

# Uso de imagens de satélites para detecção de queimadas nas áreas canavieiras de São Paulo

Relatório final de atividades PIBIC 2019|2020, vigência 01/08/2019 - 31/09/2020

Wesley R. da Silva Satelis

**Orientação:** Jurandir Zullo Jr., Renata R. V. Gonçalves e Guilherme V. N. Ludwig

## Resumo

Com o objetivo de propor um método de detecção de queimadas em regiões de cultivo de cana-de-açúcar em São Paulo a partir da análise de séries temporais de imagens de satélites meteorológicos, foram empregados métodos de extração de sinal nas séries, removendo efeitos atmosféricos, e métodos de pontos de mudança, discriminando intervalos de tempos em que são observadas mudanças em propriedades estatísticas. Foram estudadas séries de áreas onde se sabe que houve queima de vegetação e cultivo de cana, compreendendo o ano de 2019, empregando métodos precisos de detecção de pontos de mudança sob perspectivas Bayesianas e computacionalmente baratos. Por fim, os resultados mostraram-se satisfatórios quanto à detecção de mudanças causadas por queima de vegetação e apontam para a proposta de um sólido método de detecção com aplicação direta em imagens de satélites meteorológicos, que apresentam baixa resolução espacial e alta resolução temporal. Os resultados obtidos representam um grande avanço no emprego de dados do satélite GOES-16 no Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura da Unicamp.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, séries temporais, GOES-16, pontos de mudança, agricultura, protocolo ambiental, cana-de-açúcar

## 1 Introdução

A cultura da cana-de-açúcar possui função cada vez mais estratégica na economia do país devido ao interesse em conciliar preocupações relacionadas ao meio ambiente e a utilização de combustíveis fósseis, que considera o balanço do lançamento de carbono na atmosfera e suas contribuições no aquecimento global.

Com propósito de reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEEs) na atmosfera, vem ocorrendo a eliminação de emprego do fogo para despalha da cana-de-açúcar, nas lavouras do estado de São Paulo. A mecanização da colheita sem queima prévia evita a emissão de gases de efeito estufa e beneficia o solo, pois deixa sobre ele a palha que antes era queimada e o protege contra erosão, além de contribuir para o aumento de fertilidade e teor de matéria orgânica (Conab 2019).

O mapeamento e monitoramento das lavouras de cana-de-açúcar, com e sem pré-queima da palha, torna-se importante para avaliar a eficácia do protocolo de intenções assinado em junho de 2007 pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA-SP) e a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA).

Novaes et al. (2011) e Mello (2009) afirmam que técnicas de análise espacial de imagens de satélites são essenciais para o mapeamento e monitoramento da colheita da cana-de-açúcar com queima da palha. Rudorff et al. (2010) e Gonçalves et al. (2012a e 2012b) confirmaram que imagens de satélites são eficientes para auxiliar a avaliação de características importantes do cultivo da cana-de-açúcar,

proporcionando resultados relevantes para o debate sobre a produção sustentável de etanol. Adami et al. (2012), avaliando a precisão do mapeamento temático da cana-de-açúcar por meio de imagens de satélites, chegaram a estimativas precisas das áreas de cana-de-açúcar para fins de estatísticas agrícolas empregadas no monitoramento da expansão da cultura no país.

Este projeto de pesquisa utilizou imagens do satélite meteorológico GOES-16 referentes ao estado de São Paulo, empregando técnicas de análise de pontos de mudança em séries temporais.

As áreas de plantio foram modeladas como séries temporais espacialmente dependentes entre si, por um processo de média móvel (ARMA) (uma introdução recente é Morettin e Toloi 2006), incluindo um componente de pontos de mudança (Aminikhanghahi e Cook 2017). O interesse principal foi identificar quantos pontos de mudança foram observados, em quais momentos e qual a mudança resultante e sugerir um método de detecção de áreas com queima de biomassa referente à cana-de-açúcar.

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo geral

O projeto teve como objetivo geral, monitorar a colheita de cana-de-açúcar na safra 2019/2020, por meio de imagens do satélite GOES-16, quantificando as áreas colhidas com e sem queima.

### 2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram: i) Analisar a variação dos valores do NDVI da cana-de-açúcar no estado de São Paulo no período de colheita da cultura; ii) Selecionar as áreas colhidas de cana-de-açúcar e verificar se houve ou não colheita por queima; iii) Quantificar a área colhida de cana-de-açúcar por queima e não queima.

