

## Monitoramento da cultura da cana-de-açúcar utilizando a Transformada de *Wavelet* em séries temporais de dados EVI/MODIS

João Francisco Gonçalves Antunes<sup>1,2</sup>  
Rubens Augusto Camargo Lamparelli<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Embrapa Informática Agropecuária (Doutorando na Feagri/Unicamp)  
Caixa Postal 6041 - 13083-886 - Campinas - SP, Brasil  
joaof@cnptia.embrapa.br

<sup>2</sup> Faculdade de Engenharia Agrícola - Feagri/Unicamp  
Caixa Postal 6011 - 13083-875 - Campinas - SP, Brasil

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas Meteorológicas e Agrícolas aplicadas a Agricultura - Cepagri/Unicamp  
Cidade Universitária "Zeferino Vaz" - 13083-970 - Campinas - SP  
rubens@cpa.unicamp.br

**Abstract.** MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data provide coverage of large areas and high periodicity. These characteristics are fundamental for monitoring strategic agricultural crops in Brazil, such as sugarcane. The harmonic analysis is a technique that is being applied to time-series of remote sensing imagery to characterize the phenology of vegetation and to better understand its dynamics. This study aimed to carry out the monitoring of two sugarcane crop areas in the center of São Paulo State using the Wavelet Transform applied to a time-series of EVI (Enhanced Vegetation Index) MODIS data between 2005 and 2009, in order to analyze the dynamics of the vegetation phenology. The results showed that the Coiflet Wavelet Transform of order 4 with a power of 90% was able to remove the high frequency noise and highlight the changes of the vegetation phenology with a higher precision, allowing a better analysis of trends in the interannual variability of the EVI index. The EVI temporal profiles have shown that the phenology of sugarcane crop areas have greater amplitude of EVI values due to the temporal variation of biomass. The relationship between EVI and rainfall seasonality can point out the productive potential of sugarcane, which allow to compare the nowadays conditions to previous cropping seasons conditions.

**Palavras-chave:** remote sensing, image processing, temporal profiles, sensoriamento remoto, processamento de imagens, perfis temporais.

### 1. Introdução

O setor agrícola brasileiro está sendo marcado por um novo ciclo no plantio da cana-de-açúcar para obtenção do álcool combustível. O Brasil é hoje o maior produtor de cana-de-açúcar e exportador de açúcar e etanol do mundo gerando, anualmente, mais de 2 bilhões de dólares para a balança comercial brasileira. A região Centro-Sul produz quase toda a cana-de-açúcar do país, em que o Estado de São Paulo é o maior produtor nacional, onde vários municípios têm grandes áreas de plantio e várias usinas instaladas (UNICA, 2008).

A cana-de-açúcar é uma poácea e como permite vários cortes anuais é considerada semiperene, permitindo cerca de cinco cortes para posteriormente ser feita a reforma do canal. Possui um rápido crescimento, reprodução abundante e o aproveitamento econômico de grande parte da planta. O ciclo de desenvolvimento é composto pelas fases de brotação, perfilhamento, crescimento e maturação. Do plantio até o primeiro corte recebe o nome de cana-planta, cujo ciclo tem duração entre 12 a 18 meses, dependendo da época e da região de plantio. Após o primeiro corte, a rebrota da cana-de-açúcar passa a ter um ciclo de 12 meses, sendo denominada cana-soca. No Estado de São Paulo, o plantio da cana-de-açúcar ocorre entre os meses de agosto a outubro para a cana-soca e de outubro a abril para a cana-planta. A colheita predominantemente estende-se entre os meses de abril a novembro (Paranhos, 1987).

Os satélites ambientais vêm operando de forma sistemática nos últimos anos, provendo uma visão sinóptica e frequente de grandes áreas, a custos baixos. As imagens geradas pelos sensores orbitais a bordo desses satélites têm características que possibilitam o estudo e a análise do ciclo de desenvolvimento de culturas agrícolas.

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo das plataformas orbitais do programa internacional EOS (*Earth Observing System*), liderado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), tem gerado dados processados para estudos globais da vegetação. O satélite Terra foi lançado em dezembro de 1999 e tem passagem pelo Equador às 10h30 (horário local), em órbita descendente (Soares et al., 2007).

