

Adaptação dos índices de queimada (V, W) utilizando informações do SWIR no sensor TM/Landsat

Fabício Rodrigues Teixeira¹
Leonardo de Faria Peres¹
Renata Libonati dos Santos¹

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
CEP 13416-000 – Rio de Janeiro – RJ, Brasil
frteixeira75@gmail.com; {leonardo.peres, renata.libonati}@igeo.ufrj.br

Abstract. An effort has been made by the scientific community to develop thematic products of burnt areas. In such context, LANDSAT series is able to provide continuous, long term data sets, which may contribute in a unique way to build a long time series of burnt area estimates. In this work we intend to adapt the (V,W) burned index to the TM/Landsat5 characteristics in order to derive burnt area maps over Brazilian Cerrado. The (V,W) burned index was firstly designed for MODIS sensor characteristics of channels 2 (near infrared, 0.8 μm) and 20 (middle-infrared – daytime, 3.9 μm). The authors, however, have emphasized that although tested with the MODIS sensor, the proposed transformation may be straightforwardly adapted to other sensors and to other combination of bands, such as the Landsat, working in the shortwave-infrared and near infrared bands. The short - wave infrared (SWIR2, 2.1 μm) domain, such as the middle infrared (MIR), has adequate characteristics for the monitoring of the earth 's surface after fire episodes, taking into account that the spectral response to fire scars in the SWIR domain is similar to that observed in the MIR region. In addition, SWIR2 region is largely unaffected by the presence of aerosols. The adaptation approach takes uses of reflectance data from spectral libraries and TM/Landsat imageries. Results shows that the NIR/SWIR2 adapted (V, W) burn-sensitive vegetation index is appropriate for burned area discrimination in TM Landsat, opening interesting perspectives to the generation of long-term databases of burned areas using OLI/Landsat sensor.

Palavras-chave: remote sensing, satellite monitoring, automated mapping, spectral behavior, sensoriamento remoto, monitoramento com satélites, mapeamento automatizado e comportamento espectral.

1. Introdução

A queima da superfície vegetal no globo proporciona um aumento na concentração de aerossóis na atmosfera, ocasionando uma diminuição no quantitativo de radiação fotossintética nos dosséis vegetais, interferindo no balanço de energia com os fluxos de calor latente e sensível na superfície da Terra (Procopio et al., 2004).

Observações contínuas de áreas queimadas a partir do espaço são relevantes para quantificar e estudar variáveis de interesse, como o total de emissões de biomassa. Para isso dados obtidos por sensores remotos, configuram uma alternativa promissora para o monitoramento espacial e temporal destes eventos de fogo (Grégoire et al., 2003).

Os índices de vegetação, concebidos a partir de imagens de satélites, constituem um método simples e dinâmico no mapeamento da vegetação. Estes índices foram previamente utilizados para detecção e mapeamento de áreas queimadas pelos sensores *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)* e *Thematic Mapper (TM)* (Pereira, 1999; Barbosa et al., 1999; Libonati et al., 2010; 2011; 2012; 2015).

Os índices de queimada (V, W) foram inicialmente desenvolvidos para os bandas do infravermelho próximo (NIR - 0,8 μm) e infravermelho médio (MIR - 3,9 μm) do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)* (Libonati et al., 2011, 2012), se mostrando eficaz na detecção de áreas queimadas em imagens obtidas por este sensor nestas faixas espectrais. Estes autores têm enfatizado que, embora testados com o *MODIS*, o índice de queimadas (V, W) também pode ser adaptado para outros sensores e a outras combinações de faixas do espectro eletromagnético, como as bandas NIR (0,8 μm) e infravermelho de