## 3 Material e métodos

### 3.1 Índices de vegetação e queimada

O espectro eletromagnético do GOES-16 é dividido em 16 bandas, com comprimentos de onda classificados entre visível e infravermelho próximo, médio e termal. Neste relatório, as bandas foram denotadas por  $\rho$ .

Foram calculados índices de vegetação e queimada a fim de acompanhar a cultura da cana-de-açúcar e avaliar áreas onde houve pré-queima, resultando em uma imagem completa do estado de São Paulo a cada banda recebida do satélite. Para tal, foi utilizado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), definido por Rouse et al. (1974) e 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 ( $0,86\mu m$ ) e  $\rho_{II}$  no vermelho ( $0,64\mu m$ ). 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) (García e Caselles 1991) foi utilizado na avaliação de áreas de queimadas, uma vez que ele evidencia cicatrizes 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 onda curta ( $2, 24\mu m$ ) e  $\rho_{III}$  é o mesmo utilizado no cálculo de NDVI. Valores negativos ou relativamente próximos a zero correspondem a áreas com vegetação queimada.

### 3.2 Extração de dados e georeferenciamento

Em 2018, com recursos da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), o Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI) adquiriu e instalou um sistema de recepção e processamento de imagens do satélite meteorológico GOES-16. O sistema possui um software específico (Protheus) para o cálculo de índices a partir de diferentes faixas espectrais. Entretanto, buscando maior controle sobre a qualidade, os cálculos foram feitos diretamente com códigos implementados na linguagem de computação estatística R. Assim, optou-se por utilizar o software do sistema somente para recorte da área de interesse e seleção das faixas espectrais, minimizando o tamanho em disco e, consequentemente, o tempo de processamento.

As imagens recebidas abrangem todo o ocidente e o pré processamento tem o objetivo de extrair somente a região de estudo. O software do sistema de recepção retorna uma matriz para cada banda espectral, compreendendo todo o estado de São Paulo e com resolução espacial de aproximadamente 500 m por pixel.

Tabela 1: Conjunto de testes utilizado na construção do modelo de detecção de queimadas

Momento de queima	Latitude	Longitude	Município
2019-10-17 00:43:06	-22,72	-47,78	Piracicaba
2019-10-25 21:43:06	-22,68	-47,34	Limeira
2019-08-12 00:03:13	-21,42	-47,75	Sao Simao
2019-08-11 18:33:14	-21,14	-48,19	Jaboticabal
2019-09-10 01:43:16	-20,78	-49,45	Sao Jose do Rio Preto
2019-08-18 22:33:05	-22,70	-49,22	Agudos
2019-08-09 02:43:14	-21,22	-47,73	Ribeirao Preto
2019-09-17 20:03:15	-21,12	-48,15	Sertaozinho

As localizações das culturas canavieiras utilizadas neste projeto provêm de um estudo feito por Aguiar et al. (2011) no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que também teve o objetivo de monitorar o cumprimento do protocolo ambiental no cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Além destas, foram extraídas localizações de focos de incêndio reportadas pelo programa de monitoramento de queimadas, também desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, [s.d.]), selecionando municípios com plantações de tamanho considerável de cana. As técnicas discutidas nas seções a seguir foram aplicadas nestes pontos, a fim de criar um método de classificação de queimas em vegetação. Este conjunto de dados foi denominado conjunto de testes e está discriminado na Tabela 1.

O geoprocessamento dos dados tomou tempo considerável deste trabalho, sendo desenvolvido em servidores do Cepagri e clusters de alta performance computacional disponibilizados pelo Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica (IMECC).

### 3.3 Redução de efeitos atmosféricos

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

O procedimento de Composição de Máximo Valor (MVC) (Holben 1986) avalia valores em intervalos de tempo predeterminados e mantém os pixels com maior valor. Por fim, tem-se uma imagem resultante da combinação dos valores máximos de todas as imagens na janela de tempo fixado. 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 apresentarem menor contaminação em horários ao redor do meio-dia. Vale ressaltar que esta técnica diminui consideravelmente a resolução temporal dos dados, indo de uma observação a cada 15 minutos para duas observações por dia e, conseqüentemente, reduz a possibilidade de detectar mudanças de curto prazo.

Visando manter a resolução temporal, foi aplicado um filtro de mediana adaptativo definido por Schettlinger, Fried, e Gather (2009), 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.

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 e está descrita em Schettlinger, Fried, e Gather (2009).

