

## MODELAGEM MATEMÁTICA PARA SIMULAÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NO RIO GRANDE DO SUL - BRASIL

LEONIDAS A. BALTAZAR<sup>1</sup>; MARCELO F. ALONSO<sup>2</sup>; REGIS S. QUADROS<sup>3</sup>;  
EMERSON RODRIGUES<sup>4</sup>; DANIELA BUSKE<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pelotas - leonidasariasb@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas - mfapel@gmail.com

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pelotas - quadros99@gmail.com

<sup>4</sup> Universidade Federal de Pelotas - emerson\_pel@hotmail.com

<sup>5</sup> Universidade Federal de Pelotas - danielabuske@gmail.com

### 1. INTRODUÇÃO

Os incêndios florestais são um dos principais fatores de degradação ambiental no Brasil, com impactos diretos sobre a biodiversidade, o clima, a saúde humana e os ciclos hidrológicos. Embora amplamente estudadas na região amazônica e no cerrado, os incêndios florestais no Sul do Brasil ainda carecem de modelos específicos que considerem as particularidades climáticas, topográficas e de uso do solo da região.

Segundo o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis IBAMA (2023), descreve-se incêndio florestal como um fogo sem controle na vegetação, originada de forma natural, intencional ou acidental, e a queima com o uso do fogo para fins agropastoris ou de conservação ambiental realizada pelo homem.

BAKHSHAI e JOHNSON (2019), fizeram uma revisão da modelagem de incêndios florestais, indicando que para estudar sua propagação na escala espacial e temporal, a tendência é acoplar os modelos de tempo e clima aos modelos de combustível e terreno; os modelos tradicionais que usavam dados empíricos (umidade do combustível, topografia e tempo atmosférico) tinham limitações de previsão de incêndios com convecção intensa. A nova geração de modelos acoplados são modelos físicos e mecanicistas (com química da combustão, calor e dinâmica dos fluidos), acoplamento atmosfera-fogo (que simula em espaço-tempo com previsão numérica de tempo e modelos de propagação de fogo), feedback atmosférico (que mudam o clima local com alteração de vento, temperatura e umidade produto do calor e a umidade do fogo). Tem modelos como o FIRETEC, WFDS, CAWFE, WRF-FIRE, ForeFire/Meso-NH, ARPS/DEVS-FIRE.

A previsão meteorológica de curto e médio prazo, com dados de vento, umidade relativa e temperatura perto da superfície do solo e acima da camada limite, podem prever com antecedência o perigo de incêndio florestal, com aplicação de modelagem numérica (SPEER et al., 1996).

Diante do exposto, o objetivo do trabalho será desenvolver e validar um modelo matemático capaz de simular a propagação de incêndios florestais e sua previsão, considerando as características específicas do Estado do Rio Grande do Sul.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Área de estudo

O trabalho vai ser desenvolvido para aplicação no Estado do Rio Grande do Sul (RS) (Figura 1), situado na região sul do Brasil, o clima predominante é subtropical úmido, com verão quente e inverno frio. Sua área territorial é de 281.707,15 km<sup>2</sup> e uma população de 10.882.965 habitantes (IBGE, 2022).

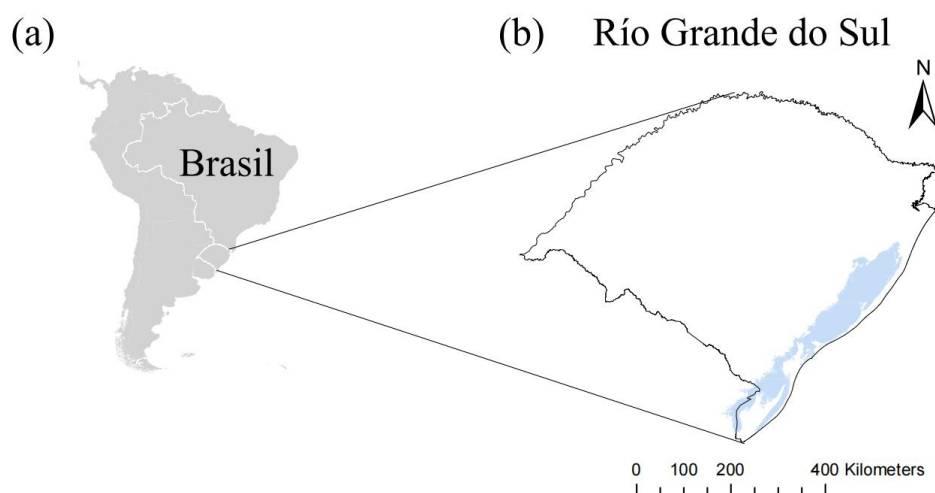


Figura 1: (a) Localização da área de estudo no Brasil e na América do Sul, (b) Estado do Rio Grande do Sul.

### 2.2 Procedimento:

O primeiro passo a seguir no presente estudo para a simulação dos incêndios florestais é sobre a estrutura do modelo com a escolha entre modelos determinísticos ou estocásticos, isso mediante análise entre modelos baseados em equações diferenciais parciais EDPs (como equações de reação-difusão), modelos empíricos e modelos baseados em autômatos celulares. O anterior nos permitirá o desenvolvimento e implementação de um modelo computacional utilizando a linguagem computacional Python, com entradas de dados regionais, como informações meteorológicas, de cobertura do solo, relevo e registros históricos de focos de calor; realizando sua respectiva calibração e validação do modelo com dados reais observados (do INPE e IBAMA) e serão realizados testes de sensibilidade para avaliar a influência de diferentes parâmetros no comportamento do modelo, além da análise de cenários considerando dados de previsão de tempo, para mitigar incêndios florestais.