ondas curtas (SWIR2 - 2,1 μm) do sensor *TM/Landsat-5*. As justificativas para adaptação do índice (V, W) para a região do SWIR2 são baseadas nos seguintes fatores: a) superfícies de vegetação e superfícies queimadas apresentam comportamento espectral parecido nas regiões do MIR e do SWIR2; b) as regiões espectrais do SWIR2 e MIR apresentam baixa atenuação por aerossol de queimadas; c) as regiões espectrais do SWIR2 e MIR apresentam o mesmo comportamento espectral condicionado pela absorção de água; d) a disponibilidade do SWIR2 em sensores de maior resolução espacial como *TM/Landsat* e o *MSI/Sentinel-2*; e) a região espectral do MIR não se apresenta em outros sensores com série temporal longa como o *TM/Landsat*; f) a região espectral do SWIR2 não apresenta sobreposição de fonte de radiação solar refletida pela superfície, com a emitida pela faixa do termal.

No presente trabalho é proposta uma adaptação do índice de queimada (V, W), utilizando as seguintes informações referentes às bandas 4 NIR (0,8 μm) e 7 SWIR2 (2,1 μm): 1) função resposta do sensor *TM/Landsat*; 2) dados de reflectância de bibliotecas espectrais; e 3) dados de reflectância coletados em imagens *Landsat-5*.

2. Metodologia de Trabalho

As imagens do sensor *TM/Landsat-5* utilizadas neste estudo cobrem a região do Jalapão, no Estado do Tocantins – TO (Figura 1) e corresponde a órbita/ponto 221/67. Esta região está inserida no Bioma Cerrado e apresenta áreas ainda preservadas com grupos fisionômicos distintos e áreas antropizadas pela atividade agrícola.

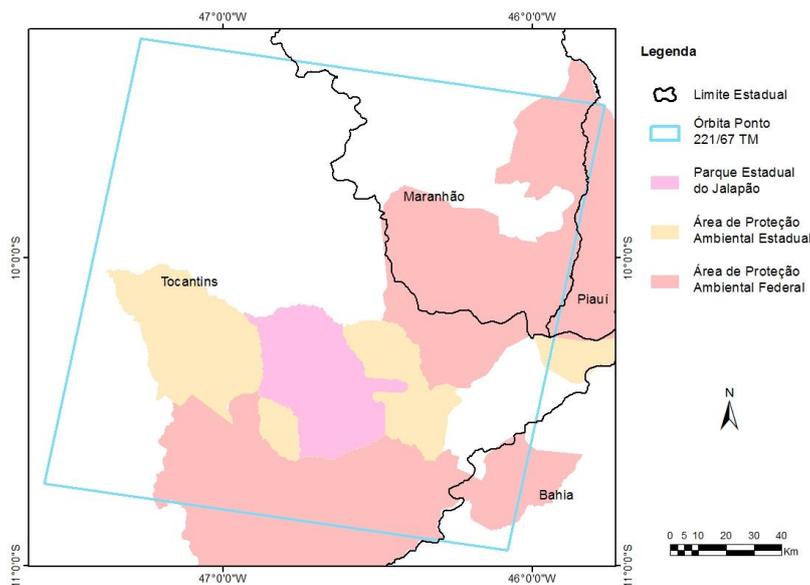


Figura 1. Localização da região de estudo com a delimitação da cena do *TM/Landsat-5* que recobre a área.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) mapeia as áreas queimadas nesta região e os dados obtidos são convertidos em arquivos vetoriais, formando uma base de dados de cicatrizes de áreas em que ocorreram incêndios. O mapeamento de áreas queimadas realizado pelo INPE para esta região é feito com base nas imagens do sensor *TM/Landsat-5*, sendo esta uma das justificativas para escolha deste sensor para adaptação do índice (V, W). Nesta pesquisa, estas cicatrizes de áreas queimadas, foram utilizadas para coleta de amostras de refletância e como referência para validação do mapeamento do índice (V, W) adaptado.

A metodologia utilizada para elaboração nesta pesquisa ficou organizada em duas seções: desenvolvimento e aplicação.

