

Análise do comportamento espaço-temporal de incêndios no Parque Nacional de Itatiaia utilizando o variograma marcado

Rodrigo Ferreira de Abreu ¹, Isabela Braga Belchior ², Rafael Agostinho Ferreira ³, João Domingos Scalón ³, Luis Marcelo Tavares de Carvalho ³

Introdução

Incêndio florestal pode ser definido como o fogo que se propaga de modo descontrolado consumindo diversos tipos de combustíveis de uma floresta e afetando toda sua fauna e flora (LOPES, 2013). A origem de um incêndio pode se dar de forma natural, como por exemplo a queda de raios ou por meio de ações antrópicas.

Uma forma de tentar mitigar os prejuízos causados pelos incêndios é procurar entender o comportamento de suas ocorrências auxiliando assim no planejamento de estratégias de prevenção. Nesse sentido, podem ser utilizadas ferramentas que incluem técnicas de análises estatísticas para dados espaço-temporais (localizações geográficas e tempos de ocorrência).

Entre as regiões que tem grandes perdas com os incêndios florestais está a Mata Atlântica, que possui uma das maiores biodiversidades do mundo. A partir disso, o objetivo deste trabalho foi analisar o padrão espaço-temporal de focos de calor no Parque Nacional de Itatiaia, durante o período de 2010 a 2016. O parque é uma unidade de conservação da Mata Atlântica com uma área de aproximadamente 28000 hectares, localizado na Serra da Mantiqueira, entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro¹.

Para as análises considerou-se a teoria de processos pontuais espaço-temporais e processos pontuais marcados, e como ferramenta foi utilizado o variograma marcado.

Materiais e Métodos

Metodologia

Um processo pontual espaço-temporal é um processo estocástico que gera um conjunto contável de pontos $\{(s_i, t_i) : i = 1, \dots, n\}$, em que $s_i \in S \subset \mathbb{R}^2$ e $t_i \in T \subset \mathbb{R}^+$. Deste modo, o estudo dos processos pontuais espaço-temporais é considerado no produto cartesiano $\mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^+$ (DIGGLE, 2013).

Um dos objetivos da análise de dados de processos desse tipo, é captar a estrutura de correlação espaço-temporal entre as ocorrências dos eventos (incêndios nesse caso), de modo que se possa observar o padrão das ocorrências como agrupamento, regularidade (inibição) ou completamente aleatório.

No caso de agrupamento, a ocorrência de um evento aumenta a probabilidade de ocorrência de outro evento nas proximidades (no espaço e no tempo), já para regularidade,

¹Universidade Federal de Lavras e-mail: rodrigo.10mega@hotmail.com

²Universidade Federal de Lavras. e-mail: isabela.bbelchior@gmail.com

³Universidade Federal de Lavras. e-mail: rafaelferreiratc@hotmail.com

³Universidade Federal de Lavras. e-mail: scalon@des.ufla.br

³Universidade Federal de Lavras. e-mail: passarinho@dcf.ufla.br

¹Informações adicionais podem ser encontradas na página da internet do parque, disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/parnaitatiaia/>

a ocorrência de um evento diminui a probabilidade de que outro evento aconteça nas proximidades. Quando o processo é completamente aleatório, o que ocorre é que não há nenhuma estrutura de correlação espaço-temporal entre os eventos.

Ferramentas para análises desses padrões incluem a função K espaço-temporal, a função de correlação entre pares de eventos e a densidade de covariância (DIGGLE, 2013).

Outro modo de analisar dados espaço-temporais foi proposto por Stoyan et al. (2017). Os autores sugerem que o processo espaço-temporal pode ser reinterpretado como um processo pontual marcado e analisá-lo como tal.

Um processo pontual é dito marcado quando, além da localização espacial dos eventos há uma informação adicional (marca) anexada a cada evento.

De acordo com Chiu et al. (2013), um processo pontual marcado em \mathbb{R}^d é uma sequência aleatória $\Psi = \{(\mathbf{s}_i, m_i)\}$, em que os pontos \mathbf{s}_i juntos constituem o processo pontual não marcado em \mathbb{R}^d , e os valores m_i são as marcas correspondentes a cada ponto \mathbf{s}_i . Considerando aqui $d = 2$ e que as marcas pertencem a espaço das marcas \mathcal{M} , o estudo de processos pontuais marcados é dado em $\mathbb{R}^2 \times \mathcal{M}$.

A respeito da natureza das marcas, elas podem ser variáveis contínuas ou discretas/catóricas. Um exemplo de variável contínua é o diâmetro à altura do peito de uma determinada espécie de árvore, em um talhão de floresta e no caso discreto, tipos de crime ocorridos em uma grande cidade.

