

Monitoramento do uso e cobertura da terra em uma faixa de franca expansão sucroalcooleira

Gustavo Felipe Balué Arcoverde¹
Cláudia Maria de Almeida¹
Bernardo Friedrich Theodor Rudorff¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{gustavo, almeida, bernardo}@dsr.inpe.br

Abstract. The aim of this study was to evaluate the historical use and land cover in a region that has in recent years the booming sugar cane for ethanol production, the city and around Quirinópolis, Goiás. It was used three reference years, 2005, 2008 and 2011. The mapping was performed on images of TM/Landsat 5, which were restored to 15 meters of spatial resolution. The class sugar cane sugar was available by CANASAT project. The remaining agricultural classes were mapped by visual interpretation and observation of temporal histograms of EVI (Enhanced Vegetation Index) within a virtual laboratory of Remote Sensing. Also, we used the index MVI (moisture vegetation index) for vegetation mapping. The cane sugar has increased over 400% between 2005/2008 and over 200% in the period 2008/2011. This transition occurs in the first period mainly on summer crops, while in the second period occurs on pastures. The irrigated crops, which are present much of the food, do not undergo transition with sugar cane. The summer crop had significant drop in 2008, including losing area for urban expansion, possible consequence of the global economic crisis at that time. The two studied periods retain differentiated characteristics of transition especially for sugar cane and summer crops.

Palavras-chave: uso e cobertura da terra, cana-de-açúcar, biocombustível, processamento de imagens de satélite.

1. Introdução

A demanda energética mundial tende a aumentar principalmente pelo fato de que países em desenvolvimento passam a ter grande crescimento de demanda no setor energético e industrial, EIA (1999). Além disso, são nestas economias que as taxas de crescimento populacional são as mais acentuadas, EIA (1999). De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Brasil, estima-se que nesta década e na próxima a oferta interna de energia crescerá no Brasil entre 3,4 % e 3,6%, Tomalsquim et. (2007). Vale ressaltar que a maior fonte de energia consumida no planeta e que promove o efeito estufa, o petróleo, de acordo com simulações da IEA (2001), existe o cenário que entre 2026 e 2047, haverá esgotamento do petróleo convencional. Diante disto, novas energias precisam ser implantadas.

Associada à necessidade de implantação de novas fontes energia, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) atesta que a melhor alternativa para a diminuição de gases de efeito estufa na atmosfera ainda é a diminuição da emissão dos mesmos pela queima de combustíveis fósseis e a substituição desta matriz energética por outras de matriz limpa ou renovável, Pachauri e Reisinger (2007). No Brasil, devido à inserção no mercado de veículos *flex fuel* especialmente após o ano de 2003, notadamente têm sido desenvolvidas tecnologias para a produção de biocombustíveis através da cana-de-açúcar, o etanol, Rudorff et al. (2010). Além da crescente demanda no setor energético ter justificado o aumento da produção de etanol pela cana-de-açúcar, esta fonte energética também propicia a diversificação e a introdução de fontes energéticas renováveis no país. O crescimento da produção anual de etanol da cana-de-açúcar traz algumas reflexões acerca da dinâmica desta cultura agrícola. A cana-de-açúcar tem tido sobressaliente crescimento anual de área na primeira década do século XXI no Centro-Sul do país, Rudorff e Sugawara (2007). Observando a evolução da área cultivada pela cana-de-açúcar na região Centro-Sul através de imagens de satélite e disponível na internet (<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>) – Projeto CANASAT –, Rudorff et al. (2011), na safra