A seção desenvolvimento consiste nas rotinas necessárias para a adaptação dos índices V e W para as bandas NIR e SWIR2 do TM/Landsat. Para proceder a esta adaptação dos índices de queimada V e W para as regiões do NIR e SWIR2 foi necessário previamente a construção dos índices η e ξ para a nova região espectral de interesse, já que esses índices servem posteriormente como um novo espaço para a definição dos índices V e W. Para a adaptação do índice η , torna-se necessário definir o ponto de convergência no espaço SWIR2/NIR representativo de uma superfície totalmente queimada (pós-fogo). Torna-se também necessário a determinação do ponto no espaço SWIR2/NIR representativo de uma superfície totalmente vegetada ($\rho_{CV_{SWIR}}$, $\rho_{CV_{NIR}}$) simbolizando a condição pré-fogo. O estabelecimento do ponto de convergência no espaço SWIR2/NIR foi definido utilizando dois conjuntos de dados: dados de reflectância de amostras presentes nas bibliotecas espectrais (utilizados como referência) e amostras de reflectância coletadas de imagens TM/Landsat-5 (referentes ao ano de 2010) com base nas cicatrizes processadas pelo INPE.

Os dados de reflectância espectral utilizados para análise neste estudo foram obtidos em parte a partir das bibliotecas espectrais do *Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)* e do *MODIS University of California, Santa Barbara (UCSB)*. Dados de reflectância de superfícies como vegetação, água, rochas e solos foram obtidos a partir destas duas bibliotecas. Maiores informações sobre estas bibliotecas espectrais podem ser obtidas em Baldrige et al. (2009). Entretanto, tanto a biblioteca ASTER como a biblioteca MODISUCSB não possuem informações espectrais de material carbonizado. Os dados de reflectâncias de carvão e cinza utilizados neste trabalho foram obtidos por Libonati et al. (2011), a partir de quatro amostras de materiais carbonizados coletadas pelo Laboratório de Combustão do INPE (LCP/INPE) durante um incêndio ocorrido em Alta Floresta, Mato Grosso, Brasil. Amostras de material carbonizado também foram coletadas em Portugal, provenientes de fitomassa da espécie “Pinheiro Bravo”. Os dados de reflectância coletados nas imagens TM/Landsat-5 (ano 2010) foram obtidos em cenas pré e pós fogo, para três diferentes fisionomias do Cerrado em seis diferentes combinações: “Agricultura”, “Campo Limpo”, “Campo Sujo”, “Campo Limpo e Sujo”, “Agricultura Campo Limpo Campo Sujo”, sendo esta última combinação também limitada pelo percentil de 5-95%. A partir do processamento destes dados no ambiente MATLAB, foram estabelecidos os pontos de convergência de todas as combinações, o vetor deslocamento formado por uma superfície totalmente vegetada e uma superfície totalmente queimada e as isolinhas do espaço η e ξ . Em seguida os valores de reflectância (Imagens TM/Landsat 2010) do espaço amostral η e ξ formado pelas coordenadas NIR e SWIR2, foram transformados para um novo espaço amostral (V, W) formado pelas coordenadas η e ξ .

A escolha dos pontos de convergência considerou o critério do ajuste mais ortogonal proporcionado entre as isolinhas do espaço (η , ξ) e o vetor deslocamento formado entre os pontos de convergência. Este critério de ortogonalidade seguiu a premissa de que um índice espectral é considerado ótimo, quando este é sensível ao fenômeno de interesse e insensível a fatores externos (Verstraete e Pinty, 1996).

A identificação dos pontos de convergência que apresentaram o ajuste mais ortogonal foi baseada na aplicação do índice de separabilidade M para as imagens TM/Landsat 2010, resultantes da transformação dos valores de (V, W) no novo espaço amostral.

Para verificar a adaptação do índice de queimada, foi realizado novamente o cálculo de V e W, mas desta vez, com base somente no ponto de convergência escolhido e utilizando imagens TM/Landsat de outras datas (2005 e 2008), de forma a não favorecer uma condição tendenciosa dos resultados. Com base nestas novas condições, a verificação da adaptação foi realizada mediante novo teste do índice de separabilidade M.

