

Variáveis limitantes sobre a detecção de queimadas em imagens Landsat no Parque Nacional da Serra do Cipó (MG)

Tamires Fornazari¹
Thiago Sanna Freire Silva¹
Swanni Tatiana Alvarado¹
Leonor Patrícia Cerdeira Morellato²

¹Ecosystem Dynamics Observatory, Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE)
UNESP - Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro.
Caixa Postal 178 - 13506-900 – Rio Claro, SP - Brasil
tamiresfornazari@live.com, tsfsilva@rc.unesp.br, swanni_ta@yahoo.es

²Laboratório de Fenologia, Instituto de Biociências (IB)
UNESP - Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro.
Caixa Postal 199 - 13506-900 – Rio Claro, SP - Brasil
patricia.morellato@gmail.com

Abstract. The Cerrado is an ecosystem that has a close relationship with fire. However, human practices are altering the fire regime, which may result in an imbalance of the ecosystem. Remote sensing has been proposed as a tool for monitoring active fires and burn scars. We sought to understand the possible limitations of remote sensing to detect burn scars in the Cerrado region of Parque Nacional da Serra do Cipó (Minas Gerais, Brazil), investigating how cloud cover, size of the burned area and monthly precipitation can affect the probability of detecting burning scars in Landsat imagery. We used MODIS active fire data to characterize the historical seasonality of fire in the period from 2002 to 2013, and mapped burn scars for the years 2009 and 2010, measuring the permanence of scars in images. The highest incidence of active fires and mapped scars occurred during the dry period, showing the month of September as the most affected. The low temporal resolution of Landsat 5 hampered the monitoring of the scars due to the obstruction by clouds. This effect, associated with the size of the burned area and precipitation, demonstrated the existence of multiple limitations in mapping scars. Although the variables "size" of the scar" and "monthly rainfall" had small statistical relation with burn scar permanence, they suggest the combined action of multiple limiting variables.

Palavras-chave: active fires, burn scars, monitoring, focos de calor, cicatrizes de queimada, monitoramento

1. Introdução

Nas últimas décadas, estudos sobre aspectos ecológico-ambientais do fogo e práticas de queimada nas regiões intertropicais tornaram-se necessários, uma vez que estas áreas são *hotspots* destes tipos de ocorrência (Cochrane, 2009). Aproximando esta realidade à escala nacional, o Cerrado brasileiro é um dos ecossistemas mais diretamente influenciados pelo fogo, capaz de influenciar a distribuição da vegetação, a fertilidade dos solos, e até mesmo a precipitação sazonal e a drenagem local, indiretamente (Eiten, 1972). O bioma Cerrado é também possuidor de uma grande riqueza de espécies, que associada aos níveis de endemismo, faz deste bioma uma das savanas mais ricas e diversas do mundo (Silva e Bates, 2002).

No Cerrado, o fogo de origem natural e antropogênico tem coexistido na região durante séculos, demonstrando-se essenciais para a manutenção e o equilíbrio deste bioma (Miranda, 2002). O fogo promove a evolução genética e impulsiona a rebrota de diversas espécies que são estimuladas pela queima de sua biomassa vegetal. Contudo, a maioria das espécies está adaptada a determinados regimes de fogo – mais intensos, frequentes ou sazonais – de modo que a alteração nestes regimes ou a ausência permanente do fogo pode acarretar no desaparecimento de espécies que constituem a flora local (Cochrane, 2009). Além disso, a influência antrópica neste espaço, ao

promover a inserção de monoculturas e atividades pecuárias, devasta grandes áreas da vegetação nativa, além de alterar os regimes de fogo, tornando-os cada vez mais frequentes e intensos. Isto faz com que indivíduos arbóreos menores passem a não sobreviver ou tornem-se incapazes de crescer e atingir classes de tamanho maiores (Ribeiro, 2012). Impactos indiretos incluem a alteração no clima e nos ciclos biogeoquímicos, como mudanças no regime de chuvas, modificações nas estruturas do solo e alterações no fluxo do carbono e outros nutrientes (Andreae et al. 2004).

