações agrícolas. Nesse sentido, dados oriundos de sensoriamento remoto podem ser utilizados para este objetivo. O uso de imagens de moderada resolução espacial e alta resolução temporal para o mapeamento e monitoramento da atividade agrícola, baseado na análise do comportamento espectro-temporal de índices de vegetação, pode produzir resultados com maior rapidez, precisão e ainda com menor custo operacional do que as técnicas convencionais atualmente empregadas.

Entre os sensores em operação, aquele que melhor atende a estas demandas é o MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*), que tem sido amplamente utilizado em estudos agrícolas. Diversos trabalhos apontam para a viabilidade de uso de imagens do sensor MODIS para a elaboração de mapeamentos, tendo como base os atributos espectro-temporal de culturas agrícolas (Brown et al., 2013; Chang et al., 2007; Epiphany et al., 2010; Johann et al., 2012; Victoria et al., 2012). Nestes, as variações espectrais ao longo do ciclo são usadas como critério de diferenciação de áreas de cultivo, o que é exitoso quando existe compatibilidade entre a resolução espacial do sensor e o tamanho das lavouras, assim como quando a faixa recomendada de semeadura é estreita.

No Rio Grande do Sul, as culturas do arroz irrigado e da soja apresentam ciclos fenológicos similares, o que faz com que a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto que utilizam somente atributos espectro-temporal para diferenciar os cultivos tornem-se complexas. Como as áreas de várzea são as mais indicadas para o cultivo de arroz irrigado, a correta delimitação dessas áreas pode ser considerada como ponto fundamental para o refinamento do mapeamento entre as culturas de verão, permitindo a distinção das áreas de arroz irrigado das áreas ocupadas por outros cultivos de ciclo coincidente, como a soja. Nesse contexto, a utilização do descritor de terrenos HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) (Nobre et al., 2011; Rennó et al., 2008) para discriminar as áreas de várzeas, ou áreas utilizáveis para o cultivo de arroz irrigado, é uma ferramenta importante e com características muito positivas, de baixo custo e fácil implementação.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e testar uma metodologia de baixo custo para a execução do mapeamento e diferenciação das culturas de verão (soja e arroz irrigado) no Estado do Rio Grande do Sul, em escala municipal e estadual, com base na análise do comportamento espectro-temporal de índices de vegetação de imagens de satélite de alta resolução temporal e o Modelo HAND.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo foi o Estado do Rio Grande do Sul, localizado no extremo sul do Brasil, entre as latitudes 27°05's e 33°45's e longitudes 49°43'w e 56°20'w, abrangendo

497 municípios, com uma área total de 281.748 km². O estudo foi feito no período de agosto de 2011 a maio de 2012, compreendendo assim o período de desenvolvimento da cultura do arroz irrigado e da soja no estado.

Foram utilizadas imagens do satélite TERRA, sensor MODIS, produto MOD13Q1, coleção 5, que contém composições de imagens de 16 dias sob forma de índices de vegetação EVI (Huete et al., 1994), com uma resolução espacial de 250 metros. Este produto foi obtido de forma gratuita, no site da Embrapa (EMBRAPA, 2014). De posse das imagens MODIS, a primeira etapa foi realizar o empilhamento temporal das imagens EVI, procedimento necessário para construir os perfis espectro-temporais. Também foram obtidas as 18 imagens de confiabilidade do pixel (*Pixel Reliability*) para o mesmo período.

Com o objetivo de diminuir a interferência de ruídos oriundos da presença de nuvens, falhas do detector, geometria de visada, dentre outros, e suavizar a curva espectro-temporal, aplicou-se o filtro “flat bottom smoother” (Wardlow et al., 2006). Utilizou-se para tanto a linguagem de programação “Interactive Data Language” (IDL), versão 7.1.2, adaptada pela Embrapa Informática Agropecuária.

O perfil espectro-temporal foi elaborado a partir da avaliação do padrão do EVI dos pixels classificados como arroz irrigado e de soja no mapa de referência construído com as imagens de 10/1/12 e 14/2/12 do sensor RapidEye com resolução espacial de 5 metros (imagens cedidas através do projeto Metodologia para Mapeamento da Agricultura Brasileira (MAPAGRI) da Embrapa). Para elaborar o mapa de referência foi feita uma classificação digital, empregando-se o algoritmo de classificação não supervisionada Isodata. Estabeleceu-se um mínimo de cinco classes e um máximo de dez classes, com cinco iterações. A partir da classificação não supervisionada, foi realizado um agrupamento de classes espectrais e executada uma etapa de revisão, em que todas as áreas de arroz e soja passaram por uma análise visual em tela para detectar e editar possíveis erros de classificação.

Devido à variabilidade possível de datas de semeadura entre as lavouras de arroz irrigado e de soja nas diferentes regiões do Estado, utilizaram-se imagens compostas de mínimo valor (relacionada à implantação da cultura) e de máximo valor (relacionada ao máximo vigor das lavouras) de EVI.

Para a elaboração da imagem de mínimo EVI na cultura do arroz irrigado foram utilizadas as imagens de 14/9/11 a 17/11/11 (5 imagens), contemplando a fase de pré-plantio e desenvolvimento inicial da cultura. O período de 17/11/2011 a 22/4/2012 (11 imagens) foi utilizado para geração da imagem de máximo EVI. Já para cultura da soja foram usadas as imagens referentes ao período de 16/10/2011 a 3/12/2011 (4 imagens) para a geração da imagem de mínimo EVI, e o período de 3/12/2011 a 6/4/2012 (9 imagens) para a geração da imagem de máximo (Figura 1).

Para a geração da máscara de cultivo da cultura de arroz irrigado e da soja utilizou-se o método de classificação supervisionada paralelepípedo. As amostras para treinamento

do classificador foram coletadas em uma imagem de composição colorida RGB, as quais foram usadas para destacar as áreas cultivadas com as culturas de primavera-verão. Na elaboração da composição colorida, a imagem de máximo foi colocada no canal R (vermelho) e a imagem de mínimo foi colocada nos canais G (verde) e B (azul). As áreas em vermelho representam as culturas de verão, e as demais cores, os outros alvos (Figura 2).