2005/06 foram 4.632.111 ha, enquanto que na safra 2010/11 foram 8.348.674 ha, ou seja, expansão de 55% de área em cinco safras. O uso de imagens de sensoriamento remoto para acompanhar estas alterações é altamente recomendável e eficiente, FAO (1996), uma vez que traz resultados com baixo custo e com tempo hábil, além da extrínseca visão sinóptica do fenômeno. De acordo com Rudorff et al. (2010) a expansão de área da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, na safra de 2008/09, foi realizada majoritariamente sobre áreas de pastagem (56,5%), seguida de áreas de culturas anuais (40,2%), e outras coberturas da terra (Citros, floresta e reflorestamento) com 3,24%. Percebe-se que este tipo de matriz energética renovável, por ser agrícola, traz consigo significativas alterações diretas do uso e cobertura da terra. Este fato pode trazer consequências a nível de, por exemplo, ciclagem de nutrientes do solo, reserva de carbono, conexão de nichos ecológicos, saúde pública, preço do etanol, entre outros, Walker (2004). Partindo desta problemática, o monitoramento e planejamento da matriz energética sucroalcooleira exerce importância para o país, sendo importante avaliar: quanto, quando e onde ocorre a expansão da cana-de-açúcar; tanto em sua evolução histórica como na projeção de cenários.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi o de avaliar o histórico do uso e cobertura da terra em uma região que teve nos últimos anos franca expansão da cana-de-açúcar para a produção de etanol através do uso de imagens de satélite.

2. Material e métodos

Primeiramente, escolheu-se uma área de estudo que cumprisse o objetivo deste trabalho, ou seja, uma área em que pudesse ser avaliada a expansão da cana-de-açúcar para a produção de etanol nos últimos anos. Além disso, uma dimensão de área que fosse possível o mapeamento através de imagens de satélite associando as melhores resoluções espaciais e temporais, e, também, o tempo de processamento destas imagens. Através desta associação seria possível ter maior nível de detalhe com maior disponibilidade de imagens, necessário para mapeamentos de atividades agrícolas. Desta forma, foi definida como área de estudo o município e entorno de Quirinópolis, com maior parte no estado de Goiás, conforme Figura 1. Foi considerado como entorno do município de Quirinópolis, uma área equivalente a distância de 20 quilômetros de seu limite, totalizando uma área de 1.108.486,48 hectares.

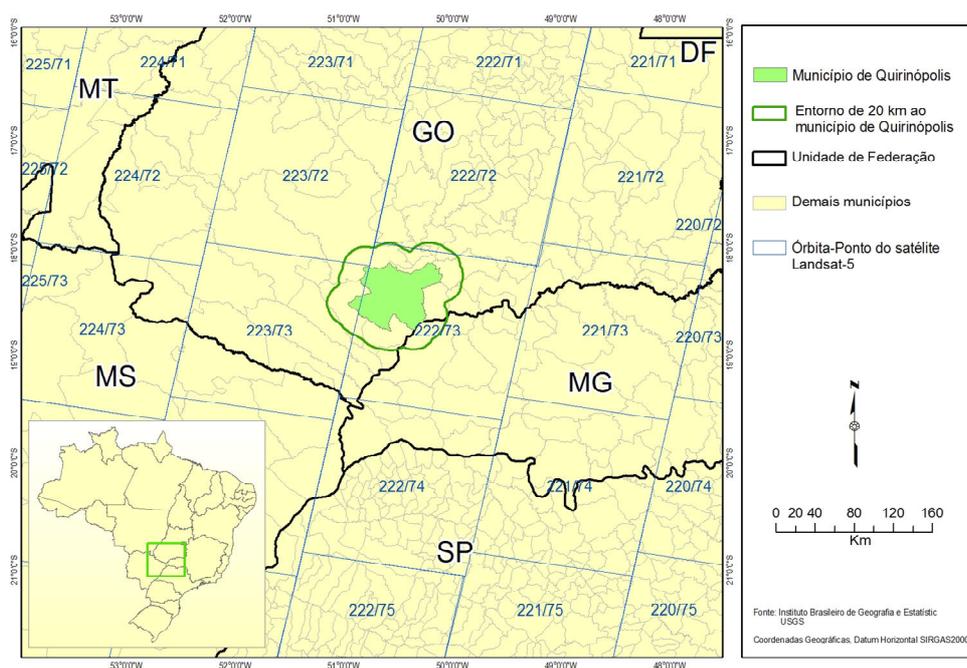


Figura 1. Área de estudo

Para cumprir a melhor associação de resolução espacial e temporal de imagens de satélite, optou-se pelo uso de imagens do sensor TM, a bordo do satélite Landsat 5, cuja revisita acontece a cada 16 dias, mantendo uma resolução espacial instantânea (IFOV) de 30 metros. Para a cobertura da área de estudo, foram necessárias, pelo menos, para uma data específica, quatro imageamentos de diferentes órbitas-ponto do satélite Landsat-5, são elas: 222/073, 222/072, 223/073 e 223/072 (Figura1).

