

Geração de imagens sintéticas Landsat TM para a avaliação da fenologia de diferentes fitofisnomias na região do Espinhaço Meridional, MG.

Annia Susin Streher^{1,2}
Thiago Sanna Freire Silva²

¹ Instituto de Biociências, UNESP – Universidade Estadual Paulista
Caixa Postal 199, 13506-900, Rio Claro, SP
annia.streher@gmail.com;

² Ecosystem Dynamics Observatory, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
UNESP - Universidade Estadual Paulista, Caixa Postal 178, 13506-900, Rio Claro, SP
tsfsilva@rc.unesp.br

Abstract: We evaluated the performance of the ESTARFM algorithm for generating synthetic Landsat images, to assess phenological changes in the Espinhaço Meridional region. We used the available Landsat TM and MODIS NBAR time series for the dry period, ranging from May to September 2010. The results showed a good performance of the algorithm, highlighted by the strong agreement between the synthetic image and an original image of the same date. From the time series densified with synthetic images, it was possible to observe the delay of the drought for the region in the year 2010, also emphasized by the EVI2 index. We intend to extend this study to a longer series of available Landsat TM imagery, to estimate the time when the phenological events occur more accurately.

Palavras-chave: *ESTARFM, phenology, synthetic imagery, ESTARFM, fenologia, imagens sintéticas*

1. Introdução

A Cadeia do Espinhaço atua como uma barreira à umidade oriunda do oceano, gerando um gradiente climático na direção Leste-Oeste, constituindo um limite relativamente abrupto entre os domínios da Mata Atlântica e do Cerrado (IBGE, 1993). Além da variação climática, a vegetação do local é afetada também por uma grande diversidade topográfica e edáfica, o que lhe confere uma elevada riqueza de espécies, endemismos e grande individualidade fisionômica (Giulietti et al. 1997; Santos et al., 2011). A avaliação de padrões fenológicos do mosaico de comunidades presentes na Cadeia do Espinhaço pode ser utilizada como indicativo para melhor compreender a dinâmica dos ecossistemas, a organização temporal dos recursos nas comunidades e a influência de diferentes forças seletivas sobre as espécies vegetais (Memmott et al., 2007; Staggemeier et al., 2010; Morellato et al., 2013). Além disso, estudos fenológicos proporcionam uma indicação integrada da sensibilidade e adaptabilidade dos sistemas naturais frente às mudanças climáticas (Cleland et al., 2012).

O estudo da fenologia da vegetação por meio de sensoriamento remoto – também conhecido como *land surface phenology* (LSP) – tem progredido consideravelmente ao longo das últimas duas décadas, tanto no aspecto da geração de conjuntos de dados para documentar a fenologia em grandes áreas, quanto em termos metodológicos, para derivar métricas que descrevam a sazonalidade da vegetação (Reed et al., 2013). Os dados de sensoriamento remoto são obtidos principalmente a partir do imageamento da superfície terrestre por sensores orbitais, os quais fornecem observações sinópticas do ambiente em diferentes escalas e repetidas vezes, resultando em séries temporais de diferentes atributos da vegetação.

O sensor MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*) adquire diariamente imagens com resolução espacial moderada da superfície terrestre (250 a 500 m para as bandas de cobertura da terra). A frequência na disponibilidade de dados de reflectância de superfície fornecida pelo MODIS faz com que este sensor seja utilizado na investigação de padrões fenológicos da vegetação em larga escala (Hufkens et al., 2012;

Anderson et al., 2011). Contudo, para a análise de mudanças fenológicas em escalas espaciais mais refinadas dentro da paisagem, o conjunto de dados da série de satélites Landsat são mais apropriados, considerando-se sua resolução espacial de 30 m. A detecção de eventos fenológicos por meio de dados Landsat é limitada pela frequência de aquisição de imagens, realizada a cada 16 dias, e pela frequente cobertura de nuvens. Apesar de existirem diversos satélites em operação, poucos são os que disponibilizam imagens com alta resolução temporal e espacial (Gao et al., 2013).

A fim de minimizar as limitações individuais de cada conjunto de imagens, as técnicas de fusão de imagens surgiram como alternativa para integrar as diferentes fontes de dados de sensoriamento remoto, produzindo imagens sintéticas a partir da combinação de diferentes sensores. Gao et al. (2006) desenvolveram uma técnica empírica de fusão de imagens, o Modelo Adaptativo de Fusão de Reflectâncias (*Adaptive Reflectance Fusion Model - STARFM*), o qual combina a resolução espacial do sistema Landsat com a frequência temporal dos sensores MODIS, gerando imagens sintéticas similares às imagens Landsat, mas com os intervalos de tempo das imagens MODIS. Diferentemente da maioria dos outros métodos de fusão de dados, o STARFM produz resultados que são calibrados para reflectância espectral, e por isso podem ser utilizados para avaliar as mudanças quantitativas na reflectância de superfície (Gao et al., 2006; Gao et al., 2013).

