

## **Análise da dependência temporal da ocorrência do fogo nas fisionomias abertas do Parque Nacional das Emas, estado de Goiás, Brasil**

Rodolfo Maduro Almeida<sup>1</sup>  
Helena França<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Oeste do Pará  
Avenida Marechal Rondon, s/n – Caranazal, CEP 68040-070, Santarém, Pará, Brasil  
rodolfo.almeida@ufopa.edu.br

<sup>2</sup>Universidade Federal do ABC  
Avenida dos Estados, 5001 – Bangu, CEP 09.210-170, Santo André, São Paulo, Brasil  
helenafranca@ufabc.edu.br

**Abstract.** Based on the chronology of fire occurrence covering the period 1984-2010, we investigate the time dependence of fire occurrence in open savannah areas of Emas National Park. The statistical analysis of the fire return interval, calculated the time between two subsequent fires, is performed using the Weibull distribution. The analysis shows that the probability distribution function has a peak concentrated in the fire return interval between 3 and 4 years since last fire. The cumulative distribution function show that the probability of fire occurs until the fire return interval between 3 and 4 years is around 75%, characterizing a critical condition of fuel accumulation.

**Palavras-chave:** dinâmica do fogo, incêndios de vegetação, distribuição de Weibull, Parque Nacional das Emas.

### **1. Introdução**

A presença do fogo e seu papel em áreas de preservação de Cerrado é um tema de ampla discussão. Embora seja conhecido como um evento natural fundamental para origem e dinâmica de funcionamento do seu ecossistema (Miranda et al., 2002; Simon et al., 2009), a sua presença, na maioria das vezes, é encarada como indesejada, com fortes recomendações para ser combatido. Apesar da estreita ligação com a ação humana, o homem não é o único responsável pela presença do fogo no Cerrado. A principal característica do regime de fogo nas unidades de conservação de Cerrado é a existência de um regime de incêndios de causas antropogênicas e outro regime de incêndios de causas naturais (Miranda et al., 2002).

Os raios são o principal agente causador do fogo natural no Cerrado (Ramos Neto & Pivello, 2000; Miranda et al., 2002). Estes tipos de incêndios possuem sua maior incidência concentrada durante a transição da estação seca para a chuvosa e na estação chuvosa, quando o teor de umidade na superfície do solo e na vegetação está bem mais elevado. Durante a estação seca, os incêndios naturais são eventos raros (França et al., 2007). Normalmente, os incêndios naturais são seguidos por chuvas que os extingue limitando-os a pequenas áreas. Além disso, o estado de vigor da vegetação, que permanece com elevado teor de umidade durante a estação de chuvas, favorece que os incêndios naturais possuam queima de baixa intensidade (Miranda et al., 2002).

O grande perigo está nos incêndios antropogênicos, que ocorrem durante o período seco, período no qual se concentram as atividades de uso do fogo em atividades agropastoris. Estes incêndios costumam ser oriundos de áreas externas às unidades de conservação. Possuem característica de serem devastadores, pois há maior dificuldade para a vegetação se regenerar durante o período seco, pois devido às condições climáticas não serem favoráveis, o brotamento é reduzido até o começo do próximo período chuvoso (Ramos Neto, 2000). Durante a estação seca as condições ambientais tais como elevada temperatura da atmosfera, baixa umidade relativa do ar, vegetação seca e ventos fortes, são propícias ao desenvolvimento de grandes e incontroláveis incêndios.

O objetivo desta pesquisa é estudar a dinâmica do fogo em incêndios de vegetação nas fisionomias abertas do Parque Nacional das Emas. Esta uma unidade de conservação de Cerrado é situada no sudoeste do estado de Goiás, e possui um amplo histórico de ocorrência de incêndios de vegetação registrados por meio de mapeamento sistemático obtido a partir da interpretação visual de imagens de sensoriamento remoto (França et al., 2007). A motivação para este estudo é compreender a relação causa-efeito e quais os principais fatores que influenciam na dinâmica do fogo nas fisionomias abertas. Este trabalho é estruturado conforme descrito a seguir. Inicialmente apresentamos a área de estudo e a metodologia utilizada para estudar a dinâmica do fogo. Na terceira seção, apresentamos o resultado. E, por fim, temos as considerações finais.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1. Caracterização da área de estudo

Criado em 1961, o Parque Nacional das Emas (PNE) possui uma área de um pouco mais que 132.000 hectares, e está localizado no extremo sudoeste do Estado de Goiás, próximo às divisas com o Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, entre as latitudes 17°51' S e 18°21' S, e longitudes 52°43' e 53°07' W, conforme mostra a Figura 1.