Os dados MODIS de moderada resolução espacial, elevada repetitividade temporal, boa qualidade radiométrica, alta precisão geométrica, com correção atmosférica e de distribuição gratuita, possuem características que proporcionam um grande potencial de aplicação no monitoramento da cultura da cana-de-açúcar (Xavier et al., 2006).

Dos dados MODIS é possível extrair os produtos de índices de vegetação que realçam a resposta espectral das plantas e amenizam a influência do solo, com o propósito de distinguir a fenologia da vegetação e as alterações do uso e da cobertura do solo na análise ao longo de uma série temporal de imagens (Wardlow et al., 2007).

A análise harmônica vem sendo empregada no estudo de longas séries temporais de índices de vegetação baseada nas mudanças que acontecem na superfície terrestre, o que facilita o entendimento da dinâmica temporal.

Uma das técnicas utilizadas em séries temporais que normalmente não têm periodicidade devido a inerente variabilidade do vigor da vegetação é a Transformada de *Wavelet* (Ondaletas), que se baseia no ajuste de uma curva com a finalidade de remover as altas frequências associadas a ruídos, permanecendo sensível às mudanças da fenologia da planta. Essa transformação matemática é aplicada no processamento de sinais não-estacionários para decompor e recompor dados em diferentes escalas temporais, para obtenção de informações ocultas no domínio da frequência, onde cada escala é representada por uma frequência específica (Sakamoto et al., 2005).

Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi realizar o monitoramento da cultura da cana-de-açúcar no noroeste do Estado de São Paulo, utilizando a Transformada de *Wavelet* em séries temporais de dados EVI/MODIS, do ano de 2005 a 2009.

## 2. Metodologia de Trabalho

O monitoramento temporal da cultura da cana-de-açúcar foi realizado em duas áreas localizadas no centro do Estado de São Paulo entre as cidades de Bauru e São Carlos, extraídas de um mapa temático de referência dessa região que é significativamente representativa das condições da cultura, nas seguintes coordenadas: área 1 - latitude 22° 10' 50" S e longitude 48° 12' 51" O; área 2 - latitude 22° 15' 2" S e longitude 47° 57' 51" O. Em cada área de cultivo da cana-de-açúcar foram coletados os dados espectrais numa janela de tamanho 2 x 2 pixels, resultando numa área amostral de 250.000 m<sup>2</sup>, bastante homogênea e com baixa mistura espectral.

Para este estudo foi utilizado o produto Índice de Vegetação MOD13Q1 do MODIS/Terra na resolução espacial de 250 m, obtidos gratuitamente do LP-DAAC (*Land Processes Distributed Active Archive Center*), pertencente ao EOS da NASA, em forma de quadrantes (*tiles*) de 1.200 km por 1.200 km, no formato HDF (*Hierarchical Data Format*) e na projeção cartográfica sinusoidal (LP-DAAC, 2009).

A manipulação dos dados para seleção do produto, mosaico, recorte da área de interesse e definição da projeção cartográfica, foi realizada automaticamente por meio de rotinas implementadas na linguagem IDL (*Interactive Data Language*) do software ENVI (*The*

*Environment for Visualizing Images*), com a execução de programas do pacote computacional gratuito MRTTools (*MODIS Reprojection Tools*).

O produto MOD13Q1 consiste de composições dos pixels de alta qualidade radiométrica, melhor geometria de observação, mínima presença de nuvens e aerossóis, selecionados das imagens diárias durante o período de 16 dias. A atual versão é a coleção 5 que possui mudanças significativas para aumentar a qualidade dos produtos (Latorre et al., 2007).

A banda do produto MOD13Q1 selecionada para este trabalho foi a do EVI (*Enhanced Vegetation Index*), com o propósito de melhor representar a dinâmica da vegetação ao longo da série temporal. Segundo Huete et al. (2002), o EVI foi desenvolvido para otimizar a resposta espectral da vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, além de propiciar o monitoramento da vegetação através da redução dos efeitos de substrato do dossel e de influências atmosféricas, calculado pela Equação (1):

$$EVI = G \times \left[ \frac{(IVP - VER)}{(IVP + C_1 \times VER - C_2 \times AZU + L)} \right] \quad (1)$$

onde:

AZU: refletância na banda 3 do azul (459 a 479 nm);

VER: refletância na banda 1 do vermelho (620 a 670 nm);

IVP: refletância na banda 2 do infravermelho próximo (841 a 876 nm);

G = 2,59: fator de ganho;

L = 1: fator de ajuste do substrato do dossel;

C<sub>1</sub> = 6,0 e C<sub>2</sub> = 7,5: coeficientes da resistência de aerossóis que utiliza a banda do azul para atenuar a influência dos aerossóis na banda do vermelho.

