

## Escalonamento, lei de potências e correlações de focos de queimadas no Brasil

Luciano Rodrigues da Silva, Tatijana Stosic, Borko Stosic

Departamento de Estatística e Informática, UFRPE, 52171-900, Recife, PE

lucrodsilva@gmail.com, tstosic@gmail.com, borkostosic@gmail.com

**Resumo:** Nesse trabalho analisamos a distribuição temporal dos focos de queimadas no Brasil usando a função de sobrevivência e Detrended Fluctuation Analysis (DFA). Usamos os dados disponibilizados no site da Divisão de Pesquisa de Imagem do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os resultados mostram que a função de sobrevivência obedece a lei de potência com dois regimes distintos. O expoente de escala obtido usando Detrended Fluctuation Analysis indica o comportamento fortemente antipersistente.

**Palavras-chave:** floresta, queimada, lei de potência, Detrended Fluctuation Analysis.

### Introdução

Todos os anos incêndios florestais destroem milhões de hectares das florestas Brasileiras, ameaçando a vida e a propriedade das pessoas e causando os danos como a perda de espécies da fauna e flora, deterioração (aumento) do efeito de estufa e deterioração da camada de ozônio, além de conseqüências econômicas como a queima da madeira e custos para prevenção e controle de fogo. O aumento de número de incêndios e queimadas vem como conseqüência de vários fatores, principalmente de crescimento populacional e acúmulo de material combustível. A preservação do meio ambiente depende das políticas protecionistas globais e regionais adequadas às características de cada região. Para estabelecer essas políticas de controle e prevenção é necessário conhecer o perfil dos incêndios florestais: onde, quando e por que ocorrem. Além das estatísticas tradicionais de ocorrências de incêndios, podem ser utilizados diversos métodos emergentes da física estatística, incluindo análise de dados e modelos computacionais, para providenciar as informações adicionais sobre a distribuição e agrupamento espaço-temporal dos incêndios, que podem ser úteis para planejamento e controle mais eficiente [1,2,3,4].

### Dados e Metodologia

#### Dados

Os dados foram obtidos a partir do banco de dados de monitoramento de focos de queimadas do site da Divisão de Pesquisa de Imagens (DPI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) [5], onde

estão disponibilizados os focos de incêndios monitorados pelos satélites. No presente trabalho, foram utilizados os dados do satélite NOAA-15 do dia 28/06/2005 até 18/09/2008, com total de 164168 focos de queimadas.

#### Lei de Potências

A Análise dos dados demonstra comportamento livre de escala, caracterizado pela lei de potências, com dois regimes distintos de comportamento. Mais precisamente, quando um fenômeno obedece a distribuição de potências com função de sobrevivência.

$$S(x) = \Pr(X \geq x) = \left(\frac{m}{x}\right)^k \quad (1)$$

onde  $m$  e  $k$  são parâmetros constantes, sua probabilidade acumulada e dada por

$$P(X < x) = 1 - \left(\frac{m}{x}\right)^k \quad (2)$$

e sua densidade de probabilidade é

$$f(x) = km^k x^{-(k+1)} \quad (3)$$

Neste caso, no gráfico log-log, a função de sobrevivência apresenta dependência linear da variável independente, o que se chama independência de escala: os eventos grandes têm o mesmo comportamento que os eventos pequenos, porque mudança de escala (multiplicação da variável independente por um fator constante  $c$ ) resulta na mesma distribuição (com constante correspondente à  $c^k$ ).

Quando existem dois regimes de comportamento de lei de potências, a curva que representa a função de sobrevivência na escala log-log pode ser bem representada por duas linhas retas, com inclinações diferentes.