No caso de marcas contínuas, uma ferramenta para a análise dos dados de padrões pontuais com marcas é o variograma marcado (CRESSIE, 1991; BADDELEY; RUBAK; TURNER, 2015), que pode ser definido por

$$\gamma(r) = \frac{1}{2} \mathbb{E} \left[(m_i - m_j)^2 \mid \|\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j\| = r \right], \quad (1)$$

em que m_i e m_j são as marcas dos pontos \mathbf{s}_i e \mathbf{s}_j , respectivamente. Temos então que $2\gamma(r)$ é a diferença quadrática esperada entre os valores de duas marcas cujos pontos correspondentes estão separados por uma distância r .

O variograma marcado mede o grau de correlação entre as marcas de um processo marcado espacial (ou temporal), à medida que os pontos se tornam mais distantes. Informações importantes que o variograma marcado fornece incluem a rapidez com que a correlação entre marcas diminui, qual é o alcance dessa correlação, se pontos próximos tendem a ter marcas parecidas ou não, ou mesmo se não há correlação nenhuma.

Seja então o processo pontual espaço-temporal $\{(\mathbf{s}_1, t_1), (\mathbf{s}_2, t_2), \dots\}$. Considerando que não existem pontos coincidentes, e o processo ocorre em uma janela de tempo $T = [0, \tau]$ e de espaço W , dada por um retângulo de lados a e b , Stoyan et al. (2017) afirmam que se pode transformar um processo pontual espaço-temporal em um processo pontual marcado de duas formas.

A primeira é reinterpretar o processo espaço-temporal, como um processo marcado Ψ_T tomando os tempos t_i como marcas das localizações \mathbf{s}_i , ou seja, $\Psi_T = \{(\mathbf{s}_i, t(\mathbf{s}_i))\}$. A segunda forma é reinterpretar o processo N , como um processo marcado Ψ_W tomando as localizações \mathbf{s}_i como marcas dos tempos t_i , ou seja, $\Psi_W = \{(t_i, \mathbf{s}_i(t_i))\}$. Nesse trabalho foi considerada a abordagem com relação à essa segunda forma apenas.

Para o caso do processo Ψ_W Stoyan et al. (2017) definem o variograma marcado temporal $\gamma_{te}(t)$ por

$$\gamma_{te}(t) = \frac{1}{2} \mathbb{E} \left[(\mathbf{s}(l) - \mathbf{s}(k))^2 \mid l, k \in N_{time} \right] \quad (2)$$

em que $\mathbf{s}(t)$ é marca espacial do ponto no tempo t , e N_{time} é a componente temporal do processo pontual espaço-temporal. Nesse caso as localizações são pontos em \mathbb{R} e as marcas estão em \mathbb{R}^d . Um estimador para $\gamma_{te}(t)$ é dado por

$$\hat{\gamma}_{te}(t) = \frac{\sum_{t_1, t_2 \in T}^{\neq} \frac{1}{2} (\|\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2\|)^2 \kappa_{\delta}(|t_1 - t_2| - t)}{\sum_{t_1, t_2 \in T}^{\neq} \kappa_{\delta}(|t_1 - t_2| - t)}, \quad (3)$$

em que κ_{δ} é uma função kernel unidimensional com parâmetro de suavização (largura de banda) δ (DIGGLE, 1985).

Procurou-se verificar com o variograma marcado, se focos de calor que acontecem próximos no tempo tendem a ocorrer próximos no espaço e para qual intervalo de tempo as localizações dos focos estão correlacionadas.

Como hipótese nula considerou-se a *rotulagem aleatória* que consiste basicamente, conforme Pawlas (2009), no fato de que as marcas do processo são independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.) e além disso, são independentes dos pontos. Ou seja, a rotulagem aleatória implica que independente da estrutura do padrão das localizações (agrupamento, regularidade ou completamente aleatório), as marcas são “rotuladas” de modo aleatório a cada ponto do processo.

Para testar um conjunto de dados sob a hipótese de rotulagem aleatória, o processo consiste em manter fixas as localizações do processo não marcado e permutar n vezes as marcas de modo aleatório para cada localização. Para cada permutação computa-se a estatística de teste de interesse e compara-se com o resultado dos dados originais com envelopes das permutações.

O conjunto de dados

O conjunto de dados analisados é referente a 147 localizações e datas de ocorrência de focos de calor capturados por satélite ², no período de janeiro de 2010 a novembro de 2016 no Parque Nacional do Itatiaia e numa distância de até 5 quilômetros do seu entorno.

Todo o processo de análise foi realizado no *software* R (R CORE TEAM, 2019), com o auxílio das bibliotecas *spatstat* (BADDELEY; TURNER, 2005) e *stpp* (GABRIEL et al., 2013) e o repositório *mvstpp* (RODRÍGUEZ-CORTÉS, 2015) do GitHub.

