

# **Análise harmônica de séries temporais de imagens NDVI/MODIS para discriminação de coberturas vegetais**

Daniel de Castro Victoria<sup>1</sup>  
Aryeverton Fortes de Oliveira<sup>1</sup>  
Célia Regina Grego<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Embrapa Monitoramento por Satélite  
Av. Soldado Passarinho, 303. Fazenda Chapadão. Campinas, SP. CEP: 13070-115.  
Telefone: (19) 3211-6200  
{daniel,ary,crgrego}@cnpm.embrapa.br

**Abstract.** The high temporal resolution information obtained with the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) is of great value when it comes to monitoring changes in Earth surface. Since several land cover types presents a distinguished temporal pattern in it's spectral response, MODIS high temporal resolution can be used to identify such covers. This is specially true when observing the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of agricultural land covers. Fourier transformations decomposes any signal represented in time to a frequency domain. Applying this transformation in a NDVI time-series results in parameters that describe how this signal behaves along several time frequencies (annual, semestral, etc). A strong annual signal indicates a land cover with a long growth cycle, such as sugar-cane (1 to 1.5 years) while stronger semestral signals are typical of other agricultural crops (soy, corn, beans). Also, observing the annual and semestral signals, it's possible to distinguish agricultural areas with one or two crop cycles per year. A computational routine, independent of any commercial remote sensing package, has been developed in order to calculate Fourier amplitude and phase images of a NDVI time series. Applying such analysis over a diverse agricultural region in São Paulo state (Ribeirão Preto) indicates that long and short growth period crops are easily distinguished (sugar-cane and annual crops such as soy, corn, beans). Silvicultural areas are also easily distinguished due to their long growth period (5 years) however, these are confused with natural forests. A longer time series analysis could easily solve this.

**Palavras-chave:** MODIS, NDVI, time series, Fourier, series temporais.

## **1. Introdução**

A alta resolução temporal do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) permite acompanhar as alterações da cobertura da Terra de forma quase contínua, além de ser imprescindível para a geração de imagens compostas temporais com menor interferência de nuvens, sombras e efeitos de aerossóis. Esta característica, reforçada por um baixo custo de obtenção de produtos, inclusive com imagens compostas de 16 dias livres de nuvens, e a disponibilidade de ferramentas para processamento, amplia as possibilidades de utilização de modelos de análise de séries temporais e reforça a capacidade de interpretação dos fenômenos locais a partir do entendimento dos processos que determinam as alterações na cobertura vegetal ao longo do tempo. Na literatura, a análise de séries temporais de imagens vem sendo muito explorada tanto para as imagens MODIS quanto AVHRR, principalmente de índices de vegetação como NDVI e EVI (Bruce e Mathur,2006; Yu et al.,2004; Lacruz et al., 2005; Jönsson e Eklundh, 2002), com diferentes abordagens metodológicas.

O trabalho convencional de geoprocessamento trata da identificação de uma cobertura a partir de uma resposta espectral pontual no tempo, condicionada a uma série de interferências atmosféricas e ao estado da vegetação em determinado instante. Mesmo com uma melhor resolução espacial, esta abordagem é limitada, por exemplo, quando se depara com áreas recobertas por nuvens e sombras ou áreas de solo exposto, onde a possibilidade de exploração agrícola se abre a uma série de alternativas. Nestes casos, a possibilidade de extração de informações a partir de padrões evolutivos da resposta espectral conta com uma diversidade de modelos para análise de séries temporais, que sumarizam as informações e podem auxiliar na classificação tanto da cobertura quanto do uso das terras.

As diversas coberturas da superfície apresentam padrões de comportamento temporal distintos, principalmente quando analisamos os índices de vegetação de culturas agrícolas e áreas nativas. Enquanto que áreas não vegetadas (cidades e superfícies alagadas) apresentam NDVI sistematicamente baixo ao longo do ano, áreas com uso agrícola apresentam “pulsos” referentes às épocas de crescimento e colheita. Além disso, tais pulsos podem indicar a presença de um ou mais ciclos ao longo do ano, distinguindo locais com culturas de longa duração no campo como cana-de-açúcar, culturas com ciclos semestrais, e até áreas com duas culturas implantadas em apenas um ano. Portanto, uma série temporal de imagens NDVI pode ser utilizada como forma de identificar determinadas coberturas vegetais.