A última etapa foi a realização dos cruzamentos da área de inundação, gerada com o modelo HAND, com as classificações de arroz irrigado e soja, obedecendo-se à seguinte regra: áreas classificadas como arroz irrigado dentro das áreas de inundação foram computadas; áreas classificadas como arroz, mas que estavam fora da área de inundação, foram desconsideradas. Áreas classificadas como soja dentro das áreas de inundação foram desconsideradas; áreas classificadas como soja, mas que estavam fora da área de inundação, foram computadas.

O Modelo HAND utiliza dados topográficos na forma de Modelos Digitais de Elevação – MDE para mapear a superfície, baseando-se na distância vertical à drenagem mais próxima. Para a implementação foram utilizados dados do SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) (NASA, 2000), obtidos de forma gratuita no site da Embrapa (Brasil, 2005). As imagens SRTM são fornecidas em articulação compatível com a escala 1:250.000 (IBGE, 2012a), tendo sido necessárias 21 imagens para compor o mosaico que abrange toda a área de estudo, o qual foi realizado no programa Envi 4.7 (Exelis,

McLean, VA, EUA). Para processar os dados SRTM e gerar o modelo HAND utilizou-se o Sistema para Modelagem Hidrológica Distribuída, também chamado de TerraHidro, que está inserido dentro do programa TerraView, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2010).

A imagem do modelo HAND foi exportada em formato GeoTIFF e, no programa Envi 4.7, fatiou-se a imagem para definir a área de inundação, ou seja, foi escolhida a altura de inundação a partir da drenagem mais próxima. O valor do fatiamento não foi o mesmo para toda a região orizícola; a altura mínima foi de 8 metros em algumas regiões e a máxima foi de 40 metros. A escolha da altura seguiu critérios de análise visual em imagens de satélite de melhor resolução espacial como o Landsat 5 (resolução espacial de 30 m) e Resource Sat-1 (resolução espacial de 24 m). Por fim, foi aplicado um filtro de convolução mediana janela 5×5 para eliminar pequenas inconsistências (buracos causados pela topografia local) dentro da área de inundação.

A representação esquemática das etapas da metodologia para o processamento e geração das máscaras de cultura do arroz irrigado e da soja está mostrada na figura 3.

Para validar os resultados da classificação MODIS, foram utilizados três conjuntos de informações: dados de campo, dados oficiais do IBGE e mapa referência a partir de imagens RapidEye.

Realizaram-se dois levantamentos de campo, nos meses de fevereiro e abril de 2012, a fim de avaliar a qualidade dos resultados obtidos no processo de classificação e interpretação

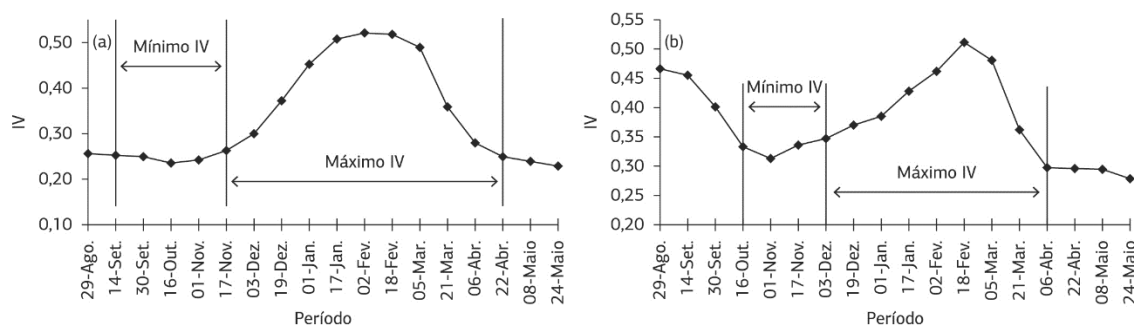


Figura 1. Perfil espectro-temporal da cultura do arroz irrigado (a) e da soja (b) e os períodos de mínimo e máximo EVI.

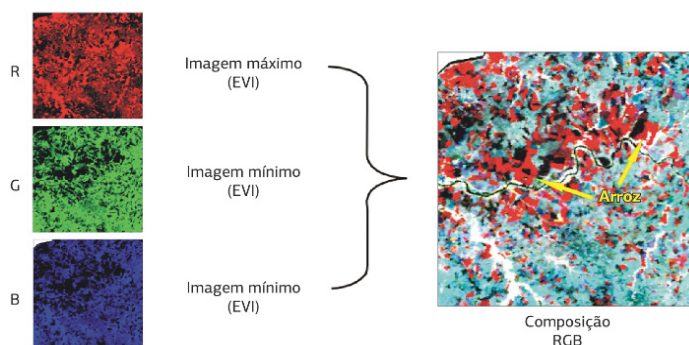


Figura 2. Exemplo de aplicação da técnica de composição multitemporal das imagens para cultura arroz irrigado, em RGB.