A avaliação do uso e cobertura da terra foi realizada através dos dados de mapeamento geográfico e categórico da área de estudo para 3 anos de referência agrícola: 2004/2005 (2005), 2007/2008 (2008) e 2010/2011, que neste trabalho foram referenciados por 2005, 2008 e 2011, respectivamente. Todo o mapeamento foi realizado sob o sistema de coordenadas métrico UTM, Fuso 22, Datum horizontal SIRGAS 2000. Para tanto, foram utilizados os seguintes *softwares*: SPRING 5.1.8 e ENVI 4.8 e 6S. O mapeamento da área de estudo foi de categoria matricial, cuja resolução espacial adotada foi de 15 metros de pixel. As classes de uso e cobertura da terra adotadas neste estudo foram:

- Cana-de-açúcar soca, reforma e reformada: Cana-de-açúcar
- Cana-de-açúcar expansão
- Cultura agrícola de verão
- Cultura agrícola de irrigação
- Silvicultura
- Cobertura vegetal arbustiva a arbórea perene: Vegetação
- Pastagem e demais formações vegetacionais sub-arbustivas: Pastagem
- Área urbanizada
- Espelho d'água

O mapeamento das classes Cana-de-açúcar e Cana-de-açúcar expansão foi cedido pelo Projeto CANASAT, Rudorff et al. (2010), cuja resolução espacial original, de 30 metros, foi transformada para 15 metros, com devidos ajustes.

Os mapeamentos das classes restantes foram realizados com base nas imagens do sensor TM/Landsat-5 e, ou, em observação ao histórico do histograma do índice EVI (*Enhanced Vegetation Index*), Huete et al. (1997), produto MOD13Q1 do sensor MODIS a bordo do satélite TERRA. Este histograma foi consultado no Laboratório Virtual de Sensoriamento Remoto (LVSR), página WEB “www.dsr.inpe.br/laf/series/index.html”, desenvolvido por Freitas et al. (2011). Foi avaliada a possibilidade de restauração das imagens da resolução espacial original, de 30 metros, para 15 metros, através do método de restauração disponível no software SPRING 5.1.8. Este método utiliza a Função de Espalhamento Pontual (FEP) de um respectivo sensor TM para melhorar a resolução do pixel da imagem, Fonseca (1988).

Os mapeamentos das Classes Cultura agrícola de verão, Cultura agrícola irrigada, Silvicultura (culturas agrícolas) e Área urbanizada foram realizados por edição matricial a partir da interpretação visual das imagens TM/Landsat-5 do período seco (pré-plantio) e do período chuvoso (plantio) do respectivo ano de referência. Agregado a esta técnica, à exceção da classe Área urbanizada, houve o acompanhamento da resposta histórica dos talhões das classes pelo EVI, conforme supracitado. Através desta observação, foi possível adotar critérios de certificação de presença de cultura agrícola, com exceção das classes Cana-de-açúcar e Cana-de-açúcar expansão, as quais já teriam sido certificadas pelo projeto CANASAT. Quando um talhão tivesse sido verificado com cultivo agrícola no ano de referência, o mesmo somente poderia ser definido como tal, sob os seguintes critérios:

1- O talhão tinha que ter pelo menos 2 anos de cultura agrícola anteriores ao ano de referência agrícola;

2 – No caso de um talhão ter tido sua primeira cultura agrícola no ano de referência, esta cultura agrícola deveria permanecer neste talhão por pelo menos mais 2 anos após o ano de referência agrícola.