Uma metodologia comumente empregada no estudo de séries temporais, focalizada neste trabalho, utiliza as transformações de Fourier. Algumas aplicações incluem a identificação de diferentes coberturas vegetais naturais, estudo de suas condições fenológicas e a detecção de desflorestamento (Yu et al., 2004; Lacruz et al., 2005). As transformações de Fourier convertem um sinal que ocorre ao longo do tempo em sinais no espaço de frequências. Em termos práticos, significa decompor a variação anual da série temporal de NDVI em sinais que representem a oscilação anual, semestral, quadrimestral e assim por diante. Considerando o comportamento das principais coberturas vegetais temos que, coberturas agrícolas com uma safra no período de 1 ano, como a cana-de-açúcar, apresentam um forte sinal com oscilação anual (primeira componente harmônica) enquanto que o sinal semestral (segunda componente) é baixo. Já culturas agrícolas, com ciclos mais curtos, apresentam forte sinal semestral (segunda componente), principalmente quando são feitas duas safras no ano. Caso seja feita apenas uma safra curta em um ano, a análise de Fourier indicará dois sinais fortes, um anual e outro semestral. Coberturas sem grande variação de NDVI ao longo do ano, como florestas não decíduas e plantações florestais, resultam em baixos sinais anuais e semestrais (primeira e segunda componentes) com elevado sinal constante (componente harmônico zero), referente ao NDVI médio anual da cobertura. Neste caso, florestas plantadas e remanescentes florestais se confundem.

Uma rotina computacional, independente de qualquer pacote comercial de sensoriamento remoto e geoprocessamento, foi desenvolvida de forma a executar a análise das componentes de Fourier em uma série temporal de imagens em formato GeoTiff. São calculadas assim as imagens de amplitude e fase, que indicam a magnitude dos sinais em cada componente e quando que estes atingem seu máximo, respectivamente.

Imagens compostas de 16 dias do índice de vegetação NDVI da região de Ribeirão Preto, SP, no ano de 2005, foram utilizadas para compor a série temporal, com o objetivo de gerar as imagens amplitude da primeira e segunda componentes e mostrar o comportamento temporal do NDVI das diferentes coberturas vegetais, permitindo a separação destas classes.

## 2. Metodologia de Trabalho

Descrevendo brevemente, a análise harmônica permite que uma sequência temporal de números seja reproduzida por um somatório de um termo aditivo e de ondas, definidas por pares de valores de amplitude e fase. Yu et al. (2004) aplicaram a análise harmônica e apresentaram imagens do termo aditivo, amplitude e ângulo de fase para cada termo, uma abordagem utilizada neste trabalho. A transformada discreta de Fourier é dada por (1):

$$F(u) = \frac{1}{T} \sum_{k=0}^{T-1} f(x) e^{-j \frac{2\pi}{T} k} \quad (1)$$

onde  $f(x)$  é uma série de valores amostrais;  $T$  é o número de observações na série temporal;  $k$  é um índice representando a observação atual e  $j$  é um número imaginário. Os termos real e imaginário são transformados nos valores de amplitude e fase a partir das equações (2) e (3):

$$F_{\text{amplitude}} = \left( F_{\text{real}}^2 + F_{\text{imaginário}}^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$F_{\text{fase}} = \text{atan} \left( F_{\text{imaginário}} / F_{\text{real}} \right) \quad (3)$$

A análise de Fourier converte uma série temporal em seus diversos componentes harmônicos, sendo que o primeiro representa a variação do sinal para um período correspondente ao intervalo de tempo de toda a série temporal ( $T$ ). A segunda e terceira componentes representam a variação da série em um período  $T/2$  e  $T/3$ , respectivamente. Componentes de ordem mais elevada, representando frequências menores, também podem ser obtidos. No entanto, utilizando apenas as primeiras componentes, já é possível descrever o padrão temporal do sinal com razoável aproximação (Lacruz e Santos, 2007). Além disso, a utilização apenas das primeiras componentes harmônicas atua como um filtro passa-baixa na série temporal, eliminando possíveis ruídos causados por cobertura de nuvens e outros problemas.