A informação de confiabilidade (*reliability*) do pixel MODIS foi utilizada para mascarar os pixels das composições de EVI contaminados por nuvens. Nesses casos, o valor do pixel da composição de EVI foi substituído pela média da composição anterior e posterior, como forma de assegurar uma adequada continuidade das séries temporais.

A distribuição das chuvas nas áreas de cultivo da cana-de-açúcar durante o ano pode afetar o padrão dos picos de fenologia da vegetação. Para auxiliar na análise da dinâmica temporal foram utilizados os dados de precipitação acumulada calculada por interpolação de 195 estações pluviométricas do Agritempo (Sistema de Monitoramento Agrometeorológico) (Embrapa Informática Agropecuária e Cepagri/Unicamp, 2009), no Estado de São Paulo.

Para decomposição e filtragem da série temporal de EVI/MODIS foi utilizada a Transformada de *Wavelet* discreta, onde  $\phi(t)$  é uma função de oscilação com energia finita e média nula, conforme a Equação (2):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(t) dt = 0 \quad (2)$$

A Transformada de *Wavelet* W(a,b) é definida pela Equação (3):

$$W(a,b)_i = \frac{1}{\sqrt{a}} \int \phi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) s(t) dt \quad (3)$$

onde, s(t) é o sinal de entrada analisado e  $\phi^*$  é a *wavelet* mãe ou base. Nesta equação, a largura da *wavelet* é determinada pelo parâmetro de escala “a” enquanto o seu centro é determinada pelo parâmetro “b”. A variável “t” representa o intervalo de tempo na série temporal na qual é realizada a integração. A Transformada de *Wavelet* tem a vantagem de manter as informações relacionadas à largura (escala) e a localização (tempo) das características presentes em s(t). A Equação (4) é utilizada para reconstruir o sinal.

$$W = \sum_{i=1}^x W(a,b)_i \quad (4)$$

A série temporal de *wavelet*  $W$  é um somatório das *wavelets* de larguras decrescentes de “ $i$ ” a “ $x$ ”, onde “ $x$ ” é número de transformações necessárias para alcançar o número definido de coeficientes retidos dos dados de entrada. A filtragem *wavelet* inicia-se com a aplicação da função de suavização na série temporal para remover os ruídos de alta frequência. A série temporal suavizada de EVI é então reconstruída com a Transformada de *Wavelet* discreta.

A aplicação da Transformada de *Wavelet* numa série temporal de EVI requer a definição dos parâmetros ordem e potência da *wavelet* mãe que definem o comportamento da curva. Ordem é uma medida de suavidade, em que valores mais elevados produzem mais suavização. Potência corresponde ao número de coeficientes retidos da série temporal de EVI. Uma maior potência gera uma *wavelet* mais estreita com mais detalhes de escala, mas pode reter mais ruído. Uma menor potência remove mais ruído pela forma mais larga da *wavelet*, podendo capturar tendências, mas pode perder detalhes fenológicos (Galford et al., 2008).