Simulações baseadas em imagens reais Landsat e MODIS mostraram que o STARFM pode prever a reflectância com precisão, se o pixel de resolução grosseira for homogêneo. Entretanto, a precisão das previsões diminui quando as paisagens são muito heterogêneas (Gao et al., 2006; Hilker et al., 2009; Zhu et al., 2010). Buscando resolver esta limitação, Zhu et al. (2010) desenvolveram uma versão aprimorada do algoritmo STARFM, chamada de ESTARFM (*Enhanced Adaptive Reflectance Fusion Model*), a qual é capaz de prever de maneira mais precisa as mudanças na reflectância em paisagens espacialmente heterogêneas.

Nos últimos anos, o método STARFM e seus derivados têm sido utilizados com sucesso na densificação de séries temporais de dados Landsat para o monitoramento de florestas (Hilker et al., 2009; Schimdt et al., 2012), na avaliação da produtividade primária bruta (Shing, 2011) e na análise da fenologia de vegetação de locais semiáridos (Walker et al., 2012). Esses estudos mostraram que a fusão de dados e geração de imagens sintéticas pode ser efetivamente utilizada para capturar tanto a informação espacial quanto a informação temporal com elevada resolução.

A Cadeira do Espinhaço é caracterizada por uma grande heterogeneidade espacial na distribuição da vegetação, e, individualmente, nem os dados Landsat nem os dados MODIS são adequados para a avaliação das trajetórias fenológicas nesta área. Neste sentido, o presente estudo avaliou a viabilidade da utilização do algoritmo ESTARFM para a geração de imagens sintéticas e densificação da série temporal de imagens Landsat, durante a época seca, na região do Espinhaço Meridional em Minas Gerais, com a finalidade de monitorar as mudanças fenológicas da vegetação.

2. Materiais e Métodos

A área de estudo concentra-se na região do Espinhaço Meridional, contida na Cadeia do Espinhaço, que se inicia nas proximidades de Belo Horizonte e prolonga-se ininterruptamente até a região de Olhos D'Água, em Minas Gerais (Chemale Jr. et al., 2011) (Figura 1). Esta área possui grande valor ambiental, pois abriga dois *hotspots* de biodiversidade, representados pelos biomas Cerrado e Mata Atlântica, unidos por uma faixa transicional de Campos Rupestres, cuja diversidade florística ultrapassa 1600 espécies (Schaefer et al., 2007). A porção sul do Espinhaço Meridional abriga duas unidades de conservação, a Área de Proteção Ambiental Morro da Pedreira e o Parque Nacional da Serra do Cipó (Ribeiro et al., (2009).

A oeste da serra do Espinhaço, em altitudes mais baixas (800 - 1000m), ocorrem manchas de Cerrado (Giulietti et al. 1997) que, após o fim das elevações da Serra, tornam-se a fitofisionomia predominante (Santos et al., 2011). Nas áreas mais elevadas, em geral acima de 900 m de altitude, ocorrem sobre afloramentos rochosos os Campos Rupestres, cercados por um estrato herbáceo contínuo. Na encosta oriental, predominam as fitofisionomias do bioma Mata Atlântica, como as florestas semidecíduais (Santos et al., 2011).

O clima em toda Serra do Cipó é do tipo *Cwb* de Köppen (1948), com verões muito chuvosos e invernos secos, precipitação concentrada entre novembro e março e média anual de 1500 mm (Madeira & Fernandes, 1999). Contudo, pode-se observar variação climatológica de acordo com a orientação das vertentes, já que a nebulosidade quase constante prevalece nas vertentes orientais, enquanto as vertentes ocidentais enfrentam até sete meses de seca (Ribeiro et al. 2009). Madeira & Fernandes (1999) consideraram duas diferentes estações na área: uma úmida (outubro a abril) e outra seca (maio a setembro).