A rotina computacional para cálculo das imagens de amplitude e fase foi implementada na linguagem Python (<http://www.python.org/>), com o auxílio das bibliotecas Numpy (<http://numpy.scipy.org/>) e GDAL (<http://www.gdal.org/>), que possibilitam o cálculo da transformação de Fourier (algoritmo *Fast Fourier Transform* - FFT) e o manuseio de arquivos raster no formato GeoTiff, respectivamente.

A região de Ribeirão Preto, SP (lat 21°12'S lon 47°48'O, Modis tile h13v11) foi escolhida como área teste por apresentar boa diversidade de cobertura vegetal (cana-de-açúcar, culturas anuais, silvicultura e remanescentes florestais). Foram obtidas 23 imagens da composição de 16 dias do NDVI, com resolução espacial de 250 m, sensor MODIS (produto MOD13Q1) do ano de 2005 para a composição da série temporal. As imagens, disponibilizadas no formato HDF e projeção Sinusoidal pelo *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) (<ftp://e4ftl01u.ecs.nasa.gov/>), foram convertidas para o formato GeoTiff, com sistema de coordenadas geográficas, utilizando o pacote computacional *Modis Reprojection Tool* (<http://lpdaac.usgs.gov/landdaac/tools/modis/index.asp>). Foram então geradas as imagens de amplitude e fase das 3 primeiras componentes, além da imagem amplitude da componente 0. Neste trabalho apenas as imagens de amplitude foram consideradas.

### 3. Resultados e Discussão

A série temporal utilizada é de um ano, portanto, as imagens de amplitude e fase da primeira componente harmônica de Fourier representam a oscilação anual. Já a segunda e terceira componentes representam as oscilações semestrais e quadrimestrais. Caso a série temporal utilizada fosse mais longa, as componentes representariam outras frequências. A imagem amplitude da componente 0 representa a média da série temporal, enquanto sua imagem fase é, por definição, igual a 0.

O comportamento oscilatório dos termos associa-se aos ciclos produtivos, determinados pelo manejo das coberturas vegetais e pela flutuação estacional da atividade fotossintética. Na imagem de amplitude da componente 0 são identificadas diversas feições, como as áreas urbanizadas e extensas superfícies com água, com valores baixos de NDVI. Também são identificadas áreas de silvicultura e remanescentes florestais, onde o NDVI se mantém elevado ao longo do ano. Já áreas com culturas agrícolas aparecem com um valor de NDVI intermediário pois estão cobertas com vegetação em apenas uma parte do ano (Figura 1). A imagem composta do sensor TM, satélite Landsat 5, da mesma área é apresentada a fim de facilitar a compreensão (Figura 2).