Resultados

Considerando apenas uma análise exploratória dos dados, pode-se perceber que o período de maior intensidade dos focos ocorre entre os meses de julho e outubro (Figura 1). Com relação à distribuição espacial, para o período de 2010 a 2016 a figura 2 a seguir mostra que os focos tendem a ocorrer em áreas fora dos limites do parque e dentro do parque na região dos campos de altitude.

²Dados desse tipo estão disponibilizados no Banco de Dados de Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e podem ser consultados em : <http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>.

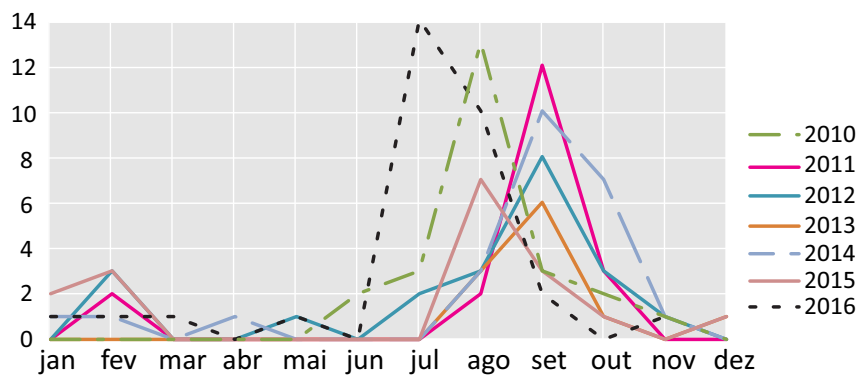


Figura 1: Distribuição temporal dos focos de calor

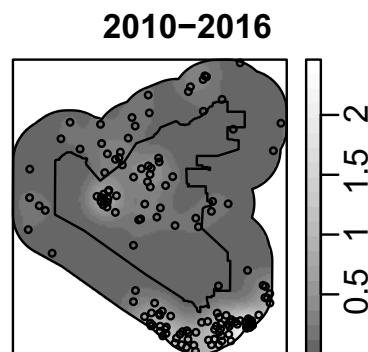


Figura 2: Distribuição espacial dos focos de calor entre 2010 e 2016

A análise com o variograma marcado para o período de 2010 a 2016, mostrou que existe correlação espacial entre os focos de calor para distâncias de tempo de até 120 dias. Na Figura 3, a linha contínua corresponde ao variograma estimado e a faixa em cinza corresponde aos envelopes das permutações sob a hipótese nula de rotulagem aleatória. A partir da distância temporal em que o variograma entra no envelope não se tem mais nenhuma estrutura de correlação espacial entre as localizações. Outro resultado que a figura aponta é que como o variograma apresentou altos valores nas proximidades de zero, isso sugere que em pequenos intervalos de tempo os incêndios ocorreram de modo espalhado dentro da região de estudo. O intervalo de tempo de 120 dias coincide com o período de inverno, no qual é caracterizado pela maior inflamabilidade do material combustível provocada pela estiagem.

Considerando a análise com o variograma marcado dentro de cada um dos anos de 2010 a 2016, os resultados dos gráficos, apontam que o padrão das ocorrências foi completamente aleatório. Uma possível justificativa para esse comportamento aleatório pode ser pelo fato da maioria das ocorrências dos incêndios serem causadas pela ação humana, o que faz o fenômeno ter um comportamento não natural.

Considerações

O variograma marcado é uma útil ferramenta no estudos de dados de processos pontuais espaço-temporais. Além de informar sobre a natureza do padrão entre agrupamento, regularidade e aleatoriedade, trás também a extensão da correlação entre os eventos seja no espaço ou no tempo. Os resultados obtidos pelas análises foram coerentes com a re-

