

# Modelagem da influência da densidade populacional na ocorrência de focos de calor no bioma da Amazônia

<sup>1</sup>Ana Lucia Nascimento\*, <sup>1</sup>Nelson Jesus Ferreira, <sup>1</sup>Saulo Freitas, <sup>1</sup>Demerval Moreira, <sup>2</sup>Lucijacy Javarini

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista/SP, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas, Pelotas/RS, Brasil

\*analuciasne@gmail.com

---

## RESUMO

Modelos de Risco de Fogo têm como objetivo auxiliar previamente o risco potencial da ocorrência de fogo na vegetação com base em métricas ambientais, sociais e regionais. No entanto, devido as simplificações, diversos modelos não utilizam a variável antrópica – ou utilizam aproximações -, causa de cerca de 90% do fogo no Brasil. Este estudo tem como objetivo apresentar os principais resultados da calibração da função antrópica utilizada pelo módulo de fogo INFERNO e SPITFIRE para o bioma da Amazônia brasileira. Para tal, foram utilizados dados anuais de densidade populacional do Instituto Nacional de Geografia e Estatística – IBGE e dados mensais de focos de calor do Banco de Dados de Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE durante o período de 2003 a 2020. Duas funções foram ajustadas, uma delas representando de forma mais satisfatória o comportamento do fogo no bioma. Foi constatado que 75% dos focos de calor ocorrem em regiões com densidades populacionais de até 17 habitantes/km<sup>2</sup>. Ou seja, fica evidente que para densidades populacionais baixas, há uma maior ocorrência de focos de calor. Avaliando os municípios historicamente mais atingidos, os mesmos apresentam uma alta dependência de atividades econômicas ligadas a extração de madeira, agricultura e pecuária, além de apresentar um baixo desenvolvimento social e econômico.

**Palavras-Chave:** Queimadas, Risco de Fogo.

---

## 1. INTRODUÇÃO

As queimadas e os incêndios florestais podem causar significativos impactos socioeconômicos, na dinâmica da vegetação, no ciclo biogeoquímico, na química da atmosfera e no clima (FREITAS; LONGO; RODRIGUES, 2009; SILVA et al., 2018; VENEVSKY et al., 2019; FREIRE et al., 2020). Do ponto de vista antropogênico, os incêndios podem ocorrer de forma acidental ou com finalidades de desmatamento, queima de resíduos agrícolas, gestão de incêndios e mudança no uso da terra (ARAGÃO et al., 2008; HANTSON et al., 2016b). E, em escala global, cerca de 90% das ignições estão ligadas direta ou indiretamente a ação humana (ROBBINE et al., 2018).

Os Modelos de Risco de Fogo (MRF) têm sido amplamente utilizados para avaliar a possibilidade de ocorrência de fogo na vegetação com base nas condições de tempo, clima e disponibilidade de combustível. No entanto, alguns MRF ainda não utilizam uma importante variável no seu cálculo, a influência antrópica. Este trabalho tem o objetivo de apresentar uma breve síntese da componente de modelagem que está sendo desenvolvida para contribuir com este importante problema científico. Neste trabalho serão apresentados os principais resultados da calibração da função antrópica utilizada pelo módulo de fogo INFERNO (VENESYSKY et al., 2002) e SPITFIRE (THONICKE et al., 2010). Ou seja, a influência da densidade populacional na ocorrência de focos de calor no bioma da Amazônia.

## 2. METODOLOGIA

Este estudo baseou-se na variação anual da densidade populacional e média mensal (mês 8 e 9) de focos de calor nos municípios (772) contidos no bioma da Amazônia, durante o período de 2003 a 2020. Foram utilizados dados do IBGE e de focos de calor do Banco de Dados de Queimadas do INPE (BDqueimadas, 2022). A fim de descrever o melhor ajuste que pudesse representar a influência da densidade populacional na ocorrência de focos de calor no bioma, foram utilizados métodos de estimação para modelos lineares e não lineares. Utilizou-se medidas corretivas aos testes de normalidade através da família de transformações Box-Cox (Box and Cox, 1964). Como alternativa ao ajuste dos dados, foi utilizado um modelo de Ajuste Não Linear, disponibilizado no software estatístico R (Nonlinear Least Squares (NSL)). Para o NSL, utilizou-se a equação não linear (1) desenvolvida por Kirsten et al., (2010), onde os parâmetros estimados foram os fatores  $a$  e  $b$ .

