

Dinâmica de Propagação de Incêndios Florestais e Regeneração: Uma Abordagem via Autômatos Celulares

Hivison Santos Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Departamento de Computação - Disciplina de Computação Biológica

Janeiro de 2026

Resumo

Este trabalho apresenta a implementação e análise de um modelo de simulação de incêndios florestais utilizando Autômatos Celulares (AC). O objetivo é compreender como regras locais simples de interação entre células (árvores) podem gerar comportamentos globais complexos, como a propagação de frentes de fogo e ciclos de regeneração florestal. Utilizando a linguagem Python e bibliotecas de computação científica, simulamos uma grade bidimensional onde estados discretos representam a condição da vegetação. Os resultados demonstram a eficácia dos ACs na modelagem de sistemas dinâmicos e fenômenos de percolação.

1 Introdução

A modelagem de sistemas naturais complexos é um dos grandes desafios da ciência computacional. Fenômenos como a propagação de epidemias, o fluxo de trânsito e incêndios florestais compartilham uma característica comum: o comportamento macroscópico emerge de interações locais microscópicas [3].

Autômatos Celulares (AC) são modelos matemáticos discretos ideais para estudar tais sistemas. Eles consistem em uma grade de células, onde cada célula possui um estado finito que evolui no tempo de acordo com regras determinísticas ou estocásticas baseadas nos estados de seus vizinhos [2].

Neste estudo, aplicamos um modelo estocástico de AC para simular um incêndio florestal, considerando não apenas a queima, mas também a capacidade de regeneração da floresta, observando a transição de fases do sistema ao longo de t iterações.

2 Metodologia

O modelo foi implementado em Python utilizando as bibliotecas NumPy para manipulação matricial e Matplotlib para visualização e animação.

2.1 Definição do Espaço e Estados

O ambiente é representado por uma matriz $N \times N$ (onde $N = 100$), resultando em 10.000 células. Cada

célula (i, j) pode assumir um dos quatro estados discretos no tempo t :

- **0 (Branco):** Espaço Vazio.
- **1 (Verde):** Árvore Viva.
- **2 (Vermelho):** Fogo (Árvore queimando).
- **3 (Preto):** Cinzas/Área queimada.

A condição inicial da floresta é gerada estocasticamente, onde cada célula tem 70% de chance de conter uma árvore e 30% de estar vazia. O fogo é iniciado artificialmente no centro da grade (50, 50).

2.2 Regras de Transição

A evolução do sistema ocorre em passos de tempo discretos. Para cada célula, aplicam-se as seguintes regras baseadas na Vizinhança de Von Neumann (cima, baixo, esquerda, direita):

1. **Propagação:** Se uma célula é Árvore (1) e possui pelo menos um vizinho pegando Fogo (2), ela se torna Fogo (2) no tempo $t + 1$.
2. **Combustão:** Se uma célula é Fogo (2), ela se consome e vira Cinzas (3) no próximo passo.
3. **Regeneração:** Se uma célula é Vazio (0) ou Cinzas (3), ela tem uma pequena probabilidade $p = 0.01$ (1%) de se tornar uma nova Árvore (1).

As bordas da matriz são tratadas como fronteiras fixas (inertes) para evitar erros de índice na simulação.

3 Resultados e Discussão

A simulação foi executada por 300 frames. Observou-se que a densidade inicial de 70% é suficiente para permitir a percolação do fogo, ou seja, o incêndio se espalha por grandes aglomerados de vegetação conectada (Fig. 4).

A introdução da regra de regeneração ($p = 0.01$) criou um comportamento cíclico. Diferente de modelos estáticos onde o fogo cessa após consumir o combustível, nosso modelo permite que a floresta "renasça", criando potencial para novos incêndios futuros caso haja reconexão da biomassa.

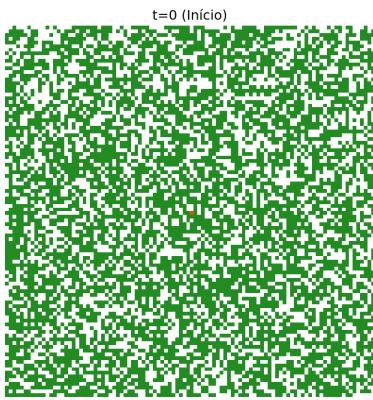


Figura 1: Estado Inicial ($t = 0$).
Foco central.