O sensoriamento remoto é um instrumento eficiente para a reconstrução espaço-temporal do histórico de fogo, e oferece a possibilidade de monitorar a extensão das áreas afetadas pelo fogo e o dinamismo deste processo. Seu uso facilita também o processo de proteção de áreas naturais de baixa acessibilidade, através do fornecimento de imagens do local (Pereira, 2007). O monitoramento do fogo por sensoriamento remoto se baseia em dois processos: o primeiro em relação ao momento em que este efetivamente ocorre, denominado de foco de calor (*active fire*), e o segundo correspondendo à situação pós-fogo, conhecida por cicatriz de queimada (*burn scar*). A análise dos focos de calor se baseia no registro de um aumento anormal da temperatura pelo sensor (Pereira, 2007), e o monitoramento das cicatrizes se dá pelo sinal decorrente da queima de biomassa vegetal, resultando em um comportamento espectral diferente do entorno onde não houve a queima. Estes processos são registrados, respectivamente, nas bandas do infravermelho termal e do espectro óptico (visível, infravermelho próximo e infravermelho médio).

Para análise dos focos de calor e das cicatrizes de queimadas, são utilizados principalmente dois sistemas: o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e os sensores da série Landsat, ambos operando nas faixas do espectro óptico e infravermelho termal. Entretanto, estes sensores diferem em diversas características. O sensor MODIS, a bordo das plataformas Terra e Aqua, lançadas em 1999 e 2002, respectivamente, possui resolução espacial de 250 metros, considerada atualmente baixa em relação a outros satélites, mas possui, todavia, alta resolução temporal, fornecendo quatro imagens diariamente, duas durante o dia e duas à noite. Já a série de satélites Landsat, operante desde 1972 e atualmente representada pelos sensores Landsat 7 ETM+ e Landsat 8 OLI, possui boa resolução espacial (30m), recobrando uma área de 185x185 km, favorecendo o monitoramento de queimadas em escala local e regional. Além disso, por estar operante há quatro décadas, este satélite permite reconstruir o histórico do fogo em diferentes regiões. Contudo, os satélites Landsat adquirem imagens a cada 16 dias, sendo considerados sensores com baixa resolução temporal. Em regiões tropicais, onde a probabilidade de encobrimento por nuvens é alta, esta resolução compromete o monitoramento dos processos de superfície no tempo. Atualmente, o uso de dados Landsat foi grandemente facilitado pela distribuição dos produtos Landsat *Surface Reflectance Climate Data Record* (CDR), que consistem em imagens já corrigidas para os efeitos atmosféricos e distorções geométricas, além de incluírem uma máscara de nuvens e sombras de nuvens (http://landsat.usgs.gov/CDR_LSR.php).

A região da Área Proteção Ambiental (APA) “Morro da Pedreira” e o Parque Nacional da Serra do Cipó (PNSC), ambos localizados no estado de Minas Gerais, possuem tipos de vegetação que dependem do fogo para promover sua rebrota e o *input* de nutrientes. Especula-se que a forte ação antrópica na região está promovendo uma desregulação no regime do fogo, além de um descontrole em sua utilização (Cochrane, 2009), podendo acarretar na morte de diversos seres que compõe a biota local e comprometer toda a ecologia da região à longo prazo. Portanto, sabendo que o fogo é essencial para a manutenção do Cerrado e que alterações neste regime podem influenciar negativamente este ecossistema, necessitando de monitoramento, o

sensoriamento remoto apresenta-se como método para tal. O presente trabalho buscou melhor compreender as possíveis limitações que esta técnica pode apresentar para realização do monitoramento do fogo, através de 1) reconstrução do histórico do fogo para a região do PNSC e análise da sazonalidade do mesmo para o período de 2002 até 2013; 2) mapeamento das cicatrizes de queimadas incididas na região, a fim de determinar os totais mensais de área queimada entre 2009 e 2010 e; 3) compreender quais seriam os efeitos que a nebulosidade, o tamanho da área queimada e a precipitação poderiam exercer nas probabilidades de detecção de queimadas na região da APA “Morro da Pedreira” e Parque Nacional da Serra do Cipó.