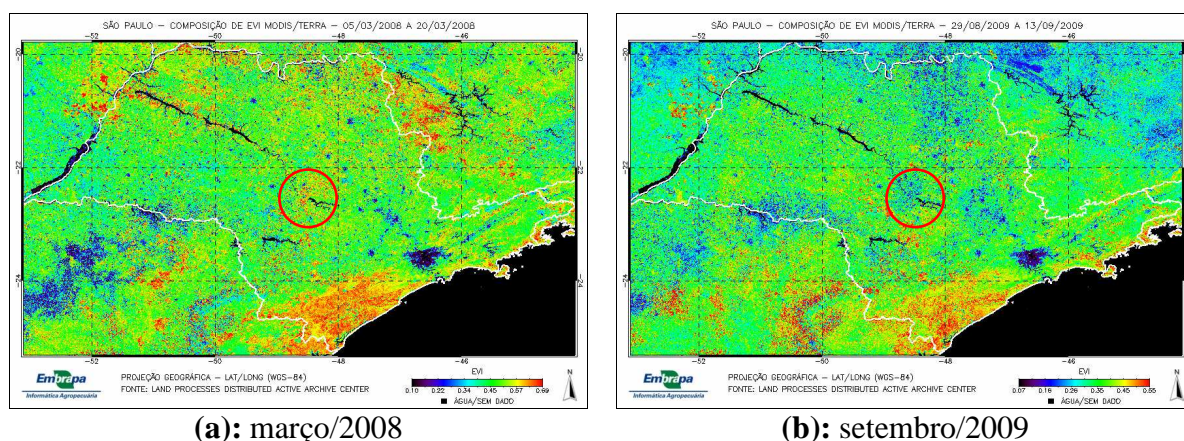
Nesse estudo foi utilizada a *wavelet* mãe discreta denominada Coiflet, ortogonal e aproximadamente simétrica, de ordem 4, por ter a forma mais similar aos picos fenológicos. A potência empregada foi de 90% para detectar os picos na série temporal suavizada de EVI com mais precisão e, assim, propiciar uma melhor análise dos padrões da fenologia da vegetação (Sakamoto et al., 2005). Apenas para investigar as tendências da série temporal de EVI, também foi utilizada a potência de 80% e 70%.

O processamento foi realizado por meio do pacote IDL *Wavelet Toolkit* do software ENVI, que é uma implementação de um conjunto de interfaces gráficas e rotinas para a Transformada de *Wavelet*, baseada em Torrence e Compo (1998).

### 3. Resultados e Discussão

O processamento das imagens MOD13Q1 consistiu no mosaico dos quadrantes H13V10 e H13V11 que cobrem a área de estudo, a transformação para a projeção cartográfica geográfica, o recorte para os limites do Estado de São Paulo, a extração do produto EVI e a gravação no formato GeoTIFF. A partir disso foram então obtidas as composições de 16 dias de EVI do período de janeiro a dezembro dos anos de 2005 a 2009, sendo 23 imagens para cada ano, totalizando 115 imagens de toda a série temporal.

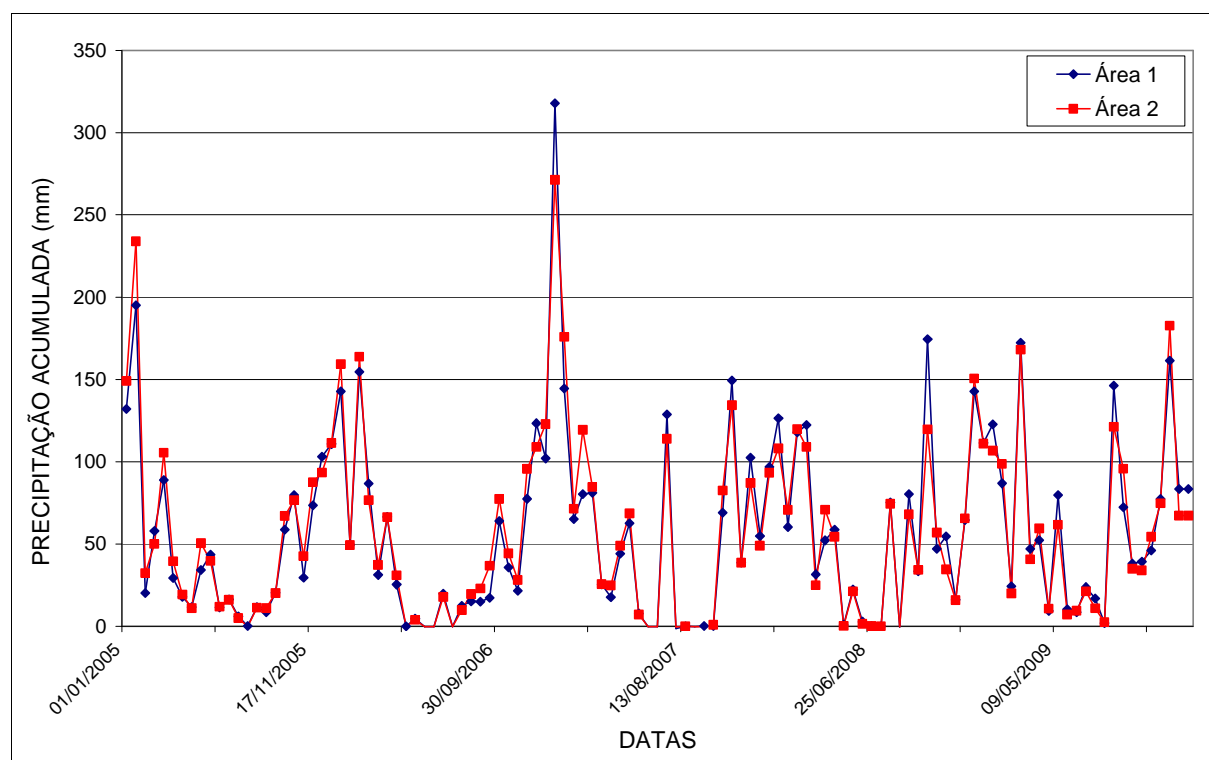
A **Figura 1** apresenta duas composições de EVI, de 05 a 20 de março de 2008 e de 29 de agosto a 13 setembro de 2009, onde, numa visão geral, colorações mais alaranjadas representam maior biomassa, colorações esverdeadas baixa biomassa, colorações azuladas solo exposto e preto corpos d’água.