A técnica foi aplicada utilizando o pacote implementado por Fried, Schettlinger, e Borowski (2019), e foi comparada ao MVC.

### 3.4 Pontos de mudança

A identificação de pontos de mudança nas séries temporais de NDVI e NBR tem o objetivo específico de discriminar intervalos em que ocorrem mudanças nas propriedades estatísticas,  $\mu$  e  $\sigma$ , causadas pela pré-queima da palha de cana-de-açúcar.

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 ( $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ ) (Killick, Fearnhead, e Eckley 2012). 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 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, empregado utilizando o pacote descrito por Killick e Eckley (2014). 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 deste texto na forma de desvio padrão  $\sqrt{\sigma^2}$  e denotadas por  $\sigma$ .

## 4 Resultados

Os índices de vegetação por diferença normalizada e de queima normalizada calculados para todo o território de São Paulo estão representados nas Figuras 1 e 2. Todas as imagens recebidas passaram pelo mesmo procedimento, possibilitando a obtenção das séries de qualquer pixel contido nas imagens.

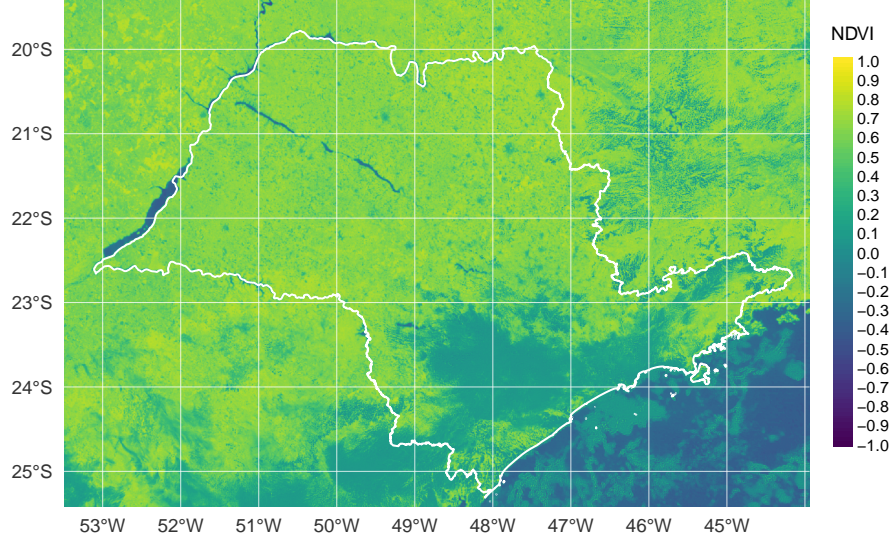


Figura 1: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), georeferenciado pelas fronteiras do estado de São Paulo. Imagem de abril de 2019 às 13:00 UTC-3.

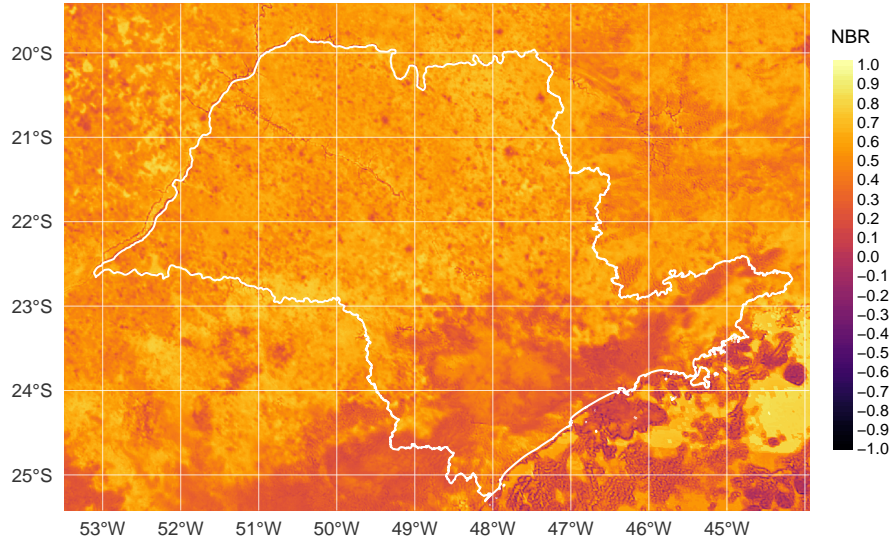


Figura 2: Índice de Queima Normalizada (NBR), georeferenciado pelas fronteiras do estado de São Paulo. Imagem de abril de 2019 às 13:00 UTC-3.