$$k(DP) = a \exp [b \sqrt{(DP)}] \quad (1)$$

Os demais parâmetros, comum as duas equações calibradas, também foram ajustados (Equação 2). Após a calibração dos termos, foi simulada a ignição antrópica para a região de estudo.

$$\alpha = a(Nd) = \frac{\ln(DP)}{\lambda} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{107.921}{4.196.943} = \frac{\text{média mensal de focos de calor}}{\text{área do bioma}} \quad 0,025$$

$\alpha$  representa propensão de ocorrência de fogo em determinada região. O termo  $a$  variou entre 0 e

$17 \times 10^{-2}$ , a depender da densidade populacional da região.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os ajustes aplicados, fez-se um teste de correlação de *spearman* ( $p = -0,36$ ) ao nível de 95% de confiança. Com isto, chegou-se na primeira parte da equação para a representação da influência da densidade populacional nos focos de calor para o bioma, aqui chamada de  $KDP_{A0}$  (Equação 3). Utilizando o *nls*, fez-se o ajuste da equação com os dados de focos de calor e densidade populacional do bioma da Amazônia, chegando-se à equação (4). Posteriormente, foram simuladas as variabilidades da influência antropogênica nas ignições através das equações utilizadas no INFERNO ( $KDP_{INF}$ , Equação 5), SPITFIRE ( $KDP_{SPT}$ , Equação 6) e calibradas através das metodologias propostas ( $KDP_{A0}$  e  $KDP_{A1}$ ). É possível observar com a análise gráfica (Figura 1) que ambos os modelos simulam uma função exponencial, onde os maiores acumulados de focos de calor são observados para densidades populacionais baixas. É importante destacar que o modelo  $KDP_{A1}$  simula os maiores acumulados de fogo, seguido do modelo  $KDP_{SPT}$ .

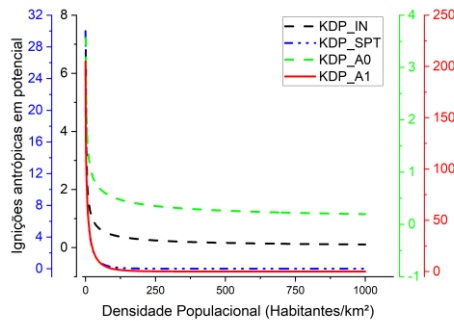
$$KDP_{A0} = 3,57 * DP^{-0,42} \quad (3)$$

$$KDP_{A1} = 205 * \exp(-0,44\sqrt{DP}) \quad (4)$$

$$KDP_{INF} = 6,8 * DP^{-0,6} \quad (5)$$

$$KDP_{SPT} = 30 * \exp(-0,5\sqrt{DP}) \quad (6)$$

Figura 1 – Simulação das ignições antrópicas em potencial utilizando as equações calibradas.



Após a calibração dos termos, foi simulada a ignição antrópica para a região de estudo a partir das equações descritas abaixo e representadas graficamente (figura 2). Os resultados indicaram que a maior quantidade de focos de calor simuladas foram pelo modelo  $IA_{A1}$  seguida do modelo  $IA_{A0}$ . Os resultados encontrados em Venesvsky et al., (2002) e Thonicke et al., (2010) apresentam um total de ignições simuladas variando entre 0 e 9 (ignições/dia) e 0 a 2,2 (ignições/mês) respectivamente. Ao comparar o que é encontrado na literatura com o proposto neste estudo, é possível afirmar que o modelo  $IA_{A1}$  simula de forma mais satisfatória o comportamento dos focos de calor (50 ignições/mês) encontrados no bioma (Figura 2 e Figura 3). Com a análise gráfica, é possível observar dois comportamentos distintos para as ignições simuladas. O primeiro representa uma função logarítmica

crecente, variando com a densidade populacional, diferindo do que é observado no gráfico de dispersão (Figura 3). O segundo comportamento representa uma função crescente até um valor máximo (37 ignições), seguido de um comportamento decrescente e estabilizado. Este segundo comportamento representa de forma mais realística o comportamento do fogo no bioma, dado que a ocorrência de focos de calor tem relação inversa a densidade populacional a partir de determinado crescimento populacional.