2. Metodologia de Trabalho

As regiões selecionadas para o desenvolvimento deste estudo são as áreas que compreendem o Parque Nacional da Serra do Cipó e a Área de Proteção Ambiental (APA) “Morro da Pedreira”, que circunda o Parque, ambas localizadas no estado de Minas Gerais. O Parque foi criado em 1984 com o intuito de promover a proteção das diversas espécies endêmicas ali encontradas (Gomes et al. 2004), sendo também intitulado como Unidade de Conservação. A APA e o PNSC estão situados na região sul da Serra do Espinhaço, considerada desde 2005 pela UNESCO como Reserva da Biosfera, por abrigar uma variedade de espécies raras e endêmicas de fauna e flora encontradas em alguns dos mais ricos e também frágeis biomas (Ribeiro et al. 2012). O clima na região do PARNA é do tipo Cwb de Köppen, possuindo verões chuvosos e invernos secos, com períodos de precipitação concentrada entre novembro e março (Sano et al. 2011). A paisagem na região do Parque apresenta-se como um grande mosaico de vegetações, em termos florísticos, estruturais e fisionômicos, condicionados pela altitude e pela imensa variedade na composição dos solos (Fernandes et al. 1997), possuindo a oeste uma vegetação típica de Cerrado, e a leste fisionomias semelhantes à Mata Atlântica.

Para a caracterização da sazonalidade do fogo, analisou-se os dados de focos de calor disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, em www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/), produzidos pela University of Maryland, EUA, através do sensor MODIS AQUA. Inicialmente, calculou-se a média mensal do número de focos de calor observados para todo o estado de Minas Gerais, para os anos de 2002 até 2013. Posteriormente, definiu-se um *buffer* de 50 km a partir dos limites da APA, com o intuito de analisar as relações existentes entre os padrões observados em todo o estado e aqueles observados em escala local, próximos ao PNSC. O número médio de focos de calor foi comparado às médias climatológicas de precipitação, disponíveis em www.ana.gov.br/, de modo a caracterizar uma possível relação entre o aumento ou diminuição da quantidade de focos de calor com os períodos chuvosos e secos da região.

Além disso, foi realizado o mapeamento das cicatrizes das queimadas a partir de digitalização manual sobre produtos CDR do sensor Landsat 5 TM, disponíveis em <http://earthexplorer.usgs.gov>, para os anos 2009 e 2010. Para a realização deste processo, utilizaram-se os softwares QGIS 2.0 e ArcGIS 10.2, adotando a composição de bandas 5, 4 e 3 para as imagens. Uma vez que as imagens são fornecidas já corrigidas para refletância de superfície (multiplicada por 10000, e usando o valor -9999 como indicador de ausência de dados), o contraste foi normalizado entre as diferentes datas utilizando valores mínimos e máximos, de acordo com as bandas. Para a banda 5 adotou-se o valor mínimo de -1182 e máximo de 5834. Para a banda 4 os valores foram de -1409 e 5659, respectivamente e, finalmente, para a banda 3 os valores de - 2318 e 5063.

Após o mapeamento, calculou-se mensalmente a área total das cicatrizes e investigou-se a permanência destas áreas queimadas no tempo, a partir da contagem do número de imagens consecutivas em que cada queimada mapeada encontrava-se visível. Buscou-se também compreender quais seriam os fatores que poderiam influenciar na permanência destas cicatrizes de queimadas no tempo, escolhendo-se duas variáveis de análise, o tamanho da área queimada e a precipitação mensal relativa ao mês da primeira observação de cada queimada. A relação entre estas variáveis foi avaliada através da análise visual de gráficos de dispersão e do cálculo de correlação estatística através do coeficiente de correlação linear de Pearson (r) e coeficiente de determinação de um modelo de regressão linear (R^2). Para estas análises, foram consideradas somente as queimadas onde sua observação consecutiva não foi interrompida pela presença de nuvens.

