

Acompanhamento do crescimento vegetativo da cana-de-açúcar por meio de séries temporais de NDVI do sensor Modis

Luciana Miura Sugawara¹
Bernardo Friedrich Theodor Rudorff¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{lmiura, bernardo}@dsr.inpe.br

Abstract. Monitoring of crop growth condition is relevant for crop yield estimation. Time series of vegetation indices derived from remote sensing satellite imagery provide important information on crop growth conditions. The present work aims to monitor key sugarcane growing periods at different cutting stages using NDVI/MODIS time series to provide information on sugarcane growing conditions. The study was carried out in São Paulo state for crop years 2006/07, 2007/08, and 2008/09. The 16-days composites of NDVI, MOD13Q1 product, were filtered using the “4253H, Twice” smoother. A sampling grid (250x250 m) of pure pixels was generated for sugarcane fields at different cutting stage. This grid was used to monitor the NDVI evolution, as well as the NDVI sum, every 16 days, during the sugarcane growing season from October to March (12 observations). NDVI ranged between 0.1 and 0.9 during the 12 observations in each of the three evaluated crop years. The NDVI sums indicated significant differences for sugarcane cutting stage. In addition, sugarcane at same cutting stages presented different NDVI values in different crop years. Therefore, it is possible to monitor sugarcane growing condition using NDVI/MODIS time series that can be used to estimate key input biophysical variables for agronomic crop yield models.

Palavras-chave: remote sensing, NDVI, sugarcane, 4253H, Twice smoother, sensoriamento remoto, NDVI, cana-de-açúcar, filtro 4253H, Twice.

1. Introdução

A cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene com um ciclo que dura em torno de quatro a cinco estágios de corte (Salomé et al., 2007). De acordo com Segato et al. (2006), o ciclo inicia com o plantio da muda, que brota, perfilha, madura e recebe o primeiro corte (cana-planta). O plantio é feito em duas épocas preferenciais, dando origem à cana-planta de ano (12 meses) ou à cana-planta de ano e meio (18 meses). Após este primeiro corte, os estágios de corte seguintes são denominados de cana-soca, onde a cada corte ocorre a brotação da soqueira e o início de um novo estágio de corte. Com o aumento do número de estágios de corte ocorre uma perda gradativa na produtividade agrícola (CTC, 2008). Os estágios de corte de cana-soca se repetem em intervalos anuais até que a lavoura não seja mais rentável economicamente, quando a cultura passa pelo manejo denominado de reforma e o ciclo reinicia com o plantio de uma nova muda (Segato et al., 2006).

O acompanhamento do crescimento vegetativo da cana-de-açúcar é importante para estimar a produtividade agrícola. Uma das maneiras de realizar este acompanhamento é por meio de séries temporais de índices de vegetação, provenientes de imagens de sensoriamento remoto (SR). Devido à alta dinâmica dos alvos agrícolas, uma das características mais importantes dos dados de SR para aplicações em agricultura é a alta resolução temporal. O sensor Modis, a bordo dos satélites Terra e Aqua, permite obter imagens quase diárias, com resolução espacial de 250 m, nas bandas do vermelho (banda 1) e do infravermelho próximo (banda 2) (Rudorff et al., 2007).

Embora a resolução espacial dos dados do sensor Modis seja moderada, estes dados parecem ser adequados para estudos regionais de monitoramento de grandes culturas agrícolas. Guissard et al. (2004) e Duveiller e Defourny (2010), demonstraram que as amostras extraídas de observações multitemporais de pixels puros são capazes de representar as fases de crescimento de uma cultura agrícola dentro de uma região homogênea com boa precisão. No entanto, Guissard et al. (2004) ressaltaram a importância do conhecimento sobre

o tamanho, o formato e a distribuição dos talhões na região agrícola avaliada. Desta forma, a amostragem e a escolha da resolução espacial do dado de SR podem ser feitas de forma adequada. Os mapas gerados pelo projeto Canasat permitem que estas características sejam conhecidas no caso da cana-de-açúcar. O projeto realiza o mapeamento das áreas de cultivo de cana-de-açúcar para o estado de São Paulo desde 2003 e para os demais estados da região Centro-Sul desde 2005 (Rudorff e Sugawara, 2007; INPE, 2010; Rudorff et al., 2010).