Somente através destes critérios, uma cultura agrícola, seja ela, agrícola de verão, irrigada, ou de silvicultura, poderia ser considerada efetivamente como tal. Uma cultura agrícola presente de forma isolada em um ano de referência poderia ser somente um indicativo de rotação de rotação de pastagens. Da mesma forma, se existe um histórico de cultura agrícola, e no ano de referência, constata-se comportamento no EVI de pousio, ou pastagem, o talhão em questão continua sendo agrícola, haja vista que naquele ano de referência houve pousio. Outra questão é que, no ano de 2011, quando uma cultura agrícola de verão fosse inserida um ano antes de 2011, não seria possível avaliar se a mesma teria dado continuidade. Nestas situações estes talhões não foram mapeados como culturas agrícolas de verão, mas como culturas agrícolas de dúvida, servindo de subsídio para possíveis mapeamentos em anos seguintes.

Visando melhor entendimento, segue quadro (Figura 2) com alguns exemplos do critério adotado para mapear talhões com cultura agrícola (com exceção às culturas de cana-de-açúcar).

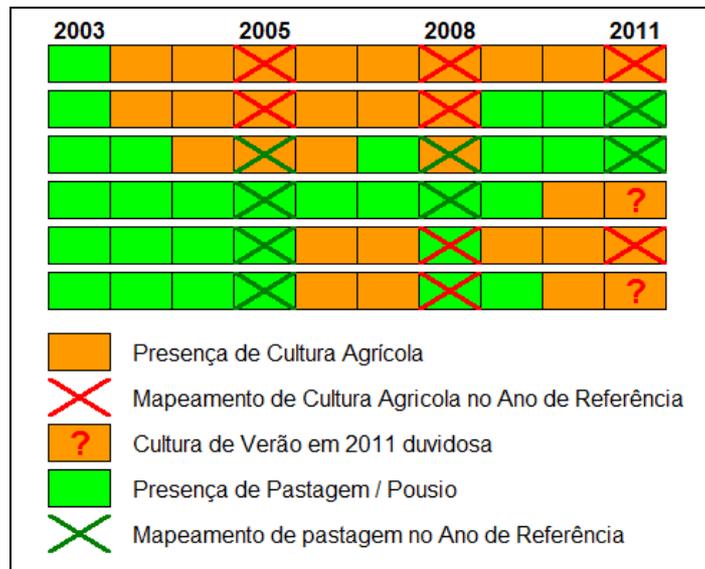


Figura 2. Exemplos de critérios históricos para mapeamento de culturas agrícolas (Exceção às culturas de cana-de-açúcar).

Para o mapeamento da classe Vegetação empregou-se um limiar, fatiamento, do índice MVI (*moisture vegetation index*) – Equação 1, Sousa e Ponzoni (1998). Estes autores demonstraram que neste índice há maior relação no volume de madeira florestal com as bandas do infravermelho médio, e, portanto, sugeriram tal índice. Além disso, este índice é mais sensível à cobertura de dosséis densos, justamente por haver baixa saturação do mesmo, Freitas e Cruz (2003). Desta forma, esse índice daria maior resposta à característica à da classe Vegetação - cobertura vegetal arbustiva a arbórea perene.

$$MVI = \frac{NIR - MIR}{NIR + MIR} \quad (1)$$

A geração deste índice foi realizado por imagens TM/Landsat-5 do período seco do ano de referência. A presença de resposta deste índice no período seco retrataria a vegetação

arbustiva e arbórea perene, classe Vegetação. Para geração e comparação vegetacional a partir deste índice, seria necessário que todas as imagens estivessem em reflectância de superfície.