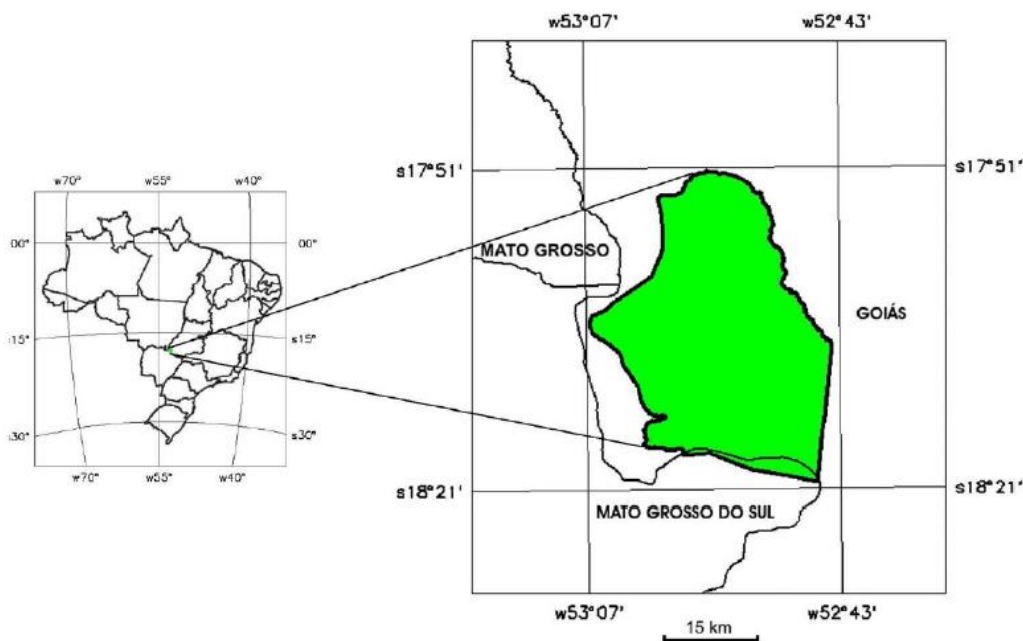


Figura 1: Localização do Parque Nacional das Emas.

FONTE: (França et al., 2007)

O Parque Nacional das Emas apresenta quase todas as variações fisionômicas encontradas no Cerrado, e nele predominam as fisionomias abertas. Estimativas obtidas a partir da interpretação de imagens do satélite LANDSAT indicam que os campos limpos, campos sujos e campos cerrados somam em torno de 78,5% da área (Ramos Neto, 2000). A Figura 2 mostra a distribuição do cerrado aberto ao longo do Parque Nacional das Emas.

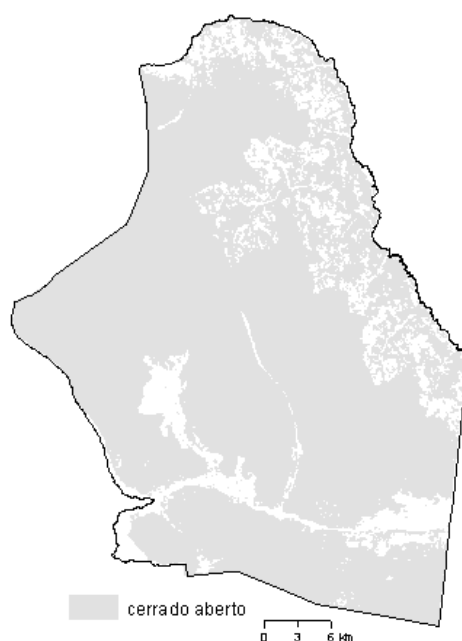


Figura 2: Área de abrangência das fisionomias abertas do Parque Nacional das Emas.