3. Resultados e Discussão

A análise dos focos de calor mostrou um aumento considerável da incidência de fogo a partir do mês de junho, apresentando picos de ocorrência durante os meses de setembro e outubro. Este fato está diretamente ligado ao período de seca nessa região, evidenciado pelos baixos índices de precipitação durante o período (Figura 1). O mapeamento das cicatrizes de queimadas para os anos de 2009 e 2010 (Figura 2) também mostra maior incidência durante os meses de seca, com destaque para o mês de setembro de 2010, que exibiu uma área queimada de, aproximadamente 35 km².

O mês de julho de 2009 também apresentou valor elevado do número de cicatrizes, alcançando aproximadamente 80 queimadas mapeadas. Entretanto, a área total queimada foi reduzida, se comparado ao mês de setembro de 2010. Isto ocorreu devido às queimadas incididas neste mês apresentarem pequenas extensões, representando um total aproximado de apenas 8 km² queimados. Este fato mostra que a percepção de que um maior número de queimadas indica, via de regra, maior extensão total queimada, é equivocada.

Outro fator importante a ser considerado surge a partir da comparação entre a média histórica de focos de calor e o mapeamento para o mês de outubro de 2010; enquanto que a primeira possui valores altos, aproximando-se aos dados de setembro, o mapeamento mostrou reduzida área total e número de cicatrizes mapeadas. Esta discrepância demonstra o impacto da baixa resolução temporal (cerca de 16 dias) dos satélites Landsat, uma vez que o mês de outubro marca o início do período de chuvas na região do Parque, e a elevada nebulosidade neste período comprometeu o monitoramento de toda a área do PNSC e APA, evitando que diversas potenciais cicatrizes fossem mapeadas devido a estarem obscurecidas pelas nuvens (*e.g.* Figura 3).

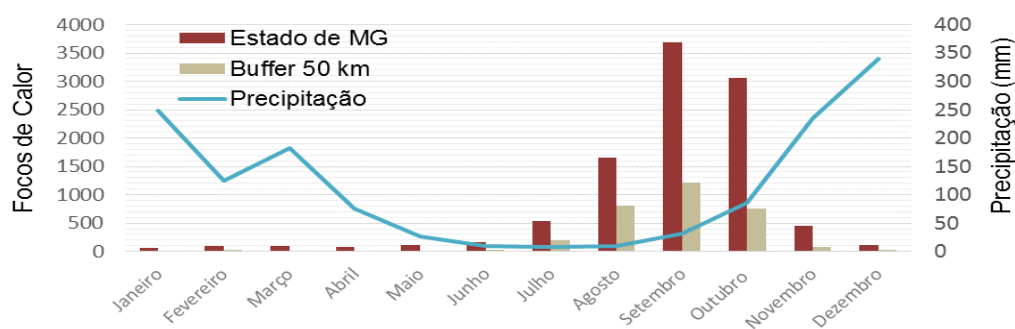


Figura 1. Focos de calor ocorridos no estado de Minas Gerais e na área buffer durante o período de 2000 a 2013, e relação com a precipitação média mensal no período de 1984 a 2013 ocorrida na região do Parque Nacional da Serra do Cipó-MG