Como este trabalho restaurou todas as imagens para 15 metros de pixel, foi necessário averiguar se este procedimento afetaria as médias e variâncias das classes com imagens na resolução de 15 metros. Para tanto foi realizado testes de hipótese com as imagens originais, de 30 metros de pixel, com as imagens restauradas para 15 metros de pixel. Utilizou-se o teste de F-Snedecor para verificar se a hipótese nula de que a razão entre as variâncias por classe seria inferior a 1, e Teste de T-Student para verificar a hipótese nula que a diferença entre as médias por classe seria inferior a 0. Foram coletadas amostras para as classes de Agricultura de verão, Vegetação, Cana-de-açúcar soca e Pastagem. Em todos os casos, com intervalo de confiança de 95%, as hipóteses nulas foram aceitas. Desta forma não haveria razões para que as imagens de 30 metros não fossem restauradas para 15 metros, com a finalidade de que estas fossem transformadas para reflectância de superfície, uma vez que, em nível de classe temática, as imagens possuem as mesmas médias e variâncias. A partir desta constatação, uma das imagens foi transformada para reflectância de superfície através do modelo de correção de transferência radiativa 6S (*Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum*), Vermote et al. (1997). As demais imagens foram transformadas para reflectância aparente e normalizadas radiometricamente em relação à de reflectância de superfície, seguindo os preceitos de Hall et al. (1991).

A escolha por um limiar de fatiamento no índice MVI, gerando a classe Vegetação, seria definido a partir de observações de campo de áreas não antropizadas no Parque Nacional de Brasília, cujo bioma que ali se encontra corresponde ao mesmo presente em Quirinópolis, o Cerrado.

A geração da classe Espelho d'água foi realizado a partir de fatiamento do índice amplamente conhecido NDWI (índice de umidade por diferença normalizada). Esta classe não foi gerada para cada ano de referência, mas foi considerada como desta classe, a do respectivo ano que tivesse visivelmente maior predominância desta classe.

3. Resultados

O mapeamento das classes agrícolas amparado em critérios históricos de permanência das mesmas foi fundamental para os resultados obtidos. Para tanto, o uso dos dados EVI consultados no LVSR foi imprescindível. De acordo com o quadro da Figura 3 um talhão contendo área com palhada, na imagem TM/Landsat, não foi mapeado como cultura agrícola de verão, pelo fato de que o mesmo somente teve presença desta cultura por dois anos safra, 2004/2005 e 2005/2006. Antes e após este período o mesmo talhão continha pastagem. Somente no período 2009/2010 e 2010/2011 a área vem a apresentar cultura agrícola, contudo, novamente, a mesma não foi mapeada como tal, pelo fato do não conhecimento de permanência desta cultura no ano seguinte.

O mapeamento da classe Vegetação foi realizado pelo MVI empregando, como informação do infravermelho médio, a banda 7 (2,08 – 2,35 micrômetros) – MVI7. A utilização desta banda em detrimento da banda 5, resultou em maior variação da cobertura florestal, sendo mais condizente também com as observações realizadas em campo. Foi considerado como classe Vegetação o MVI7 com valores iguais ou superiores a 0,3. Após esta operação, foi necessário certas edições matriciais para remover pixels desta classe coberturas de vegetação não natural. O Fatiamento para delimitação de espelhos d'água, realizado sobre o NDWI, foi atribuído sobre o limiar igual ou maior que o valor 0. O ano de 2011 correspondeu ao ano de maior presença de corpos hídricos, devido à construções de barragens, portanto, a classe presente neste ano foi utilizada para todos os demais anos.