Ecologistas consideram o fogo como um importante agente abiótico (distúrbio ecológico) que atua sobre um ecossistema (Cochrane & Ryan, 2009), podendo ocorrer tanto como um processo natural, quanto como um processo de causa antropogênica. Os raios são o principal agente causador do fogo natural no Cerrado (Ramos Neto & Pivello, 2000; Miranda et al., 2002). Embora o fogo seja um evento endógeno e importante para a estruturação do Cerrado, nos dias de hoje, a pressão humana sobre este bioma gera um impacto negativo: o fogo exógeno ou de origem antrópica. O uso indiscriminado do fogo para a limpeza da superfície para plantio e renovação de pastagens, é nocivo e devastador, ao contrário dos incêndios de causas naturais (Ramos Neto & Pivello, 2000).

Os incêndios naturais possuem a sua maior incidência durante a transição da estação seca para a chuvosa e na estação chuvosa são normalmente seguidos por chuvas. Durante esses períodos, o teor de água no solo e umidade atmosférica encontra-se elevado, a temperatura do ar encontra-se amena, desfavorecendo a ocorrência de estresse hídrico da vegetação. Ou seja, as condições ambientais em que os incêndios naturais ocorrem favorecem incêndios de baixa intensidade e limitados a pequenas áreas. Já os incêndios de causa antropogênica ocorrem geralmente no período seco, onde predominam elevada temperatura da atmosfera, baixa umidade relativa do ar, vegetação seca e ventos fortes, gerando um cenário propício ao desenvolvimento de incêndios de grandes magnitudes.

Em França et al. (2007), o histórico de ocorrência de incêndios no Parque Nacional das Emas é documentado, por meio do mapeamento sistemático obtido pela interpretação visual da resposta espectral de "cicatrices" deixadas por incêndios em imagens dos satélites LANDSAT (séries 3, 5 e 7) e CBERS (séries 2 e 2B), que datam desde 1973 até o período atual. Estas informações compreendem um ingrediente essencial para o desenvolvimento de estudos que visem compreender o comportamento do fogo no Parque, as suas causas e os efeitos.

No regime atual de incêndios no Parque, que ocorre desde 1994 até o presente, é definido predominantemente por incêndios de pequenas proporções que ocorrem no período chuvoso, com diferentes tamanhos e localizações. Os incêndios de origem antrópica são pouco frequentes. Como consequência, temos um mosaico sobre a vegetação, onde as áreas queimadas recentemente não atingem densidade de biomassa suficiente para alimentar as

chamas, e estas atuam como barreiras à propagação do fogo. O mosaico de diferentes classes de densidade de biomassa combustível sobre a vegetação pode ser obtido a partir do mapeamento das classes de anos sem queima. Desde um grande incêndio que ocorreu em 1994, onde a totalidade do Parque foi atingida, a densidade de biomassa combustível ao longo de toda a extensão do Parque atingiu um nível inicial nulo uniforme, tornou-se possível mapear as classes de anos sem queima, calculado como o tempo em anos contado desde a última vez que o fogo ocorreu em uma dada região do Parque. A Figura 3 mostra o mapa de anos sem queima contado desde o grande incêndio de 1994 até Junho de 2002.

