

Algoritmo automático de detecção de áreas queimadas em imagens MODIS – aplicação na região do Jalapão, TO

Renata Libonati ¹
Alberto W. Setzer ¹
Fabiano Morelli ¹
Carlos DaCamara ²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{renata.libonati, alberto.setzer, fabiano.morelli}@cptec.inpe.br
² Instituto Dom Luiz – Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa
Lisboa - Portugal
carlos.dacamara@fc.ul.pt

Abstract. This paper presents a procedure to detect burned areas based on 1km Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) imagery onboard the TERRA and AQUA satellites. The method uses channels 2 (near-infrared – NIR, centered at 0,856 μm) and 20 (middle-infrared – MIR, centered at 3.96 μm), together with information of active fires detected by INPE's monitoring system. Monthly composites of the "V,W" burned index with fixed and relative thresholds derived from the pixels in the neighborhood of burned areas are applied. An overview is provided for the results obtained in 2005 for a Cerrado (savanna) region over Parque Nacional do Jalapão, in the east of Tocantins, regarding the spatial and temporal distribution of burned areas. The accuracy assessment was performed using burned area maps derived from medium-resolution (30 m) Landsat imagery and a comparison between our algorithm and the NASA/MODIS burned area product MCD45 was also evaluated. The INPE-MODIS quantification of the burned area extent is in agreement within 10% with that of scars derived from Landsat images; for instance the total amount of burned area in the region of study detected by our algorithm was about 2208 km^2 , while the scars detected by Landsat images totalized 2082 km^2 . The NASA MODIS mCD45 product was off by more than 40%. As expected, mapped burned areas in general showed a good agreement in terms of spatial distribution with active fires.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, algoritmos MODIS, remote sensing, burned areas, MODIS algorithms

1. Introdução

Como parte do monitoramento do uso do fogo na vegetação, o Grupo de Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) vem desenvolvendo e aprimorando desde a década de 1980 seu sistema operacional em tempo quase-real (<http://www.inpe.br/queimadas>). O sistema gera e distribui diversos produtos derivados de imagens de satélite ambientais, voltados para o monitoramento das queimadas/incêndios que acontecem no território brasileiro e nos demais países da América do Sul, destacando-se os focos de calor associados aos fogos ativos. O sistema operacional ainda apresenta diversos produtos relacionados à ocorrência de queimadas, como mapas de risco de fogo, mapas de concentração de fumaça, mapas de dias sem chuva e de precipitação acumulada, entre outros. Visando identificar áreas potenciais para o aprimoramento do sistema de monitoramento de queimadas do INPE, a caracterização de áreas queimadas no Brasil afigura-se atualmente crucial visto que tal conhecimento inexistente e que terá impacto positivo numa vasta gama de aplicações.

Atualmente grandes discrepâncias persistem nos produtos globais, tanto na quantificação da extensão da área queimada, quanto na sua localização espacial e temporal. Adicionalmente, a exatidão destes produtos varia ainda de forma significativa de acordo com o bioma. Outra grande dificuldade dos produtos globais está relacionada com sua validação, a qual se torna complexa e onerosa por envolver áreas extensas e com características distintas. Vale ressaltar, que parte dos produtos atuais está começando a utilizar os focos ativos como aproximação para estimar áreas queimadas, a despeito da dificuldade em relacioná-los corretamente devido

à sua amostragem temporal limitada, variabilidade nas condições do combustível e na cobertura de nuvens e diferenças no comportamento do fogo. Adicionalmente, a classificação de áreas queimadas em diferentes produtos é realizada com base em limiares fixos que são prejudicados pelas variações dos efeitos atmosféricos e diferentes coberturas vegetais. Completando, o uso de produtos clássicos, baseados na região do visível e infravermelho próximo, para discriminar áreas queimadas em regiões tropicais é limitado pela característica efêmera do sinal radiativo e pela presença de aerossóis.