Com a escolha dos pontos de convergência e feita à verificação, é concluída a seção “desenvolvimento”, que tem o propósito de adaptação do índice de queimada (V, W) para as bandas do *NIR* e do *SWIR2* do *TM/Landsat*.

A segunda seção desta pesquisa, denominada “aplicação”, consiste na utilização do índice W adaptado para o mapeamento automatizado de áreas queimadas. Para aplicar o índice adaptado, foram definidos limiares espaciais e temporais do índice W utilizando imagens *TM/Landsat* dos anos de 2005 e de 2008. Para a aplicação do índice W foram definidos limiares espaciais e temporais, com objetivo principal de estabelecer valores limites que sejam capazes de diferenciar área queimada de não-queimada com base em W, de forma que ocorra o mínimo de sobreposição (confusão de classes) de valores de W para pixels de áreas queimadas e não-queimadas. A idéia é que os limiares permitam identificar o máximo possível de áreas queimadas sem classificar erroneamente os pixels não-queimados. Com a definição dos limiares o índice W foi aplicado em imagens *TM/Landsat* dos anos de 2006, 2007 e 2009. A validação dos resultados foi processada no aplicativo *MATLAB*, utilizando como referência as cicatrizes de áreas queimadas produzidas pelo INPE.

A acurácia da classificação do índice, com a validação dos resultados foi calculada pela aplicação de 4 medidas de verificação derivadas da tabela de contingência (Wilks, 2006).

3. Resultados e Discussão

A figura 2 apresenta as isolinhas dos índices η e ξ e o vetor deslocamento no espaço *SWIR2/NIR* ligando os pontos de convergência representando vegetação e queimada com base nos critérios selecionados, referente ao percentil dos três tipos fisionômicos do Cerrado (Agricultura, Campo Limpo e Campo Sujo). Estes resultados foram obtidos a partir de coleta de amostras de pixels, em cicatrizes selecionadas referente ao ano de 2010. A visualização do vetor deslocamento no espaço *SWIR2/NIR* representando a mudança na vegetação quando esta é queimada, permite verificar se as isolinhas dos índices η e ξ são ortogonais ao vetor deslocamento. Os pontos de convergência que apresentaram melhor ajuste ortogonal foram PCQ_{SWIR} 0.2045; PCQ_{NIR} 0.0692, referentes ao percentil de 5-95%, sendo que estes pontos foram os que apresentaram o maior índice de separabilidade, $M=2,8$. O cálculo do índice M (Kaufman e Remer, 1994) foi realizado com o objetivo de verificar a sobreposição dos histogramas de frequência das superfícies analisadas. Assim a separabilidade entre as superfícies é classificada como alta, quando o resultado do cálculo de M for maior que 1 ($M > 1$), e a separabilidade é considerada baixa entre as superfícies, quando o valor de M for menor que 1 ($M < 1$).

Utilizando os diferentes pontos de convergência, os valores de refletância foram transformados para valores de V e W, os quais são apresentados no gráfico do chamado “*kitedomain*”, onde os limites do domínio são estabelecidos pelo novo sistema de coordenadas η e ξ .

Os gráficos da Figura 3 apresentam um padrão similar ao que foi verificado por Libonati et al. (2011) para a região do *MIR*, sendo que os valores de V, para a região do *SWIR2*, associados à superfície de vegetação verde, seca e queimada aparecem com pequena dispersão, enquanto os valores de W cobrem uma série de valores. Desta forma, a adaptação dos índices (V, W) para as bandas do *TM/Landsat*, confirmaram que V é um bom classificador do tipo de superfície ao qual o pixel se refere, já que os pixels associados à presença de biomassa tendem a alinhar-se ao longo da curva $V=1$ (como superfícies vegetadas, solos e áreas queimadas). Para W, ficou comprovado que se trata de um bom quantificador quanto ao teor de umidade. Os resultados mostram que as superfícies vegetadas, solos e áreas queimadas estão associados respectivamente a valores altos ($\sim 0,6$), moderados ($\sim 0,2 - 0,4$) e baixos ($< 0,2$) de W.