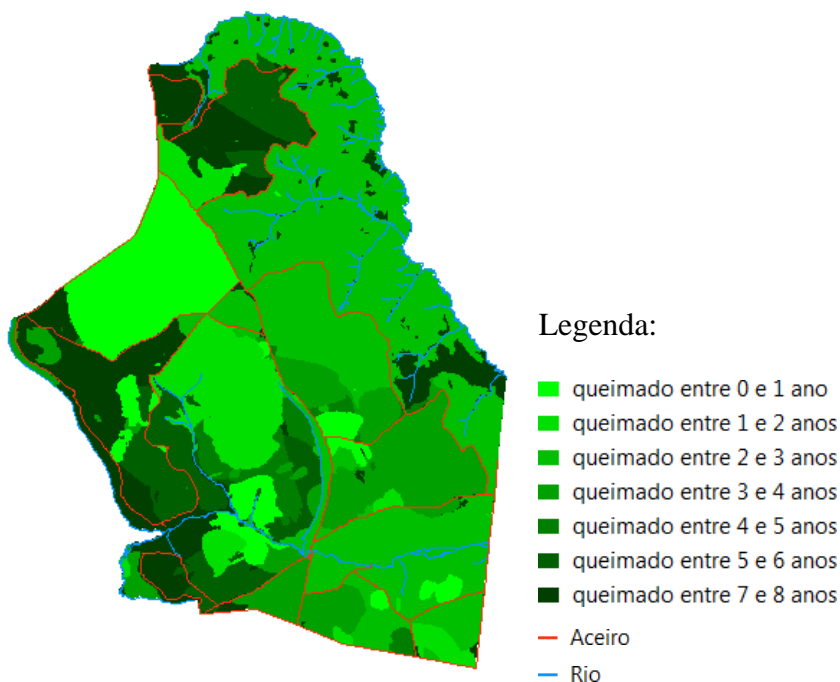


Figura 3: Mapa de anos sem queima até Maio de 2002.

O mosaico de anos sem queima é uma informação importante que nos permite inferir sobre a susceptibilidade ao fogo e a severidade ou intensidade da queima. Pelo mosaico é possível, por exemplo, identificar áreas que não são atingidas pelo fogo há mais tempo e que, portanto, devem ter uma maior densidade biomassa combustível acumulada, sendo então mais susceptíveis ao fogo que regiões atingidas pelo fogo mais recentemente. Quanto mais biomassa combustível acumulada, mais intensa será a queima, logo, regiões que não são atingidas pelo fogo há mais tempo são mais propensas à ocorrência de grandes e incontroláveis incêndios. De maneira inversa, as regiões recentemente atingidas pelo fogo possuem menor quantidade de densidade de biomassa combustível, são menos susceptíveis a suportar o fogo e, caso o fogo ocorra, a severidade da queima será menor. Uma vez iniciado, o fogo pode inclusive se extinguir. Esta dependência pode se dar também em função da estrutura da vegetação, ou seja, cada tipo de vegetação pode possuir uma específica susceptibilidade ao fogo ao longo de tempo. O capim-flecha (*Tristachya leiostachya*), gramínea predominante nas fisionomias abertas do Parque, é muito importante na definição da susceptibilidade ao fogo. Esta gramínea é responsável por um grande incremento de fitomassa combustível, que atinge um valor crítico no período de 3 a 4 anos sem queima, criando condições para grandes e incontroláveis incêndios (Ramos Neto, 2000).

## 2.2. Análise temporal da ocorrência de incêndios nas fisionomias abertas

Segundo Falk et al. (2007), o fogo é parte estruturante de um ecossistema, e a sua incidência e ocorrência é governada por uma série de fatores como: (i) as condições

climáticas e meteorológicas, definida principalmente em termos de duração e de intensidade das estações secas e chuvosas; (ii) as características da vegetação, onde o tipo de vegetação, a distribuição espacial, a sensibilidade ao fogo e conseqüente regeneração pós-queima, e a dinâmica de acúmulo de combustível vegetal, são importantes fatores que condicionam a ocorrência do fogo; e (iii) as características do relevo, onde as feições topográficas podem contribuir para a incidência e ocorrência de certos regimes de incêndios.

Uma importante variável ecológica, que caracteriza o regime de fogo para um dado ecossistema, é o chamado tempo de retorno do fogo  $t$  ( $t > 0$ ), definido como o intervalo de tempo entre dois eventos de queima. A dependência temporal da inflamabilidade dos combustíveis vegetais para um dado tipo de vegetação define-se a partir da análise estatística do tempo de retorno do fogo (Polakow & Dunne, 1999).

O modelo paramétrico mais comumente utilizado em estudos da frequência do fogo é o modelo de Weibull (Johnson & Gutsell, 1994). A função de distribuição de anos sem queima, também chamada de função de sobrevivência (*survivorship*) ao fogo,  $A(t)$ , é a função que nos dá a probabilidade de o fogo não ocorrer até um tempo  $t < T$  é dada por:

$$A(t) = \Pr(t < T) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{b} \right)^c \right].$$

Quando  $t = 0$ , temos  $A(t) = 1$ , e  $\lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = 0$ . Os parâmetros  $b$  e  $c$  do modelo de Weibull são denominados, respectivamente, parâmetro de escala e parâmetro de forma.