As limitações dos algoritmos atuais que geram estimativas de áreas queimadas a nível global, sugerem o desenvolvimento de algoritmos regionais que levem em consideração os desafios descritos acima. Considerando a escala regional, é naturalmente possível considerar as características regionais como vegetação, solo e clima, além de facilitar a validação dos resultados. Neste trabalho será apresentado um novo método de identificação de áreas queimadas, baseado no índice de queimadas proposto por Libonati et al. (2011) para o sensor MODIS, com objetivo de gerar estimativas mensais. Os resultados são validados através da comparação com imagens de média resolução e localização dos focos de calor gerados pelo INPE no parque nacional do Jalapão.

2. Dados

O método de detecção de áreas queimadas baseia-se no sistema de coordenadas proposto por Libonati et al. (2011), que considera características regionais como vegetação, solo e clima, além de utilizar as reflectâncias das duas regiões do espectro eletromagnético onde o sinal radiométrico das queimadas é mais evidente: infravermelho médio (MIR - canal 20 do sensor MODIS, 3,66-3,84 μm) e infravermelho próximo (NIR - canal 2 do sensor MODIS, 0,84-0,88 μm). Atualmente, ambas as regiões do espectro eletromagnético têm sido utilizadas nos estudos acerca da discriminação de áreas queimadas (Roy et al., 1999; Pereira, 1999). Em contrapartida, os métodos convencionais de detecção de áreas queimadas através do sensoriamento remoto por satélite dão prioridade às regiões do vermelho (0,64 μm) e infravermelho-próximo (0,84 μm). No entanto, tanto a região do vermelho quanto a do infravermelho-próximo apresentam a desvantagem da sensibilidade à presença de aerossóis na atmosfera (Fraser e Kaufman, 1985). Desta forma, em regiões tropicais, onde existem grandes camadas de fumaça devido à queima de biomassa, a utilização destas duas regiões do espectro torna-se insatisfatória para a detecção de áreas queimadas. Por outro lado, a região do infravermelho médio tem a vantagem de não ser sensível à maior parte dos aerossóis (Kaufman e Remer, 1994) mostrando-se, ainda, sensível a mudanças na vegetação.

Os dados utilizados foram obtidos do produto MODIS Level 1B 1 km V5 dos satélites Terra e Aqua, que é gerado automaticamente na DGI/INPE no formato HDF. Os dados brutos adquiridos pelo sensor MODIS, chamados CADU (“Channel Access Data Units”), são recebidos pela estação SeaSpace/TeraCan do INPE em Cuiabá, MT, e gravados em fita. A partir das curvas de calibração atualizadas das várias bandas, é feita a conversão para reflectância e temperatura de brilho. É aplicada ainda uma reamostragem das bandas do visível, modificando sua resolução nominal de 250 m para a das bandas termais, que é 1 km. O produto é corrigido para eliminar erros de calibração e georreferenciamento, estando em unidades de radiancia no topo-da-atmosfera [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$]. Apenas imagens diurnas são as utilizadas, pois as noturnas não apresentam a componente reflectiva do canal 20 e não contém informação no canal 2.

Tendo em conta a resolução espacial de 1 km do produto Terra(Aqua)/MODIS Level 1B, os mapas de estimativa de área queimada gerados por este projeto estarão limitados a queimadas com extensão próxima ou superior a 1 km^2 .

3. Método

O esquema de funcionamento do algoritmo de detecção de áreas queimadas é sumarizado na Figura 1.

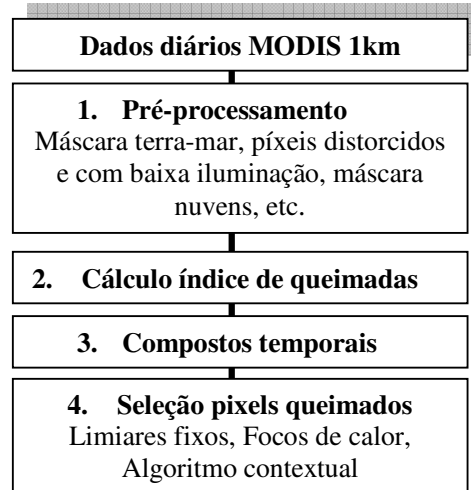


Figura 1. Esquema de funcionamento do algoritmo de detecção de áreas queimadas.

