

# USO DE SÉRIES TEMPORAIS DE IMAGENS DO SATÉLITE GOES-16 PARA DETECÇÃO DE QUEIMADAS NO PANTANAL SUL MATO-GROSSENSE

Wesley Ricardo da Silva Satelis<sup>1</sup>, Renata Ribeiro do Valle Gonçalves<sup>2</sup>, Jurandir Zullo Junior<sup>3</sup> e Guilherme Vieira Nunes Ludwig<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Matemática Estatística e Ciência da Computação (IMECC)/Unicamp, Rua Sérgio Buarque de Holanda, Cidade Universitária, Campinas, SP e wesleysatelis@gmail.com, <sup>2</sup>Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climatológicas Aplicadas a Agricultura (Cepagri)/Unicamp, Av. André Toselo, Cidade Universitária, Campinas, SP e renata@cpa.unicamp.br, <sup>3</sup>Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climatológicas Aplicadas a Agricultura (Cepagri)/Unicamp, Av. André Toselo, Cidade Universitária, Campinas, SP e jurandir@cpa.unicamp.br; e <sup>4</sup>Instituto de Matemática Estatística e Ciência da Computação (IMECC)/Unicamp, Rua Sérgio Buarque de Holanda, Cidade Universitária, Campinas, SP e gvludwig@ime.unicamp.br

## RESUMO

O Pantanal faz parte de uma planície de inundação no Brasil que desempenha um papel vital na estruturação da vegetação. Esse bioma tem sido atingido com maior frequência e intensidade por queimadas nos últimos anos, colocando em risco sua fauna e flora. O objetivo do trabalho foi desenvolver um método de detecção de queimadas no Pantanal Sul Mato-Grossense a partir da análise de séries temporais de imagens do satélite meteorológico. Foram extraídas séries de dados de índices de vegetação e queima de áreas de vegetação onde houve registro de queima em 2020, e empregados métodos de detecção de pontos de mudança a fim de discriminar os momentos de queima. Os resultados mostraram-se satisfatórios quanto à detecção de mudanças causadas por queima de vegetação e apontam para uma proposta de um método sólido de detecção com aplicação direta em imagens de satélites meteorológicos, de baixa resolução espacial, alta resolução temporal e baixo custo.

**Palavras-chave** – séries temporais, GOES-16, pontos de mudança, incêndios, Pantanal.

## ABSTRACT

*The Pantanal is part of a floodplain in Brazil that plays a vital role in structuring the vegetation. This biome has been hit with greater frequency and intensity fires recently, endangering its fauna and flora. The purpose of the work was to develop a method of detecting fires in the Pantanal of the state of Mato-Grosso do Sul, from the analysis of GOES-16 meteorological satellite images time series. Series of data were extracted from vegetation indices and burning of vegetation areas where there was burning in 2020. Change point detection methods were used to discriminate the burning moments. The results proved to be satisfactory in terms of detecting changes caused by the burning vegetation and point to a proposal for a solid detection method with direct application to images of meteorological satellites, low spatial resolution, high time resolution, and low cost.*

**Key words** – time series, GOES-16, changepoint detection, fire, Pantanal.

## 1. INTRODUÇÃO

Com mais de 84% de seu território conservado, o Pantanal é a maior área úmida remanescente de vegetação natural do mundo. É um Patrimônio Mundial da UNESCO. Em 2020, a temporada de incêndios no Pantanal foi excepcional: quatro milhões de hectares (quase um terço do Pantanal) de florestas, savanas e arbustos foram incendiados. Mas as condições que levaram a esses incêndios estão se tornando cada vez mais comuns à medida que o clima se aquece e os impactos humanos aumentam [1].

A modelagem climática sugere que o Pantanal pode se tornar mais quente e seco, com um aumento de temperatura de até 7 °C até o final do século. Essas mudanças podem levar ao colapso da vegetação atual do Pantanal, tornando-o ainda mais suscetível a incêndios, e podem transformar a região em um tipo diferente de ecossistema [2].