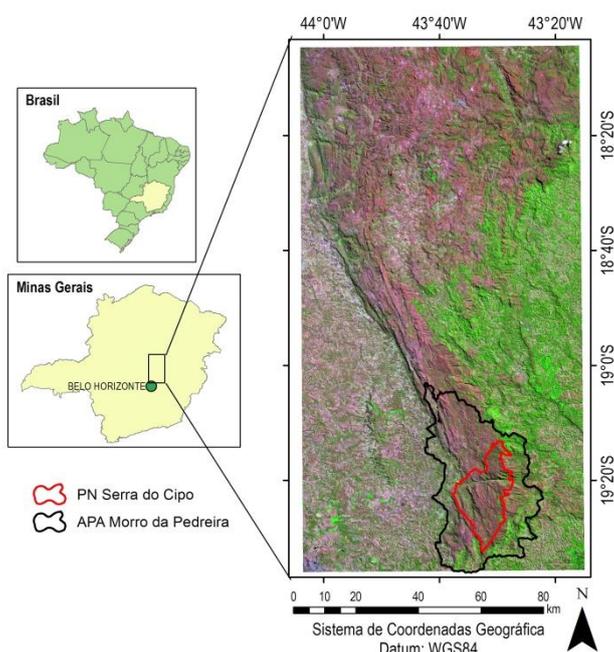


Figura 1: À esquerda, a localização da área de estudo no estado de Minas Gerais, Brasil. À direita, uma imagem Landsat TM (R5, G4, B3) da região do Espinhaço Meridional, onde observam-se as diferentes fitofisionomias no gradiente de leste a oeste. Na porção sul do Espinhaço Meridional localizam-se duas unidades conservação: o Parque Nacional da Serra do Cipó e a APA Morro da Pedreira, evidenciando a importância ecológica da região.

2.1 Seleção de imagens e aplicação do algoritmo de fusão ESTARFM

As imagens foram adquiridas na forma de produtos Landsat CDR (*Climate Data Record*), órbita/ponto 218/73, já corrigidas para efeitos geométricos e atmosféricos, e disponibilizadas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, www.earthexplorer.org). Além das imagens Landsat, foram adquiridas também imagens MODIS, na forma do produto NBAR (*Nadir BRDF Adjusted Reflectance - MCD43A4*), corrigidas para os efeitos de geometria de iluminação e visada e ajustadas ao nadir. O produto MODIS NBAR é uma combinação de 16 dias de imagens de reflectância de superfície, agregadas e disponibilizadas em intervalos de 8 dias. A seleção de cenas utilizadas no presente estudo levou em consideração a cobertura de nuvens da série temporal disponível para as imagens Landsat, optando-se por trabalhar com as imagens da época seca do ano de 2010. Esta época foi definida como mais adequada para o presente estudo por apresentar menor cobertura de nuvens e maior contraste na fenologia da vegetação no gradiente Leste-Oeste.

O algoritmo ESTARFM estima a reflectância de superfície diária, assumindo uma relação linear entre a reflectância Landsat e a reflectância MODIS, para o mesmo pixel. O algoritmo utiliza dois pares de imagens Landsat e MODIS adquiridos em datas iguais, sendo um conjunto anterior (t_0) e outro posterior (t_2) à data da imagem MODIS que será usada para modelar uma imagem Landsat sintética (t_1) (Gao et al., 2006; Hilker et al., 2009). Uma janela móvel é usada para minimizar o efeito de *outliers*, prevendo mudanças do pixel central através de uma média espacialmente e espectralmente ponderada de pixels dentro da janela (Gao et al., 2006, Zhu et al., 2010). Mais detalhes sobre o método pode ser encontrado em Zhu et al. (2010).

A densificação da série temporal de imagens Landsat contou com três conjuntos de pares de imagens Landsat e Modis, compreendidas entre os meses de maio a setembro, e oito imagens MODIS em datas onde não existem imagens Landsat livres de nuvens disponíveis, as quais foram utilizadas para a geração das imagens Landsat sintéticas (Figura 2). As imagens utilizadas foram corrigidas e as imagens MODIS foram reamostradas para 30 metros de tamanho de pixel utilizando o método de vizinho mais próximo.

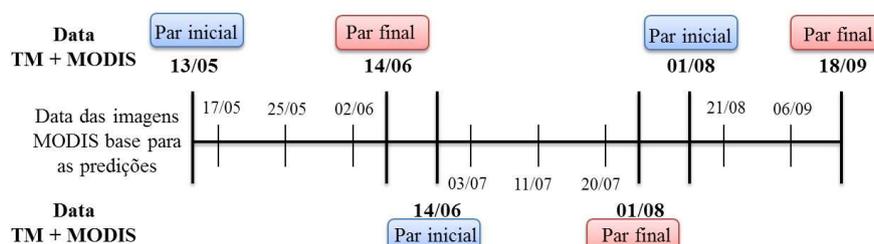


Figura 2: Datas das imagens utilizadas como entrada no algoritmo ESTARFM. As imagens Landsat sintéticas foram geradas para as datas das imagens MODIS compreendidas entre os pares de imagens iniciais e finais.