Nas Figuras 3 e 4, as linhas pretas mostram os resultados das reduções de ruídos pelos métodos de composição de valor máximo e pelo filtro de mediana com janela móvel adaptativa, respectivamente. Como esperado, ambos estão dentro do intervalo teórico de  $(-1,0 \text{ e } 1,0)$ .

A fidelidade do método de redução de ruído pelo filtro de mediana mostrou-se eficiente, uma vez que se assemelha ao método mais fiel, de composição por valor máximo, cumprindo com o objetivo de manter a resolução temporal original dos dados sem perda de fidelidade.

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 momento em que a queimada foi detectada pelo sistema de monitoramento de queimadas do INPE.

Nas Tabelas 2 e 3 estão as estimativas das médias e desvios padrões, para cada segmento de mudança das séries resultantes por composição de valor máximo, bem como as datas e horas que formam os intervalos em que foram detectadas. Analogamente, as Tabelas 4 e 5 trazem a mesma informação para as séries resultantes do filtro de mediana com janela móvel adaptativa.

Tabela 2: Estimativas de pontos de mudança para o índice de vegetação NDVI tratado pela composição de valor máximo do município de Sertãozinho.

Momento de início	Momento de fim	Média	Desvio padrão
2019-01-01 09:00:00	2019-04-14 15:00:00	0,462	0,239
2019-04-15 09:00:00	2019-07-14 14:00:00	0,530	0,148
2019-07-14 15:00:00	2019-09-18 14:00:00	0,364	0,116
2019-09-18 15:00:00	2019-11-15 15:00:00	0,249	0,119
2019-11-16 09:00:00	2019-12-24 11:00:00	0,366	0,203
2019-12-24 13:00:00	2019-12-31 15:00:00	0,708	0,029

Tabela 3: Estimativas de pontos de mudança para o índice de queimada NBR tratado pela composição de valor máximo do município de Sertãozinho.

Momento de início	Momento de fim	Média	Desvio padrão
2019-01-01 09:00:00	2019-05-31 11:00:00	0,534	0,128
2019-05-31 13:00:00	2019-07-25 09:00:00	0,488	0,079
2019-07-25 10:00:00	2019-08-19 09:00:00	0,369	0,087
2019-08-19 10:00:00	2019-11-13 09:00:00	0,271	0,106
2019-11-13 10:00:00	2019-12-24 11:00:00	0,452	0,086
2019-12-24 13:00:00	2019-12-31 15:00:00	0,674	0,035

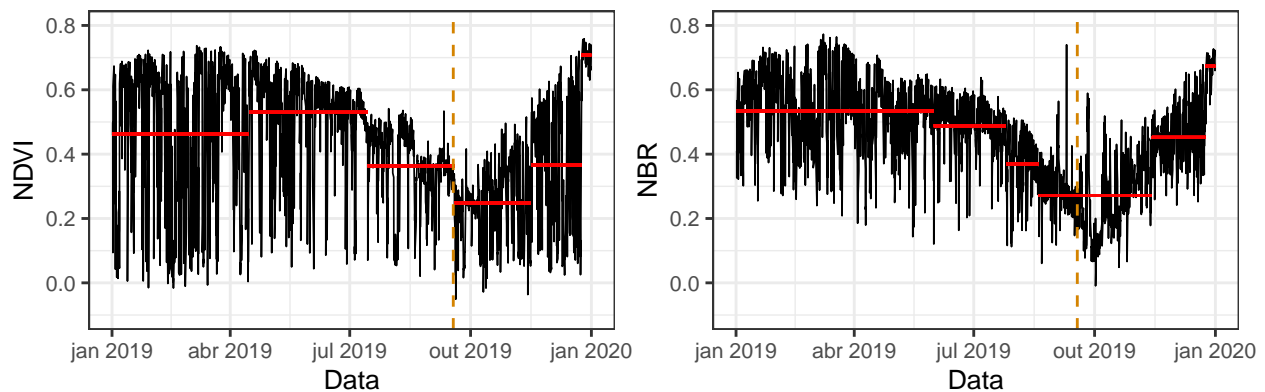


Figura 3: Em vermelho, segmentos de mudança em média e desvio padrão detectados na série resultante da composição por valor máximo (MVC) de um pixel pertencente ao conjunto de testes do município de Sertãozinho. NDVI à esquerda e NBR à direita.