Além disso, os dados adquiridos pelo sensor Modis são disponibilizados gratuitamente na internet sob a forma de diferentes produtos, que permitem a sua utilização em trabalhos que requerem obtenção sistemática de dados de SR de alta qualidade. Estes produtos já possuem correção geométrica, radiométrica e atmosférica, permitindo a sua utilização imediata nas mais variadas aplicações (Rudorff et al., 2007).

No entanto, ruídos ainda são observados nas imagens Modis, diárias ou em composições de 8 e 16 dias, decorrentes principalmente da presença de nuvens e do ângulo de visada do sensor (Carreiras et al., 2003). Desta forma, sempre que possível, os ruídos devem ser removidos previamente ao uso dos produtos Modis. Diversos métodos de remoção de ruídos em séries temporais foram desenvolvidos, dentre os quais, o filtro “4253H, Twice” (Velleman, 1980) tem bom desempenho na ausência valores negativos representativos na série (Hird e McDermid, 2009).

O objetivo deste trabalho foi avaliar as séries temporais de *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) no acompanhamento de lavouras de cana-de-açúcar em diferentes estágios de corte para fornecer informações sobre as condições de crescimento da cultura.

2. Metodologia de Trabalho

O estudo foi realizado nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, no estado de São Paulo, localizado entre as latitudes sul 19°46' e 25°19' e as longitudes 44°09' e 53°07', a oeste de Greenwich (Figura 1), no período compreendido entre os anos safra 2006/07 e 2008/09.

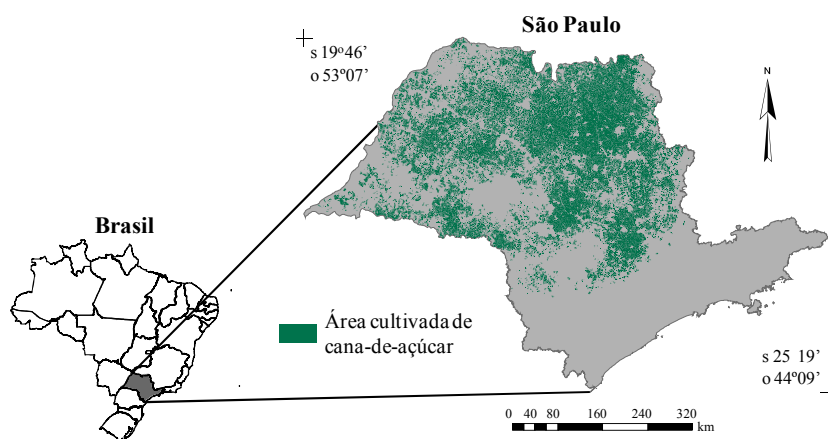


Figura 1 - Áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo no ano safra 2008/09. Fonte: INPE (2010).

Dentre os produtos Modis disponíveis, foi utilizado o produto MOD13Q1 (satélite Terra), que fornece índices de vegetação em composições temporais de 16 dias, com resolução espacial de 250 m. As composições temporais foram obtidas no endereço <https://wist.echo.nasa.gov/api/>, de onde os dados de NDVI foram extraídos com o uso do aplicativo Modis Reprojection Tool, fornecido no endereço https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/modis_reprojection_tool.

O filtro “4253H, Twice” (Velleman, 1980) foi aplicado na série temporal de NDVI para minimizar os ruídos presentes. A aplicação do filtro foi feita em quatro etapas: i) Na Etapa 1,

a mediana foi calculada em uma janela móvel para os valores de NDVI correspondentes a quatro datas da série temporal. O resultado foi submetido novamente ao cálculo da mediana, mas com o uso de uma janela móvel de duas datas da série temporal. O mesmo procedimento foi realizado para o cômputo das medianas com janelas móveis de cinco e três datas da série temporal. Em seguida, o método denominado de Hanning (H) foi utilizado nos valores resultantes do cômputo das medianas. Este método consiste na aplicação de uma média móvel ponderada, em uma janela composta por três datas da série temporal, com pesos $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$; ii) Na Etapa 2 foi feita a subtração entre os dados originais e o resultado da filtragem destes dados originais, que representou o resíduo ou o ruído da série temporal; iii) Na Etapa 3, o resíduo foi filtrado da mesma forma que o dado original na Etapa 1; iv) Na Etapa 4, o resultado da Etapa 3 foi agregado ao resultado da Etapa 1.