A conservação de recursos naturais simultaneamente à expansão do agronegócio é um desafio constante no Brasil. As queimadas utilizadas para promover a expansão agrícola aumentaram nas últimas décadas. Há uma forte correlação entre o fogo e as áreas agrícolas, com tendências crescentes apontando para a conversão de terras para áreas agrícolas em todos os biomas, inclusive no Pantanal. A alta probabilidade de incêndio indica que a expansão das áreas agrícolas por meio da conversão de biomas naturais impacta diversos ecossistemas naturais, transformando a cobertura e o uso da terra. Esta conversão de terras está promovendo mais incêndios a cada ano [3].

Para estudar os impactos do uso da terra atual e futuro, as mudanças climáticas em eventos de incêndios, e os incêndios nas áreas de expansão agrícola em áreas de conservação, é essencial que exista um sistema de monitoramento e previsão de incêndios. Nesse contexto, o uso de imagens de satélites pode determinar o estresse da vegetação, o clima extremo e como os incêndios interagem. Séries de imagens de satélites meteorológicos como o GOES-16 fornecem informações para determinar a intensidade e propagação dos incêndios, a área queimada e as condições da vegetação antes e depois dos incêndios. Desse modo, o objetivo do trabalho foi desenvolver um método de detecção de queimadas no Pantanal Sul Mato-Grossense a partir da análise de séries temporais de imagens do satélite meteorológico GOES-16.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Índices de vegetação e queima

A cobertura espectral do GOES-16 abrange 16 bandas, com comprimentos de onda nas faixas do visível e infravermelho próximo, médio e termal. Neste trabalho, as bandas espectrais foram denotadas pela letra grega  $\rho$ .

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) [4] é calculado por

$$NDVI = \frac{\rho_{III} - \rho_{II}}{\rho_{III} + \rho_{II}}, \quad (1)$$

em que  $\rho_{III}$  é o fator de refletância no infravermelho próximo (banda 3 - 0,86 $\mu m$ ) e  $\rho_{II}$  no vermelho (banda 2 - 0,64 $\mu m$ ). Os valores no NDVI variam entre -1,0 e 1,0, sendo maior quanto maior for a diferença entre o fator de refletância no infravermelho próximo e no vermelho. Valores próximos a zero correspondem a superfícies sem vegetação.

O Índice de Queima Normalizada (NBR) [5] foi utilizado para avaliação de áreas de queimadas, uma vez que ele evidencia marcas em áreas de vegetação, ou seja áreas de vegetação onde houve queima de biomassa. O NBR é calculado por

$$NBR = \frac{\rho_{III} - \rho_{VI}}{\rho_{III} + \rho_{VI}}, \quad (2)$$

em que  $\rho_{VI}$  é o fator de refletância no infravermelho de ondas curtas (banda 6 - 2,24 $\mu m$ ) e  $\rho_{III}$  é o fator de refletância no infravermelho próximo, (banda 3 - 0,86 $\mu m$ ). Os valores do NBR variam entre -1,0 e 1,0, sendo que valores negativos ou próximos a zero correspondem a áreas com vegetação queimada.

### 2.2. Extração de dados e georeferenciamento

O Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura (CEPAGRI) possui um sistema de recepção e processamento de imagens do satélite meteorológico GOES-16. Foram utilizadas imagens de 30/06/2020 a 29/09/2020 disponíveis no banco de imagens do Cepagri. Os cálculos de NDVI e NBR foram feitos diretamente com códigos implementados na linguagem de computação estatística R. As áreas de queimadas do Pantanal Sul Mato-Grossense foram selecionadas utilizando o programa de monitoramento de queimadas, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) [6]. Por esse programa, foram extraídas as localizações (latitude e longitude) dos focos de incêndio reportados, selecionando somente aqueles em larga escala na região do Pantanal Sul Mato-Grossense.