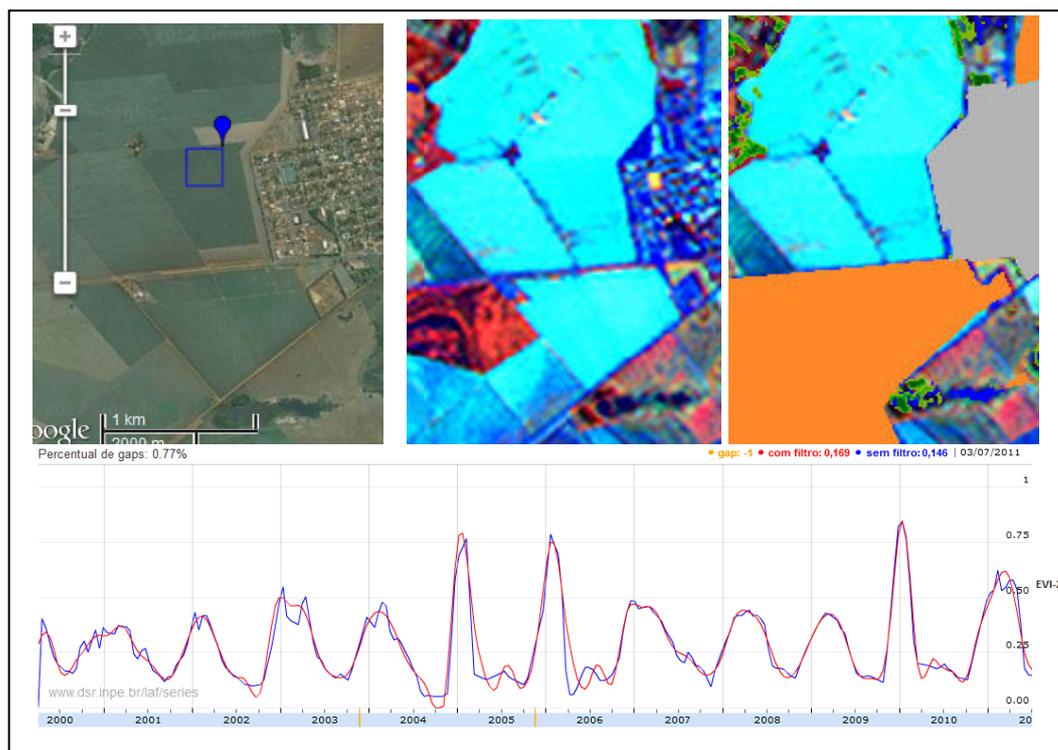


Figura 3. À esquerda e acima, ponto de interesse sobre imagem Google Earth no ambiente LVSR; ao centro e acima, composição colorida R4, G5, B3 de imagem do satélite TM/Landsat5 (09/04/05); à direita e acima, sobreposição de imagem mapeada; e, abaixo, comportamento do histograma no ponto de interesse.

Podemos agrupar 3 blocos, em ordem de grandeza, as classes deste estudo, considerando os 3 anos de referência deste estudo. Em primeiro lugar está a pastagem, com mais de 600.000 hectares. Em segundo, as classes de Cultura agrícola de verão, cana-de-açúcar e cana-de-açúcar expansão, Vegetação e Espelhos d'água, que vai de 7.244 a pouco mais de 140.000 hectares. Em terceiro, as classes com menor abrangência, Cultura agrícola de irrigação, Silvicultura e Área urbanizada, indo de 728 hectares a pouca mais de 2500 hectares.

Analisando a dinâmica das principais classes da região em termos de cobertura, conforme Figura 4, constata-se que no ano de 2008 há queda acentuada nas culturas agrícolas de verão, enquanto há aumento de mais de 400% nas culturas de cana-de-açúcar naquele ano. A pastagem aumenta no ano de 2008, mas volta ao seu estágio inicial em 2011. Somado a estas constatações aos gráficos das Figuras 5 e 6, percebe-se que a cana-de-açúcar em 2008 tem transição para as culturas agrícolas de verão, que, em 2011, passa a acontecer, predominantemente sobre pastagens. Este mesmo fato também foi evidenciado em Adami et al. (2012).

É interessante notar que as culturas irrigadas, onde estão presentes grande parte do cultivo de alimentos, diminui no período 2005/2008 e volta a crescer no período 2008/2011. Estas transições vêm ocorrendo, sobretudo, em áreas com culturas agrícolas de verão e pastagens, não ocorrendo transição para a cultura de cana-de-açúcar. A cultura agrícola de verão sofre queda significativa em 2008, inclusive perdendo área para expansão urbana. Este fato é um indicativo que os cultivos agrícolas daquela época podem ter sofrido as consequências da crise econômica dos Estados Unidos. Desta forma, constatou-se que, os dois períodos estudados mantêm características diferenciadas de transição principalmente para as culturas agrícolas de cana-de-açúcar e de verão. A partir dos dados gerados neste trabalho, será possível realizar estudos futuros de cenários, utilizando programas de modelagem dinâmica espacial.