3.1 Pré-processamento

Para garantir que os valores de reflectância utilizados nos cálculos dos compostos temporais sejam fisicamente coerentes, foi realizado um pré-processamento nos dados. Assim, para um pixel ser considerado “apto” a ser utilizado, ele precisa satisfazer as seguintes condições:

- i. ângulo solar zenital maior que 46° , para evitar erros na reflectância da banda 20;
- ii. ângulo de visada maior que 46° , para evitar grandes distorções do tamanho do pixel;
- iii. localizado em terra – Máscara terra/mar (produto MOD03);
- iv. radiâncias positivas e reflectâncias entre 0 e 1;
- v. sem nuvem – Cloud mask utilizando limiar do índice “W”.

3.2 Cálculo do índice de queimadas

O índice de queimada “V,W” desenvolvido por Libonati et al., 2011, o qual é utilizado neste trabalho, foi calculado através dos dados de reflectâncias diárias dos canais 2 e 20 do produto 1km MODIS Level 1B calibrated radiances, já pré-processados. O referido índice se baseia em uma transformação no espaço do infravermelho próximo e médio com o objetivo de maximizar a informação espectral de forma a que as áreas queimadas pudessem ser discriminadas. A transformação baseia-se na diferença entre a reflectância nos infravermelhos próximo e médio, em conjunto com a distância a um ponto de convergência no espaço espectral dos infravermelhos próximo e médio, ponto esse representativo de uma área completamente queimada. Devido à radiância medida na região do infravermelho médio do canal 20 ser afetada tanto pela radiação térmica quanto pela solar refletida, foi necessário isolar a componente refletida do sinal total medido pelo sensor. Para sua extração foi utilizado o método proposto por Kaufman e Remer (1994), o qual foi devidamente analisado para as regiões tropicais por Libonati et al. (2010), apresentando resultados satisfatórios quando o objetivo final é a identificação de áreas afetadas pelo fogo.

3.3 Compostos temporais

O monitoramento das áreas afetadas pelo fogo nas regiões tropicais com base numa única data de aquisição é prejudicado devido à elevada ocorrência de nuvens. Além disto, durante a época de queimada, grandes e densas nuvens de fumaça ocultam a superfície, dificultando a observação das áreas afetadas pelo fogo. Assim sendo, e pelas constantes variações da vegetação, torna-se necessário proceder a uma composição de diversas imagens diárias, de forma a obter uma imagem composta multitemporal correspondente a um determinado período (e.g. 15 dias ou mensal), com menor contaminação por nuvens e sombras de nuvens, e boas características espaciais. Além de útil na remoção de nuvens e contaminação atmosférica, a técnica de compostos é também válida para mitigar os efeitos da variabilidade da reflectância devido às variações da geometria de iluminação e visão. Neste sentido, o algoritmo gera compostos mensais de ~30 dias baseados no mínimo valor do índice W. Esta condição garante que o sinal da queimada seja retido, já que os menores valores do índice W estão associados às áreas queimadas.

3.4 Seleção pixels queimados

Cada pixel é classificado como queimado ou não através de técnicas de segmentação de imagem conhecidas como limiarização. Vários produtos atuais de área queimada baseiam-se em limiares fixos, e.g. o produto GLOBSCAR com o sensor ATSR (Simon et al. 2004) e o produto MCD45A1 com o sensor MODIS (Roy et al. 2008). Entretanto, foi provado que limiares fixos são prejudicados pelas variações dos efeitos atmosféricos e pelos diferentes tipos de cobertura vegetal (Barbosa et al. 1999). Com a finalidade de mitigar as limitações dos limiares fixos, neste trabalho, em conjunto com os limiares fixos foram usadas técnicas de geração automática de limiares variáveis, particularmente aquelas desenvolvidas com o cálculo da média e do desvio padrão na vizinhança do pixel, como por exemplo, nos estudos de Roy et al. (1999) e Barbosa et al. (1999). Foram ainda utilizados dados auxiliares acerca da localização dos focos de calor.