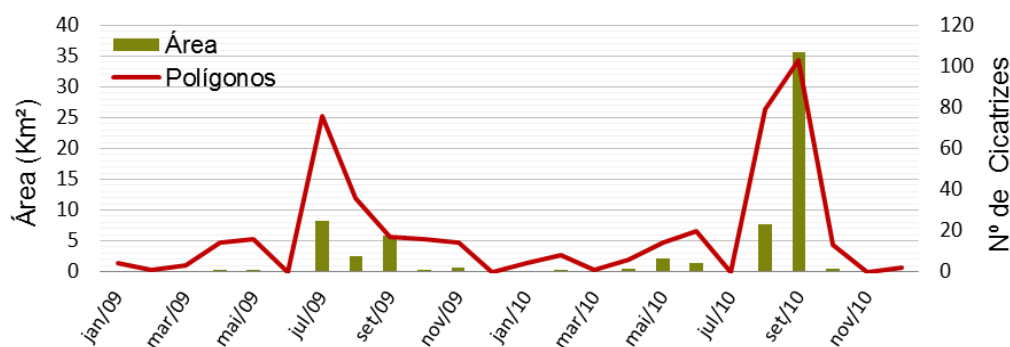


Figura 2. Relação entre a área e o número total de cicatrizes identificadas durante os anos de 2009 e 2010 para a região do Parque Nacional da Serra do Cipó-MG.

O acompanhamento da permanência das cicatrizes de queimadas também foi influenciado diretamente pela nebulosidade presente na região. De um total de 441 queimadas mapeadas, 54% tiveram seu acompanhamento temporal comprometido pela ocorrência de nuvens, impedindo a determinação do momento em que estas desapareciam (Figura 3).

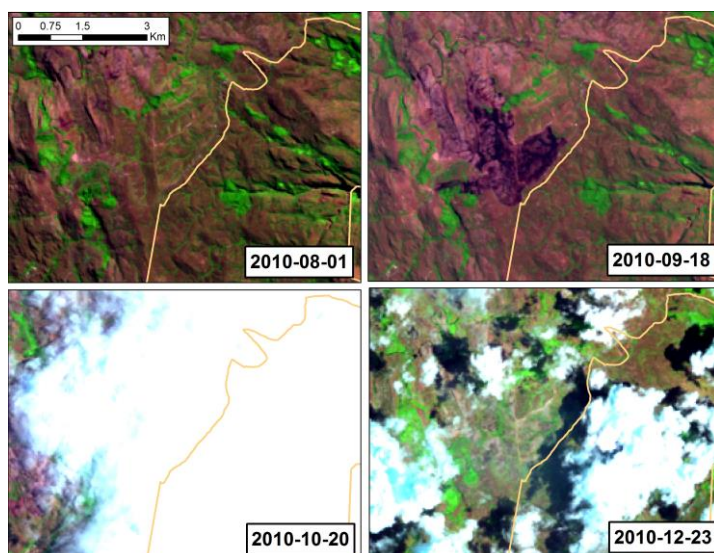


Figura 3. Exemplo de queimada que teve seu monitoramento dificultado pela presença de nuvens localizada na APA “Morro da Pedreira”, bastante próxima ao Parque da Serra do Cipó-MG. A queimada ocorre entre o dia 08/01 e 18/09, é obscurecida durante a observação de 20/10, e já está desaparecida em 23/12, próxima observação sem nuvens. Caso esta queimada houvesse ocorrido após 18/09, provavelmente não seria detectada.

A análise subsequente da influência de diferentes fatores sobre a permanência das cicatrizes limitou-se às 203 queimadas que não foram obscurecidas por nuvens, em sua grande maioria presentes por apenas uma ou duas imagens consecutivas (Figura 4A). Não foi possível observar relação estatística entre o tamanho da cicatriz ou precipitação, e a sua permanência. A variável “tamanho” explicou apenas 2% da variação dos valores de permanência ($r = 0,14$, $R^2 = 0,02$, $p > 0,05$, Figura 4B). Visualmente, uma relação inversa aparenta existir entre a permanência das cicatrizes e a ocorrência de chuvas, de modo que durante os períodos de alta precipitação as queimadas permanecem em média apenas por uma imagem conseqüente ao seu aparecimento, enquanto que durante os períodos de seca, sua permanência pode se estender por séries de 3, 4 ou, até mesmo 5 imagens (Figura 5). Entretanto, notou-se que o fator limitante precipitação, ao ser

analisado isoladamente, não foi capaz de explicar o período de permanência das cicatrizes na região, com apenas 7,5% da variação em permanência explicada ($r = 0,14$, $R^2 = 0,075$, $p < 0.05$, Figura 6). O gráfico de dispersão entre permanência e precipitação sugere que, enquanto se observa que durante os períodos chuvosos quase não há cicatrizes, outros fatores limitantes podem influenciar a duração durante a estação seca, principalmente naquelas cicatrizes que permaneceram na região por apenas uma imagem conseguinte ao seu aparecimento, ou seja, a maioria das cicatrizes mapeadas durante o estudo.