### 2.3. Redução de efeitos atmosféricos

Técnicas de redução de efeitos atmosféricos foram consideradas neste trabalho como métodos de processamento de sinais em séries temporais de imagens e objetivaram minimizar ruídos causados por fatores externos, como contaminações por nuvens, ângulos de luz solar, efeitos de sombra, efeitos de aerossol e vapor de água e refletância direcional.

Visando manter a resolução temporal, foi aplicado um filtro de mediana adaptativo [7], em que o tamanho da janela é adaptado para os dados da janela atual por um teste de ajuste do sinal estimado mais recente, mantendo a mediana de cada janela móvel. Neste trabalho, essa técnica foi aplicada às séries temporais com observações entre 9h-11h e 13h-15h UTC-3 de cada dia. A escolha dos intervalos se dá pelo fato da qualidade do resultado depender fortemente da quantidade de ruído presente no intervalo e ambos os índices apresentaram menor contaminação em horários ao redor do meio-dia.

O filtro é construído localmente com base no modelo

$$Y_t = Y_{t-j} + (t-j)\beta + \epsilon_j, j = 1, 2, \dots, n_t, \quad (3)$$

isto é, em que as últimas  $n_t$  observações em um instante de tempo arbitrário  $t$  são incrementos lineares de  $\beta$  unidades sobre valores anteriores, para cada uma unidade de tempo.

Seja uma série definida em  $Y_1, Y_2, \dots, Y_t$ . No  $t$ -ésimo instante, queremos encontrar o valor filtrado em  $Y_t$  dado por  $Y_t^*$ . Para um  $n_t$ , os dados que irão compor o valor filtrado são  $Y_t, Y_{t-1}, \dots, Y_{t-n_t+1}$ . Obtemos o estimador  $\hat{\beta} = Med_j\{Y_{t-j}, Y_{t-j-1}\}$ , o incremento mediano sobre  $Y$  por uma unidade de tempo, para a janela de  $n_t$  observações. Assumimos que, dentro da janela, a série está incrementando  $\beta$  unidades por uma unidade de tempo e  $\hat{\beta}$  é um estimador robusto de  $\beta$ .

Como a série assume um efeito linear local, a mediana dos incrementos lineares das últimas  $n_t$  observações é uma previsão robusta do sinal de  $Y_t, Y_t^* = Med_j\{Y_{t-j-1} + (n-j)\beta\}$ . A escolha de  $n_t$  é adaptativa [7].

A técnica foi aplicada utilizando o pacote *robfilter* [8].

### 2.4. Pontos de mudança

A identificação de pontos de mudança nas séries temporais, como as dos índices NBR e NDVI, tem o objetivo específico de discriminar intervalos em que ocorrem mudanças nas propriedades estatísticas,  $\mu$  e  $\sigma$ , causadas pela queima de vegetação.

Seja  $\{Y_{1,t}\}$  a série correspondente a um pixel do conjunto de testes. Um ponto de mudança ocorre quando existe um tempo  $t_\tau \in \{0, \dots, t-1\}$  em que as propriedades estatísticas de  $\{y_{1,0}, \dots, y_{1,\tau}\}$  e  $\{y_{1,\tau+1}, \dots, y_{1,t}\}$  se diferem de alguma forma. A detecção de um ponto de mudança pode ser encarada como um teste de hipóteses. A hipótese nula,  $H_0$ , corresponde a nenhum ponto de mudança ( $m = 0$ ) e a hipótese alternativa,  $H_1$ , a um ponto de mudança ( $m = 1$ ). Se rejeitamos a hipótese nula, o conjunto de dados é segmentado no ponto de mudança, e iteramos o procedimento, corrigindo os testes para evitar descobertas falsas.