O estabelecimento dos estratos e das amostras foi feito com o auxílio dos mapas gerados pelo projeto Canasat nos anos safra 2003/04 a 2008/09 (INPE, 2010). Com base no mapa do ano safra 2008/09, foi feita uma sobreposição para que apenas áreas coerentes e coincidentes nos seis mapas fossem consideradas. Por exemplo, uma área proveniente de área reformada que está no quinto estágio de corte de cana-soca (Soca 5) em 2008/09 teria que estar no quarto estágio de corte de cana-soca (Soca 4) em 2007/08, e assim por diante até o ano safra 2004/05, onde deveria estar no estágio de corte de cana-planta (Planta) e área Em reforma no ano safra 2003/04. As demais considerações (apenas nos anos safra avaliados) podem ser vistas na Tabela 1. Desta forma, o mapa do ano safra 2008/09 resultante foi tomado como base para a realização da amostragem e a definição dos estratos (Tabela 1). É preciso salientar que os estratos 21, 22, 31 e 32 somente foram considerados neste trabalho a partir do ano safra em que a cana-planta estivesse disponível para colheita. Desta forma, os estratos 21 e 31 foram avaliados somente no ano safra 2008/09 e os estratos 22 e 32, nos anos safra 2007/08 e 2008/09 (Tabela 1).

Em seguida, com base na resolução espacial das imagens Modis utilizadas, uma grade amostral de 250x250 m foi criada para ser sobreposta ao mapa gerado na etapa anterior. Neste cruzamento apenas polígonos da grade amostral cuja área estivesse 100% coberta com área de cultivo de cana-de-açúcar foram selecionados.

Tabela 1 - Estratos e o estágio de corte das áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09.

Estrato	Código	Ano safra		
		2006/07	2007/08	2008/09
Indeterminado	11	Indeterminado	Indeterminado	Indeterminado
Reforma 2007	21	Indeterminado	Em reforma	Planta*
Reforma 2006	22	Em reforma	Planta*	Soca 2
Reforma 2005	23	Planta*	Soca 2	Soca 3
Reforma 2004	24	Soca 2	Soca 3	Soca 4
Reforma 2003	25	Soca 3	Soca 4	Soca 5
Expansão 2007	31	Outro uso	Outro uso	Planta*
Expansão 2006	32	Outro uso	Planta*	Soca 2
Expansão 2005	33	Planta*	Soca 2	Soca 3
Expansão 2004	34	Soca 2	Soca 3	Soca 4
Expansão 2003	35	Soca 3	Soca 4	Soca 5

* Somente cana-planta de ano e meio.

As unidades amostrais de 250x250 m foram transformadas em pontos, localizados nos centróides de cada polígono, com o intuito de facilitar a extração dos dados das séries temporais de NDVI filtradas. A armazenagem dos dados extraídos, bem como dos resultados gerados nas unidades amostrais foi feita no formato tabular.

Dentro de cada ano safra foi feita a escolha de 12 períodos de 16 dias, coincidentes com a data das composições temporais dos dados Modis e com o período de início de crescimento vegetativo até o máximo crescimento vegetativo da cana-de-açúcar para a formação da biomassa, de acordo com Casagrande (1991). A Tabela 2 mostra os 12 períodos de avaliação selecionados e as datas correspondentes a cada período.

Tabela 2 - Períodos de avaliação selecionados e as datas correspondentes às composições de 16 dias das imagens Modis.

Período	Data	Período	Data
1	30/09 a 15/10	7	01/01 a 16/01
2	16/10 a 31/10	8	17/01 a 01/02
3	01/11 a 16/11	9	02/02 a 17/02
4	17/11 a 02/12	10	18/02 a 05/03
5	03/12 a 18/12	11	06/03 a 21/03
6	19/12 a 03/01	12	22/03 a 06/04

A evolução dos valores de NDVI foi acompanhada ao longo dos 12 períodos de crescimento (Tabela 2) em cada um dos anos safra avaliados. Além disso, foi feito um somatório dos valores de NDVI dos 12 períodos avaliados em cada ano safra.

Os resultados da evolução dos valores de NDVI e do NDVI acumulado foram representados na forma de “notched box plot”, em que as comparações das medianas foram feitas ao nível de 5% de significância (McGill et al., 1978).