A avaliação do desempenho do algoritmo foi realizada através da simulação de uma imagem Landsat para a data de 14/06/2010, a qual foi comparada com uma imagem Landsat real, disponível para a mesma data. Nesta simulação foi utilizada a imagem MODIS NBAR correspondente ao intervalo de 10/06 a 18/06. A comparação foi realizada através da subtração de bandas entre a imagem real e imagem simulada.

2.2 Avaliação dos padrões fenológicos

Para avaliação da resposta fenológica, utilizou-se o índice de vegetação de duas bandas *Enhanced Vegetation Index 2* (EVI 2) (Jiang et al., 2008) (Equação 2). Para a comparação dos valores, selecionaram-se três pontos em cada fitofisionomia reconhecida na região: cerrado, mata atlântica e campos de altitude.

$$EVI2 = 2,5 \frac{IVP-R}{IVP+2,4R+1} \quad 2$$

3. Resultados e discussão

3.1 Avaliação do algoritmo ESTARFM na geração de imagens sintéticas

A partir da imagem resultante da subtração entre a imagem Landsat real e Landsat sintética, foi possível avaliar as diferenças entre as cenas (Figura 3). Observou-se que para a banda do infravermelho próximo (IVP), as diferenças entre a imagem real e a imagem simulada foram muito pequenas, e as maiores diferenças foram ocasionadas pela presença de nuvens na imagem real. Gao et al. (2006) também encontrou as maiores diferenças entre as imagens simulada e real em áreas com presença de nuvens. Nessa simulação, a nova imagem

gerada não apresentou cobertura de nuvens, devido ao fato de que as imagens base para a simulação também estavam livres da presença de nuvens. Nesse sentido, o algoritmo ESTARFM pode ser utilizado também para gerar novas imagens Landsat em datas em que esta esteja contaminada por nuvens, desde que os conjuntos de pares de imagens e a imagem MODIS da data a ser simulada a nova imagem estejam com baixa cobertura de nuvens.

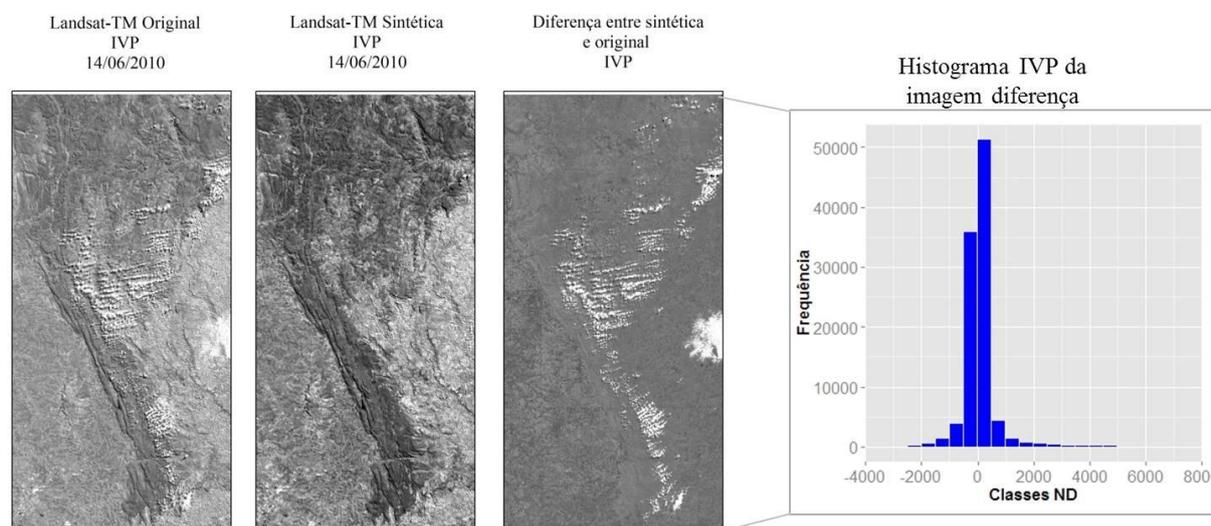


Figura 3: Banda do IVP da imagem Landsat original (à esquerda), da Landsat sintética (no centro) e a diferença entre as bandas do IVP da imagem original e sintética, evidenciando que as maiores diferenças (áreas mais claras da imagem) foram ocasionadas por nuvens.