**Figura 1:** Composições de 16 dias de EVI - safra 2008/2009 - São Paulo.

As áreas de cultivo da cana-de-açúcar podem ser analisadas visualmente por meio da evolução temporal das composições de 16 dias de EVI. Tomando como base essa safra 2008/2009, pode-se observar no centro do Estado de São Paulo, destacado por um círculo vermelho nos mapas, que em março de 2008 (**Figura 1a**) a cana-de-açúcar encontrava-se na fase de maturação, correspondente ao período de maior vegetativo com os valores mais altos de EVI representados pelas áreas de coloração alaranjada mais intensa. Nessa região, a cana-de-açúcar já havia sido colhida em setembro de 2009 (**Figura 1b**), onde é possível notar a grande extensão de solo exposto com baixos valores de EVI representados pelas áreas de coloração azulada, onde ocorrerá a brotação da nova safra.

A **Figura 2** mostra o gráfico dos dados de precipitação acumulada de 16 dias nas duas áreas de cana-de-açúcar monitoradas entre os anos de 2005 e 2009.



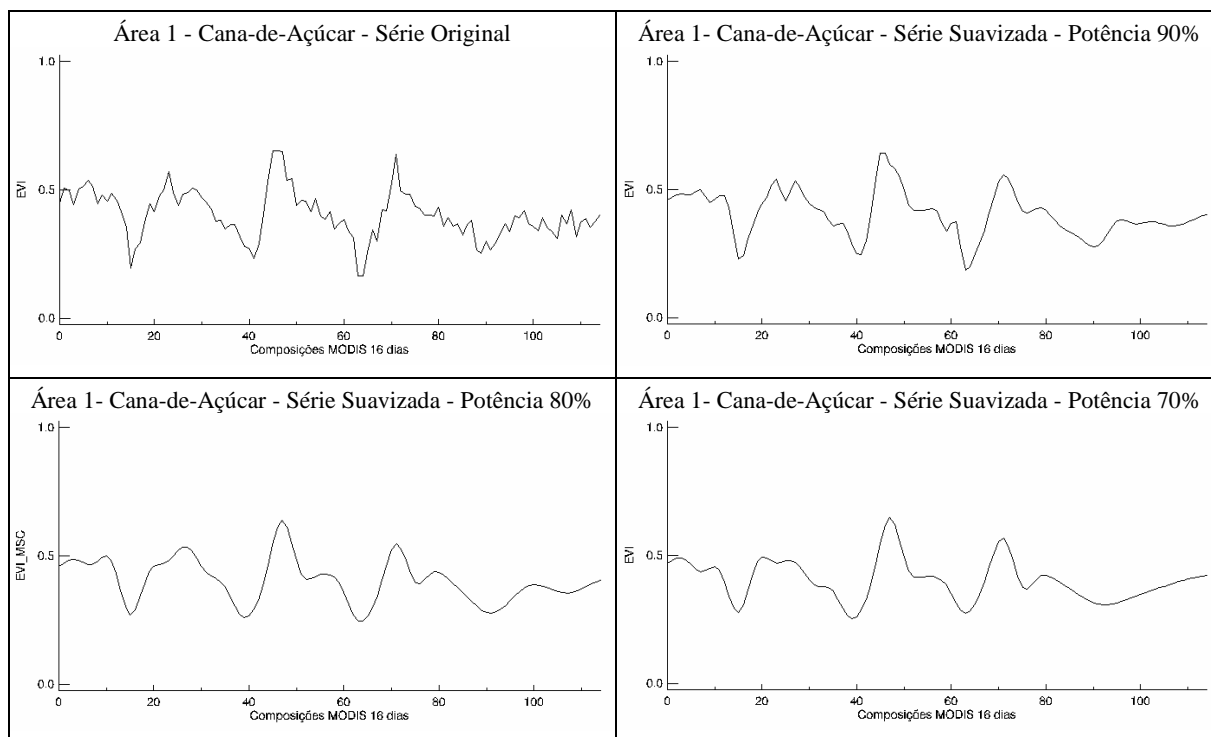
**Figura 2:** Precipitação acumulada em 16 dias nas duas áreas monitoradas entre 2005 e 2009. Fonte: Agritempo (2009).