$$IA_{IN} = 6.8 * DP^{-0.6}DP\alpha \quad (7)$$

$$IA_{A0} = 3.57 * DP^{-0.44}DP\alpha \quad (8)$$

$$IA_{SPT} = 30 * \exp [-0,5 \sqrt{(DP)}]DP\alpha \quad (9)$$

$$IA_{A1} = 205 * \exp [-0,44 \sqrt{(DP)}]DP\alpha \quad (10)$$

Figura 2 – Simulações das médias de focos de calor (mês) no bioma da Amazônia em função da densidade populacional.  $IA_{IN}$  representa a ignição antrópica simulada pelo modelo INFERNO.  $IA_{SPT}$  representa a ignição antrópica simulada pelo modelo SPITFIRE.  $IA_{A0}$  e  $IA_{A1}$  representam o ajuste das ignições antrópicas simuladas para o bioma da Amazônia. Painel à direita representa o logaritmo da densidade populacional.

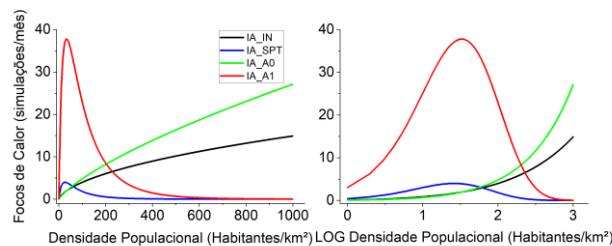
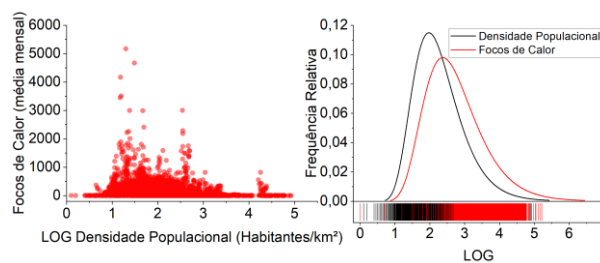


Figura 3 – Gráfico de dispersão e distribuição de frequência relativa em escala logarítmica da densidade populacional ( $\log [densidade\ populacional + 1,5]$ ) para os focos de calor que ocorreram no bioma da Amazônia durante o período de 2003 a 2020.

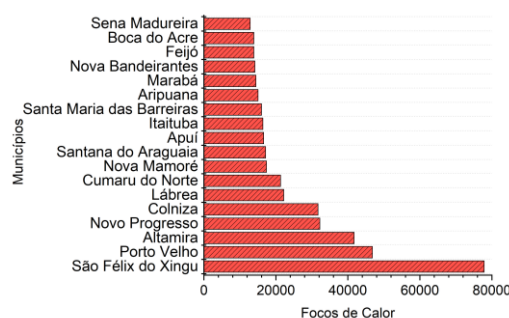


Utilizando o banco de dados de focos de calor para o bioma durante o período de estudo, foi feito um levantamento dos municípios que obtiveram as maiores ocorrências de fogo. Além disso, observou-se que 75% dos focos de calor (123) no bioma ocorreram em densidades populacionais de até 17 habitantes/km<sup>2</sup>, sendo 50% da amostra concentrada em 5,72 habitantes/km<sup>2</sup> e 32 focos de calor. Ou seja, é possível inferir que grande parte dos focos de calor que ocorrem no bioma estão em regiões com baixa

densidade populacional.