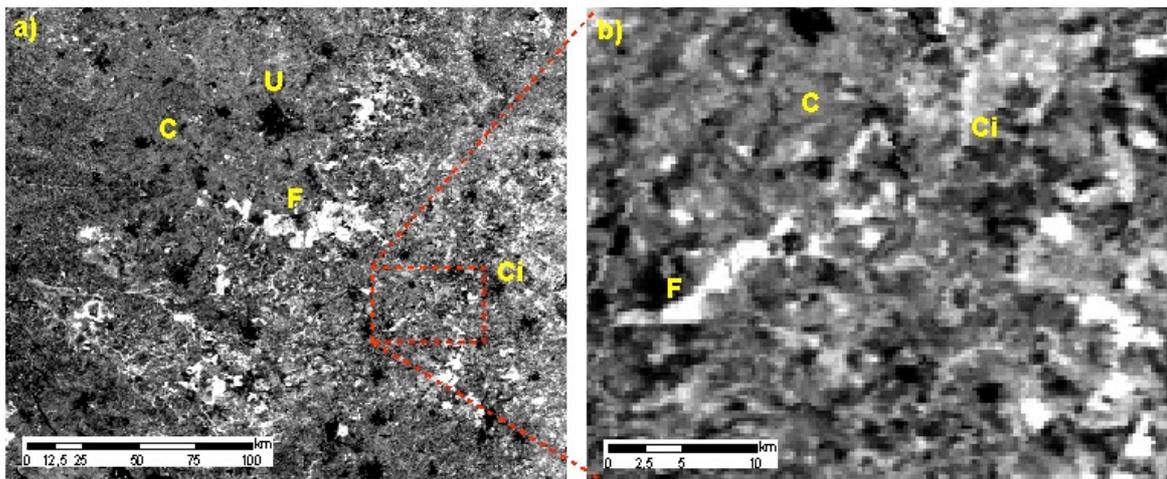


Figura 1. a) Amplitude da componente 0, correspondente ao NDVI médio anual para a região de Ribeirão Preto e b) detalhe em área com culturas anuais irrigadas, silvicultura e cana-de-açúcar. Manchas urbanas (U) e superfícies de água aparecem com valores baixos (escuros) enquanto que florestas e silviculturas (F) apresentam elevada amplitude. Culturas irrigadas (Ci) e cana-de-açúcar (C) apresentam valores intermediários.

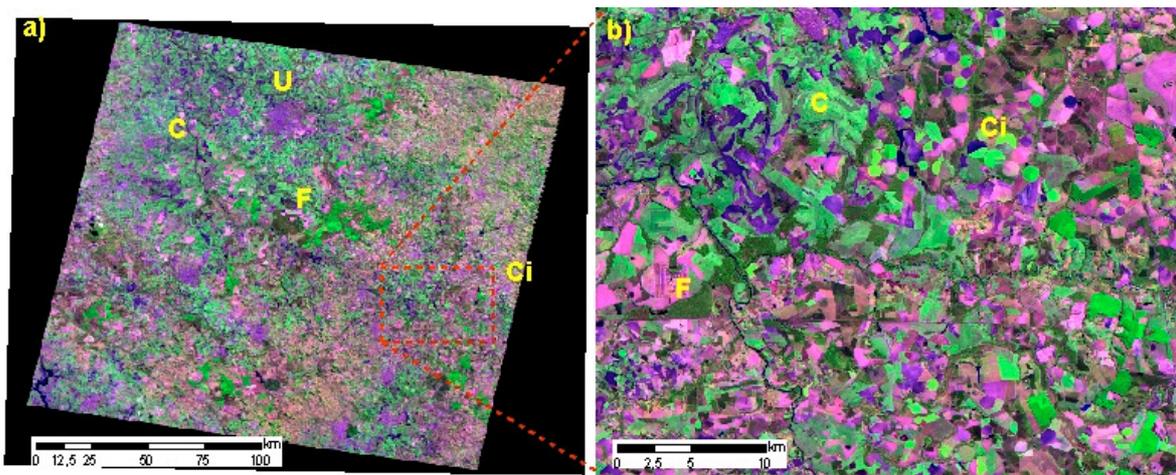


Figura 2. a) Imagem composta colorida (5,4,3), Landsat TM5, para a região de Ribeirão Preto e b) detalhe em área com culturas anuais irrigadas, silvicultura e cana-de-açúcar.

Na primeira componente temos a representação dos fenômenos com oscilações anuais (Figura 3). Coberturas com pouca ou nenhuma variação do NDVI ao longo do ano aparecem com valores muito baixos, independentemente do valor médio de NDVI. Desta forma, tanto áreas urbanizadas e superfícies de água, quanto remanescentes florestais e silviculturas apresentam baixa amplitude. Áreas agrícolas com variação anual de NDVI apresentam amplitude mais elevada, como pode ser visto nas áreas de cana-de-açúcar.