3.2 Avaliação dos padrões fenológicos da vegetação no Espinhaço Meridional

A diversidade de padrões fenológicos tem sido relatada para vegetações tropicais como os cerrados e as florestas úmidas (Morellato et al. 2000; Staggemeier & Morellato, 2011). A região do Espinhaço Meridional representa o limite entre estes dois biomas, que apresentam estratégias fenológicas divergentes entre si, sendo possível avaliar estas diferenças por meio de sensoriamento remoto. No entanto, as lacunas nas séries temporais de imagens Landsat e a resolução grosseira de satélites como MODIS dificultam a identificação correta da época em que ocorrem os eventos fenológicos. Nesse sentido, a densificação da série de imagens Landsat permitiu avaliar com maior precisão o atraso do início da época seca em 2010 (Figura 4). Apesar da literatura indicar o mês de maio como característico da época seca, pode-se observar na série temporal que a vegetação começou a apresentar características de senescência somente a partir do mês de junho. Esse atraso pode ter sido ocasionado devido à alta precipitação no mês de maio de 2010, quando choveu um total de 60,2 mm. Esta quantidade de chuva é maior que a média da série histórica para o mês de maio na região, de 28,13 mm. A geração de imagens sintéticas também permitiu a avaliação da fenologia durante o mês de julho de 2010, o qual apresenta uma única imagem disponível no banco de dados do USGS, com alta cobertura de nuvens. A partir da inspeção visual das imagens, observou-se que para a vegetação do cerrado, localizada no lado oeste da serra, a seca é mais pronunciada a partir do mês de julho, enquanto para a vegetação florestal ao leste da Cadeia do Espinhaço, o processo é mais evidente a partir do mês de agosto. Considerando-se a indisponibilidade de imagens no mês de julho, a utilização do algoritmo ESTARFM viabilizou a caracterização da época seca do ano de 2010.