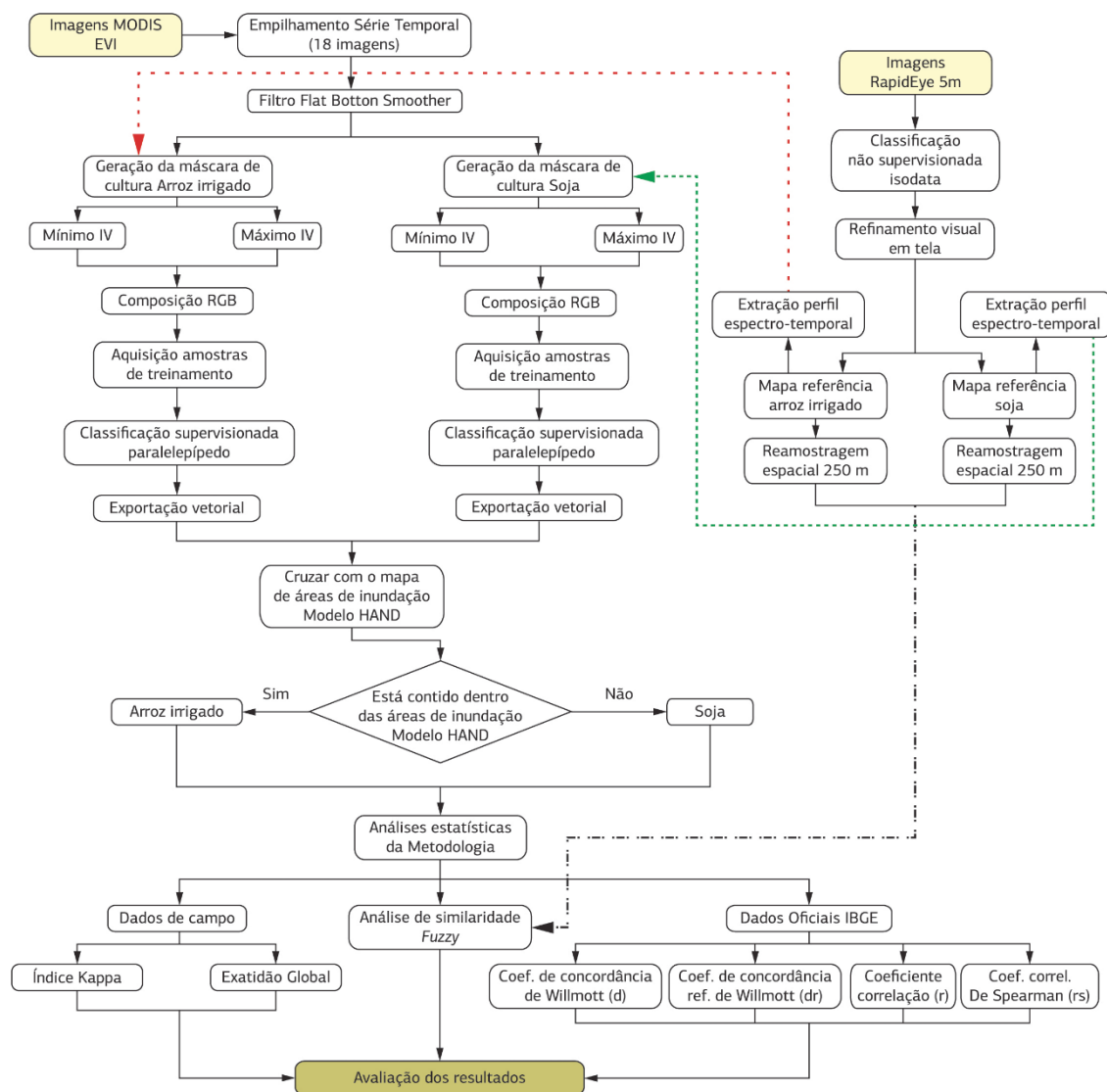


Figura 3. Fluxograma descrevendo as etapas do processamento e geração das máscaras para as culturas de verão.

das imagens. Fizeram-se, então, as análises do índice Kappa (IK) e a exatidão global (EG) da classificação.

Também foram utilizados para fins de referência os dados de área cultivada (ha) de arroz irrigado e soja, obtidos do LSPA elaborado pelo IBGE, em nível municipal, da safra 2011/2012. Após realizar as etapas de cruzamentos de informações dos dados oficiais (IBGE, 2012b) com os dados obtidos pelo mapeamento MODIS, em nível municipal, realizaram-se testes estatísticos. Primeiramente, os dados em nível municipal foram submetidos a um teste de normalidade Shapiro & Wilk (1965) para verificar se existe suposição de normalidade. Não havendo suposição de normalidade dos dados, foi realizada uma sequência de testes estatísticos, como: Coeficiente de correlação não paramétrico de Spearman (rs), análise de correlação (r), coeficiente de concordância (d) Willmott et al. (1985), coeficiente de concordância refinado (dr) Willmott et al.

(2012), erro médio (ME) e a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE).

Por fim, foram utilizados mapas temáticos como referência para avaliar a exatidão do mapeamento das imagens MODIS. Para tanto, foram utilizadas duas cenas do satélite RapidEye para elaborar o mapa de referência das lavouras de arroz irrigado, e mais duas outras cenas do mesmo satélite para elaborar o mapa de referência das lavouras de soja, totalizando quatro cenas. As imagens RapidEye possuem uma resolução espacial de 5 metros, e cada cena uma área em torno de 628 km². De posse dos mapas de referência empregou-se o método de validação pelo índice de similaridade *fuzzy*, proposto por Hagen (2003). O índice varia de 0 a 1, valores próximos a 0 indicam similaridade baixa e valores próximos a 1 indicam similaridade alta entre os mapas. Adotou-se o método de função decaimento constante com janelas de tamanhos que variaram de 1×1 a 11×11 pixels.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos perfis temporais extraídos das imagens EVI demonstrou a eficiência do filtro para corrigir as variações devido à ocorrência de ruídos, os quais podem ser decorrência das condições atmosféricas desfavoráveis e geometria da aquisição (Hird & Mcdermid, 2009). O filtro foi capaz de amenizar as oscilações, e a curva temporal resultante da filtragem se aproximou do comportamento esperado para as culturas de verão, especialmente no período em que ocorrem os elevados valores dos índices de vegetação, que estão associados à maior biomassa vegetal, evidenciando a atenuação dos pixels “ruído” pelo processo de filtragem (Figura 4).

As maiores oscilações entre os dados brutos e filtrados ocorreram nas áreas destinadas à cultura de arroz irrigado. Uma das possíveis causas é que as amostras selecionadas para gerar os perfis temporais estão localizadas na planície interna à Lagoa dos Patos, próxima ao município de Camaquã, local onde as imagens de confiabilidade do pixel possuem alvos com cobertura de nuvens, especialmente nos meses de dezembro e janeiro, como mostra a figura 5. Efetivamente, esta região é problemática do ponto de vista para obtenção de imagens

de satélite, dada a maior umidade do ar pela proximidade do mar. Custódio et al. (2009) realizaram um estudo da nebulosidade diurna no Rio Grande do Sul e concluíram que a região leste-nordeste apresenta o maior índice de nebulosidade diurna. Fica, portanto, evidenciada uma das vantagens do uso de imagens MODIS, cujas composições de 16 dias viabilizam o mapeamento nesta parte do estado.