#### Detrended Fluctuation Analysis

Para quantificar as correlações temporais, usamos o método Detrended Fluctuation Analysis, introduzido por Peng [6]. Esse método foi aplicado para detectar as correlações de longo alcance em seqüências de DNA [7], sinais fisiológicos [8,9], dados climáticos [10] e séries temporais financeiras [11,12]. O procedimento é o seguinte: Primeiro, a série temporal original  $x(i)$ ,  $i=1, 2, \dots, N$  é integrada

$$y(k) = \sum_{i=1}^k [x(i) - M] \quad (4)$$

onde  $M$  é a média dos valores  $x(i)$   $i=1, 2, \dots, N$  e  $k$  é um número inteiro entre 1 e  $N$ . A série integrada  $y(k)$  é dividida em intervalos de tamanho  $n$  e regressão  $y_n(k)$  em cada intervalo é calculada. A função de flutuação

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2} \quad (5)$$

é calculada para vários tamanhos de intervalos. Tipicamente  $F(n)$  aumenta com  $n$  como  $F(n) \sim n^\alpha$ , indicando o comportamento fractal da série. O expoente  $\alpha$  é obtido como coeficiente angular do gráfico  $\log[F(n)]$  por  $\log(n)$ . O valor de  $\alpha=0,5$  indica que  $x(i)$  é uma série não correlata (ruído branco),  $\alpha>0,5$  uma série persistente e  $\alpha<0,5$  uma série anti-persistente.

## Resultados

Os dados de 164168 focos de queimadas foram agrupados por data para obter a quantidade de focos de queimada que foram observados a cada dia (frequência). Os resultados deste procedimento estão representados na Fig.1, na escala semi-logarítmica (para acentuar os dados tanto na escala fina, quanto para as grandes frequências).

Em seguida, na base de frequência de ocorrência de focos em cada dia, foi calculada frequência relativa de ocorrer mais do que  $n$  focos, identificada com a probabilidade  $S(X \geq n)$ , ou seja, estimador de função de sobrevivência. Os resultados destes cálculos estão apresentados na Fig 2., onde se observa a existência de duas regiões com comportamento praticamente linear na escala log-log. Este tipo de comportamento na literatura é denominado “crossover”, onde cada região fica identificada com uma lei de potências.

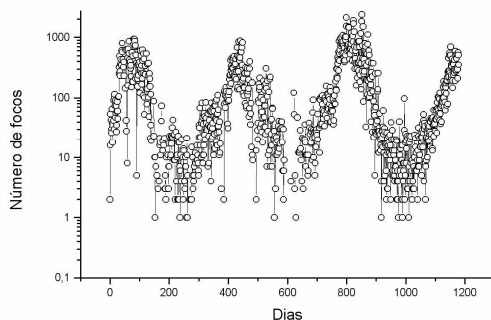


Figura 1: Numero de focos de queimadas por dia, observadas pelo satélite NOAA-15 entre 18/06/2005 e 18/09/2008.

A Região de inclinação baixa com  $k=0.417$  corresponde aos períodos de baixa incidência de fogos, com densidade de probabilidade proporcional à

$f(x) \sim x^{-1.417}$ . Esta lei implica a falta de possibilidade de identificar o número médio de queimadas, no sentido que o Teorema de Limite Central não se aplica para estes dados, de forma que aumento de amostra não ajuda em uma melhor estimação de média amostral.

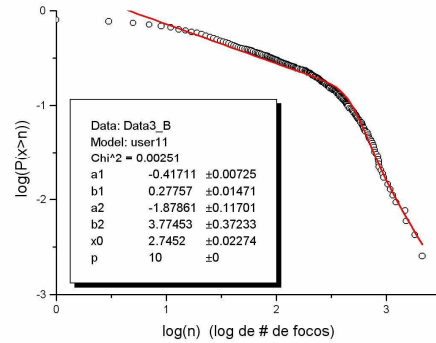


Figura 2: Função de sobrevivência (probabilidade de observar mais do que  $n$  focos por dia) em função do número de focos, na escala log-log

Por outro lado, a região de inclinação alta com  $k=1.878$  corresponde aos períodos de alta incidência de queimadas, com densidade de probabilidade  $f(x) \sim x^{-2.878}$ , implica que média populacional existe, mas a variância e momentos de ordem mais alta são infinitos.

A partir da frequência acumulada, calculamos a função  $F(n)$  utilizando a função (5). Plotando o gráfico de  $\log F(n)$  por  $\log(n)$  obtemos o gráfico da figura 3, e através de ajuste de regressão utilizando o método dos mínimos quadrados encontramos o valor de  $\alpha=0.107$ . Este resultado indica que a série é altamente anti-persistente.