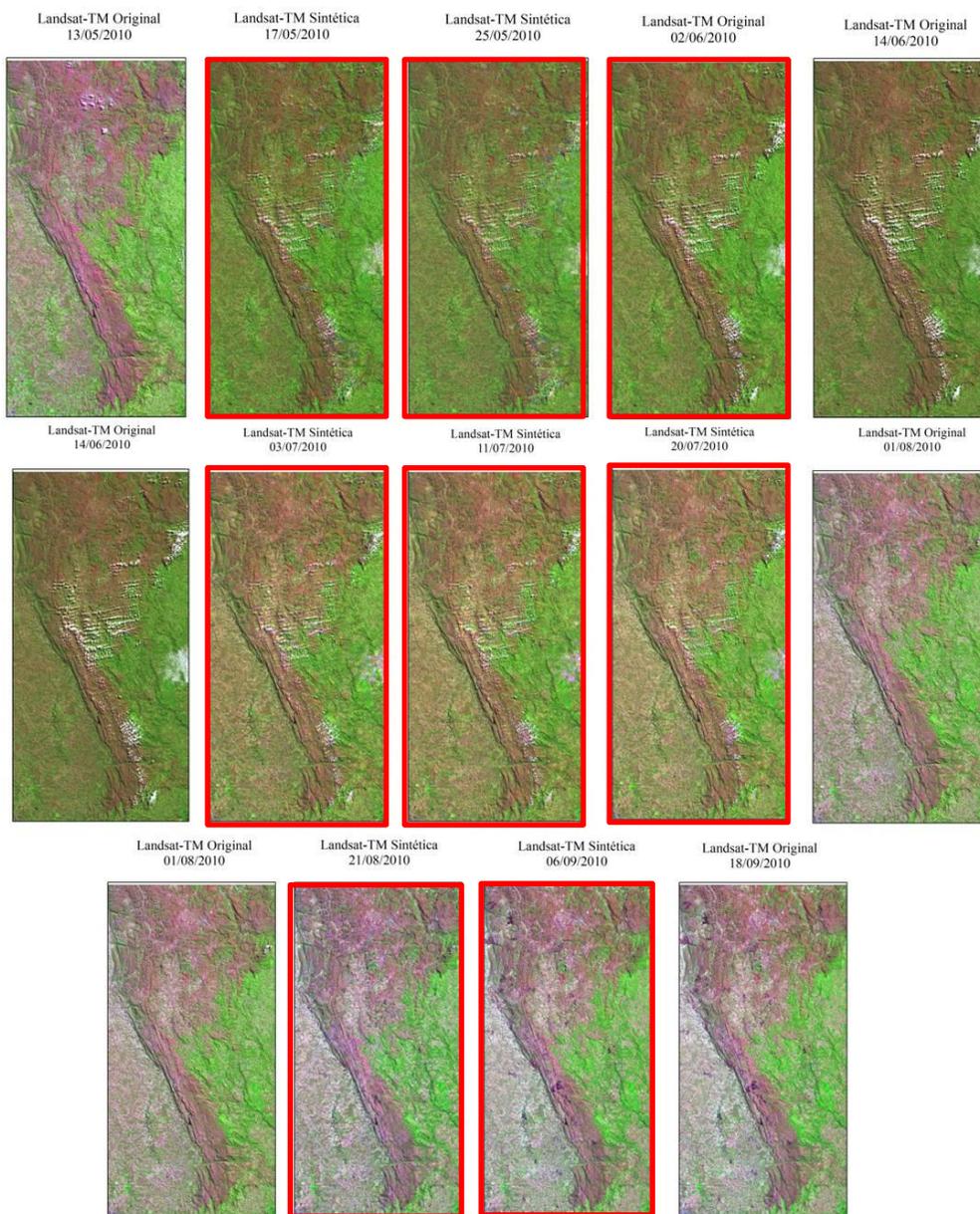


Figura 4: Série temporal densificada de imagens Landsat TM (R5, G4, B3), ao longo da época seca do ano de 2010 na região do Espinhaço Meridional. As imagens ressaltadas em vermelho são as imagens sintéticas. Pode-se perceber ao longo da série de imagens a transição da época úmida para seca, conforme a vegetação do lado oeste apresenta menos tons de verde. Todas as imagens estão com contraste e brilho ajustado.

A avaliação do EVI2 para os pontos estudados ao longo da região do Espinhaço Meridional mostrou as diferenças fenológicas entre as fitofisionomias da área (Figura 5) e evidenciou o atraso ocorrido na estação seca de 2010. Pode-se observar que as áreas de florestas apresentaram os maiores valores de EVI2, com os valores decrescendo a partir de junho, tendo efeitos mais pronunciados a partir de agosto, até o final do período avaliado. A queda abrupta do valor de EVI2 no ponto “floresta 1” ocorreu devido a presença de nuvem sobre esse local na imagem sintetizada. A vegetação do cerrado apresentou um leve aumento no EVI no mês de maio a início de junho, provavelmente devido à maior disponibilidade hídrica no ano de 2010, decrescendo bruscamente a partir do mês de agosto. No entanto, pode-se observar a heterogeneidade entre os pontos de cerrado avaliados nesse estudo, visto que os três locais amostrados apresentam perfis de valores de EVI diferentes entre si. A vegetação dos campos também apresentou perfis temporais de EVI variáveis, o que pode ser

explicado pela influência de áreas florestais próximo ao ponto “campos 2”. De acordo com os resultados de EVI apresentados, pode-se observar um padrão de senescência da vegetação dos campos ao longo da época seca. Esse resultado é contrastante aos encontrados por Belo et al. (2013), visto que os autores não verificaram sinais de senescência ao longo dos anos de 2000 e 2001 na vegetação arbustiva dos campos da área da Serra do Cipó.