3. Resultados e Discussão

A utilização dos mapas das áreas de cultivo de cana-de-açúcar, fornecidos pelo projeto Canasat (INPE, 2010), foi fundamental na determinação dos estratos e das amostras, pois estes mapas permitiram que o estágio de corte, o tamanho, o formato e a distribuição dos talhões fossem conhecidos (Guissard et al., 2004).

Em teoria, somente pixels puros de cana-de-açúcar foram selecionados na amostragem. De acordo com Guissard et al. (2004) e Duveiller e Defourny (2010), estas amostras de pixels puros são capazes de representar áreas homogêneas sem que haja perda de precisão no monitoramento do ciclo de uma cultura agrícola. A Figura 2 mostra um detalhe das amostras coletadas para o município de Pradópolis.

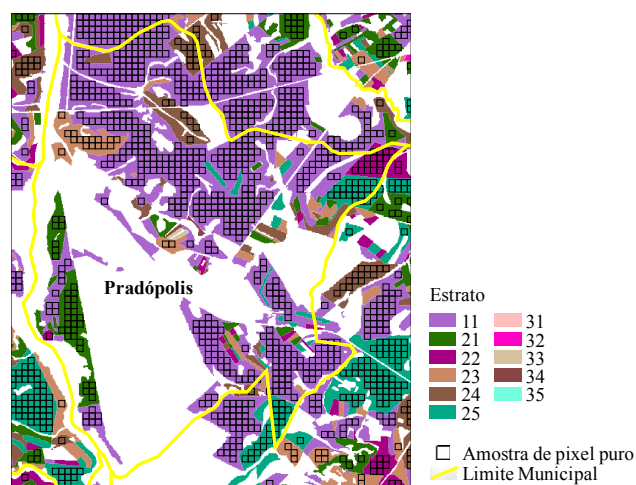


Figura 2 - Detalhe das amostras coletadas com base no mapa das áreas de cultivo de cana-de-açúcar, gerado pelo projeto Canasat (Rudorff et al., 2010).

Na prática, existe a possibilidade de uma pequena porcentagem das amostras estarem contaminadas com a presença de outros usos e ocupação da terra em função da escala dos mapas temáticos gerados pelo projeto Canasat (Rudorff e Sugawara, 2007; INPE, 2010; Rudorff et al., 2010) (Figura 2).

A quantidade de amostras obtidas nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar por estrato e o total para o estado de São Paulo nos três anos safra avaliados é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade de amostras por estrato e o total de amostras obtidas para as áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09.

Estrato	Código	Ano safra		
		2006/07	2007/08	2008/09
Indeterminado	11	48.493	48.493	48.493
Reforma 2007	21	-	-	10.771
Reforma 2006	22	-	10.652	10.652
Reforma 2005	23	10.780	10.780	10.780
Reforma 2004	24	8.261	8.261	8.261
Reforma 2003	25	13.227	13.227	13.227
Expansão 2007	31	-	-	34.667
Expansão 2006	32	-	28.399	28.399
Expansão 2005	33	12.531	12.531	12.531
Expansão 2004	34	7.597	7.597	7.597
Expansão 2003	35	4.393	4.393	4.393
Total de amostras		105.282	144.333	189.771

A quantidade total de amostras de um ano safra para outro aumentou para contemplar as áreas de cana-planta de ano e meio, provenientes de áreas de expansão e de reforma. No entanto, o número e a localização das amostras em cada estrato não variaram ao longo dos anos safra avaliados, pois a amostragem foi feita com base no mapa do ano safra 2008/09.

O filtro “4253H, Twice” mostrou ser eficiente em função da facilidade e da rapidez na sua aplicação (Figura 3a).