Pode-se perceber que o regime anual da precipitação acumulada de 16 dias nas duas áreas monitoradas tem oscilações semelhantes, com os períodos de seca ocorrendo de abril a agosto, registrando no máximo 50 mm de chuva, e com os períodos chuvosos estendendo-se de setembro a março, quando se registram volumes por volta de 300 mm. A distribuição sazonal de chuvas no centro do Estado de São Paulo determina uma alternância nas condições das áreas de cultivo da cana-de-açúcar, o que pode afetar o padrão de fenologia da vegetação.

Com base no que foi discutido anteriormente, o monitoramento das duas áreas de cana-de-açúcar no centro do Estado de São Paulo foi realizado utilizando-se a Transformada de *Wavelet* aplicada à série temporal de EVI, do ano de 2005 a 2009, para analisar a dinâmica da fenologia da vegetação, conforme apresentado na sequência das **Figuras 3 e 4**.

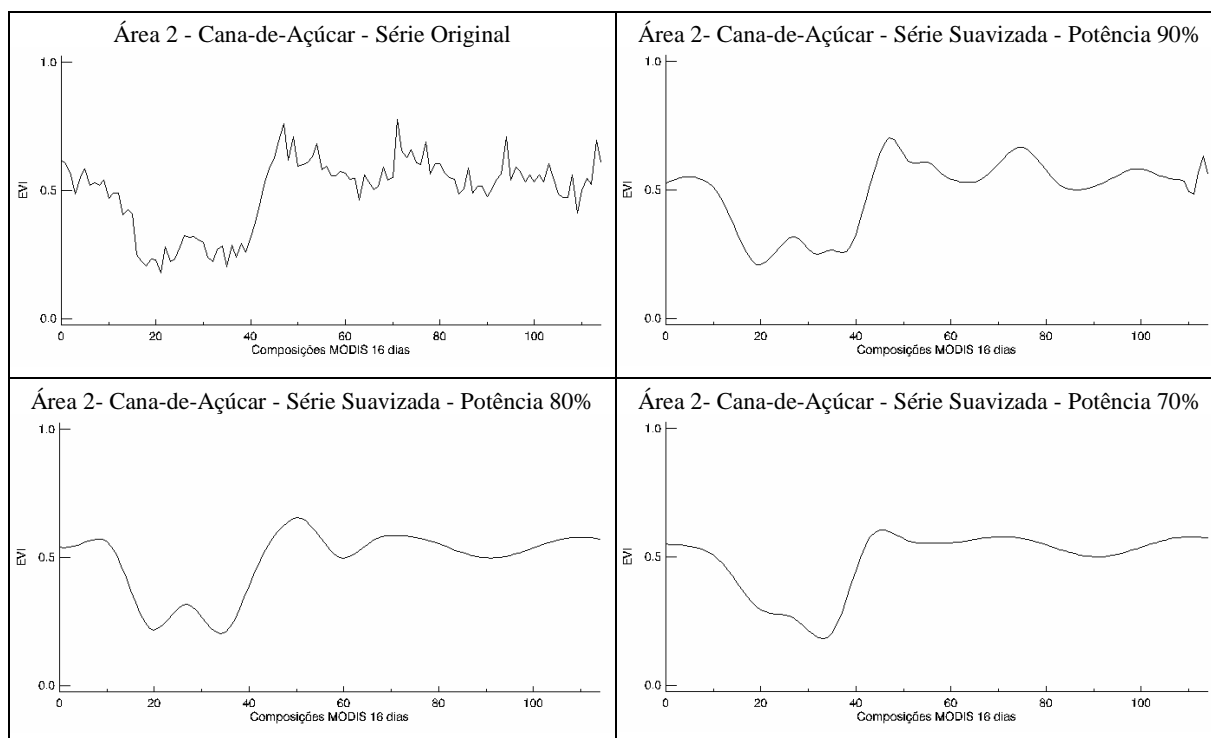
Para auxiliar na compreensão dos gráficos, a composição MODIS de 16 dias número 1 inicia-se em 01/01/2005, a número 20 em 01/11/2005, a número 40 em 14/09/2006, a número 60 em 28/07/2007, a número 80 em 09/06/2008, a número 100 em 23/04/2009 e a número 115 em 29/12/2009.