Tabela 4: Estimativas de pontos de mudança para o índice de vegetação NDVI tratado pelo filtro de mediana móvel do município de Sertãozinho.

Momento de início	Momento de fim	Média	Desvio padrão
2019-01-01 05:00:00	2019-04-15 07:00:00	0,396	0,234
2019-04-15 07:10:00	2019-08-02 13:30:00	0,469	0,168
2019-08-02 13:40:00	2019-09-18 13:20:00	0,332	0,133
2019-09-18 13:30:00	2019-10-23 06:50:00	0,197	0,079
2019-10-23 07:00:00	2019-12-24 07:40:00	0,275	0,172
2019-12-24 07:50:00	2019-12-31 15:00:00	0,684	0,058

Tabela 5: Estimativas de pontos de mudança para o Índice de queimada NBR tratado pelo filtro de mediana móvel do município de Sertãozinho.

Momento de início	Momento de fim	Média	Desvio padrão
2019-01-01 05:00:00	2019-07-25 08:20:00	0,495	0,119
2019-07-25 08:30:00	2019-08-18 09:20:00	0,370	0,105
2019-08-18 09:30:00	2019-10-28 06:10:00	0,249	0,098
2019-10-28 06:20:00	2019-11-15 09:00:00	0,333	0,063
2019-11-15 09:10:00	2019-12-24 11:20:00	0,414	0,091
2019-12-24 11:30:00	2019-12-31 15:00:00	0,665	0,052

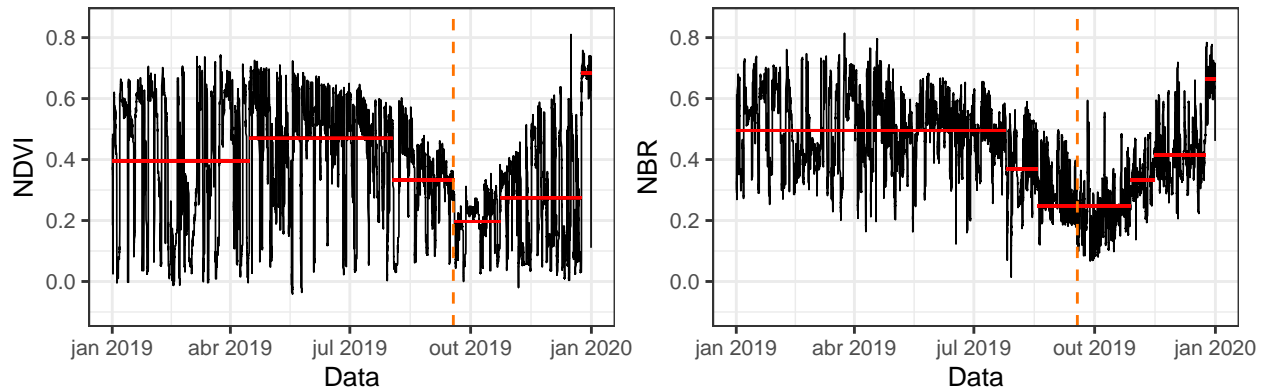


Figura 4: Em vermelho, segmentos de mudança em média e desvio padrão detectados na série resultante do filtro por mediana de um pixel pertencente ao conjunto de testes do município de Sertãozinho. NDVI à esquerda e NBR à direita.

São apresentados em anexo os gráficos para as cidades de Piracicaba, Agudos, Ribeirão Preto, Limeira, São Simão, Jaboticabal e São José do Rio Preto.

## 5 Discussão

O Índice de Queima Normalizada (NBR) mostrou-se mais sensível a queimas de vegetação, apresentando menor variabilidade na ausência de queimadas e quedas bruscas em caso contrário. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) apresentou comportamento condizente com o esperado em períodos de cultivo e queima de cana-de-açúcar, mantendo valores próximos a zero e próximos a 1



respectivamente. Estes resultados tornam imprescindível a combinação dos dois índices na proposta de um método de detecção de queimadas.