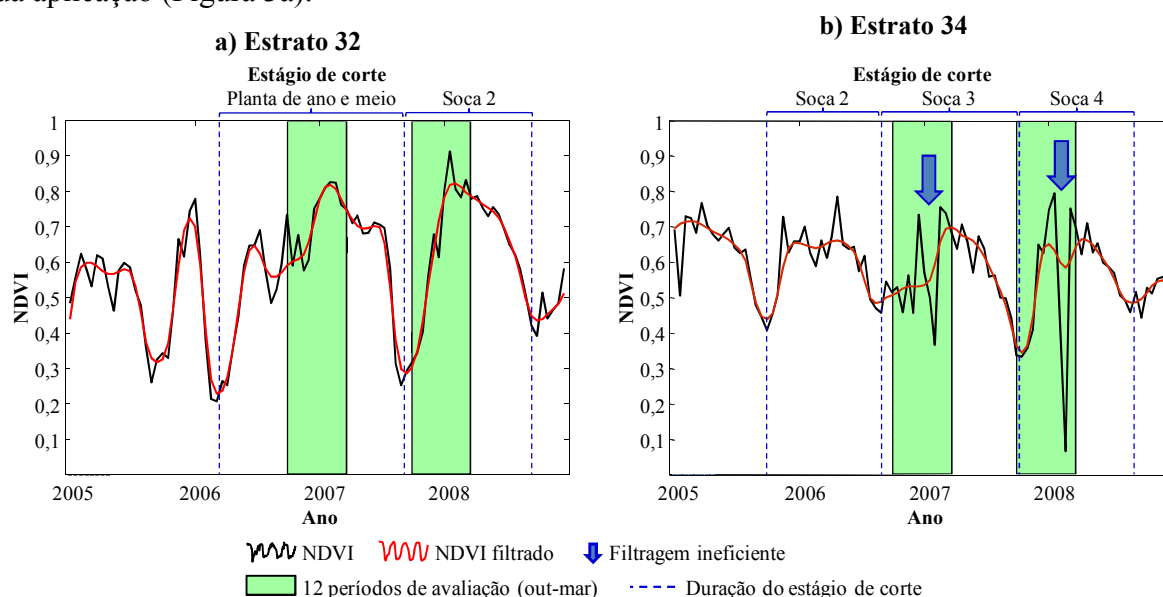


Figura 3 - Perfil temporal de um pixel de NDVI proveniente do produto MOD13Q1 sem filtro e com filtro entre os anos de 2005 e 2008, a duração dos 12 períodos de avaliação em cada ano safra e os estágios de corte da cana-de-açúcar, pertencente ao extrato: a) Expansão 2006 e; b) Expansão 2004, com filtragem ineficiente.

Contudo, o filtro não foi eficiente para casos em que ocorreu uma variação excessivamente brusca na série temporal, conforme o exemplo apresentado na Figura 3b. Embora possa trazer perda de dados, a filtragem é uma etapa necessária para trabalhos que envolvam análise de séries temporais, pois na grande maioria dos casos elimina os ruídos e suaviza os dados, sem perda de informação.

Os perfis temporais de NDVI apresentados na Figura 3 demonstraram que os 12 períodos selecionados em cada ano safra neste estudo representaram os períodos de máxima taxa de crescimento vegetativo das lavouras de cana-de-açúcar, em concordância com o que foi relatado por Casagrande (1991).

No perfil temporal pertencente ao extrato 32 (Figuras 3a), é possível observar dois estágios de corte da cana-de-açúcar, sendo um de Planta (cana planta de ano e meio), seguido de Soca 2, precedidos por uma cultura anual. O perfil temporal da Planta mostra que do plantio até a colheita (queda brusca do NDVI) se passaram cerca de um ano e meio.

As variações dos valores de NDVI por período, nos três anos safra podem ser observadas na Figura 4. Por meio desta figura é possível notar que a variabilidade do NDVI é grande nos primeiros períodos, dado pelas amostras de cana-planta de ano e meio, que estão mais desenvolvidas vegetativamente e pelas amostras de cana-soca, menos desenvolvidas. Esta variabilidade diminui nos períodos finais, onde o crescimento da planta pode ter estabilizado. No entanto, esta estabilidade no crescimento pode sugerir que o NDVI para a cultura da cana-de-açúcar satura próximo de 0,9 (Figura 4); ou seja, acima deste valor o NDVI não é capaz de expressar o aumento de biomassa.