A estatística associada ao teste de hipóteses proposto é de razão de verossimilhanças e faz uso da função de log-verossimilhança sob ambas hipóteses,  $H_0$  e  $H_1$ . Sob a hipótese alternativa, considere um modelo com um ponto de mudança em  $t_\tau$ , em que  $t_\tau \in 1, 2, \dots, n-1$ . Assim, a função de log-verossimilhança é dada por,

$$ML(\tau_1) = \log p(y_{1:\tau_1} | \hat{\theta}_1) + \log p(y_{(\tau_1+1):n} | \hat{\theta}_2). \quad (4)$$

Levando em conta a natureza discreta da localização de pontos de mudança, o valor log-verossimilhança sob a hipótese alternativa é simplesmente  $\max_{\tau_1} ML(\tau_1)$ , em que o valor máximo é tomado sobre todos os pontos de mudança possíveis. Assim, a estatística do teste é,

$$\lambda = 2 \left[ \max_{\tau_1} ML(\tau_1) - \log p(y_{1:n} | \hat{\theta}) \right]. \quad (5)$$

O teste envolve a escolha de um limite,  $c$ , tal que a hipótese nula é rejeitada se  $\lambda > c$ . Se rejeitamos a hipótese nula, ou seja, detectamos um ponto de mudança, então estimamos sua posição como  $\hat{\tau}_1$ .

O interesse principal é identificar quantos pontos de mudança foram observados no histórico ( $m$ ), em quais momentos ( $t_1, t_2, \dots, t_m$ ) e qual a mudança resultante ( $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ ) [9]. A abordagem mais comum na detecção de múltiplos pontos de mudança na literatura é minimizando,

$$\sum_{i=1}^{m+1} [\mathcal{C}(y_{(\tau_{i-1}+1):\tau_i})] + \beta f(m), \quad (6)$$

em que,  $\mathcal{C}$  é a função de custo para um segmento, por exemplo a função de log-verossimilhança, e  $\beta f(m)$  uma função penalidade para prevenir sobreajustes, uma versão para múltiplos pontos de mudança do limite  $c$  citado anteriormente. Na prática, a escolha mais comum é uma função que seja linear no número de pontos de mudança, isto é,  $\beta f(m) = \beta m$ . Temos como exemplos comuns as penalidades *Akaike's information criterion* (AIC), em que  $\beta = 2p$  e *Bayesian information criterion* (BIC), em que  $\beta = p \log(n)$  com  $p$  sendo o número de parâmetros adicionais introduzidos pela adição de um ponto de mudança.

O método de busca de pontos de mudança aplicado foi o de segmentação binária [10]. Em suma, a segmentação binária torna qualquer método para um ponto de mudança em um de múltiplos pontos, repetindo-se iterativamente em diferentes subconjuntos da série.

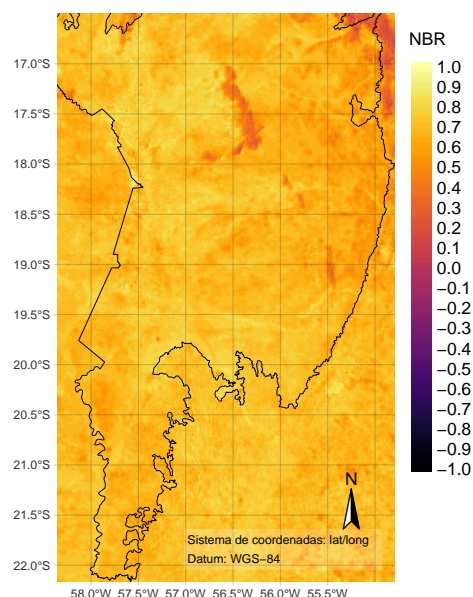
Foram estimados pontos de mudança em média,  $\mu$ , e variância,  $\sigma^2$ , conjuntamente e apesar de terem sido estimadas mudanças em variância, estas serão referidas no decorrer do trabalho na forma de desvio padrão  $\sqrt{\sigma^2}$  e denotadas por  $\sigma$ .