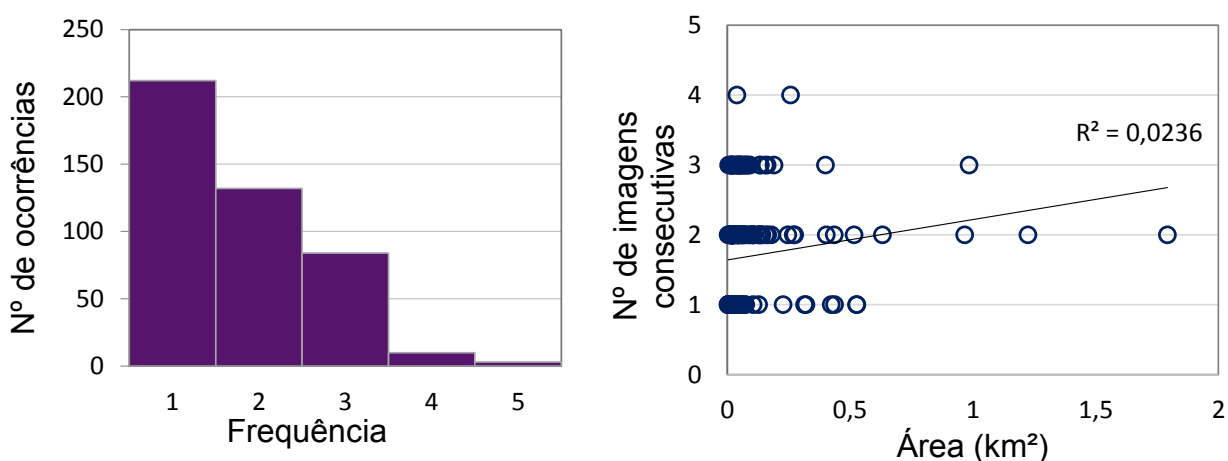


Figura 4. A) Distribuição de frequência do tempo de permanência das cicatrizes de queimada mapeadas, e B) gráfico de dispersão mostrando a relação entre permanência e área queimada.

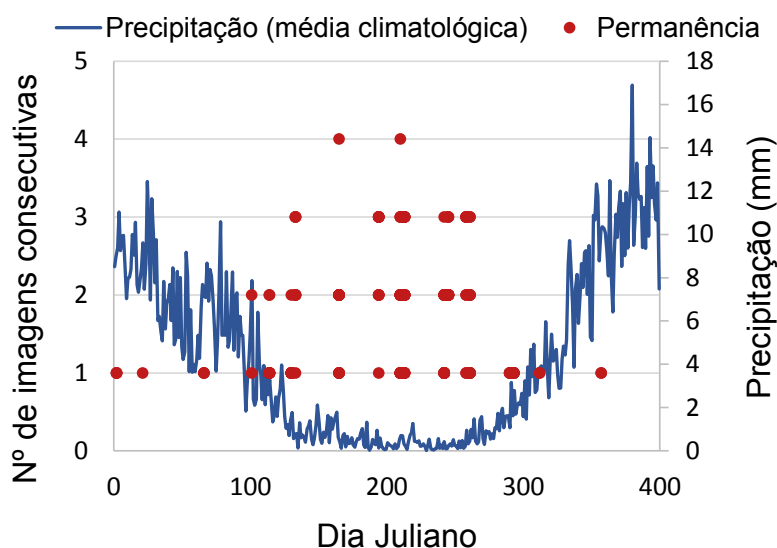


Figura 5. Relação entre a climatologia diária de precipitação para o período de 1949-2013 e a permanência das cicatrizes de queimadas durante os anos de 2009 e 2010.