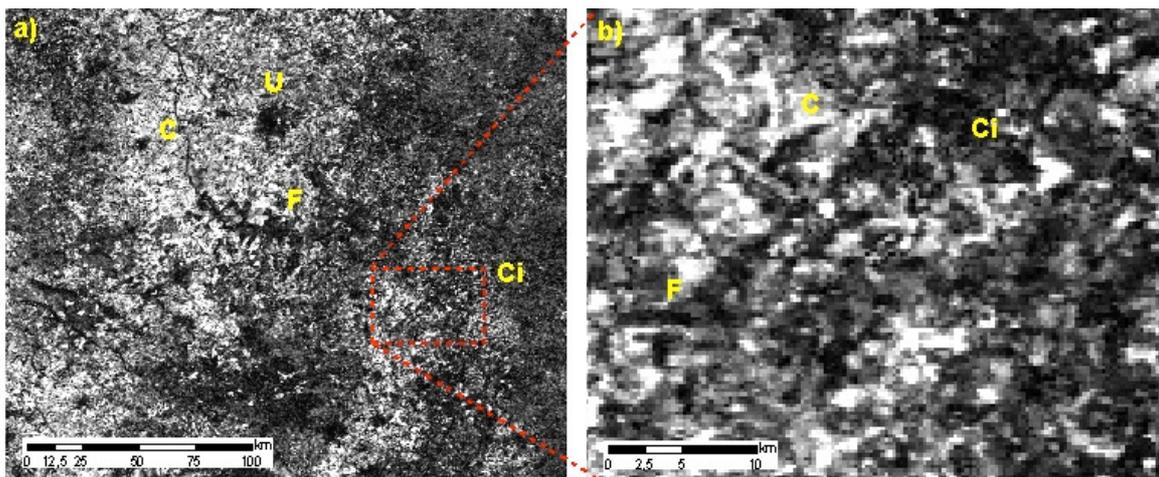


Figura 3. a) Amplitude da componente 1, correspondente a oscilação anual do NDVI para a região de Ribeirão Preto e b) detalhe em área com culturas anuais irrigadas, silvicultura e cana-de-açúcar. Urbanizações (U) e áreas florestais (F) aparecem com baixa amplitude anual, bem como culturas irrigadas (Ci), com oscilação semestral. Áreas com cana-de-açúcar (C) aparecem em destaque.

A segunda componente harmônica representa oscilações semestrais (Figura 4). Nesta, áreas com baixa variação de NDVI ao longo do ano ou apenas variação com ciclo longo (12 meses) apresentam baixa amplitude. É o caso das áreas com cana-de-açúcar que apresentam apenas uma variação anual de NDVI. Coberturas com oscilações de NDVI de 6 meses apresentam maior amplitude, identificando outras culturas anuais como soja, milho, feijão etc. É importante ressaltar que, caso a cobertura apresente dois ciclos regulares (duas safras no ano), a maior parte da variação do NDVI será captada na segunda componente, sendo que a amplitude da primeira componente será baixa. Porém, caso a cobertura apresente apenas um ciclo curto (uma safra de 6 meses seguida de pousio), serão identificados sinais na primeira e segunda componentes. Isto porque um sinal com apenas uma oscilação curta no ano é decomposto pela transformação de Fourier em uma oscilação anual e uma semestral enquanto que duas oscilações ao longo do ano é explicado apenas pela segunda componente.