### 3. RESULTADOS

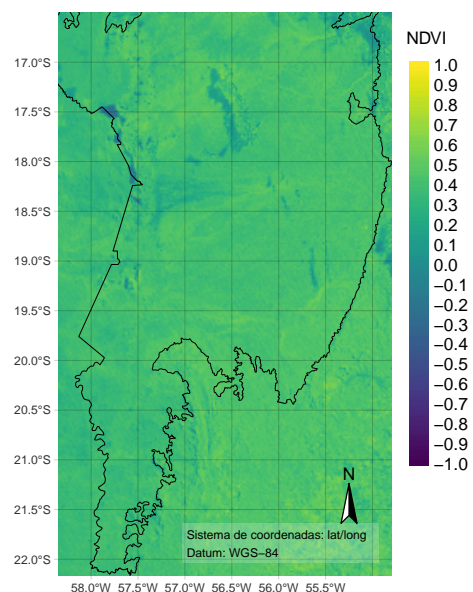
Os índices NBR e NDVI calculados para o bioma Pantanal Sul Mato-Grossense, estão representados nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Todas as imagens recebidas passaram pelo mesmo procedimento, possibilitando a obtenção das séries de qualquer pixel contido nas imagens.

Nas Figuras 3 e 4, as linhas pretas mostram os resultados das reduções de ruídos usando o filtro de mediana com janela móvel adaptativa. Como esperado, ambos estão dentro do intervalo teórico de (-1,0 e 1,0).

Os segmentos em vermelho nas Figuras 3 e 4 representam os intervalos em que as médias e desvios padrões se diferem, ou seja, intervalos dos pontos de mudança detectados. A linha tracejada em laranja é o momento em que a queima foi detectada pelos sistemas de monitoramento de queimadas do INPE.



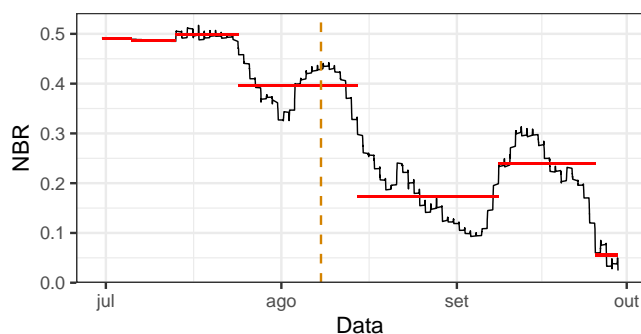
**Figura 1: Índice de Queima Normalizada (NBR), georeferenciado pelas fronteiras do bioma Pantanal Sul Mato-Grossense. Imagem de 15 de julho de 2020 às 11:00 UTC-3.**



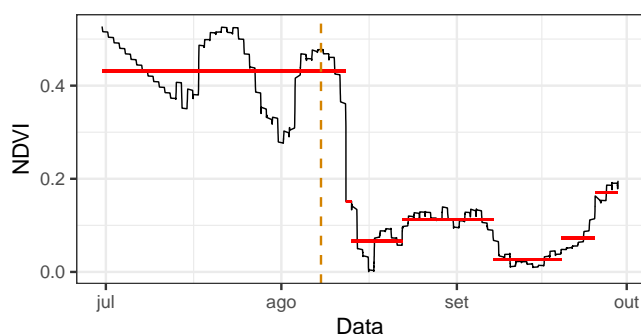
**Figura 2: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), georeferenciado pelas fronteiras do bioma Pantanal Sul Mato-Grossense. Imagem de 15 de julho de 2020 às 11:00 UTC-3.**

### 4. DISCUSSÃO

O índice NBR mostrou-se sensível a queimas de vegetação, apresentando menor variabilidade na ausência de queimadas e quedas bruscas nos valores quando ocorreram as queimadas. O índice NDVI apresentou comportamento condizente com o esperado em áreas com vegetação e áreas com queimadas, mantendo valores próximos a 1 e próximos a zero, respectivamente. Estes resultados tornam imprescindível a combinação dos dois índices na proposta de um método de detecção de queimadas.