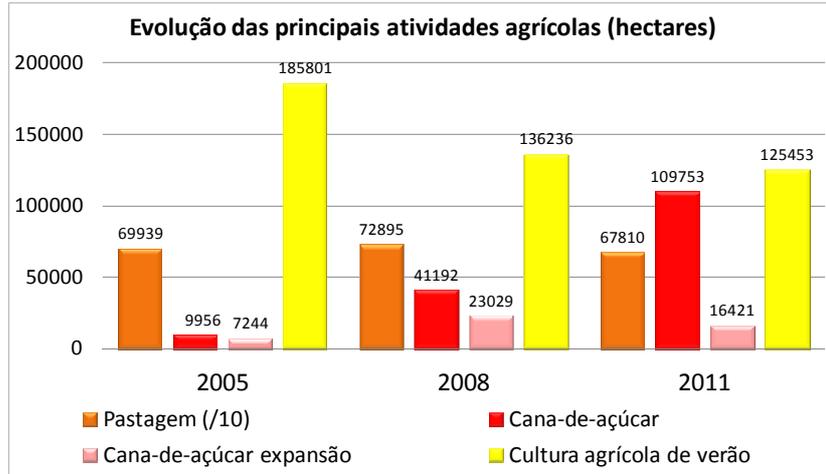


Figura 4. Dinâmica das principais culturas agrícolas da área de estudo.

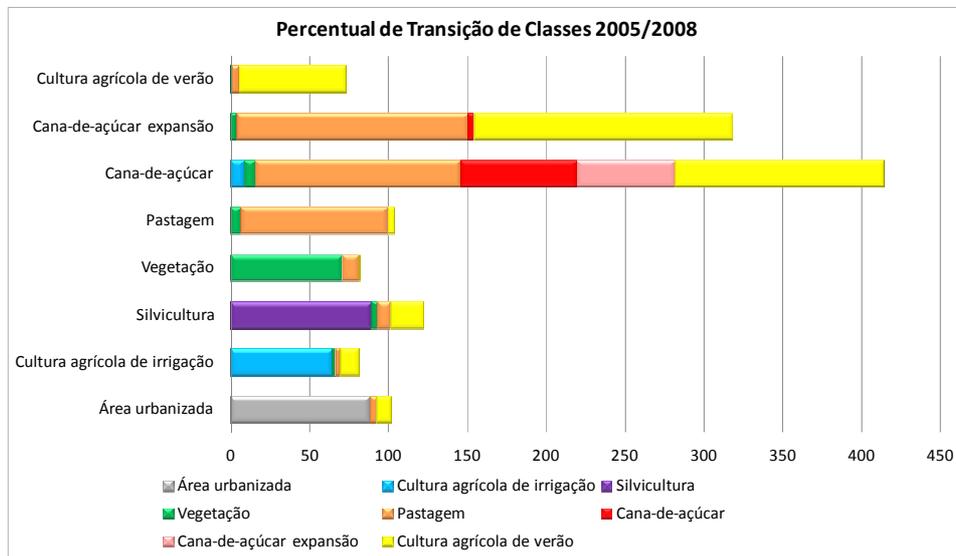


Figura 5. Dinâmica da transição entre classes no período 2005/2008.