O cruzamento da área de inundação gerada com o modelo HAND com a área classificada como de cultivo de arroz irrigado (baseada no atributo espaço-temporal em imagens Modis) gerou uma área total cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul de 1.215,529 ha, 16,72% maior do que o dado oficial (1.042,443 ha).

A partir da classificação da cultura da soja utilizando dados do sensor MODIS, obteve-se uma área de cultivo de 3.794,105 ha após a aplicação da máscara de inundação gerada pelo Modelo HAND. A classificação MODIS subestimou em 11,13% o dado oficial do IBGE (4.269,247 ha). Se tomarmos como corretas as estimativas oficiais, a superestimativa para arroz e subestimativa para soja pode ser um indicativo de que parte da área cultivada com soja no sul do estado esteja localizada nas áreas de várzea.

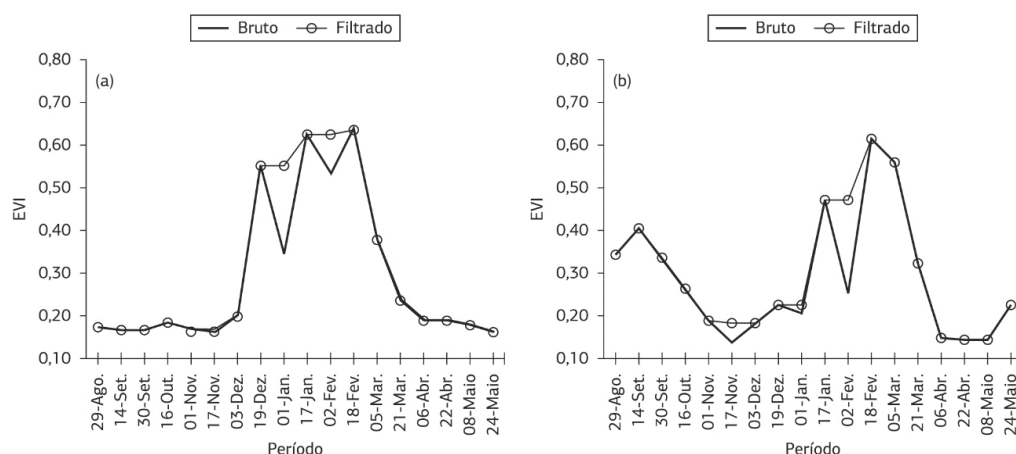


Figura 4. Perfis temporais de EVI de um pixel situado em lavouras de arroz irrigado (a) e soja (b) antes e após o processo de filtragem.

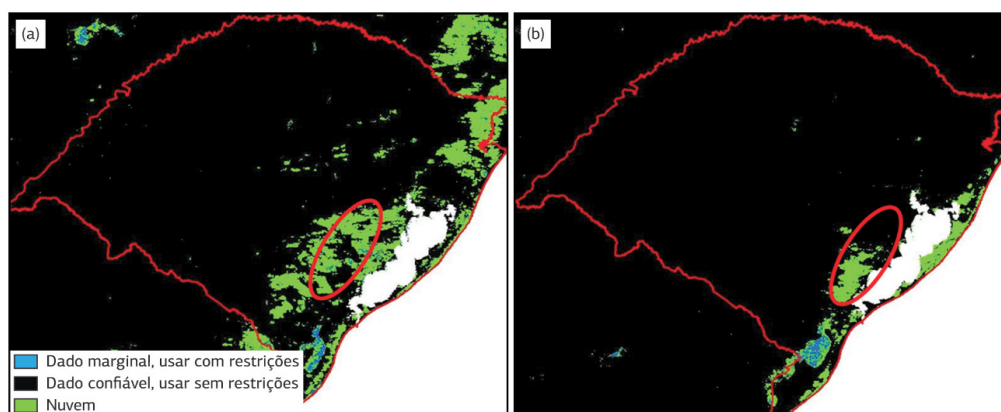


Figura 5. Imagem confiabilidade do pixel mostrando os locais onde foram extraídas as amostras de arroz irrigado. Data: 3/12/2011 (a) e 1.º/1/2012 (b).

Quando comparamos os dados da classificação MODIS com os dados de referência do IBGE em nível municipal, os resultados mostram alta concordância e baixa dispersão em ambas as culturas. Na figura 6 se observa a distribuição uniforme dos dados em torno da linha 1:1 para a cultura do arroz irrigado, com um coeficiente de correlação (r) de 0,98, coeficiente de concordância de Willmott (d) de 0,99. Já o coeficiente de concordância refinado de Willmott (dr), que penaliza mais a diferença entre os dados observados em relação à média, o valor foi de 0,89, e por último foi testado o coeficiente de correlação não paramétrico de Spearman (rs) com valor de 0,95. Já para a cultura da soja, o coeficiente de correlação (r) foi de 0,89, o índice de concordância Willmott (d) foi de 0,96. O coeficiente de concordância refinado de Willmott (dr) foi de 0,82 e, por último, o coeficiente de correlação não paramétrico de Spearman (rs) com valor de 0,88. O erro médio (ME) para as máscaras municipais para a cultura do arroz irrigado foi de 436,30 ha, e para a cultura da soja o erro foi maior, subestimando em 963,78 ha. O RMSE, que informa sobre o valor real do erro produzido pelo modelo, foi de 2.133,2 ha para a cultura do arroz irrigado e 6.666,549 ha para a cultura da soja.

Os resultados apontam para uma metodologia promissora. O ideal seria que estes erros percentuais fossem os menores possíveis, mas cabe ressaltar que o levantamento é em nível estadual e realizado de forma rápida, sistemática, baixo custo, podendo a metodologia ser implementada em outro estado.

Os resultados foram muito similares aos obtidos por Klering et al. (2013), os quais estimaram a área cultivada com arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul a partir de uma série de dez safras utilizando imagens NDVI-MODIS e compararam os resultados com dados municipais do IBGE. Os autores encontraram um coeficiente de correlação de 0,90 e valores de 0,95 para índice de concordância de Willmott (d).