A **Figura 3** mostra os gráficos do perfil de EVI original e suavizado pela *Wavelet Coiflet*, de ordem 4, com potência de 90%, 80% e 70%, da área 1 de cana-de-açúcar.



**Figura 3:** Perfil temporal de EVI da área 1 de cana-de-açúcar monitorada entre 2005 e 2009.

A **Figura 4** mostra os gráficos do perfil de EVI original e suavizado pela *Wavelet Coiflet*, de ordem 4, com potência de 90%, 80% e 70%, da área 2 de cana-de-açúcar.



**Figura 4:** Perfil temporal de EVI da área 2 de cana-de-açúcar monitorada entre 2005 e 2009.

A fenologia da área 1 (**Figura 3**) e da área 4 (**Figura 4**) tem grandes variações do EVI, relacionado ao desenvolvimento da cana-de-açúcar durante o ano, onde a cultura é caracterizada por picos na série temporal. De forma geral, entre os meses de agosto e novembro a cana-de-açúcar está na fase de perfilhamento e os valores de EVI são baixos, aumentando fortemente a partir de dezembro na fase de crescimento, com o período de maior vigor vegetativo ocorrendo em março na fase de maturação, decrescendo a partir de abril quando se inicia a colheita.

Baseado na análise das séries temporais, na área 1 o EVI pode crescer de 0,16 no início do ciclo da cana-de-açúcar a 0,65 no pico vegetativo, com valor médio de 0,40, mostrando quatro ciclos de desenvolvimento com a rebrota da cana-soca a cada corte. Já na área 2, o EVI varia de 0,18 no início do ciclo da cana-de-açúcar a 0,78 no pico vegetativo, com valor médio de 0,50, mostrando três ciclos de desenvolvimento com a rebrota da cana-soca a cada corte, onde se observa que em outubro de 2005 ocorreu a reforma do canavial com o plantio da cana-planta. Nas duas áreas, essa variação brusca do EVI está relacionada à alta dinâmica espectral da cultura da cana-de-açúcar, que apresenta solo exposto no início do ciclo de desenvolvimento e alta quantidade de biomassa no período de maior vegetativo.

As séries temporais suavizadas com potência de 80% e 70% apresentam a tendência de grandes variações do EVI ao longo dos anos relacionada ao número de ciclos de desenvolvimento que ocorreu em cada área, no entanto as curvas têm uma diminuição dos valores mais altos e perdem picos anuais muito importantes de caracterização da fenologia da cana-de-açúcar.

Na comparação dos resultados das **Figuras 3 e 4** com os dados de precipitação acumulada mostrados na **Figura 2**, verificou-se que nas áreas 1 e 2 de cana-de-açúcar, os picos de biomassa são coincidentes aos períodos de maior quantidade de chuvas, ainda que exista um intervalo de tempo entre o início da época chuvosa e a resposta da vegetação.