**Figura 3:** Em vermelho, segmentos de mudança em média e desvio padrão detectados na série de NBR resultante do filtro por mediana.



**Figura 4:** Em vermelho, segmentos de mudança em média e desvio padrão detectados na série de NDVI resultante do filtro por mediana.

O método de busca de pontos de mudanças utilizado, por segmentação binária, apresentou resultados que merecem maior atenção. Alguns pontos de mudança detectados dividem a série em segmentos que não deveriam ser classificados como pontos de mudança, segmentos relativamente pequenos ou com pouquíssima variação nos valores dos índices, como nos primeiros intervalos detectados na Figura 3. Métodos exatos com custo computacional linear e o emprego e aperfeiçoamento destes métodos, quando aplicados às séries apresentadas neste trabalho [9], podem trazer resultados mais tangíveis, levando a meios mais robustos de detecção de mudanças em propriedades estatísticas, tais como apresentadas anteriormente.

Os resultados obtidos foram satisfatórios no que diz respeito à detecção de mudanças em média e desvio padrão, em ambos os índices. As técnicas aplicadas, certamente, podem ser empregadas no monitoramento de queimadas no bioma Pantanal Sul Mato-Grossense e merecem ser estudadas e aperfeiçoadas.

Existe grande interesse em explorar as relações de dependência espacial entre as séries de pixels vizinhos com o objetivo de aperfeiçoar o método, delimitar grandes áreas, diminuir descobertas falsas e trazer maior consistência aos

resultados.

Este trabalho gerou ferramentas de processamento de imagens que fomentarão outros projetos de pesquisa no Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura - CEPAGRI/UNICAMP, onde foi desenvolvido. Os códigos implementados estão disponíveis em [github.com/wesleysatelis/GOES-16-image-analysis-for-biomass-burning-detection](https://github.com/wesleysatelis/GOES-16-image-analysis-for-biomass-burning-detection) e são guardados pela Licença Pública Geral GNU, podendo ser alterados e redistribuídos.

## 5. CONCLUSÕES

Com uso de séries de imagens do satélite GOES-16 foi possível detectar o momento em que houve queimada nas áreas de vegetação do Pantanal Sul Mato-Grossense utilizando os índices de NDVI e NBR. A grande vantagem em usar imagens do satélite GOES-16 é que se pode obter uma imagem a cada 10 minutos para o bioma do Pantanal inteiro, e obter os valores de NDVI e NBR em tempo real, podendo monitorar a queima da vegetação diariamente.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] R. Libonati, C. C. DaCamara, L. F. Peres, Lino A. Carvalho S., and L. C. Garcia. Rescue brazil's burning pantanal wetlands, 2020.
- [2] I. Bergier and M. Assine. *Dynamics of the Pantanal Wetland in South America*. Springer, 01 2016.
- [3] M. C. Abreu, G. B. Lyra, J. F. Oliveira, A. Souza, I. Pobočková, M. S. Fraga, and R. C. R. Abreu. Temporal and spatial patterns of fire activity in three biomes of brazil. *Science of The Total Environment*, 844, 2022.
- [4] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. *NASA special publication*, 351:309, 1974.
- [5] M. J. L. García and V. Caselles. Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data. *Geocarto International*, 6(1):31–37, 1991.
- [6] INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Portal do monitoramento de queimadas e incêndios florestais.
- [7] K. Schettlinger, R. Fried, and U. Gather. Real-time signal processing by adaptive repeated median filters. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 24:346 – 362, 11 2009.
- [8] R. Fried, K. Schettlinger, and M. Borowski. *robfilter: Robust Time Series Filters*, 2019. R package version 4.1.2.
- [9] R. Killick, P. Fearnhead, and I. A. Eckley. Optimal detection of changepoints with a linear computational cost. *Journal of the American Statistical Association*, 107(500):1590–1598, 2012.
- [10] R. Killick and I. Eckley. changepoint: An r package for changepoint analysis. *Journal of statistical software*, 58(3):1–19, 2014.