A distribuição espacial das culturas de verão no estado demonstram que as lavouras de arroz irrigado localizam-se

próximas a corpos d'água (rios, açudes, lagoas...) e ocupam somente uma pequena parte da área apta ao cultivo (Figura 7), conforme esperado. Observou-se a concentração da cultura de soja em áreas tradicionais de cultivo, como a porção norte do estado, que corresponde à área de maior produção. Além disso, é possível a detecção de áreas de soja em áreas não tradicionais de cultivo, como a região sul do estado, antes ocupada principalmente pela pecuária e pela produção de arroz irrigado e do Bioma Pampa (Santos et al., 2014).

Áreas detectadas e classificadas como soja pelo sensor MODIS ocupam as áreas mais altas, enquanto as áreas detectadas e classificadas como arroz irrigado ocupam as áreas de várzea. Apesar de poder haver o cultivo da soja em áreas baixas, isto ocorre em menor intensidade e, portanto, a área de inundação gerada pelo modelo HAND pode ser considerada crucial para a separação das áreas de conflito entre as culturas de arroz irrigado e soja.

Os dados gerados pelo modelo HAND são precisos e de rápida implementação, e a escala de análise vai depender da qualidade dos dados HAND. Segundo Nobre et al. (2011), a qualidade do modelo vai depender da resolução dos dados de entrada, ou seja, da qualidade do Modelo Digital de elevação. Quanto menor o tamanho do pixel, mais precisos e fidedignos serão os dados do modelo HAND.

Uma das maiores dificuldades encontradas neste trabalho foi a separação da soja de outras culturas, como o milho em todo o estado e o arroz irrigado na metade sul. Trabalhos anteriores que utilizaram imagens MODIS para detectar e mapear a soja no Rio Grande do Sul (Gusso et al., 2012; Santos et al., 2014) não utilizaram como área de estudo todo o território do Rio Grande do Sul, mas sim setorizaram o estudo na área de maior produção de soja, localizado no norte do estado, portanto, toda a região sul do estado ficou fora da análise. No presente trabalho foram computados todos os 497 municípios que compõem o estado, o que aumenta a variabilidade e conflitos de detecção de culturas com ciclo fenológico similar, como a soja (Tabela 1).

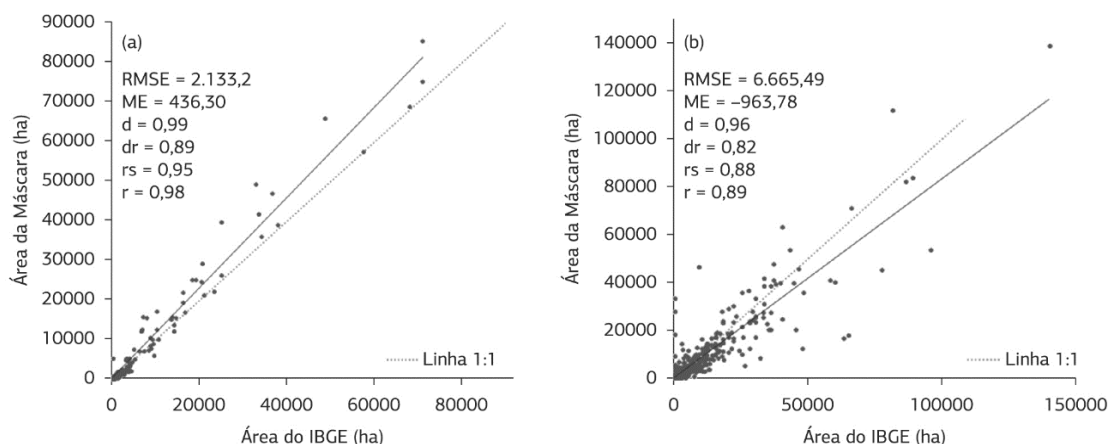


Figura 6. Gráfico de dispersão entre os dados de área cultivada de arroz irrigado (a) e soja (b) MODIS – EVI com os dados oficiais (IBGE, 2012b).

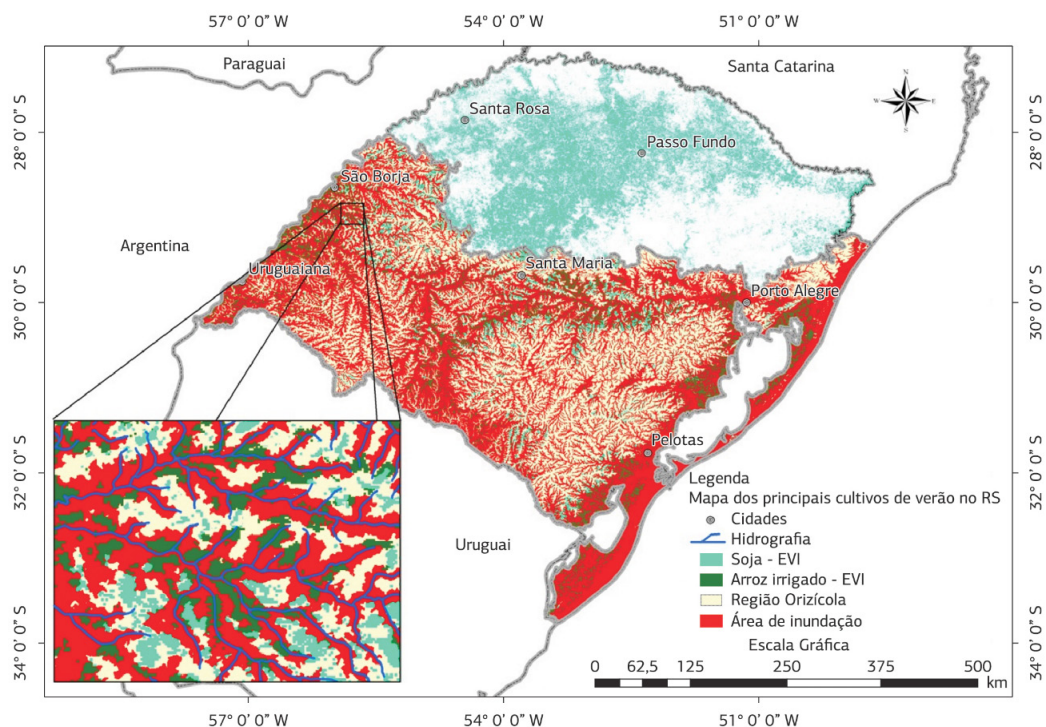


Figura 7. Mapa da área cultivada com arroz irrigado e soja obtido através do índice MODIS- EVI no ano safra 2011/2012.