A figura 4 traz o levantamento com os primeiros 20 municípios que possuem o maior acumulado de focos de calor. Félix do Xingu aparece como o município que apresenta o maior acumulado de fogo, com 77.890 focos de calor. Em segundo lugar, Porto Velho aparece com acumulado de 46.840 focos de calor durante o período de estudo. Altamira (41.747), Novo Progresso (32.222), Colniza (31.712) aparecem como o terceiro, quarto e quinto municípios que apresentam o maior acumulado de fogo. Buscou-se, durante a pesquisa, entender contexto social em que se dava a ocorrência de focos de calor no bioma utilizando dados do IBGE. O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), utilizado de forma qualitativa, mede o grau de desenvolvimento de uma região com base na educação, saúde e renda. O IDH médio dos municípios que apresentaram recordes de focos de calor foi de aproximadamente 0,61, que é considerado médio, porém baixo se comparado a municípios de regiões desenvolvidas (como por exemplo a cidade do Rio de Janeiro (IDH = 0,79). De acordo com dados do IBGE (IBGE, 2022), os municípios apresentam, em média, 13,66% de seus territórios com esgotamento sanitário básico adequado, contrapondo com 94,40% da cidade do Rio de Janeiro. O índice de escolarização entre crianças e adolescentes de 6 a 14 anos é de aproximadamente 90,61%, contrapondo 99,7% de média nacional. É possível inferir que as regiões apresentam um baixo nível de desenvolvimento econômico, visto que pelo menos 44,46% da população tem renda de até  $\frac{1}{2}$  salário-mínimo por pessoa (salário-mínimo de R\$ 1.212 em 2022). Grande parte dos municípios do bioma são dependentes de atividades ligadas a agropecuária e extração de madeira, fatores que influenciam a atividade do fogo. Dito isso, é importante também entender o contexto social e a atividade econômica dos municípios que obtêm recordes de focos de calor.

Figura 4 – Municípios do bioma da Amazônia que concentraram mais focos de calor durante o período de 2003 a 2020.



#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A variabilidade dos focos de calor no bioma da Amazonia varia em relação a densidade populacional na região. Duas funções foram calibradas neste trabalho, uma delas representa de forma mais satisfatória o comportamento dos focos de calor observados nos gráficos de dispersão. Assim,

as densidades populacionais menores concentram uma maior ocorrência de focos de calor. Avaliando os municípios historicamente mais atingidos, é possível observar também que os mesmos apresentam uma alta dependência de atividades econômicas ligadas a extração de madeira, agricultura e pecuária, além de apresentar um baixo desenvolvimento social e econômico. Na etapa seguinte desse estudo serão inseridas as funções calibradas no modelo de superfície JULES e realizar experimentos para verificar a acurácia do mesmo.

## 5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

## 6. REFERÊNCIAS

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 363, n. 1498, p. 1779–1785, 2008.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; RODRIGUES, L. F. Modelagem numérica da composição química da atmosfera e seus impactos no tempo, clima e qualidade do ar. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 2, p. 188–207, 2009.

FREIRE, J. L. M. et al. To What Extent Biomass Burning Aerosols Impact South America Seasonal Climate Predictions? *Geophysical Research Letters*, v. 47, n. 16, 2020.

HANTSON, S. et al. The status and challenge of global fire modelling. *Biogeosciences Discussions*, v. 2016, n. January, 2016a

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2022. Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios Florestais. Disponível em <http://www.inpe.br/queimadas>.

SILVA, C. H. L. et al. Deforestation-induced fragmentation increases forest fire occurrence in central Brazilian Amazonia. *Forests*, v. 9, n. 6, 2018.

THONICKE, K. et al. The influence of vegetation, fire spread and fire behaviour on biomass burning and trace gas emissions: Results from a process-based model. *Biogeosciences*, v. 7, n. 6, p. 1991–2011, 2

VENEVSKY, S. et al. Simulating fire regimes in human-dominated ecosystems: Iberian Peninsula case study. *Global Change Biology*, v. 8, n. 10, p. 984–998, 2002. 010.