A função de distribuição complementar de  $A(t)$ , dada por:

$$F(t) = \Pr(t \geq T) = 1 - A(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{b} \right)^c \right],$$

é conhecida como função de distribuição cumulativa de ocorrência do fogo, e corresponde à probabilidade de o fogo ocorrer para  $t \leq T$ . Quando  $t = 0$  temos  $F(t) = 0$ , e  $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$ .

A função de densidade de probabilidade do tempo de retorno do fogo, também conhecida como função de distribuição de ocorrência do fogo, corresponde à probabilidade de o fogo ocorrer em um intervalo de tempo de  $T$  a  $T + \Delta t$  por unidade de tempo, é dada por:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Pr(T < t < T + \Delta t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{ct^{c-1}}{b^c} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{t}{b} \right)^c \right],$$

onde  $\int_0^{\infty} f(u) du = 1$ .

A taxa de risco de ocorrência do fogo,  $\lambda(t)$ , definida como:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{A(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{ct^{c-1}}{b^c},$$

caracteriza a taxa instantânea (probabilidade por unidade de tempo) de ocorrência do fogo, dado que ele ainda não ocorreu. A função  $\lambda(t)$ , também chamada de taxa de risco de queima, contém os mecanismos essenciais relacionados com o regime do fogo, e caracteriza como se dá a inflamabilidade ou capacidade de ocorrência do fogo na vegetação ao longo do tempo (Johnson & Gutsell, 1994). Uma função  $\lambda(t)$  constante significa que o tempo não influencia na probabilidade de ocorrência do fogo. Se  $\lambda(t)$  for uma função crescente, significa dizer que a inflamabilidade aumenta ao longo do tempo. No modelo de Weibull, a função de risco de ocorrência do fogo será crescente para  $c > 1$  e constante para  $c = 1$ .

Com base na cronologia de ocorrência de incêndios que abrange o período de 1984 a 2010, investigamos a dependência temporal da ocorrência do fogo nas fisionomias abertas do Parque Nacional das Emas, utilizando o modelo paramétrico de Weibull. A análise estatística parte de uma amostragem pontual e uniformemente distribuída sobre a área de cerrado aberto, com pontos regularmente espaçados a uma distância de 90 metros. Para cada amostra pontual, recuperamos o histórico de ocorrência de incêndios para o período de estudo, e os intervalos de tempo entre dois eventos de incêndios são contabilizados. A contabilização do tempo de retorno considera apenas eventos ocorridos a partir de 1984, desprezando qualquer evento

ocorrido antes deste período. Os valores obtidos para a variável aleatória tempo de retorno do fogo  $t$  são armazenados, e em seguida a análise estatística é executada. Com base nos valores de tempo de retorno do fogo obtidos, a função de distribuição cumulativa e a função de densidade de probabilidade são ajustadas, e os parâmetros da distribuição ( $b$  e  $c$ ) são obtidos. O ajuste foi realizado via método de mínimos-quadrados não-lineares utilizando as ferramentas estatísticas e de ajuste de curvas do programa MATLAB (MATLAB, 2010).

### 3. Resultados e Discussão

Os valores estimados para os parâmetros  $b$  e  $c$ , e o erro obtido no ajuste (raiz quadrada do erro quadrático médio) são mostrados na Tabela 1. Para avaliar o ajuste, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov (Massey Jr, 1951), um teste de hipótese que avalia, com determinado nível de significância, se um conjunto de dados são bem representados pela distribuição obtida no ajuste. A hipótese nula,  $H_0$ : os dados seguem a distribuição do ajuste, foi aceita com nível de significância de 0,01.

Tabela 1: Parâmetros estimados para a distribuição de Weibull e erro de ajuste.

b	c	RMSE
3,10	2,49	0,03

Os gráficos da Figura 4 mostram a função de distribuição de probabilidade (Fig. 4(a)) e a função de distribuição cumulativa (Fig. 4(b)) observadas e ajustadas para o período de análise. O gráfico da Figura 4(a) descreve a distribuição de densidade de tempo de retorno do fogo para o período de análise. Percebe-se o pico concentrado no intervalo de queima entre 3 e 4 anos, que é consequência do comportamento fenológico do capim-flecha (*Tristachya leiostachya*). Conforme a distribuição cumulativa de tempo de retorno do fogo obtida para o período de estudo, a probabilidade de o fogo ocorrer até o intervalo de 3 a 4 anos sem queima, é em torno de 75%, caracterizando uma condição crítica de acúmulo de fitomassa combustível. A Figura 5 mostra a taxa de risco de queima estimada para as fisionomias abertas do Parque. Como o valor estimado do parâmetro  $c$  é maior que 1, a função  $\lambda(t)$  é crescente, mostrando a que a inflamabilidade da vegetação aumenta ao longo do tempo.