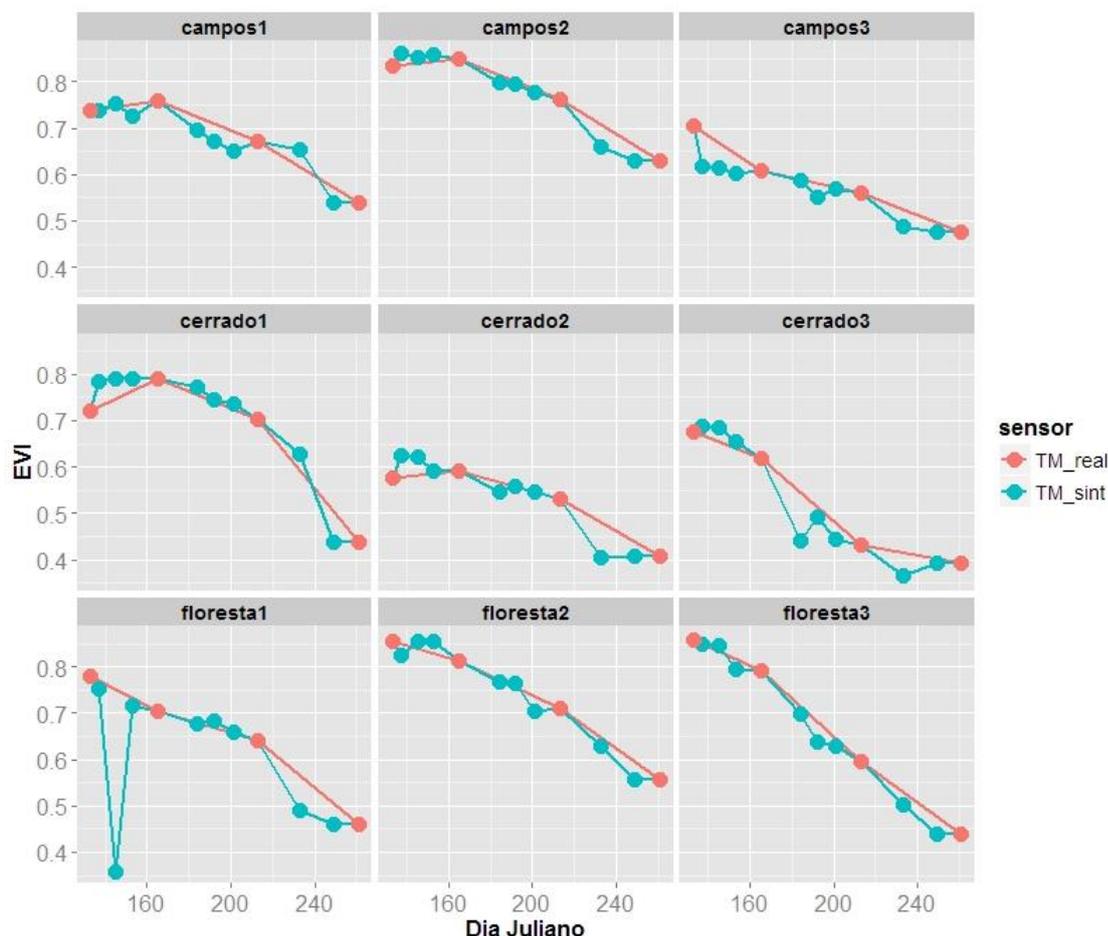


Figura 5: Séries temporais do índice de vegetação EVI2 para diferentes fitofisionomias, obtidas através de imagens Landsat TM reais e da série densificada (TM_sint), ao longo da época seca do ano de 2010 na região do Espinhaço Meridional.

4. Conclusões

A utilização do algoritmo ESTARFM mostrou-se satisfatória para a densificação de séries temporais de imagens do sensor Landsat TM. Os maiores erros nas imagens sintéticas foram encontrados em áreas que se encontravam sob o efeito de nuvens. Na avaliação da fenologia da área de estudo, a série densificada viabilizou identificar o atraso na queda de folhas da vegetação, característico de épocas secas. A geração de imagens Landsat sintéticas permite avaliar de modo mais preciso o momento em que ocorrem os diferentes eventos fenológicos, o que é de suma importância para a compreensão das respostas da vegetação frente as mudanças climáticas e impactos antrópicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Dra. Patrícia Morellato pelo apoio dado a realização do presente trabalho e a FAPESP pelo financiamento do projeto "*e-phenology: combining new technologies to monitor phenology from leaves to ecosystems*" (FAPESP 2010/52113-5).