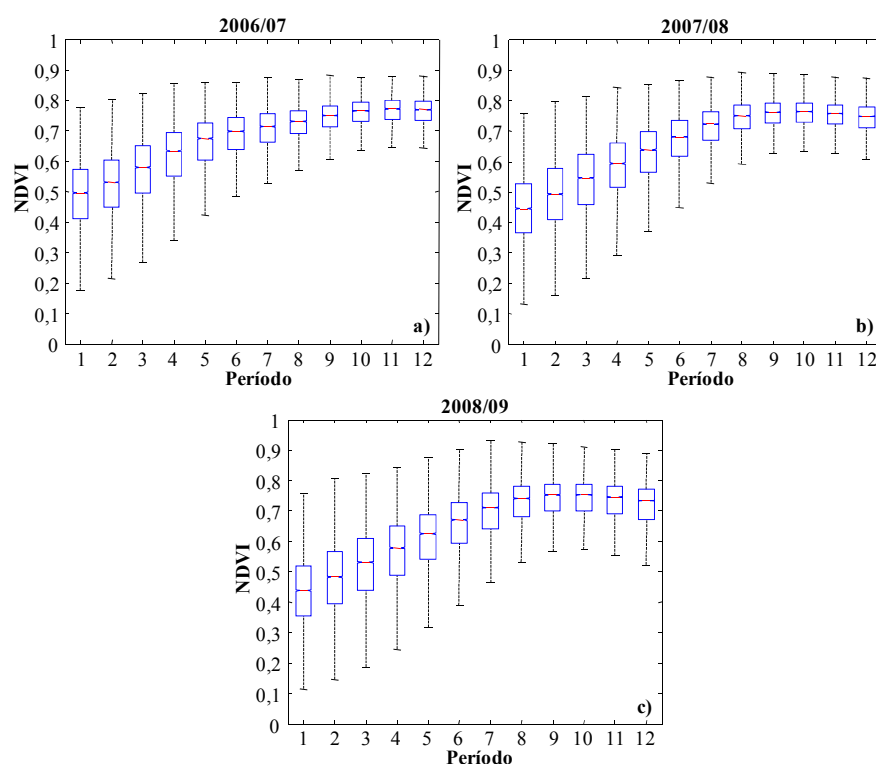


Figura 4 - Perfil temporal do NDVI dos 12 períodos avaliados (Tabela 2) em três anos-safra no estado de São Paulo: a) 2006/07; b) 2007/08 e; c) 2008/09.

As medianas dos NDVIs acumulados decresceram à medida que ocorreu o aumento do número de cortes na cultura de cana-de-açúcar (ao nível de significância de 5%) (Figura 5). Este fato é observado tanto para o mesmo estrato ao longo dos anos safra avaliados, como para os diferentes estratos dentro de um ano safra, indicando que os dados espectrais são sensíveis à esperada redução de produtividade agrícola observada com o avanço dos estágios de corte da cana-de-açúcar (CTC, 2008).