### 2.3 Modelo matemático-numérico para simular incêndios florestais, de Level-set + Taxa de Propagação (ROS)

Utiliza-se uma equação base de Level-set (equação 1) para a representação da frente de fogo como o nível  $\phi(x,t)=0$ :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + R(x,t) | \nabla \phi | = 0 \quad (1)$$

Onde:

R é a taxa de propagação do fogo (*Rate of Spread ROS*, m/s), que depende do tipo de combustível, velocidade e direção de vento e declividade do terreno.

Para a parametrização típica da taxa de propagação do fogo R, uma forma simples e eficaz (anisotrópica, alinhada com a normal da frente  $\hat{n} = \nabla \phi / |\nabla \phi|$ ) é mostrada na equação 2:

$$R(x,t) = R_0(x) [1 + a_w \max(0, \hat{W} \cdot \hat{n}) + a_s \max(0, \hat{S} \cdot \hat{n})], \quad (2)$$

onde  $R_0$  é a taxa de propagação do fogo de calma (sem vento/slope), ajustado por tipo de combustível/umidade,  $\hat{W}$  a direção do vento local;  $\hat{S}$  a direção do gradiente de relevo (subida) e  $a_w$ ,  $a_s$  são ganhos (empíricos) do efeito de vento e declividade, respectivamente.

A discretização será realizada em uma malha regular espacial de tamanho com passo  $\Delta x$ , passo de tempo  $\Delta t$  explícito, condição de estabilidade CFL (Courant–Friedrichs–Lewy)  $\Delta t \leq \text{CFL} \Delta x / \max R$  (é recomendável um  $\text{CFL} \approx 0,4 - 0,5$ ). O Gradiente segundo o esquema de Godunov upwind (a favor do vento) para  $|\nabla \phi|$ .

A estabilização será com a re-inicialização periódica de  $\phi$  para distância assinada resolvendo com uso da equação 3:

$$\partial_t \phi = \text{sign}(\phi_0) (1 - |\nabla \phi|). \quad (3)$$

As Saídas do modelo serão o Tempo de chegada  $T(x)$  (quando  $\phi$  cruza 0), o Perímetro espacial atingido  $\{\phi=0\}$  ao longo do tempo e a área queimada final acumulada.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram coletadas informações de tempo atmosférico na Estação A887, em Capão do Leão para o dia 06/03/2025 às 17:00 (Tabela 1), que teve onda de calor e risco de incêndios florestais.

Tabela 1. Dados de tempo atmosférico

Variável	Quantidade
Temperatura máxima	34,6°C (sensação térmica 40°C)
Umidade do ar	66%
Velocidade de vento	4,6 m/s
Direção de vento	110°
Rajada de vento	7,2 m/s
Precipitação	0 mm

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia - INMET

Do modelo matemático-numérico de Level-set + Taxa de Propagação (ROS) para uma simulação de risco de incêndio florestal em uma área de 4 km<sup>2</sup>, pode se observar na Figura 2 um tempo de chegada do fogo de 3500 segundos, em uma topografia com desnível entre 0-50 m, e que produziu uma área de queimada final de 1,2 km x 0,8 km.

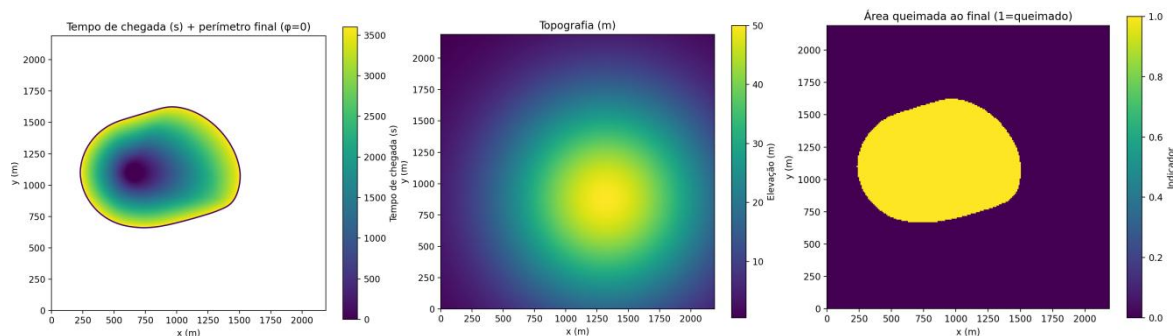


Figura 2. Simulação de tempo de chegada, Perímetro-topografia e Área queimada final

#### 4. CONCLUSÕES

O modelo matemático inicial utilizado para simulação de incêndios florestais foi capaz de simular a propagação do fogo em uma área próxima de Pelotas-RS. A próxima etapa do trabalho será aprimorar, ampliar e validar o modelo, complementando com informações de previsão de tempo para fins de previsão de risco de incêndios florestais.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAKHSHAI and E.A. JOHNSON. A review of a new generation of wildfire–atmosphere modeling. Canadian Journal of Forest Research. 49(6): 565-574. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0138>, 2019.
2. IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis 2023. [https://www.gov.br/ibama/pt-br/acesso-a-informacao/perguntas-frequentes/incendios-florestais?utm\\_source=chatgpt.com#incendioqueima](https://www.gov.br/ibama/pt-br/acesso-a-informacao/perguntas-frequentes/incendios-florestais?utm_source=chatgpt.com#incendioqueima).
3. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2022. Estimativa populacional 2022 IBGE. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/panorama>.
4. SPEER MS, LESLIE LM, COLQUHOUN JR MITCHELL E. The Sydney Australia Wildfires of January 1994 - Meteorological Conditions and High Resolution Numerical Modeling Experiments. International Journal of Wildland Fire 6, 145-154. <https://doi.org/10.1071/WF9960145>, 1996.