Tabela 1. Área oficial (IBGE, 2012b) e áreas obtidas com a classificação MODIS-EVI dos principais cultivos de verão do Estado do Rio Grande do Sul para o ano-safra 2011/2012

Variáveis	Arroz Irrigado	Soja
Área Oficial - IBGE (ha)	1.041,44	4.269,24
Área Máscara - MODIS (ha)	1.215,52	3.794,10
Diferença (MODIS - IBGE) (ha)	174,086	-475,142
Diferença (%)	16,72%	-11,13%
Diferença Média (ha)	436,30	-963,78
RMSE	2.133,2	6.665,49
Erro Médio - ME	436,30	-963,78
Coef. Concordância Willmott - d	0,99	0,96
Coef. Concordância ref. Willmott - dr	0,89	0,82
Coef. de correlação de Spearman - rs	0,95	0,88
Coefficiente de correlação - r	0,98	0,89

Analisando-se os dados de referência coletados em campo, comparados aos mapas da classificação MODIS nas áreas de arroz irrigado e soja, verifica-se que os processamentos realizados no presente trabalho foram satisfatórios. As áreas classificadas como arroz irrigado (Tabela 2) apresentaram melhores resultados, quando comparados com os dados da classificação soja (Tabela 3).

Espectralmente, a cultura do arroz irrigado possui características muito distintas das demais. Em teoria, o sistema de irrigação deveria permitir que a cultura do arroz irrigado fosse facilmente distinguida das demais através de técnicas de sensoriamento remoto (Gumma et al., 2011). No entanto, devido à espessura do conteúdo de matéria orgânica em suspensão na lâmina d'água, áreas com cultivos de primavera-verão de ciclo semelhante, como é o caso da soja e do milho, podem ser incluídas no mapeamento.

A exatidão global (EG) foi de 90,56% e o índice Kappa (IK) foi de 0,6613 para a cultura do arroz irrigado. Os maiores erros de classificação ocorreram com as culturas da soja e milho. Resultados semelhantes a esses foram encontrados em outros trabalhos, que utilizam dados de campo para validar suas classificações. García & Martínez (2010) identificaram áreas de cultivo de arroz nas províncias de Cundinamarca e Tolima, na Colômbia, em uma área de 4.519,01 km², com dados NDVI provenientes do Landsat 7 ETM+ e ASTER, e compararam os resultados com um mapa gerado por dados obtidos em campo. Foram encontrados valores de IK entre 0,45 e 0,74 e EG superior a 72%. Importante destacar que, no trabalho mencionado, os autores utilizaram áreas de estudo com dimensões menores e satélites com menor resolução espacial e apresentaram menor acurácia em relação aos encontrados no presente trabalho.

Tabela 2. Matriz de confusão para a cultura do arroz irrigado para a classificação MODIS-EVI

		Referência de campo		Total	Erro inclusão [%]
		arroz	não arroz		
Classes do Mapa temático	arroz	336	137	473	29,0
	não arroz	127	2196	2323	5,5
Total pontos de campo		463	2333	2796	
Erro omissão [%]		27,4	5,9		

Tabela 3. Matriz de confusão para a cultura da soja para a classificação MODIS-EVI

		Referência de campo		Total	Erro inclusão [%]
		soja	não soja		
Classes do Mapa temático	soja	779	313	1092	28,7
	não soja	328	3032	3360	9,8
Total pontos de campo		1107	3345	4452	
Erro omissão [%]		29,6	9,4		

Já para a soja, os maiores erros de inclusão envolveram a confusão espectral com arroz irrigado, bioma campo e, em especial, a cultura do milho. Os erros de inclusão para a cultura do milho foram em torno de 60% das amostras de campo, as quais se concentraram na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, que é tradicionalmente produtora de soja.

O valor de (EG) 85,60% e o (IK) de 0,6129 obtido na avaliação de acurácia da estimativa de área cultivada de soja pode, assim, ser considerado satisfatório, diante da grande variabilidade da cultura da soja em todo o estado. Bernardes et al. (2011) utilizaram imagens multitemporais do sensor MODIS para estimar a área de soja no Estado do Mato Grosso e compararam os resultados com imagens do sensor TM/Landsat-5. Testaram diversos tipos de classificadores e os melhores resultados obtidos foram de EG de 83% e IK de 0,63.

A qualidade dos resultados obtidos pode também ser evidenciada a partir da comparação de valores de trabalhos que utilizaram dados espectro-temporais, porém utilizando outro sensor. Mercante et al. (2012) encontraram valores de IK acima de 0,63 e EG de 79,05%, quando comparam imagens espectro-temporais do Landsat-5/TM para a safra 2008/2009 com os resultados obtidos por meio de amostragem de pontos de controle, para detectar áreas semeadas com soja em municípios do oeste do Estado do Paraná.

Diversos autores têm registrado as dificuldades de mapeamento de culturas agrícolas na região sul do Brasil com sensores de resolução espacial mais grosseira, devido ao tamanho das propriedades e das variações topográficas (Yi et al., 2007). Segundo estes autores, nessas regiões a utilização de sensores de resolução espacial moderada é incapaz de fornecer estimativas precisas de áreas de cultivo em função das peculiaridades locais. Esta condição também foi registrada por Lamparelli et al. (2008), demonstrando valores inferiores na acurácia da classificação da soja utilizando imagens de resolução espacial moderada e classificadores supervisionados.

Na validação realizada através da análise de similaridade *Fuzzy*, obtiveram-se índices considerados como satisfatórios, com uma similaridade superior a 60% (1×1) para a cultura de arroz irrigado e soja, quando comparados os dados da classificação MODIS-EVI e o mapa de referência obtido através das imagens RapidEye. Diversos trabalhos (Almeida et al., 2008; Macedo et al., 2013; Santos et al., 2014; Trenti & Freitas, 2010) consideraram os índices de similaridade *Fuzzy* com valores oscilando entre 0,45 e 0,50, para janelas de amostragem com tamanhos de 3×3 a 5×5, como concordâncias aceitáveis entre o mapa simulado e o mapa de referência.