- ***Focos de calor***

Segundo Giglio et al. (2009), em latitudes tropicais e sub-tropicais, a frequência de passagens dos satélites AQUA e TERRA, mesmo em combinação, resulta numa máscara de focos de calor que subestima de forma considerável a extensão de grandes áreas queimadas. Para mitigar este problema, duas medidas foram tomadas. A primeira consiste em expandir a área de atuação do foco. Isto é, para cada foco de calor foi delimitado um buffer para análise de 3x3 pixels ao redor do foco. A segunda medida foi utilizar focos não só dos satélites AQUA e TERRA, mas também provenientes de outros satélites, como NOAA e GOES. A utilização de focos de calor provenientes de mais satélites garante uma melhor cobertura tanto temporal quanto espacial da área de estudo, possibilitando diminuir as omissões da detecção dos focos e, consequentemente, garantir melhor homogeneidade espacial dos resultados do algoritmo de detecção de áreas queimadas.

Assim sendo, para cada foco de calor foi delimitado um buffer de 3x3 pixels ao redor deste foco. Para ser considerado um pixel “apto” a ter sido queimado, o pixel deve estar contido em um buffer do foco de calor. Isto se justifica pelo fato de que áreas onde não foram detectados focos de calor, dificilmente terão áreas queimadas; logo, o algoritmo se restringe a áreas ao redor de onde foram encontrados focos de calor. A Figura 2 exemplifica a área abrangida pelo buffer dos focos de calor. Os satélites AQUA, TERRA, NOAA e GOES possuem resoluções espaciais que variam de 1 a 4 km no nadir. Portanto a escolha do buffer

de 3x3 pixels, aproximadamente 9 km² de área, engloba o erro associado à detecção dos focos para estes satélites.

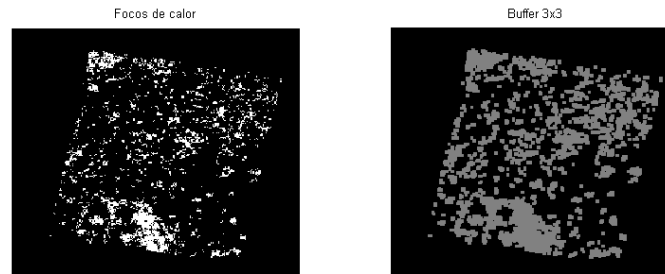


Figura 2. Buffers de 3x3 pixels (direita) aplicados em cada foco de calor (esquerda). Para localização ver Figura 4.

- **Limiars fixos**

Para os pixels contidos no buffer dos focos de calor, a seleção inicial de pixels contendo área queimada foi elaborada aplicando limiars fixos apropriados nos compostos do índice W e também nas diferenças entre os compostos do mês atual (t) e do mês anterior (t-1). Os valores dos limiars fixos foram obtidos através do método de classificação em árvore, sendo os preditores formados por valores do índice W no mês t e por valores de diferenças de W entre mês t e mês t-1 extraídos de um total de 255 pixels MODIS queimados nos biomas Cerrado e Amazônia ao longo de diferentes meses do ano. Com base do resultado da classificação em árvore, e ainda levando em consideração uma exaustiva inspeção visual de pixels queimados em imagens MODIS, um pixel é considerado queimado se estiver de acordo com as três condições a seguir:

- i) Estiver contido no buffer dos focos
- ii) $W_t \leq 0.14$ (1)
- iii) $\Delta W_{t-(t-1)} \geq -0.05$ (2)

Onde W_t corresponde ao valor do índice de queimada W no mês t e $\Delta W_{t-(t-1)}$ corresponde ao valor da diferença de W entre o mês t e o mês t-1. A primeira condição restringe o conjunto de pixels àqueles onde um foco de calor foi detectado em um raio de 3 km. A segunda e terceira condições restringem o conjunto de pixels àqueles que têm maior chance de terem sido queimados por meio do uso de limiars fixos.