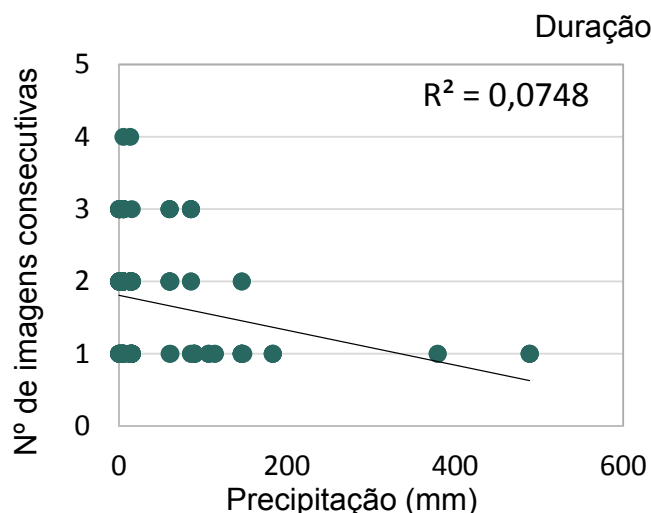


Figura 6. Relação entre precipitação média mensal e tempo de permanência das cicatrizes de queimadas, para os anos de 2009 e 2010.

De fato, as variáveis “tamanho” e “precipitação” demonstram graficamente a provável existência de outros fatores que influenciando a permanência das cicatrizes. Desta forma, é importante salientar que seu poder explicativo (2 e 7,5%, respectivamente), mesmo que considerados baixos, não significam que estes fatores não exercem nenhuma influência na permanência da cicatriz. Outros fatores, como o tipo de vegetação presente na região, o período decorrente desde a última queima e a capacidade de rebrota particular de cada espécie, podem influenciar na permanência das cicatrizes e, associados aos dados apresentados, determinam dinâmica observada para a análise da permanência.

Diferentes estratégias poderiam ser adotadas para o mapeamento de queimadas quando há obscuridade por nuvens em imagens dos sensores Landsat: 1) utilizar imagens adquiridas por sensores de radar; 2) estabelecimento de uma constelação de satélites de monitoramento, aumentando a resolução temporal; 3) uso de satélite capazes de imagear fora do nadir (*side-looking*). As opções 1) e 3) são atualmente possíveis, mas possuem alto custo de aquisição de imagens, pois em sua maioria somente satélites comerciais possuem esta funcionalidade.

4. Conclusões

Conclui-se que apesar de todos os benefícios existentes em utilizar o sensoriamento remoto para o monitoramento dos focos de calor e cicatrizes de queimada, o método demonstrou limitações diante a análise da permanência das cicatrizes associadas às variáveis “tamanho” e “precipitação”. A presença de nuvens promoveu o obscurecimento de diversas cenas adquiridas pelo sensor Landsat 5 TM devido à sua baixa resolução temporal, de modo que possíveis cicatrizes presentes na região não tenham sido mapeadas. A obscuridade promovida pelas nuvens também influenciou diretamente o monitoramento desde o surgimento até o desaparecimento das cicatrizes, e a capacidade de determinação da área total queimada. Destaca-se a também a necessidade em se atentar para a combinação de fatores limitantes que possuem influência direta na permanência de queimadas.

Agradecimentos

A PROPe/UNESP pela bolsa PIBIC. Esta pesquisa recebeu apoio da Fundação de Apoio à pesquisa do Estado de São Paulo, processos 2010/51307- e 2013/50155-0.