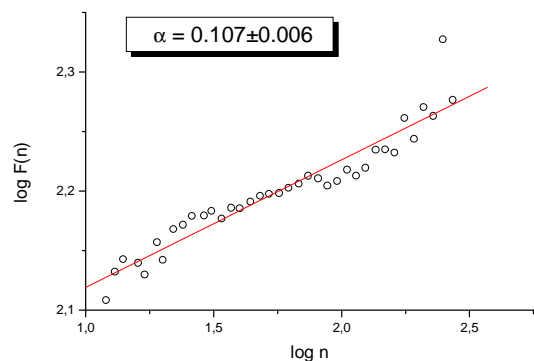


Figura 3: Função de flutuação (5) versus fator de escala  $n$ .

## Discussão

Análise de frequência de focos de queimadas observadas pelo satélite NOAA15 entre 28/06/2005 e 18/09/2008, com total de 164168 observações sugere que os dados obedecem à lei de potências com dois regimes distintos.

No regime de baixa atividade, a densidade de probabilidade é proporcional a  $f(x) \sim x^{-1.417}$ , sugerindo que valor médio, variância, e outros momentos de ordem mais alta da distribuição não podem ser determinados a partir de amostras crescentes.

Em regime de alta atividade, a densidade de probabilidade obedece a lei de potência  $f(x) \sim x^{-2.878}$ , sugerindo que o valor médio amostral tende ao valor populacional, enquanto a variância e os momentos de ordem mais alta não são definidos. Em ambos os casos, observa-se invariância à escala.

No caso de Detrended Fluctuation Analysis foi obtido o expoente  $\alpha=0.107$ , indicando que a série é altamente anti-persistente.

Os resultados apresentados neste trabalho devem ser entendidos como aspectos distintos do fenômeno observado, a serem levados em consideração na construção de modelos que pretendem simular e explicar os dados referentes a queimadas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem curso de Pós-graduação em Biometria e estatística Aplicada, junto ao Departamento de estatística e Informática, e Universidade Federal Rural de Pernambuco, que possibilitaram este trabalho.

## Referências

- [1] Tuia D., Lasaponara R., Telesca L., Kanevski M., Emergence of spatio-temporal patterns in forest-fire sequences. *Physica A*, 387 (2008) 3271- 3280.
- [2] Zheng H., Song W., Wang J. Detrended fluctuation analysis of forest fires and related weather parameters. *Physica A*, 387 (2008) 2091-2099.
- [3] Drossel, B. And Schwabl, F. Self-organized critical forest-fire model. *Phys. Rev. Lett.*, 69 (1992) 1629 - 1632.
- [4] Chen, K., Bak, P. And Jensen, M. H., A deterministic critical forest fire model. *Phys. Lett. A* 149 (1990) 207.
- [5] Site da Divisão de Pesquisa de Imagens (DPI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) <http://www.dpi.inpe.br/>
- [6] C. K. Peng, S.V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H.E. Stanley, A.L. Goldberger. Mosaic organization of DNA nucleotides, *Phys. Rev. E* 49 (1994) 1685.
- [7] C. K. Peng, S. Havlin, H. E. Stanley, And A. L. Goldberger, Quantification of Scaling Exponents and Crossover Phenomena in Nonstationary Heartbeat Time Series, *Chaos* 5 (1995) 82-87.
- [8] R. C. Hwa, T. C. Ferree, Scaling Properties of Fluctuations in Human Electroencephalogram, *Phys. Rev. E* 66 (2002) 021901
- [9] H.E. Stanley, L.A.N. Amaral, A.L. Goldberger, S. Havlin, P. Ch. Ivanov, C.-K. Peng, Statistical physics and physiology: Monofractal and multifractal approaches, *Physica A* 270 (1999) 309-324.
- [10] E. Koscielny-Bunde, A. Bunde, S. Halvin, H.E. Roman, Y. Goldreich, H.J. Schellnhuber, Indication of a Universal Persistence Law Governing Atmospheric, *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998) 729-732.
- [11] M. Auslos, K. Ivanova, Introducing False EUR and False EUR exchange rates, *Physica A* 286 (2000) 353-366.
- [12] K. Matia, L.A.N. Amaral, S. Goodwin, H.E. Stanley, Different Scaling Behaviors of Commodity Spot and Future Prices, *Phys. Rev. E* 66 (2002) 027104