- **Algoritmo contextual**

A etapa final do método consiste na aplicação de técnicas de geração automática de limiars variáveis, particularmente aquelas desenvolvidas com o cálculo da média e do desvio padrão na vizinhança do pixel de interesse. Esta etapa é necessária para garantir a identificação de pixels queimados que não foram identificados com tal na etapa anterior. A omissão destes pixels na etapa anterior pode ocorrer devido a vários fatores, entre eles, por não terem sido completamente queimados, ou pelo grau de severidade do fogo não ter sido muito grande, levando a um baixo sinal radiométrico. Portanto, a etapa final do algoritmo torna-se necessária para reduzir os erros de omissão nos casos onde o sinal radiométrico da área queimada não foi suficiente para ser detectado pela etapa anterior.

Um pixel é considerado com queimada ou não através da comparação de suas características com as da vizinhança. A vizinhança é definida como um grid de 5x5 pixels centrado num pixel semente (do inglês “seed”). Um pixel semente é aquele detectado como queimada na etapa anterior. Apenas os pixels detectados como queimada na etapa anterior são utilizados para o cálculo da estatística na vizinhança (grid de 5x5 pixels) de um pixel semente. A estatística da vizinhança é composta pelo cálculo da média e desvio padrão do índice de

queimadas W , nomeadamente \hat{W} e δW . Um pixel candidato a queimado será considerado efetivamente queimado se satisfizer a seguinte condição:

$$W_{cq} \leq \hat{W} + (3 \times \delta W) \quad (3)$$

Onde o subscrito “cq” indica um pixel candidato a queimado.

Cada novo pixel detectado como queimado nesta etapa é considerado uma nova semente na iteração subsequente. Novas iterações são realizadas até não haver nenhuma nova semente, conforme a Figura 3. A partir do resultado do limiar fixo (coluna 1 e linha 1 da fig. 3) é feita a primeira iteração com a incorporação de novos pixels sementes e assim sucessivamente até não haver mais novos pixels sementes (iteração 5, não apresentada na fig. 3). O resultado final (coluna 3 e linha 2 da fig. 3) é a junção de todas as etapas anteriores.

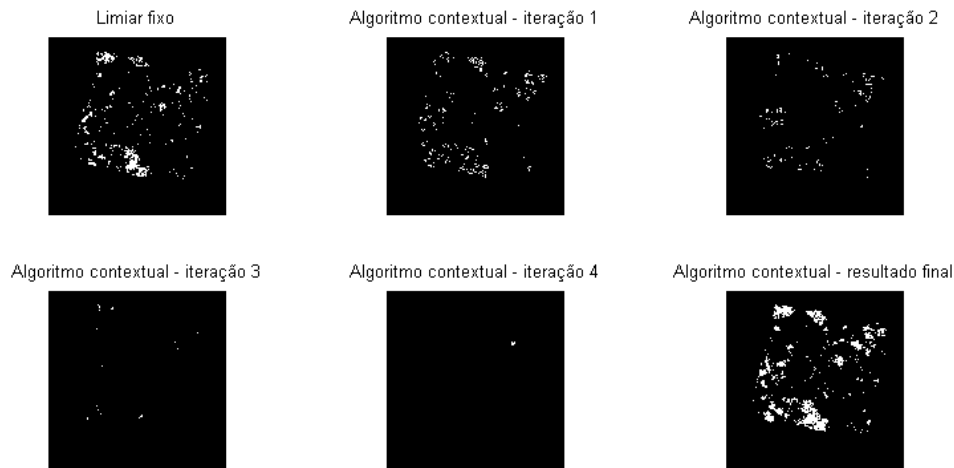


Figura 3. Etapas do processamento do algoritmo contextual. Para localização ver Figura 4.

4. Resultados e análises

A área escolhida para validação do algoritmo é a região do Jalapão, a qual se localiza na porção leste do estado do Tocantins, limítrofe com os estados da Bahia, Piauí e Maranhão. A pressão sobre a região em termos de desmatamentos e queimadas vem crescendo ao longo dos últimos anos. Durante o período de seca em 2010 foram registrados na área de abrangência do Corredor Ecológico aproximadamente 60% de todos os focos do Cerrado. Os dados de cicatrizes de queimadas mapeadas com Landsat, os quais foram utilizados para validação, concentram-se nos meses de julho e agosto. A Figura 4 apresenta a região de estudo e a delimitação de órbita-ponto Landsat utilizada para validação (221/67).