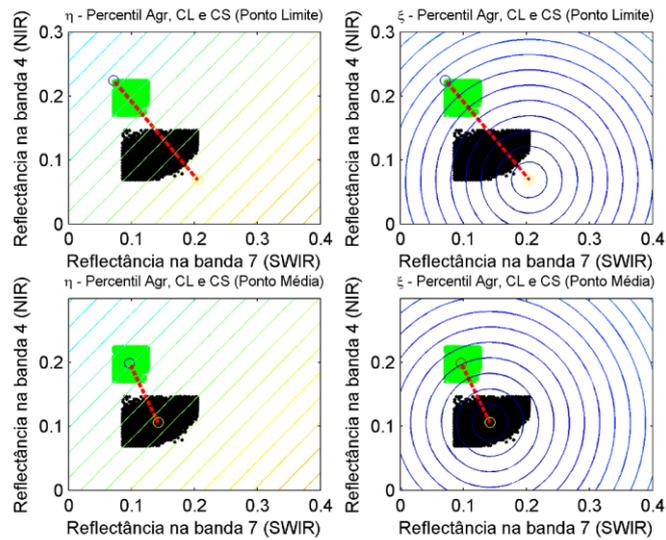


Figura 2. Vetor deslocamento no espaço *SWIR2/NIR* ligando os pontos de convergência representando vegetação e queimada para as fisionomias Agricultura, Campo Limpo e Campo Sujo, calculados com base no critério máximo-mínimo (primeira linha), média (segunda linha) e as isolinhas dos índices η (primeira coluna) e ξ (segunda coluna), mas limitado pelo percentil de 5% e 95%.

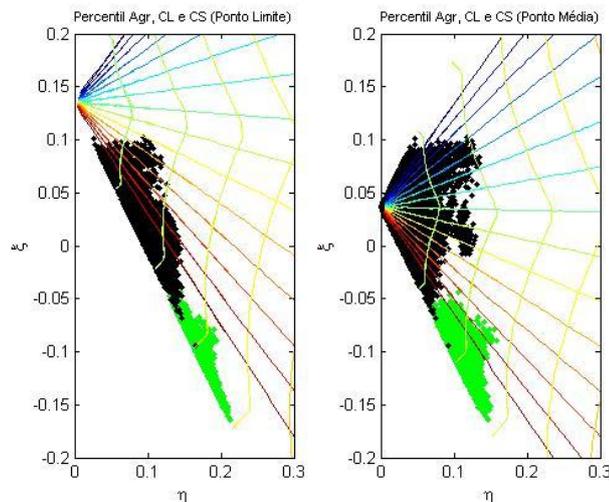


Figura 3. Valores do índice V, W para vegetação (pontos em verde) e queimada (pontos em preto) apresentados no diagrama “kitedomain” com as coordenadas η e ξ , considerando os critérios de limite e média para a amostra Agricultura (Agr), Campo Limpo (CL) e Campo Sujo (CS), limitada pelo percentil 5 e 95%.

A verificação da adaptação do índice de queimada (V, W), apresentou separabilidade (M) de 2,2 (anos 2005) e 2,4 (ano 2008) para a classe queimada, significando alta separabilidade, sendo estes resultados próximos do resultado do índice de separabilidade (M) de 3,32 obtido por Libonati (2010).

O resultado do estabelecimento dos limiares, espacial e temporal, selecionados para a aplicação do índice de queimada (V, W) apresentados na Figura 4, são os valores 0,1671 (a) e - 0,0438 (b), respectivamente. Estes valores correspondem ao percentil de 95% da amostra W_b .