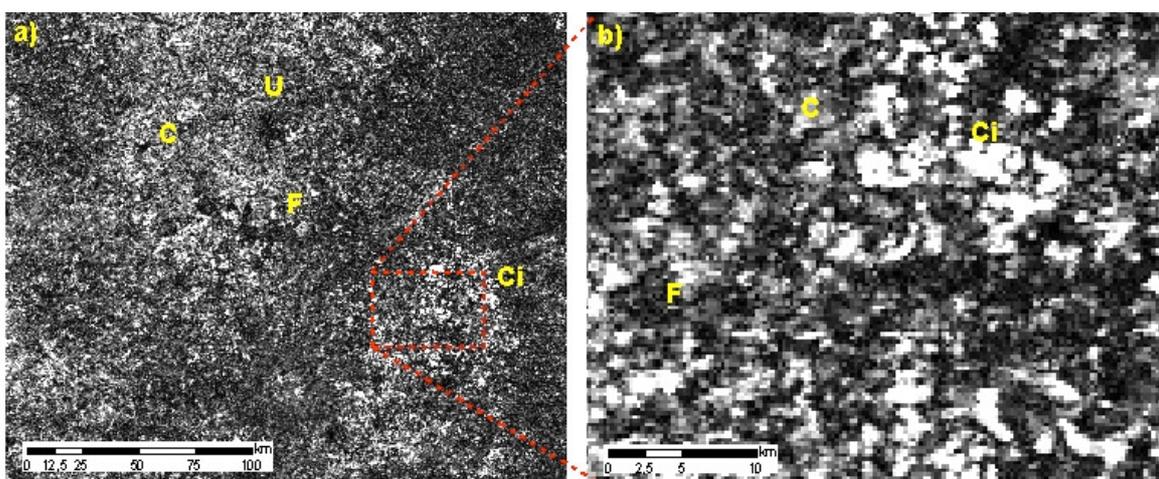


Figura 4. a) Amplitude da componente 2, correspondente a oscilação semestral para a região de Ribeirão Preto e b) detalhe em área com culturas anuais irrigadas, silvicultura e cana-de-açúcar. Urbanizações (U) e áreas florestais (F) aparecem com baixa amplitude anual e áreas com cana-de-açúcar (C) com valores intermediários. Áreas com culturas irrigadas (Ci) aparecem em destaque.

A terceira componente representa oscilações mais curtas (quadrimestrais). Como coberturas vegetais raramente apresentam oscilações curtas e constantes, esta componente não traduz nenhum fenômeno natural comum. No entanto, a análise de Fourier se baseia na decomposição de uma série temporal em séries harmônicas, e a terceira componente tem papel importante no ajuste da série temporal, quando esta é recomposta a partir dos diversos harmônicos.

A composição colorida RGB a partir das amplitudes das componentes 1, 0 e 2 auxilia na compreensão (Figura 5). Locais escuros na imagem significam áreas em que o NDVI se manteve baixo e sem oscilações durante toda a série temporal (urbanizações e superfícies de água). Tons verdes mostram áreas em que o NDVI se manteve elevado durante toda a série temporal porém com pouca variação (remanescentes florestais e silvicultura). Culturas com um ciclo longo, como a cana-de-açúcar, aparecem em tons de rosa enquanto que áreas onde são feitas duas safras no ano aparecem em cores azuis intensas (regiões com irrigação por pivô central, por exemplo). Áreas com culturas com um ciclo curto no ano apresentam tonalidades intermediárias entre vermelho e azul (componentes 1 e 2). Coberturas como pastagem, em que a variação do NDVI não é tão intensa ao longo do ano, também apresentam coloração intermediária entre os harmônicos 0 e 1.