Nos períodos em que a distribuição das chuvas foi mais regular com a maior quantidade de chuvas ocorrendo no início do ano, como em 2007, o pico vegetativo da cana-de-açúcar atingiu maiores valores de EVI, o que indica que a precipitação influencia diretamente o comportamento temporal do EVI. Esse fato pode explicar a variabilidade da produtividade da cana-de-açúcar em safras com regimes de precipitação favoráveis, numa comparação das condições atuais da cultura com as condições apresentadas em safras passadas.

O ajuste da curva gerada pela Transformada da *Wavelet* Coiflet, de ordem 4 com potência de 90%, foi avaliado através do erro RMS (*Root Mean Square*), entre a diferença da série temporal de EVI original e a suavizada, para as duas áreas de cana-de-açúcar monitoradas, conforme mostrado na **Tabela 1**.

**Tabela 1:** Coeficientes retidos e erro RMS das curvas suavizadas para as duas áreas.

Área	Coeficientes Retidos (%)	Erro RMS	Erro RMS (%)
1	19,5	0,0287	30,5
2	12,5	0,0435	30,7

Os ajustes da curva suavizada para as duas áreas obtiveram desempenho semelhante, com a magnitude do erro RMS em torno de 30,5%. O ajuste da área 2 pode ser considerado o mais preciso porque reteve apenas 12,5% dos coeficientes da série temporal original para reconstrução da curva suavizada, com praticamente o mesmo nível de erro.

#### 4. Conclusões

Os resultados deste trabalho mostraram o potencial do monitoramento temporal na detecção de padrões de fenologia da cultura da cana-de-açúcar, cujo entendimento é importante para se verificar suas variações interanuais.

A Transformada de Wavelet Coiflet, de ordem 4 com potência de 90%, aplicada à série temporal de EVI/MODIS, conseguiu remover os ruídos de alta frequência e destacar melhor as mudanças de fenologia da cana-de-açúcar, gerando uma curva com mais detalhes que facilitou o entendimento da dinâmica temporal.

A relação entre o EVI e a sazonalidade da precipitação pode indicar o potencial produtivo da cana-de-açúcar, o que permite comparar as condições atuais da cultura com as condições apresentadas em safras passadas.

## Referências Bibliográficas

Embrapa Informática Agropecuária; Cepagri/Unicamp. **Agritempo**. Disponível em <<http://www.agritempo.gov.br/>>. Acesso em: 18 ago. 2009.

Galford, G. L.; Mustard, J. F.; Melillo, J.; Gendrin, A.; Cerri, C. C., Cerri, C. E. P. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 2, p. 576-587, 2008.

Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. (Special Issue). **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n.1-2, p. 195-213, 2002.

Land Processes Distributed Active Archive Center (LP-DAAC). **MODIS Data Pool Holdings**. Disponível em <[https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get\\_data/data\\_pool](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/data_pool)>. Acesso em 10. nov. 2009.

Latorre, M. L.; Shimabukuro, Y. E.; Anderson, L. O. **Sensor MODIS: Produtos para Ecossistemas Terrestres - MODLAND**. In: O Sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil - Shimabukuro, Y. E.; Rudorff, B. F. T.; Ceballos, J. C. (Coords). São José dos Campos: Editora Parêntese, SP, Brasil, 2007.

Paranhos, S. B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Cargill, v. 1, 431 p., 1987.

Sakamoto, T.; Yokozawa, M.; Toritani, H.; Shibayama, M.; Ishitsuka, N.; Ohno, H. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, n. 3-4, p. 366-374, 2005.

Soares, J. V.; Batista, G. T.; Shimabukuro, Y. E. **Sensor MODIS: Histórico e Descrição**. In: O Sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil - Shimabukuro, Y. E.; Rudorff, B. F. T.; Ceballos, J. C. (Coords). São José dos Campos: Editora Parêntese, SP, Brasil, 2007.

Torrence, C.; Compo, G. P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 1, p. 61-78, 1998.

União da Agroindústria Canavieira de São Paulo (UNICA). **Dados e Cotações - Estatísticas**. Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br/>>. Acesso em: 02. jun. 2008.

Xavier, A. C.; Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E.; Berka, L. M. S. B.; Moreira, M. A. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 4, p. 55-768, 2006.

Wardlow, B. D.; Egbert, S. L.; Kastens, J. H. Analysis of time-series MODIS 250m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, n. 3, p. 290-310, 2007.