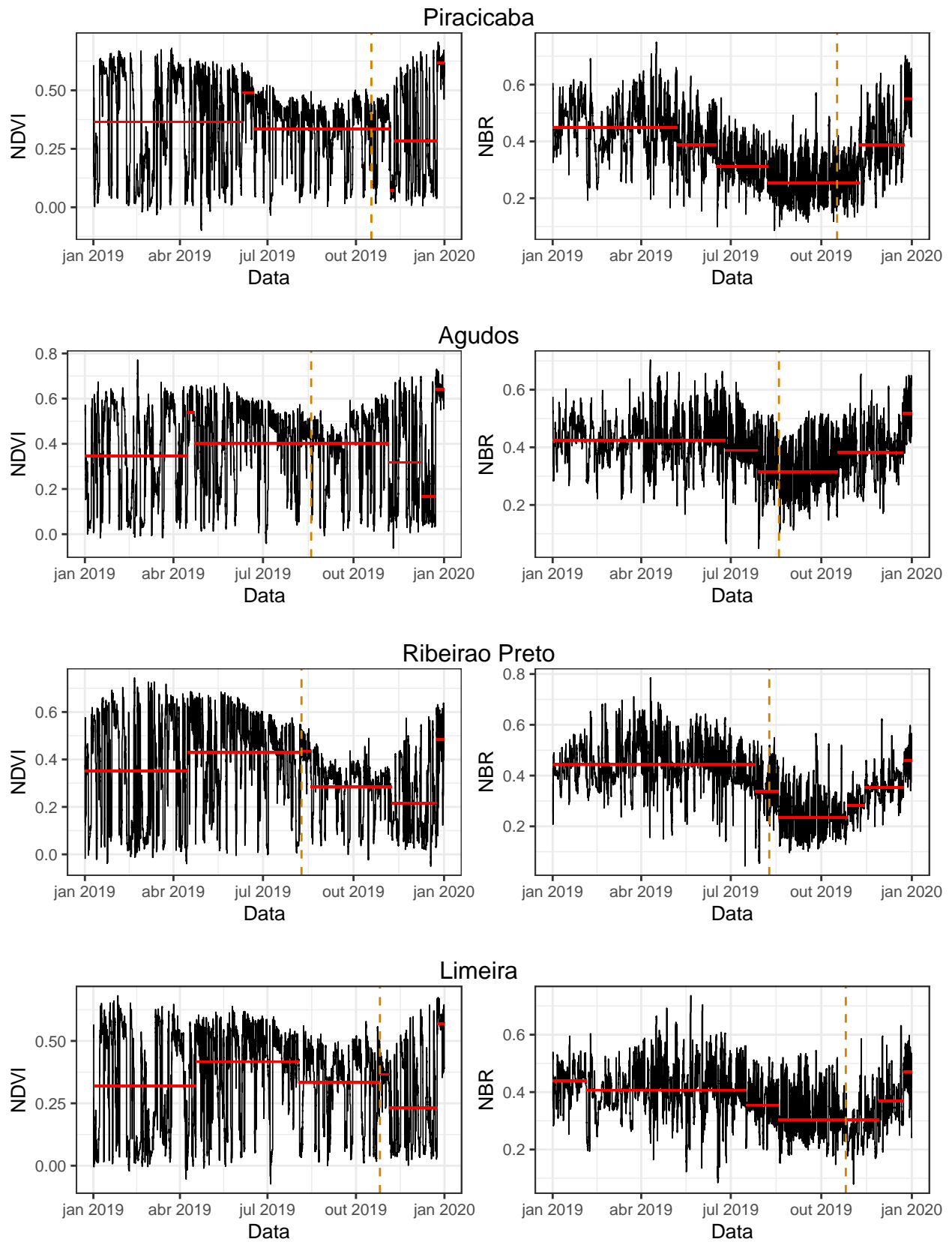
O método de busca de pontos de mudanças utilizado, por segmentação binária, apresentou resultados que merecem maior atenção. Alguns pontos de mudança detectados dividem a série em segmentos relativamente pequenos e não deveriam ser classificados como pontos de mudança. Killick, Fearnhead, e Eckley (2012) sugerem métodos exatos com custo computacional linear e o emprego e aperfeiçoamento destes métodos quando aplicados às séries apresentadas neste trabalho podem trazer resultados mais tangíveis, levando a meios mais robustos de detecção de mudanças em propriedades estatísticas, tais como apresentadas anteriormente.