A Tabela 1 apresenta o total de área queimada obtido com o algoritmo do INPE em desenvolvimento, para a área da órbita ponto Landsat 221/67, assim como a área queimada obtida com suas imagens TM-5, e com o produto MCD45 e o número total de focos de calor detectados com os satélites AQUA, TERRA, GOES e NOAA obtidos através do banco de dados de queimadas do INPE. Nota-se que a quantificação da área queimada feita com o algoritmo está de acordo com a área queimada calculada a partir de dados de imagens de alta resolução (Landsat) dentro do limite de 10%. Por outro lado, as estimativas feitas pelo produto MCD45 subestimam quase a metade a área afetada pelo fogo.

A quantidade de focos de calor não pode ser utilizada para quantificar a área queimada, pois um foco ativo se refere a um horário específico de passagem do satélite e, portanto está sujeita a perda de informações em períodos do dia sem a ocorrência de passagens do satélite; além disso, a energia de uma combustão de poucas dezenas de m^2 costuma saturar todo o píxel com um ou mais km^2 . Entretanto, é possível verificar pela Tabela 1, que existe uma boa

correlação entre a quantidade de focos detectados e a quantidade de área queimada com o algoritmo desenvolvido e com as imagens Landsat.

Apesar dos focos ativos não serem indicadores da extensão de área queimada, estes podem ser utilizados como indicativo da localização espacial e temporal destas áreas. A coerência espacial entre a localização dos focos de calor e as áreas queimadas pode ser observada na Figura 5, para o mês de setembro de 2005. Vale a pena ressaltar que na Figura 5 estão representados os focos de calor obtidos com os satélites AQUA, TERRA, GOES e NOAA segundo o banco de dados de queimadas do INPE. Em geral, ocorre uma boa concordância na distribuição espacial das áreas queimadas e dos focos de calor.

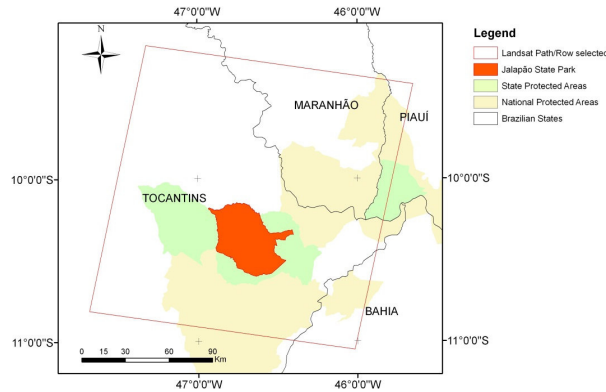


Figura 4. Localização da área de validação cicatrizes de queimadas.

Tabela 1. Total de área queimada em julho e agosto e acumulado nestes dois meses de 2005 na área da órbita-ponto Landsat 221/67 com as diferenças em porcentagem relativas ao valor de referência nas imagens Landsat; a área de cada foco foi assumida em 1km².

Ano: 2005	Área queimada Landsat, km ²	Área queimada INPE, km ²	Área queimada MCD45, km ²	Nº focos de calor INPE
Julho	670	861; 21%	321; -52%	787; 17%
Agosto	1412	1347; -5%	836; -41%	1134; -20%
Acumulado	2082	2208; 6%	1157; -44%	1921; -8%

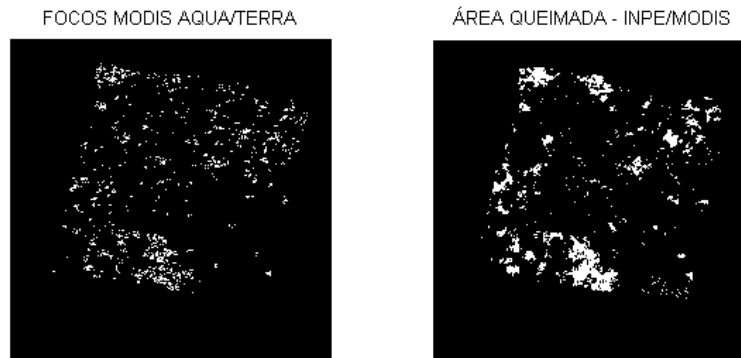


Figura 5. Coerência espacial entre focos de calor (esquerda) e área queimada (direita). Para localização ver Figura 4.