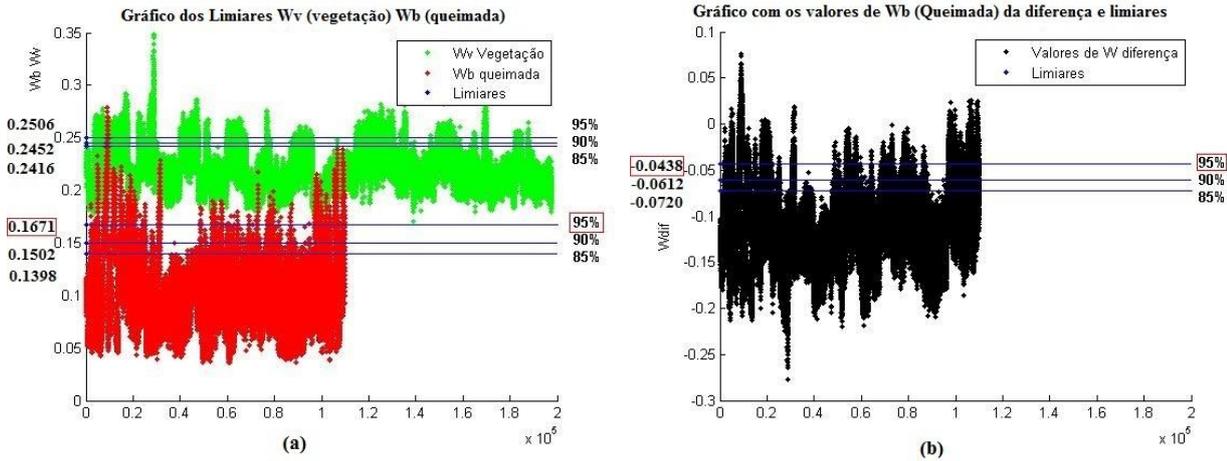


Figura 4. Limiares espaciais (a) definido com base em valores absolutos de W; e Limiares temporais (b) definidos com base em diferença entre valores de W de pixels de áreas queimadas e de áreas de vegetação.

A Figura 5 apresenta como resultado o mapeamento automático (aplicação do índice W) de áreas queimadas em uma cena com valores de W e os limiares espacial e temporal definidos. As áreas queimadas estão representadas pela cor cinza claro, enquanto que a área não queimada é representada pela cor preta.

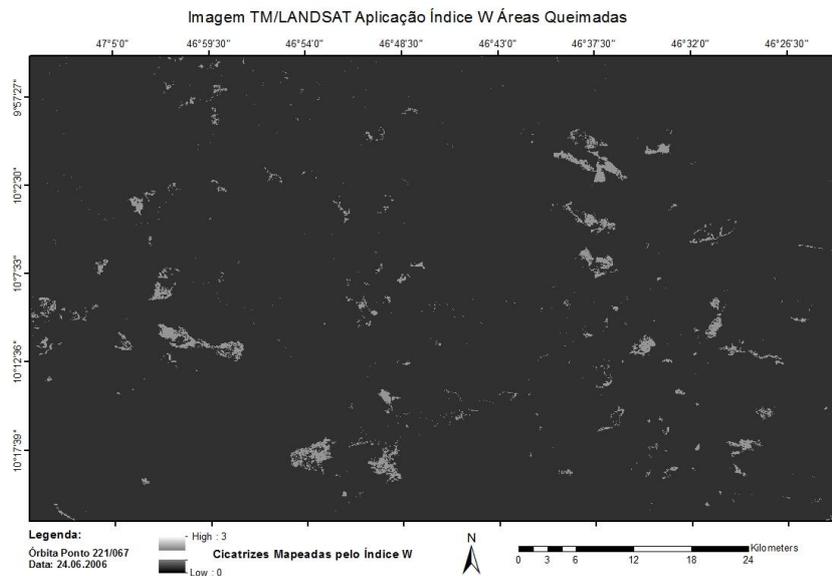


Figura 5. Mapeamento automático com base no índice W adaptado e nos limiares estabelecidos para a imagem TM/Landsat de 24.06.2006.