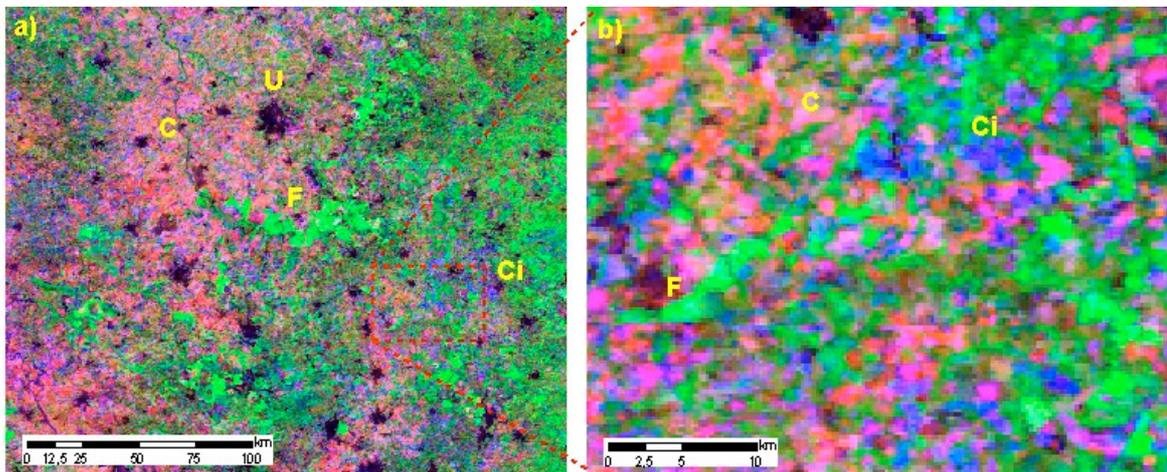


Figura 5. a) Composição colorida RGB com as amplitudes 1, 0, 2 para a região de Ribeirão Preto e b) detalhe em área com culturas anuais irrigadas, silvicultura e cana-de-açúcar. Urbanizações (U) e superfícies de água aparecem escuras. Áreas florestais (F) aparecem em tom verde brilhante, enquanto tonalidades menos acentuadas de verde representam pastagens e pixels com mistura espectral. A cana-de-açúcar (C) sobressai em tons avermelhados. Culturas irrigadas (Ci) aparecem em tonalidade azul.

Quando trabalhamos com imagens de apenas uma data, dificilmente podemos identificar qual a cobertura vegetal das áreas que estavam com solo exposto no momento de aquisição da imagem. A utilização de séries temporais não está sujeita a este problema pois a informação utilizada não se trata da cobertura em um instante no tempo mas sim, de sua variação ao longo do período de estudo.

As imagens de amplitude foram utilizadas em uma classificação supervisionada exploratória, a fim de identificar as principais dificuldades. Por usarmos apenas informações de NDVI, algumas confusões são esperadas como urbanização com superfície de água e remanescentes florestais com silvicultura e cerrados fechados. A identificação de pastagens também se mostrou difícil e sujeita à confusão com pixels de mistura espectral, porém isso pode ser devido à baixa resolução espacial do sensor ou ao pequeno número de amostras de treinamento utilizadas na classificação exploratória.

As imagens de fase não foram tratadas neste trabalho porém, estas também contém informações que podem ser alvo de outro estudo. A fase é utilizada para calcular o instante no tempo em que os harmônicos de cada componente atingem o valor máximo e mínimo, o que pode ser um indicativo da época de colheita.

#### 4. Conclusões

Uma programa capaz de gerar a análise de Fourier em uma série temporal de imagens foi desenvolvido. Como produto temos as imagens de amplitude e fase dos diversos componentes harmônicos da análise de Fourier. Cada componente identifica a oscilação da série temporal em uma frequência específica. Melhorias no programa estão sendo feitas para que este possa funcionar de maneira distribuída, aproveitando melhor os processadores com múltiplos núcleos e *clusters*. Desta forma, a análise em grandes áreas e séries mais longas tornar-se-á possível.

Regiões com baixa variação de NDVI ao longo do ano (urbanizações, silviculturas, florestas) apresentaram baixa amplitude na primeira e segunda componentes harmônicas. Áreas urbanizadas e alagadas são distinguidas das áreas de vegetação pelo valor médio de NDVI ao longo do tempo (harmônico 0), porém, existe dificuldade em separar os remanescentes florestais das florestas plantadas.