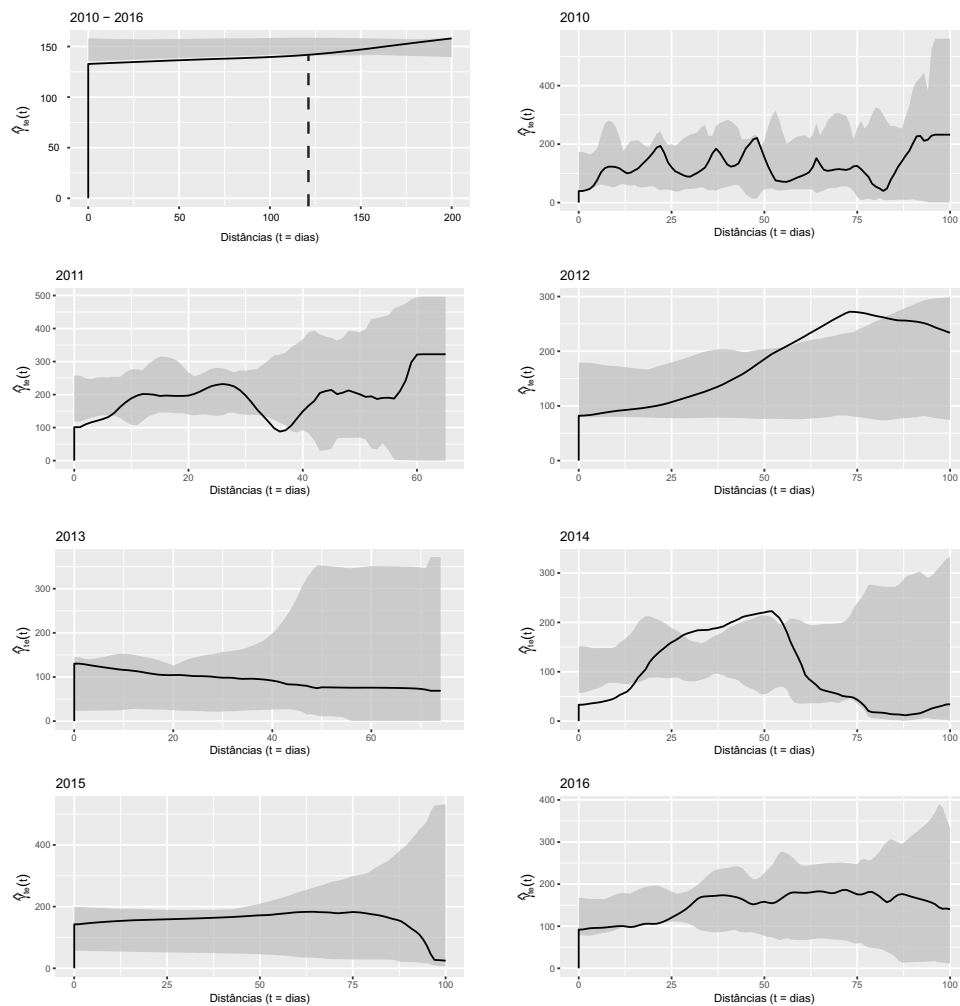


Figura 3: Variograma estimado para o período de 2010 a 2016 e para cada ano individualmente.

alidade, no entanto estudos adicionais são necessários para um maior detalhamento do fenômeno.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e a Fapemig pelo apoio financeiro.

Referencias Bibliográficas

BADDELEY, A.; TURNER, R. spatstat: An R package for analyzing spatial point patterns. *Journal of Statistical Software*, v. 12, n. 6, p. 1?42, 2005. Disponível em: <<http://www.jstatsoft.org/v12/i06/>>.

BADDELEY, A.; RUBAK, E.; TURNER, R. *Spatial point patterns: methodology and applications with R*. [S.l.]: Chapman and Hall/CRC, 2015.

CRESSIE, N. *Statistics for Spatial Data (Wiley Series in Probability and Statistics)*.

Revised edition. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1991.

DIGGLE, P. J. A kernel method for smoothing point process data. *Applied statistics*, JSTOR, p.138-147, 1985.

DIGGLE, P.J. *Statistical analysis of spatial and spatio-temporal point patterns*. Chapman and Hall/CRC, 2013.

GABRIEL, E. et al. stpp: an r package for plotting, simulating and analyzing spatio-temporal point patterns. *Journal of Statistical Software*, v. 53, n. 2, p. 1?29, 2013.

LOPES, L. S. *Modelação do risco e dinâmica do fogo para apoio ao planeamento e gestão do espaço florestal. Caso de Estudo - Bacia Hidrográfica do Rio Estorãos*. 2014. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental e Ordenamento do Território) - Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Ponte de Lima, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.ipvc.pt/bitstream/123456789/1269/1/Lucia.Lopes.1924.pdf>>.

PAWLAS, Z. Empirical distributions in marked point processes. *Stochastic Processes and their Applications*, Elsevier, v. 119, n. 12, p. 4194?4209, 2009.

R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2019. ISBN 3-900051-07-0. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>.

RODRÍGUEZ-CORTÉS, F. J. *mvstpp: Mark Variogram for Spatio-Temporal Point Processes*. [S.l.], 2015. GitHub repository. Disponível em: <<https://github.com/frajaroco/mvstpp>>.

STOYAN, Dietrich et al. Mark variograms for spatio-temporal point processes. *Spatial statistics*, v. 20, p. 125-147, 2017.