Referências Bibliográficas

- Anderson, L. O., Aragao, L. E., Shimabukuro, Y. E., Almeida, S., & Huete, A. 2011. Fraction images for monitoring intra-annual phenology of different vegetation physiognomies in Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, 32(2), 387-408.
- Belo, R. M., Negreiros, D., Fernandes, W.G., Silveira, F.A.O., Ranieri, B.D., Morellato, P.C., 2013. Fenologia reprodutiva e vegetativa de arbustos endêmicos de campo rupestre na Serra do Cipó, Sudeste do Brasil. **Rodriguésia** 64(4): 817 – 828.
- Chemale Jr, Dussin, I.A., Martins, M., Santos, M., 2011 Nova abordagem tectono-estratigráfica do Supergrupo Espinhaço em sua porção meridional (MG). **Geonomos**, 19(2), 173-41.
- Cleland, E. E., Allen, J. M., Crimmins, T. M., Dunne, J. A., Pau, S., Travers, S. E., ... & Wolkovich, e. M., 2012. Phenological tracking enables positive species responses to climate change. **Ecology**, 93(8), 1765-1771.
- Emelyanova, I. V., McVicar, T. R., Van Niel, T. G., Li, L. T., & van Dijk, A. I. J. M., 2013. Assessing the accuracy of blending Landsat–MODIS surface reflectances in two landscapes with contrasting spatial and temporal dynamics: A framework for algorithm selection. **Remote Sensing of Environment**, 133, 193–209. doi:10.1016/j.rse.2013.02.007
- Gao, F., Masek, J., Schwaller, M., & Hall, F., 2006. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 44(8), 2207–2218. doi:10.1109/TGRS.2006.872081
- Gao, F., Wang, P., & Masek, J., 2013. Integrating remote sensing data from multiple optical sensors for ecological and crop condition monitoring, 8869, 886903. doi:10.1117/12.2023417
- Giulietti A.M., Pirani J.R., Harley R.M., 1997. Espinhaço range region, eastern Brazil. In: Davis SD, Heywood VH, Herrera-MacBryde O, Villa-Lobos J, Hamilton AC (eds.) **Centres of Plant Diversity: a Guide and Strategy for Their Conservation**. Vol. 3. WWF/IUCN, Cambridge. pp. 397-404.
- Hilker, T., Wulder, M. A., Coops, N. C., Seitz, N., White, J. C., Gao, F., ... Stenhouse, G. 2009. Generation of dense time series synthetic Landsat data through data blending with MODIS using a spatial and temporal adaptive reflectance fusion model. **Remote Sensing of Environment**, 113(9), 1988–1999. doi:10.1016/j.rse.2009.05.011
- Hufkens, K., Friedl, M., Sonnentag, O., Braswell, B. H., Milliman, T., & Richardson, A. D. (2012). Linking near-surface and satellite remote sensing measurements of deciduous broadleaf forest phenology. **Remote Sensing of Environment**, 117, 307–321. doi:10.1016/j.rse.2011.10.006
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro, 1993.
- Jiang, Z., Huete, a, Didan, K., & Miura, T. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, 112(10), 3833–3845. doi:10.1016/j.rse.2008.06.006
- Madeira, J.A. & Fernandes G.W. 1999. Reproductive phenology of sympatric species of Chamaecrista (Leguminosae) in Serra do Cipó, Brazil. **Journal of Tropical Ecology** 15: 463-479.
- Memmott, J., Craze P.G., Waser, N.M., Price, M. V. 2007. Global warming and the disruption of plant–pollinator interactions. **Ecological Letters** 10, 710–717.
- Morellato, L.P.C.; Camargo, M.G. ; Gressler, E. A Review of Plant Phenology in South and Central America. In: Mark Schawrtz. (Org.). **Phenology: An Integrative Environmental Science**. 2ed.: Springer Netherlands, p. 91-113. 2013.
- Morellato, L.P.C.; Talora, D.C.; Takahashi, A; Bencke, C.S.C.; Romera, E.C.; Ziparro, V. 2000. Phenology of atlantic rain forest trees: a comparative study. **Biotropica**, v32, 811-823p.
- Reed, B.C.; Schwartz, M.D.; Xiao, X. Remote Sensing Phenology: Status and the Way Forward. In: Mark Schawrtz. (Org.). **Phenology: An Integrative Environmental Science**. 2ed.: Springer Netherlands, v. , p. 91-113, 2013.
- Santos, M. F., Serafim, H., & Sano, P. T., 2011. Fisionomia e composição da vegetação florestal na Serra do Cipó, MG, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, 25(4), 793-814.
- Schmidt, M., T. Udelhoven, T. Gill, and A. Ro'der, 2012. "Long term data fusion for a dense time series analysis with MODIS and Landsat imagery in an Australian Savanna," **Journal of Applied Remote Sensing**, 6 (1), 063512.
- Singh, D., 2011. "Generation and evaluation of gross primary productivity using Landsat data through blending with MODIS data," **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 13(1), 59-69.
- Staggemeier, V.G, Diniz-Filho, J.A.F, Morellato, L.P.C 2010, The shared influence of phylogeny and ecology on the reproductive patterns of Myrteae (Myrtaceae). **Journal of Ecology** 98:1409–1421.
- Walker, J. J., de Beurs, K. M., Wynne, R. H., & Gao, F., 2012). Evaluation of Landsat and MODIS data fusion products for analysis of dryland forest phenology. **Remote Sensing of Environment**, 117, 381–393.
- Zhu, X., Chen, J., Gao, F., Chen, X., & Masek, J. G., 2010. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. **Remote Sensing of Environment**, 114(11)