Culturas agrícolas com ciclo aproximado de um ano apresentaram elevada amplitude na primeira componente. Locais com dois ciclos agrícolas ao longo do ano apresentaram elevada amplitude na segunda componente porém baixa amplitude na primeira. Locais com apenas um ciclo agrícola curto (6 meses) ao longo do ano podem apresentar amplitudes elevadas tanto na primeira quanto segunda componente. Os maiores sinais nas áreas de pastagens ocorreram nas componentes 0 e 1, indicando um valor de NDVI relativamente alto ao longo do ano e com oscilação anual, mas este padrão de combinação entre as componentes também surgiu em pixels de mistura espectral.

Embora as imagens de alta resolução temporal produzidas pelo satélite MODIS apresentem algumas limitações em relação à escala de abordagem, em função da sua resolução espacial intermediária, a riqueza de informações temporais obtidas, sobre o desenvolvimento fenológico da cobertura vegetal, sugere um elevado potencial para sua utilização nas escalas estadual, regional e nacional.

A análise da série temporal apresentada neste trabalho demonstrou o elevado potencial de aplicação dessa ferramenta para a discriminação, mapeamento e monitoramento da atividade agrícola em uma região complexa e heterogênea do Estado de São Paulo. Esta técnica é extremamente relevante para o monitoramento da atividade fotossintética de toda a extensão do território nacional, sobretudo quando o comportamento espectro-temporal dos pixels for melhor discriminado e estiver associado às atividades agrícolas locais.

As aplicações desta ferramenta são variadas e estratégicas, no contexto Nacional. Sua adoção no monitoramento do uso e cobertura das terras, nas áreas desmatadas da Amazônia Legal, poderá subsidiar as discussões e a formulação de políticas públicas integradas, buscando uma maior sinergia, por exemplo, nas ações deflagradas pelos Ministérios da Agricultura, Pecuária e Abastecimento e o Ministério do Meio Ambiente. Também está associada à possibilidade de identificação, delimitação e mapeamento de áreas de pastagens degradadas, dado que o comportamento espectro-temporal difere daquele encontrado em áreas com alta produtividade e, portanto, alta atividade fotossintética e produção de matéria vegetal, para consumo dos rebanhos. Vale à pena ressaltar ainda, o potencial de aplicação desse comportamento espectro-temporal no monitoramento do estado fitossanitário das culturas e da produtividade, com aplicações estratégicas, imediatas e diretas para o setor de seguros agrícolas e acompanhamento e controle nacional da produção agrícola.

Finalmente, cabe destacar que, embora possa aparentar uma decisão posicionada na “contra-mão” do desenvolvimento tecnológico do mercado de observação da Terra, que migra claramente para o aumento da resolução espacial, a adoção de imagens de satélite de média resolução espacial e alta resolução temporal, deve assumir um papel cada vez maior na gestão do território nacional, sobretudo no que diz respeito às atividades com uma dinâmica interanual acelerada e complexa, como é o caso das atividades agrícolas.

## Referências Bibliográficas

BRUCE, L.M.; MATHUR, A. Denoising and wavelet-based feature extraction of MODIS multi-temporal vegetation signatures. **International Workshop on Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images**, 2005. pp. 95-98.

JÖNSSON., P; EKLUNDH, L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.**, v. 40 (8), p. 1824-1832, 2002.

LACRUZ, M. P.; SANTOS, J.R.; CONFORTE, J.C. Utilização de séries temporais de imagens MODIS/TERRA e análise harmônica para o monitoramento de corredores ecológicos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12, 16-21 abr. 2005. Goiania. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3223-3228. CD-ROM, Online. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2005/02.12.16.31/doc/capa.htm>> . Acesso em: 6 nov 2008

LACRUZ, M.P., SANTOS, J.R. Monitoramento da paisagem de unidades de conservação. In: Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E.; Ceballos, J. C. (Org.). **O sensor MODIS e suas aplicações no Brasil**. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007. cap. 13, p.173-183.

YU, X.; ZHUANG, D., CHEN, H. HOU, X. Forest classification based on MODIS time series and vegetation phenology. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. **IGARSS '04. Proceedings**. vol.4, pp. 2369-2372, set. 2004.