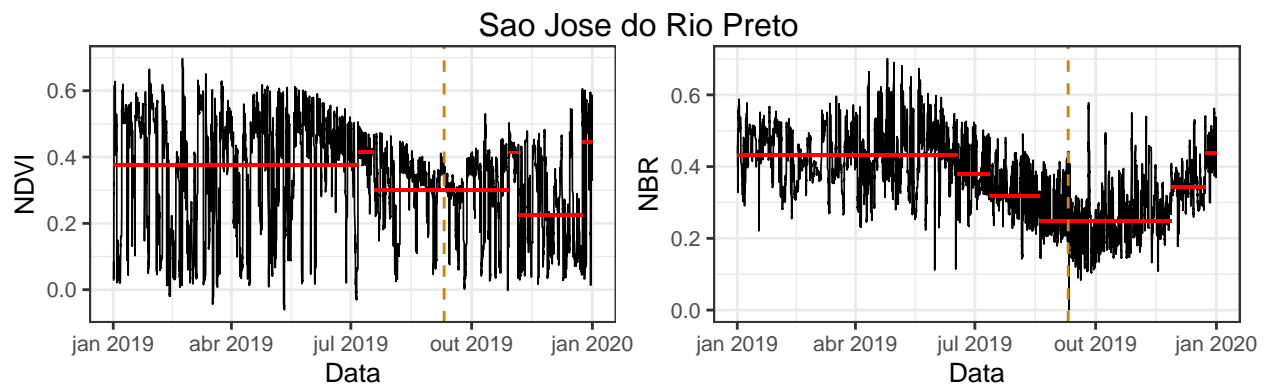
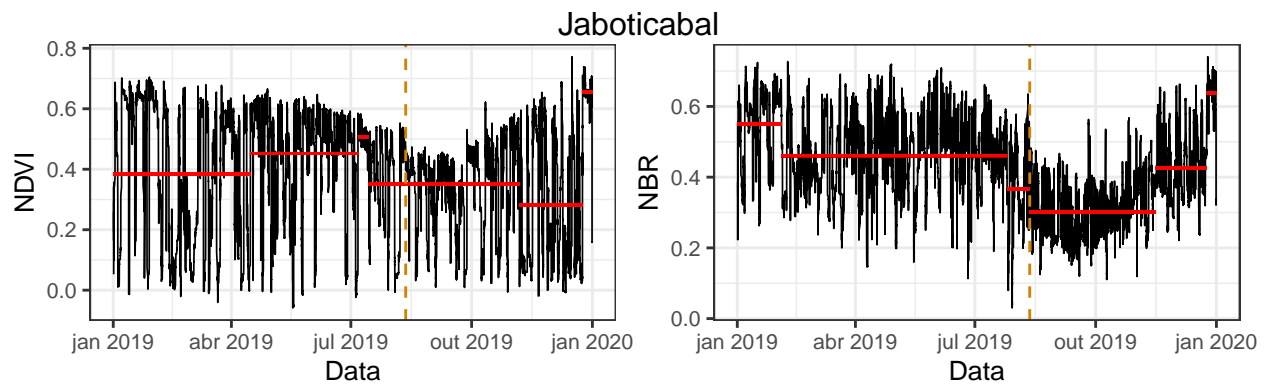
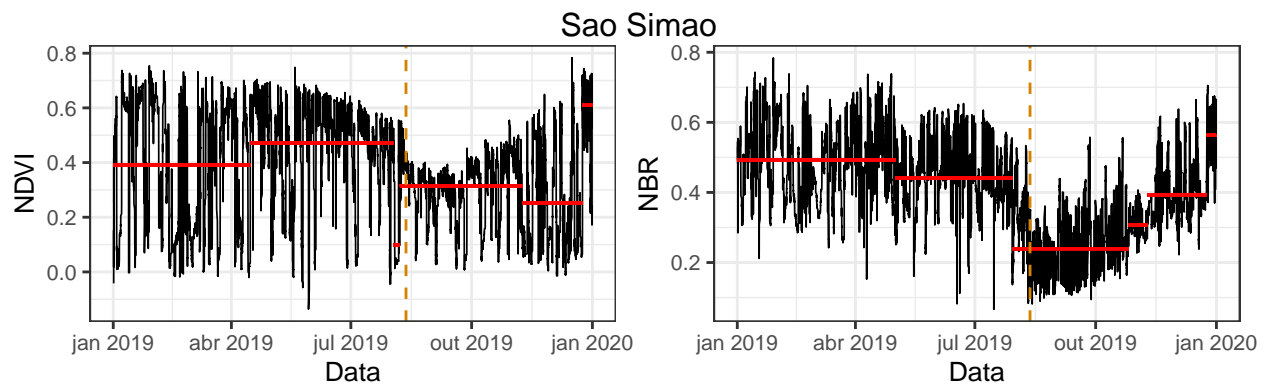
Os resultados obtidos foram satisfatórios no que diz respeito à detecção de mudanças em média e desvio padrão, em ambos os índices e em ambos métodos de redução de efeitos atmosféricos, filtro por composição de valor máximo e filtro por mediana móvel adaptativa. As técnicas aplicadas, certamente, podem ser empregadas no monitoramento de queimadas em áreas de cultivo de cana-de-açúcar 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. Os pontos de aperfeiçoamento levantados aqui continuarão a ser implantados e explorados, com a finalidade de gerar material para publicação.