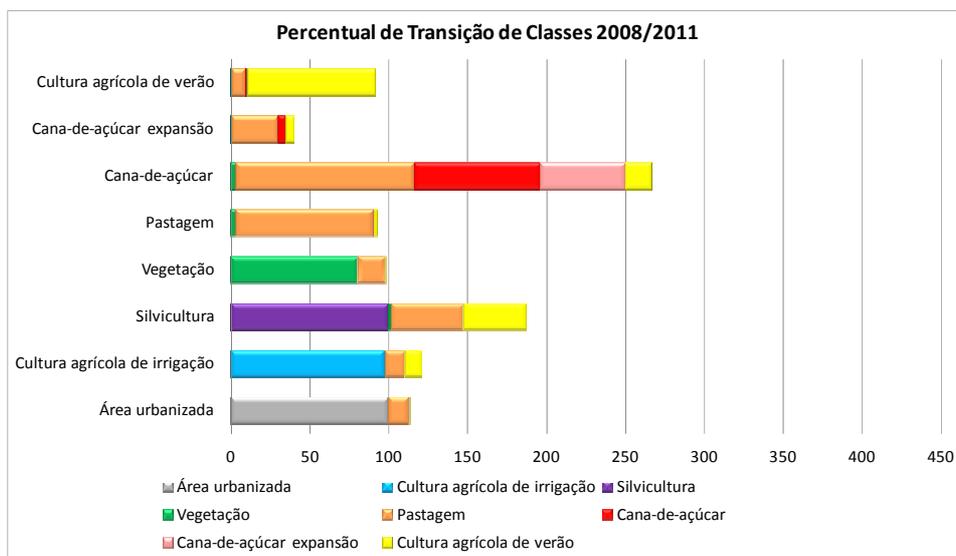


Figura 6. Dinâmica da transição entre classes no período 2008/2011.

2. Referências Bibliográficas

Adami, M.; Rudorff, B.F.T.; Freitas, S. R.; Aguiar, D.A.; Sugawara, L.M.; Mello, M.P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**. v. 4, p. 574 – 585, 2012.

Energy Information Administration (EIA). **International Energy Outlook: 1999**. Washington: EUA: Department of Energy, 1999. 226 p. Disponível em: < ftp://ftp.eia.doe.gov/forecasting/048499.pdf>.

Freitas, R. M.; Arai, E.; Adami, M.; Souza, A. F.; 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, n.1, p. 57-68, 2011.

Freitas, S. R.; Cruz, C. B. M. Índices de vegetação na caracterização de fragmentos de Mata Atlântica no Estado do RJ. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003, Belo Horizonte. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2737-2744. Repositório da URLib: <ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.13.17.41>. Disponível em: <http://iris.sid.inpe.br:1908/rep/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.13.17.41>.

Fonseca, L.M.G. Restauração e interpolação de imagens do satellite Landsat por meio de técnicas de projeto de filtros FIR. São José dos Campos. 148 p.(INPE-6628-TAE/30). Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 1988.

Food and Agriculture Organization of the Nations (FAO). **Multiple frame agricultural surveys: current survey based on area and list sampling methods**. Roma, 1996. v. 1.

Hall, F. G.; Strelbel, D. E.; Nickeson, J. E.; Goetz, S. J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multitemporal, multisensor images. *Remote Sensing of Environment*, v. 35, n.1, p. 11- 27, 1991.

Huete, A. R. et al. A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. **Remote Sens. Environ**, n.59, p.440-451, 1997.

International Energy Agency (IEA). **World Energy Outlook: 2001 Insights**. Paris: França: OECD, 2001. 425 p. Disponível em: < http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/2008-1994/weo2001.pdf>.

Sousa, C.L.; Ponzoni, F.J. Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/Landsat para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de Pinus. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 9, 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. Artigos, p. 1537-1547. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.11.10.35/doc/2_03p.pdf> . Acesso em: 16 ago 2012.

Pachauri, R. K.; Reisinger, A. (Ed.). **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Cambridge, EUA: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

Rudorff, B.F.T.; Sugawara, L.M. Mapeamento da cana-de-açúcar na região Centro-Sul via imagens de satélites. **Informe Agropecuário**, v.28, p.79-86, 2007.

Rudorff, B. F. T.; Aguiar, D. A.; 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, n. 4, p.1057-1076, 2010.

Tolmasquim, M.T.; Guerreiro, A.; Gorini, R. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos Estudos CEBRAP**, n. 79, p.47-69, 2007.

Vermote, E.F.; Tanré, D.; Deuzé, J. L.; Herman, M.; J.-J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35. n. 3, p. 675-686, 1997.

Walker, R. Theorizing land-cover and land-use change: the case of tropical deforestation. **International Regional Science Reviews**. v. 24, n. 3, p. 247-270, 2004.