Pode-se observar a partir da figura 8 que os valores do índice *Fuzzy* aumentaram conforme aumentou o tamanho da janela, e que houve uma estabilização na similaridade a partir da janela 5×5 para todas as classificações MODIS, característica já esperada para esse tipo de análise, diferentemente das análises pixel a pixel, como no índice Kappa. A cultura com melhor similaridade a partir do mapa de referência foi o arroz irrigado. Considerando a janela de 5×5, o valor encontrado foi de 87%, índices que, segundo a literatura, podem ser classificados como excelentes. Já para a cultura da soja, os valores foram um pouco menores, mas mesmo assim podem ser considerados como excelentes. Os valores encontrados para a janela 5×5 foram de 81%.

Uma das possíveis causas que podem explicar os melhores resultados de similaridade para a cultura do arroz irrigado comparados à cultura da soja está relacionada às características de cultivo, por exemplo, relevo, tamanho das propriedades e simetria. Nas áreas de cultivo destinadas ao arroz irrigado, o padrão das lavouras é de grande extensão territorial e geralmente de forma geométrica, e essas características podem influenciar numa melhor detecção do sensor MODIS. Já para a cultura da soja, essas características são diferentes. A maior parte da cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul é cultivada em regiões onde a topografia é um pouco acidentada, além de possuir diferentes tipos de plantio e de tamanho. Dessa maneira, essas características distintas entre

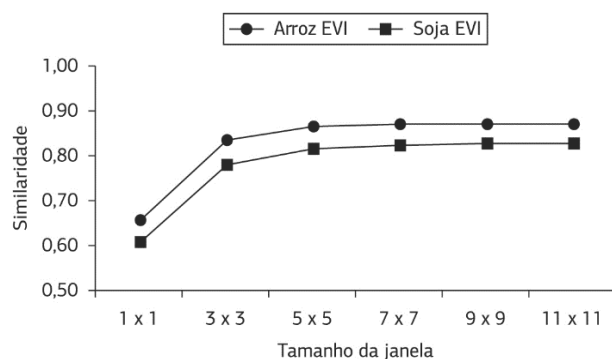


Figura 8. Gráfico da similaridade *Fuzzy*, entre os mapas de referência e os mapas gerados a partir das classificações MODIS-EVI para a cultura do arroz irrigado e soja.

as duas culturas estudadas podem influenciar na detecção pelo sensor MODIS.

Isso se confirma no estudo de Santos et al. (2014), que utilizaram o índice de similaridade para validar o mapeamento das áreas cultivadas de soja usando dados MODIS, percebendo que existem padrões distintos em algumas áreas da região de estudo com características pré-definidas, ou seja, lavouras de soja de diferentes tipos de plantio e de tamanho. A partir desse argumento, os autores analisaram separadamente os municípios com maior e menor área percentual (%) ocupada por soja, concluindo que os municípios com maior percentual de área ocupada com soja apresentam melhores resultados de similaridade entre os dados MODIS e a referência, do que os municípios de menor percentual de área ocupada com soja. Também no estudo de Rudorff et al. (2007), ficou evidenciado que o tamanho das áreas de soja é fundamental para a correta identificação e classificação dessas áreas no Estado do Rio Grande do Sul, especialmente utilizando imagens MODIS.

4. CONCLUSÃO

A partir de dados de moderada resolução espacial, provenientes do sensor MODIS, foi possível gerar e disponibilizar dados de estimativa de área cultivada para as culturas de verão para o Estado do Rio Grande do Sul. A metodologia disponibilizada é própria para uso em escala regional, gera estimativas acuradas, é de fácil e rápida implementação e também apresenta baixo custo de execução.

A etapa de aplicação de filtro foi essencial para diminuir os ruídos das séries temporais das imagens MODIS e possibilitar o uso destas para fins de mapeamento das áreas agrícolas no Estado do Rio Grande do Sul.

Além disso, classificação com imagens MODIS utilizando somente o atributo espectro temporal não foi suficiente para diferenciar as lavouras de arroz irrigado de outras lavouras de ciclo coincidente. Já a metodologia proposta para elaborar

uma área de inundação através do modelo HAND mostrou-se eficiente para separar as áreas de várzea, aptas para o cultivo de arroz irrigado, das áreas altas que podem ser destinadas ao cultivo de outras culturas, como a soja.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade ao primeiro autor de realização do mestrado, e à Embrapa, pelo fornecimento das imagens RapidEye.

REFERÊNCIAS

- Almeida, C. M., Gleriani, J. M., Castejon, E. F., & Soares-Filho, B. S. (2008). Using neural networks and cellular automata for modeling intra-urban land use dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*, 22, 943-963. <http://dx.doi.org/10.1080/13658810701731168>.
- Bernardes, T., Adami, M., Formaggio, A. R., Moreira, M. A., França, D. A., & Novaes, M. R. (2011). Imagens mono e multitemporais Modis para estimativa da área com soja no estado de Mato Grosso. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46, 1530-1537. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011001100015>.
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2005). Brasil em relevo. Brasília: Embrapa. Recuperado em 04 de dezembro de 2012, de <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/>.
- Brown, J. C., Kastens, J. H., Coutinho, A. C., Victoria, D. C., & Bishop, C. R. (2013). Classifying multiyear agricultural land use data from Mato Grosso using time-series MODIS vegetation index data. *Remote Sensing of Environment*, 130, 39-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.11.009>.
- Chang, J., Hansen, M. C., Pittman, K., Carroll, M., & Dimiceli, C. (2007). Corn and soybean mapping in the United States using MODIS time-series data sets. *Agronomy Journal*, 99, 1654-1664. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2007.0170>.
- Custódio, M. S., Berlato, M. A., & Fontana, D. C. (2009). Nebulosidade diurna no Rio Grande do Sul: Climatologia e tendência temporal. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, 15, 45-52.
- Embrapa Informática Agropecuária (2014). Banco de produtos MODIS na base estadual brasileira. Campinas: Embrapa. Recuperado em 6 de julho de 2014, de <http://www.modis.cnptia.embrapa.br/geonetwork/srv/pt/main.home>.
- Epiphany, R. D. V., Formaggio, A. R., Rudorff, B. F. T., Maeda, E. E., & Luiz, J. B. (2010). Estimating soybean crop areas using spectral-temporal surfaces derived from MODIS images in Mato Grosso, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45, 72-80. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010000100010>.
- García, J. S. A., & Martínez, M. L. J. (2010). Satellite image based method for rice (*Oryza sativa* L.) crop identification. *Journal Agronomía Colombiana*, 28, 281-290.
- Gumma, M. K., Nelson, A., Thenkabail, P. S., & Singh, A. N. (2011). Mapping rice areas of South Asia using MODIS multitemporal