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 <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.

## 6 Anexos





## Referências

- Adami, M., M. P. Mello, D. A. Aguiar, B. F. T. Rudorff, e A. F. Souza. 2012. “A web platform development to perform thematic accuracy assessment of sugarcane mapping in South-Central Brazil”. *Remote Sensing* 4 (10): 3201–14.
- Aguiar, D. A., B. F. T. Rudorff, W. F. Silva, M. Adami, e M. P. Mello. 2011. “Remote sensing images in support of environmental protocol: Monitoring the sugarcane harvest in São Paulo State, Brazil”. *Remote Sensing* 3 (12): 2682–2703.
- Aminikhanghahi, S., e D. J. Cook. 2017. “A survey of methods for time series change point detection”. *Knowledge and information systems* 51 (2): 339–67.
- Conab. 2019. “Cana-de-açúcar: Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar – Safra 2018/19 - Terceiro levantamento”. [www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana](http://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana).
- Fried, Roland, Karen Schettlinger, e Matthias Borowski. 2019. *robfilter: Robust Time Series Filters*. <https://CRAN.R-project.org/package=robfilter>.
- García, M. J. L., e V. Caselles. 1991. “Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data”. *Geocarto International* 6 (1): 31–37.
- Gonçalves, R. R. V., J. Zullo, P. P. Coltri, A. M. H. Avila, B. F. Amaral, E. B. M. de Sousa, e L. A. S. Romani. 2012. “Relação entre o índice EVI e dados de precipitação nas áreas de plantio de cana-de-açúcar na região central do Brasil.” 4º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal - Geopantanal, Bonito, MS.: 2012b, Anais - Geopantanal.
- Gonçalves, R. R. V., J. Zullo, P. P. Coltri, e L. A. S. Romani. 2012. “Evi’s estimation to improve the monitoring of sugarcane using TRMM satellite data”. In *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 6609–12. 2012a, IEEE.
- Holben, B. N. 1986. “Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data”. *International journal of remote sensing* 7 (11): 1417–34.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE –. [s.d.]. “Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios Florestais”. <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal>.
- Killick, R, e I Eckley. 2014. “changepoint: An R package for changepoint analysis”. *Journal of statistical software* 58 (3): 1–19.
- Killick, R., P. Fearnhead, e I. A. Eckley. 2012. “Optimal detection of changepoints with a linear computational cost”. *Journal of the American Statistical Association* 107 (500): 1590–8.
- Mello, M. P. 2009. “Classificação espectro-temporal de imagens orbitais para o mapeamento da colheita da cana-de-açúcar com queima da palha”. Tese de doutorado, São José dos Campos, INPE.: MS dissertation, Nat. Inst. Space Res., São José dos Campos, Brazil; Anais - SBSR.
- Morettin, P. A., e C. M. Toloi. 2006. “Análise de séries temporais”. *ABE-Projeto Fisher, Editora Edgar Blücher*.
- Novaes, M. R. de, B. F. T. Rudorff, C. M. de Almeida, e D. A. de Aguiar. 2011. “Análise espacial da redução da queima na colheita da cana-de-açúcar: perspectivas futuras ao cumprimento do protocolo agroambiental.” 31 (3).
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, e D. W. Deering. 1974. “Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS”. *NASA special publication* 351: 309.
- Rudorff, B. F. T., D. A. de Aguiar, W. F. Silva, L. M. Sugawara, M. Adami, e M. A. Moreira. 2010. “Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data”. *Remote sensing* 2 (4): 1057–76.

Schettlinger, K., Roland Fried, e U. Gather. 2009. “Real-time signal processing by adaptive repeated median filters”. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 24 (novembro): 346–62. <https://doi.org/10.1002/acs.1105>.