O resultado da primeira medida de verificação “precisão global” (*AO*), apresentou valores muito próximos de 1 que significa um resultado com grande acerto. Isto indica que a quantidade de pixels classificados corretamente como queimada e vegetação pelo algoritmo, tiveram um resultado preciso, quando utilizado o limiar de 95%. A medida de verificação erro de omissão (*omission error - OE*) representou o resultado do mapeamento de pixels considerados queimadas no mapa de referência, que não foram classificados como áreas queimadas pelo algoritmo. O resultado *OE* que apresentou o menor acerto pelo algoritmo foi 0,70 (resultado menos promissor, *OE* próximo de 1). O resultado que apresentou maior acerto pelo algoritmo foi 0,44 (resultado mais promissor, *OE* próximo de 0). A maior parte dos valores, referentes às outras datas se mantiveram entre (0,44 – 0,59), significando que existe

aproximadamente metade das quantidades de pixels de áreas queimadas no mapa de referência, que deixaram de ser classificados como áreas queimadas pelo algoritmo, considerando o limiar utilizado de 95%.

Os resultados da medida de verificação erro de comissão (*commission error - CE*) indicaram a fração de pixels classificados como áreas queimadas pelo algoritmo do índice *W* adaptado, mas que se apresentaram como pixels de áreas não queimadas no mapa de referência (os falsos alarmes). Os resultados apresentaram valores baixos para as quantidades de falsos alarmes, variando de (0,03 – 0,13). O resultado ífero do *CE* (0,03) foi obtido nas imagens de 26.07.2006, sendo considerado o resultado mais acertado, por ser o valor que mais se aproxima de zero. Este resultado indica excelente eficácia do algoritmo de classificação. A quarta medida de verificação *Bias* apresentou valores que indicam melhor eficácia do algoritmo na imagem de 13.07.2007 (0,92), indicando que existe um enviesamento (próximo de 1, melhor caso) entre a razão de pixels classificados como áreas queimadas pelo algoritmo e os pixels classificados como áreas queimadas no mapa de referência.

Os resultados obtidos pela medida de verificação *Bias*, que apresentaram $B < 1$ (valores subestimados), indicam que os pixels de área queimada mapeados pelo algoritmo com *W* adaptado, ficaram aquém do número de pixels de áreas queimadas previsto no mapa de referência, ou seja, o evento foi classificado com menor frequência que ocorreu. Sendo esta razão observada na maior parte das cenas dos anos 2006, 2007 e 2009 (Figura 6).

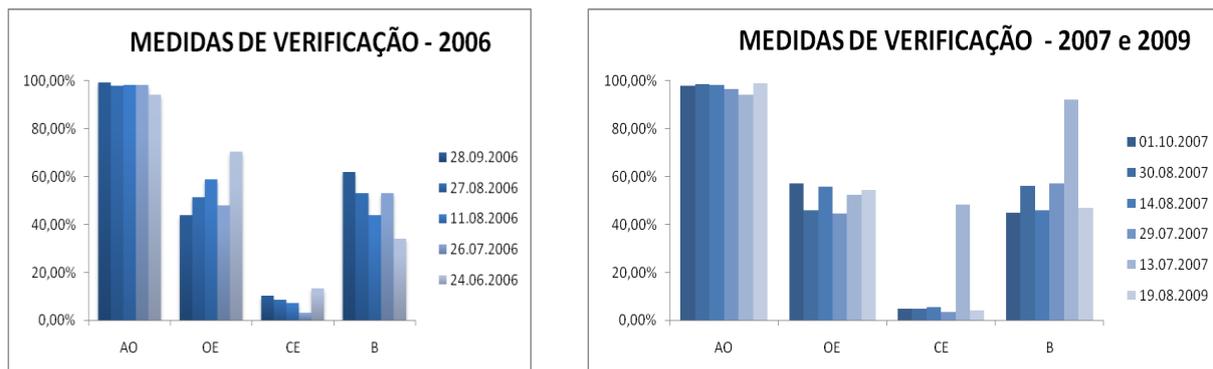


Figura 6. Gráficos do comparativo do percentual de cada medida de verificação por data da imagem, referente à validação do índice *W* aplicado nas imagens de 2006, 2007 e 2009.