- data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 5, 053547. <http://dx.doi.org/10.1117/1.3619838>.
- Gusso, A., Formaggio, A. R., Rizzi, R., Adami, M., & Rudorff, B. F. T. (2012). Soybean crop area estimation by Modis/Evi data. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47, 425-435. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000300015>.
- Hagen, A. (2003). Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 17, 235-249. <http://dx.doi.org/10.1080/13658810210157822>.
- Hird, J. N., & Mcdermid, G. J. (2009). Noise reduction of NDVI time series: an empirical comparison of selected techniques. *Remote Sensing of Environment*, 113, 248-258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.003>.
- Huete, A., Justice, C., & Liu, H. (1994). Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, 49, 224-234. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90018-3](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(94)90018-3).
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2012a) Bases cartográficas: cartas. Rio de Janeiro: IBGE. Recuperado em 2 de dezembro de 2012, de <http://mapas.ibge.gov.br/pt/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/cartas>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2012b). Sistema IBGE de recuperação automática: banco de dados agregados. Rio de Janeiro: IBGE. Recuperado em 4 de dezembro de 2012, de <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric/>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2013) Sistema IBGE de recuperação automática: banco de dados agregados. Rio de Janeiro: IBGE. Recuperado em 12 de dezembro de 2013, de <http://www.sidra.ibge.gov.br/>.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2010). TerraView 4.1.0. São José dos Campos: INPE. Recuperado em 4 de fevereiro de 2013, de <http://www.dpi.inpe.br/terracview>.
- Johann, J. A., Rocha, J. V., Duft, D. G., & Lamparelli, R. A. C. (2012). Estimativa de áreas com culturas de verão no Paraná, por meio de imagens multitemporais EVI/Modis. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47, 1295-1306. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900015>.
- Klering, E. V., Fontana, D. C., Alves, R., Rocha, J., & Berlato, M. A. (2013). Estimativa de área cultivada com arroz irrigado para o estado do rio grande do sul a partir de imagens Modis. *Ciência e Natura*, 35, 126-135. <http://dx.doi.org/10.5902/2179460x12567>.
- Lamparelli, R. A. C., Carvalho, W. M. O., & Mercante, E. (2008). Mapeamento de semeaduras de soja (*Glycine Max* (L.) Merr.) mediante dados MODIS/Terra E TM/Landsat 5: um comparativo. *Engenharia Agrícola*, 28, 334-344. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000200014>.
- Macedo, R. C., Almeida, C. M., Santos, J. R., & Rudorff, B. F. T. (2013). Modelagem dinâmica espacial das alterações de cobertura e uso da terra relacionados à expansão canavieira. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 19, 313-337. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702013000200009>.
- Mercante, E., Lima, L. E. P., Justina, D. D., Uribe-Opazo, M. A., & Lamparelli, R. C. A. (2012). Detection of soybean planted areas through orbital images based on culture spectral dynamics. *Engenharia Agrícola*, 32, 920-931. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000500011>.
- National Aeronautics and Space Administration – NASA. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology (2000). The Shuttle Radar Topography Mission collected topographic data over nearly 80 percent of Earth's land surfaces, creating the first-ever near-global data set of land elevations. NASA. Recuperado em 13 de julho de 2014, de <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/mission.htm>.
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G. O., Silveira, A. C., Waterloo, M. J., & Saleska, S. R. (2011). Height Above the nearest Drainage, a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404, 13-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>.
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., & Waterloo, M. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; Mapping terra-firme rainforest environments in Amazônia. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3469-3481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018>.
- Rudorff, C. M., Rizzi, R., Rudorff, B. F. T., Sugawara, L. M., & Vieira, C. A. (2007). Superfícies de resposta espectro-temporal de imagens do sensor MODIS para classificação de área de soja no Estado do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, 37, 118-125. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782007000100019>.
- Santos, J. S., Fontana, D. C., Silva, T. S. F., & Rudorff, F. T. (2014). Identificação da dinâmica espaço-temporal para estimar área cultivada de soja a partir de imagens MODIS no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 54-63. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000100008>.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52, 591-611. <http://dx.doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>.
- Trenti, G., & Freitas, M. I. C. (2010). Modelagem da dinâmica espacial urbana: modelo de autômato celular na simulação de cenários para o município de Americana-SP. *Revista Brasileira de Cartografia*, 62, 291-305.
- Victoria, D. C., Paz, A. R., Coutinho, A. C., Kastens, J., & Brown, J. C. (2012). Cropland area estimates using Modis NDVI time series in the state of Mato Grosso, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47, 1270-1278. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900012>.
- Wardlow, B. D., Kastens, J. H., & Egbert, S. L. (2006). Using USDA Crop Progress Data for the evaluation of greenup onset date calculated from MODIS 250-Meter Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72, 1225-1234. <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.72.11.1225>.
- Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., O'Donnell, J., & Rowe, C. M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, 90, 8995-9005. <http://dx.doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>.
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32, 2088-2094. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.2419>.
- Yi, J. L. R., Shimabukuro, Y. E., & Quintanilha, J. A. (2007). Identificação e mapeamento de áreas de milho na região sul do Brasil utilizando imagens Modis. *Engenharia Agrícola*, 27, 753-763. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162007000400019>.