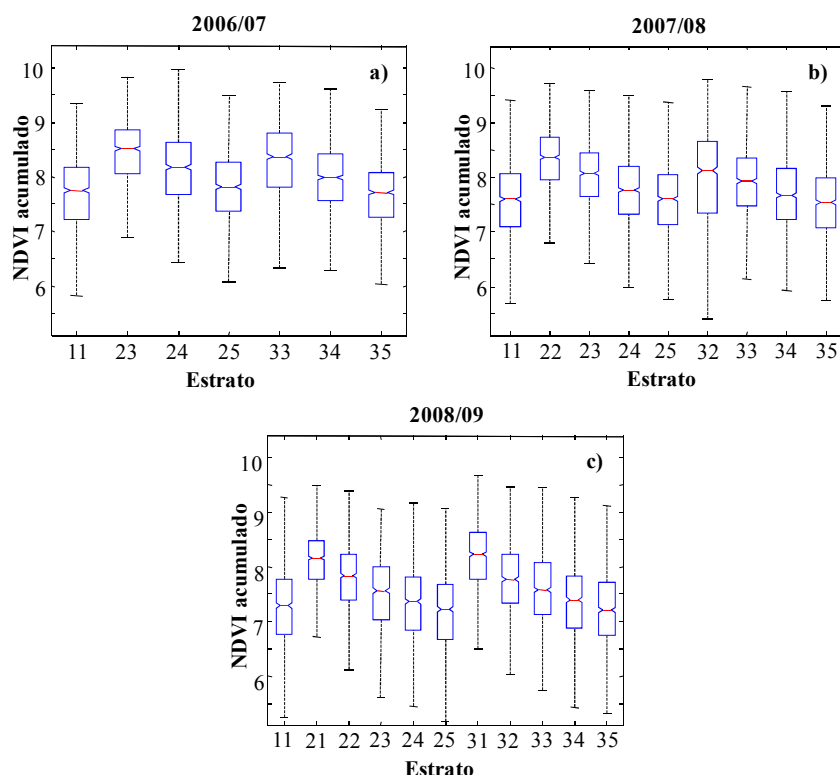


Figura 5 - NDVI acumulado nos 12 períodos avaliados (Tabela 2) por ano safra em cada estrato (Tabela 1), nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar amostradas no estado de São Paulo: a) 2006/07; b) 2006/07 e; c) 2008/09.

Diferenças expressivas nas medianas do NDVI acumulado não foram observadas nos estratos com lavouras no mesmo estágio de corte dentro de um mesmo ano safra, o que indica que as taxas de crescimento vegetativo são semelhantes para estes estratos.

As médias do NDVI acumulado para as amostras de áreas de cultivo de cana-de-açúcar avaliadas no estado de São Paulo foram: a) 7,86 em 2006/07; b) 7,77 em 2007/08 e; c) 7,59 em 2008/09. Os valores médios tendem a decrescer ao longo dos anos safra analisados por refletir a presença de mais amostras nos estágios de corte de cana-soca do que de cana-planta (Tabela 3).

4. Conclusões

As séries temporais de NDVI derivadas do sensor Modis/Terra tiveram a capacidade de expressar a variação no crescimento vegetativo da cultura da cana-de-açúcar ao longo de um ano safra, em diferentes anos safra e em função do estágio de corte. Desta forma, estas séries temporais podem ser utilizadas para estimar variáveis biofísicas utilizadas em modelos agrônômicos de estimativa de produtividade agrícola da cana-de-açúcar.

Agradecimentos

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo financiamento da pesquisa.

Referências Bibliográficas

Carreiras, J. M. B., Pereira, J. M. C., Shimabukuro, Y. E.; Stroppiana, D. Evaluation of compositing algorithms over the Brazilian Amazon using SPOT-4 VEGETATION data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 17, p. 3427-3440, Sep. 2003.

Casagrande, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, SP: FUNEP, 1991. 157 p.

Centro de Tecnologia Canavieira (CTC). **Censo varietal e de produtividade em 2008**. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira, 2008. 16 p.

Duveiller, G.; Defourny, P. A conceptual framework to define the spatial resolution requirements for agricultural monitoring using remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 11, p. 2637-2650, Jul. 2010.

Guissard, V., Defourny, P., Ledent, J. F. Crop specific information extraction based on coarse resolution pixel sampling. In: 2nd VEGETATION International Users Conference, Antwerp, Belgium, 2004. **Proceedings...** Disponível em: <http://www.vgt.vito.be/vgtapen/pages/fullpapers/guissard_full.pdf>. Acesso em 19 Set. 2010.

Hird, J. N.; Mcdermid, G. J. Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 113 n. 1, p. 248-258, Jan. 2009.

Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais (INPE). Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR). **Canasat - Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/canasat/>>. Acesso em: 21 Nov. 2010.

Mcgill, R.; Tukey, J. W.; Larsen, W. A. Variations of Box Plots. **The American Statistician**, v. 32, n. 1, p. 12-16, Feb. 1978.

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, Apr. 2010.

Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E.; Ceballos, J. C. **O sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil**. 1 ed. São José dos Campos, SP: Parêntese Editora, 2007. 423p.

Rudorff, B. F. T.; Sugawara, L. M. Mapeamento da cana-de-açúcar na região Centro-Sul via imagens de satélites. **Informe Agropecuário**, v. 28, n. 241, p. 79-86, Nov./Dez. 2007.

Salomé, J. L.; Sakai, R. H.; Ambrosano, E. Viabilidade econômica da rotação de adubos verdes com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, n. 2, p. 116-119, Out. 2007.

Segato, S. V.; Mattiuz, C. F. M.; Mozambani, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; Pinto, A. S.; Jendiroba, E. Nóbrega, J. C. M. (org.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 19-36.

Velleman, P. F. Definition and Comparison of Robust Nonlinear Data Smoothing Algorithms. **Journal of the American Statistical Association**, v. 75, n. 371, p. 609-615, Sep. 1980.