4. Conclusões

A eficácia na adaptação do índice de queimada (*V*, *W*) ficou comprovada pelo bom ajuste ortogonal proporcionado entre as isolinhas do índice (no espaço η e ξ) e do vetor deslocamento (produzido pela mudança nos valores de reflectância dos pontos de convergência de superfícies totalmente vegetada e totalmente queimada).

Na definição dos limiares, a análise no gráfico de dispersão dos valores de *W* considerou o percentil de 95%, como uma região de pouca sobreposição de pixels e com grande precisão no acerto de áreas classificadas como queimadas. Após a validação da classificação do algoritmo, o indicador de precisão global (*AO*) apresentou bons resultados, próximo de 1, no entanto os valores do Viés (*B*) se mantiveram abaixo de 1, indicando que alguns pixels foram subestimados pelo algoritmo. Ainda foram obtidos resultados com baixos valores de erro de comissão (*CE*), falsos alarmes, indicando boa confiabilidade do algoritmo. No entanto, foram registrados valores elevados das medidas de verificação erro de omissão (*OE*) e Viés (*B*), indicando pouco acerto de áreas queimadas.

Para pesquisas futuras, sugerimos que seja testada a adaptação do índice de queimada (V, W) para outros sensores que operam na região do infravermelho de ondas curtas. Sensores como *MSI/Sentinel* (resolução espacial de 20m e revisita do satélite de 5 dias) a bordo do satélite Sentinel-2 e *OLI/Landsat-8* (maior resolução radiométrica), operam nas mesmas regiões espectrais testadas nesta pesquisa, *NIR* e *SWIR2*.

Agradecimentos

À CAPES e FAPERJ, pelo apoio financeiro. Ao grupo de Monitoramento de Queimadas do INPE pelo fornecimento dos arquivos vetoriais das cicatrizes de áreas queimadas. Este trabalho foi parcialmente financiado no âmbito do Projeto *BrFLAS Brazilian Fire-Land-Atmosphere System* (FAPESP/1389/2014).

Referências Bibliográficas

- Baldrige, A.M.; Hook, S. J.; Grove, C. I.; Rivera, G. The Aster Spectral Library version 2.0, **Remote Sensing of Environment**, v. 113,711-715, 2009.
- Barbosa, P. M.; Grégoire, 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 Sensing of Environment**, v. 69, 253-263, 1999.
- Grégoire, J. M.; Tansey, K.; Silva, J. M. N. The GBA2000 initiative: Developing a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 6, 1369-1376, 2003.
- Kaufman, Y.; Remer, L. "Detection of forests using mid-IR reflectance: An application for aerosol studies," **IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing**, vol. 32, pp. 672-683, May 1994.
- 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 Sensing of Environment**, 114, 831-843, 2010.
- 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 Sensing of Environment**, 114, 831-843, 2011.
- Libonati, R.; DaCamara, C.; Pereira, J.M.C.; Peres, L.F. Retrieving Middle-Infrared Reflectance Using Physical and Empirical Approaches: Implications for Burned Area Monitoring. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 50, 1, 281-294, 2012.
- Libonati, R.; Da Camara, C.; Setzer, A.; Morelli, F.; Melchiori, A. An Algorithm for Burned Area Detection in the Brazilian Cerrado Using 4 μ m MODIS Imagery. **Remote Sensing**, v. 7, p. 15782-15803, 2015.
- Pereira, J. M. C. A Comparative Evaluation of NOAA/AVHRR Vegetation Indexes for Burned Surface Detection and Mapping. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 3, 1, 217-226, 1999.
- Procopio, A. S., Artaxo, P., Kaufman, Y. J., Remer, L. A., Schafer, J. S., Holben, B. N. Multiyear analysis of amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. **Geophysical Research Letters**, 31, L03108, 2004.
- Verstraete, M. M., Pinty, B. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 34, 5, 1254-1265, 1996.
- WILKS, D. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2.ed. Academic Press, 2006.