### 5. Conclusões

A análise de Weibull aplicada no estudo do tempo de retorno do fogo permitiu caracterizar a dependência temporal dinâmica do fogo nas fisionomias abertas do Parque Nacional das Emas. Partindo dos valores de tempo de retorno amostrados sobre a área de estudo, podemos identificar a influência da fenologia do capim-flecha sobre a dinâmica do fogo. Como estudos posteriores, pretendemos comparar a taxa de risco de queima para áreas com e sem predominância desta espécie, e estender esta análise a outras unidades de conservação.

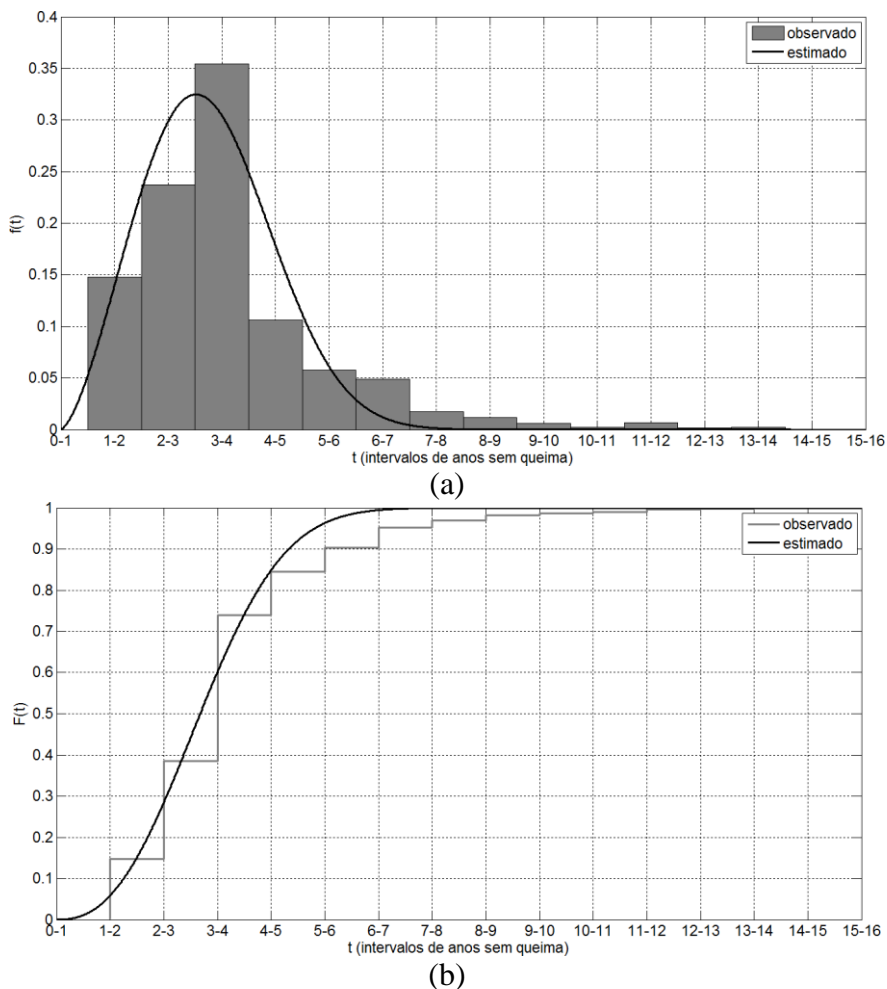


Figura 4: Valores de distribuição de densidade de probabilidade (a) e de distribuição cumulativa (b) observados e estimados pela função de Weibull para o tempo de retorno do fogo obtido no período de 1984-2010 no Parque Nacional das Emas.