Referências Bibliográficas

- Andreae, M.O.; Almeida, S. S. DE; Artaxo, P.; Brandão, C.; Carswell, F. E.; Ciccioli, P.; CULF, A.; Esteves, J. L.; Gash, J.; Grace, J.; Kabat, P.; Lelieveld, J.; Malhi, Y.; Manzi, A. O.; Meixner, F. X.; Nobre, A.; Nobre, C.; Ruivo, M. A. DE L.; Silva-Dias, M. A. F.; Stefani, P.; Valentini, R.; Jouanne, J. Von; Waterloo, M. **Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases and aerosols in Amazonia: The LBA-EUSTACH experiments.** *Journal of Geophysical Research*, 107 (D20): 8.066 8.091, 2002.
- Cardoso, F. S.; Martins, F. S. R. V.; Pereira, L. O.; Sato, L.Y.; Moura, Y. M.; Pereira, G.; Sshimabukuro, Y. E. 2011. Avaliação de áreas queimadas a partir dos índices espectrais NDVI e NDBR. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.7950.
- Cochrane, M.A. (Ed.), **Tropical Fire Ecology: Climate Change, Land Use, and Ecosystem Dynamics.** Springer/Praxis, Heidelberg, Germany/Chichester, U.K, 2009.
- Coutinho, L.M. **As queimadas e seu papel ecológico.** Brasil Florestal, 1980, 44:7-23.
- Eiten G. **The cerrado vegetation of Brazil.** Botanical. 1972. Review 38: 201-341.
- Fiedler, N. C.; Azevedo, I. N. C.; Rezende, A. V.; Medeiros, M. B.; Venturoli, F. 2004. **Efeito de Incêndios Florestais na Estrutura e Composição Florística de uma Área de Cerrado Sensu Strictu na Fazenda Água Limpa - DF.** *Árvore* 28(1):129-138.
- Granemann, D. C.; Carneiro; G. L. **Monitoramento de Focos de Incêndio e Áreas Queimadas com a Utilização de Imagens de Sensoriamento Remoto.** 2009. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 1(1): 55-62.
- Gontijo, G. A. B.; Pereira, A. A.; Oliveira, E. D. S.; Júnior, F. W. A. 2011. Detecção de queimadas e validação de focos de calor utilizando produtos de Sensoriamento Remoto. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.7966.
- Justice, C.; Giglio, L.; Boschetti, L.; Roy, D.; Csiszar, I.; Morisette, J.; Kaufman, Y. **MODIS Fire Products: Algorithm Technical Background Document.** Disponível em <http://modis-fire.umd.edu/Documents/atbd_mod14.pdf>. Acesso em 20 ago 2014.
- Justice, C.O., Malingreau, J.P. **The IGBP-DIS Satellite Fire Detection Algorithm Workshop Technical Report**, IGBP-DIS Working Paper 9, NASA/GSFC, Greenbelt, Maryland, USA, 1993.
- Klink, C. A.; Machado, R. B. **A conservação do Cerrado brasileiro.** Departamento de Ecologia. Instituto de Biologia. Universidade de Brasília (UnB). Brasília-DF, Brasil, 2005. *Megadiversidades* 1(1):147-155.
- Miranda, H.S.; Bustamante, M.M.C.; Miranda, A.C. **The Fire Factor**, p. 55-68. In: Oliveira, P.S. & Marquis, R.J. (orgs.). *The cerrados of Brazil: ecology and Natural History of a Neotropical savanna.* Columbia University Press. 424p.
- PereiraA, J.M. C. P. **Sensoriamento Remoto de Queimadas.** Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa. Florianópolis, 21-26 abril, 2007.
- Ribeiro, M. C.; Figueira, J. E. C. **Uma Abordagem Histórica do Fogo no Parque Nacional da Serra do Cipó, Minas Gerais–Brasil.** *Biodiversidade Brasileira*.2012. Ano I, Nº 2, p.212-22.
- Santos, M. F.; Serafin, H.; Sano, P. T. **Fisionomia e composição da vegetação florestal na Serra do Cipó, MG, Brasil.** *Acta Bot. Bras.* vol.25 no.4 Feira de Santana Oct./Dec. 2011.
- Silva, J.M.C & Bater, J.M. **Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: a Tropical Savanna Hotspot.** 2002, *BioScience* 52(3):225-233.