5. Conclusões e trabalhos futuros

Informações sobre as distribuições espaciais (localização e extensão) e temporais das áreas queimadas no Brasil são cruciais na gestão dos recursos naturais, e nos estudos de

química da atmosfera e de mudanças climáticas, entre outros. Neste contexto, o presente trabalho apresenta as etapas de processamento do algoritmo automático de detecção de áreas queimadas atualmente em desenvolvimento pelo Grupo de Queimadas do INPE. Utilizando os canais infravermelho-próximo e médio do sensor MODIS, com 1 km de resolução espacial, o algoritmo baseia-se em compostos temporais do índice de queimada “W”, aos quais são aplicados limiares fixos aliados à geração automática de limiares variáveis e também a informações da localização dos focos de calor gerados pelo INPE.

Os resultados mostram que, para testes iniciais na região de Cerrado do Jalapão em dois meses de 2005, o total de área queimada estimado pelo método proposto teve diferença da ordem de 10% em relação aos dados de referência. Além disso, observou-se boa concordância entre a distribuição espacial das áreas queimadas e dos focos de calor. Por outro lado, o produto global de área queimada da NASA com o mesmo sensor MODIS, o MCD45, subestimou em mais de 40% o total da área queimada, o que corrobora a necessidade do desenvolvimento de algoritmos regionais que levem em consideração as características locais, como é o caso do presente método. A estimativa dos erros de comissão e omissão associados ao presente método está em curso e irá contribuir para o refinamento do algoritmo.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) no âmbito da Bolsa nº 2010/19712-2, dos processos CNPq-PCI-INPE-CCST #551006/2011-0 e CNPq-AP #309765/2011-0, e do Projeto Jalapão GIZ. Os autores agradecem à Silvia de Jesus e Ana Lia Lopes pelo processamento das cicatrizes nas imagens Landsat.

Referências

- Barbosa, P. M.; Gregoire, J. -M.; Pereira, J. M. C. An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale. **Remote Sens. Environ.**, v. 69, p. 253–263, 1999.
- Fraser, R. S., Kaufman, Y. J. The relative importance of aerosol scattering and absorption in remote sensing. **IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sensing**, v. 23, p. 525-633, 1985.
- Giglio, L., Loboda, T., Roy, D. P., Quayle, B., and Justice, C. O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor, **Remote Sens. Environ.**, v. 113, p. 408–420, 2009.
- Kaufman, Y. J.; Remer, L. Detection of forests using mid-IR reflectance: An application for aerosol studies. **IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sensing**, v. 32, n. 3, p. 672–683, 1994.
- Libonati, R.; DaCamara, C.C.; Pereira, J.M.C.; Peres, L.F. On a new coordinate system for improved discrimination of vegetation and burned areas using MIR/NIR information. **Remote Sens. Environ.**, v. 115, p. 1464-1477, 2011.
- Libonati, R.; DaCamara, C.C.; Pereira, J.M.C.; Peres, L.F. Retrieving middle-infrared reflectance for burned area mapping in tropical environments using MODIS. **Remote Sens. Environ.**, v. 114, p. 831– 843, 2010.
- Pereira, J.M.C. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. **IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sensing**, v. 37, n. 1, p. 217-226, 1999.
- Roy, D.P., Boschetti, L., Justice, C.O., Ju, J. The collection 5 MODIS burned area product-Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. **Remote Sens. Environ.**, v. 112, n 9, p. 3690–3707, 2008.
- Roy, D. P., Giglio, L., Kendall, J. D., Justice, C. O. Multi-temporal active-fire based burn scar detection algorithm. **Int. Journal of Remote Sensing**, v. 20, p. 1031-1038, 1999.
- Simon, M., Plummer, S., Fierens, F., Hoelman, J.J., Arino, O. Burnt area detection at global scale using ATSR-2: The GLOBSCAR products and their qualification. **Journal of Geoph. Research**, v. 109, D14S02, 2004.