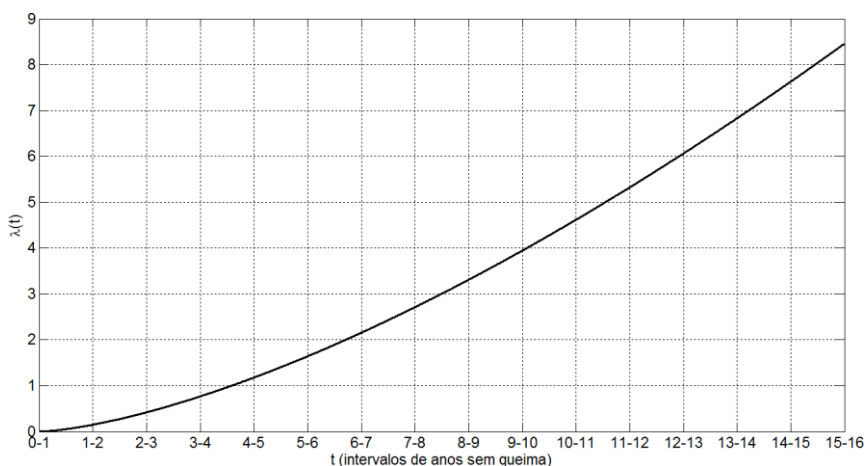


Figura 5: Taxa de risco de queima para as fisionomias abertas do Parque Nacional das Emas estimada a partir de dados de tempo de retorno do fogo para o período de 1984-2010.

## Referências bibliográficas

- Cochrane, M. A.; Ryan, K. C.; Fire and fire ecology: Concepts and principles. In: Cochrane, M. A. (Ed.). **Tropical fire ecology: Climate change, land use and ecosystem dynamics**. Chichester, UK: Praxis Publishing, Ltd., 2009 (Springer-Praxis Books in Environmental Sciences).
- Coutinho, L. M. Fire in the ecology of Brazilian Cerrado. In: Goldammer, J. G. (Ed.). **Fire in the tropical biota, ecosystem process and global challenges**. Berlin: Springer-Verlag, 1990 (Ecological Studies, v. 84). P. 81-105.
- Falk, D.; Miller, C.; Mckenzie, D.; Black, A. Cross-scale analysis of fire regimes. **Ecosystems**, Springer-Verlag, v. 10, p. 809-823, 2007.
- França, H.; Ramos Neto, M. B.; Setzer, A. **O fogo no Parque Nacional das Emas**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2007 (Série Biodiversidade v. 27).
- Johnson, E. A.; Gutsell, S. L. Fire frequency models, methods and interpretations. **Advances in ecological research**, v. 25, p. 230-287, 1994.
- MATLAB. **Version 7.10.0 (R2010a)**. Natick, Massachusetts: The Mathworks Inc, 2010.
- Massey Jr, F. J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. **Journal of American Statistical Association**, v. 46, n. 253, p. 68-78, 1951.
- Miranda, H. S.; Bustamante, M. C; Miranda, A. C. The fire fator. In: Oliveira, P. S.; Marquis, R. J. (Ed.). **The Cerrados of Brazil: Ecology and natural history of a neotropical savana**. New York, NY: Columbia University Press, 2002.
- Polakow, D. A.; Dunne, T. T. Modelling fire-return interval: stochasticity and censoring in the two-parameter Weibull model. **Ecological Modelling**, v. 121, n. 1, p. 79-102, 1999.
- Pyne, J. S.; Adrews, P. L.; Laven, R. D. **Introduction to wildland fire**. 2nd. Ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1996.
- Ramos Neto, M. B.; **O Parque Nacional das Emas (GO) e o fogo: Implicações para a conservação biológica**. Tese de Doutorado – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- Ramos Neto, M. B.; Pivello, V. R. Lightning fires in a brazilian savanna National Park: Rethinking managment strategies. **Environmental Management**. V. 26, n. 6, p. 675-684. 2000.
- Simon, M. F.; Grether, R.; Queiroz, L. P.; Skema, C.; Pennington, R. T.; Hughes, C. E. Recent assembly of the Cerrado: a neotropical plant diversity hotspot by in situ evolution of adaptation to fire. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 48, p. 20359-20364.