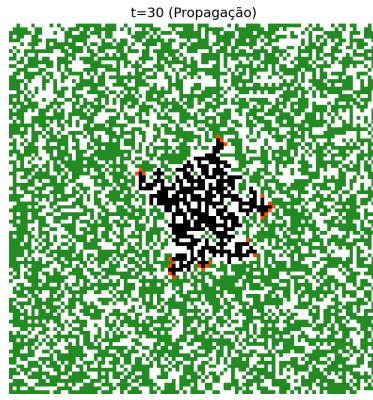


Figura 2: Propagação ($t = 30$).
Frente de fogo.

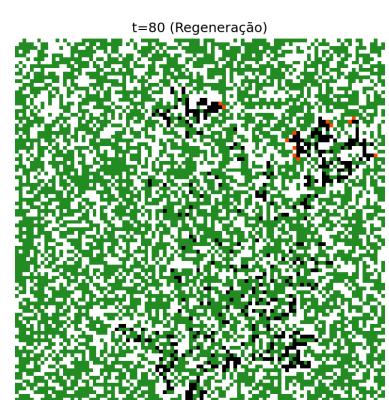


Figura 3: Regeneração ($t = 80$).

Figura 4: Evolução temporal do autômato celular: início, propagação e regeneração.

3.1 Análise de Criticalidade e Percolação

Para validar o modelo, realizamos uma análise de Monte Carlo variando a densidade inicial de árvores (ρ) de 0 a 1 e observando a fração total da área queimada.

A teoria de percolação prevê que, em reticulados quadrados com vizinhança de Von Neumann, existe um limiar crítico ($\rho_c \approx 0.59$). Abaixo deste valor, o fogo tende a se extinguir rapidamente. Acima dele, existe um *cluster* gigante que permite a propagação indefinida.

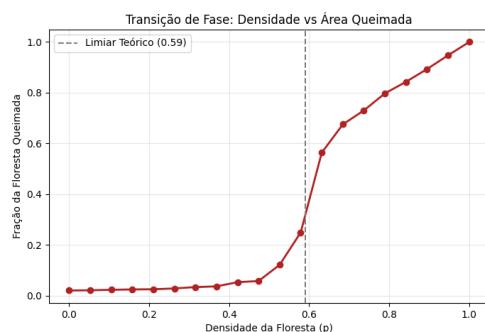


Figura 5: Transição de Fase. O gráfico mostra uma mudança abrupta (ponto de inflexão) no comportamento do incêndio próximo a $\rho = 0.6$.

Nossos resultados (Fig. 5) confirmam este comportamento, demonstrando que pequenas alterações na densidade da floresta levam a mudanças catastróficas na magnitude dos incêndios.

3.2 Conexão com a Realidade: O ”Tipping Point” Amazônico

Embora simplificado, o modelo ilustra o conceito de *Tipping Point* (Ponto de Não Retorno). No nosso autômato, a transição de fase é clara. Este

fenômeno possui um paralelo alarmante com a Floresta Amazônica.

Estudos de Carlos Nobre e Thomas Lovejoy sugerem que a Amazônia possui um ponto de inflexão similar. Se o desmatamento atingir entre 20% a 25% da área original, o bioma perderá sua capacidade de bombear umidade para a atmosfera, colapsando o ciclo hidrológico e transformando a floresta tropical em uma savana degradada — um processo irreversível [4, 5]. Nossa modelo captura a essência matemática desse perigo: a não-linearidade das respostas ecológicas à degradação.

4 Conclusão

A implementação demonstrou com sucesso como Autômatos Celulares simulam fenômenos de propagação. O código gerado serve como base para estudos mais complexos, como a inclusão de variáveis de vento. A relevância deste trabalho reside na demonstração prática da teoria do caos e da criticalidade auto-organizada em sistemas biológicos.

Disponibilidade de Dados

O código fonte e a animação estão disponíveis em: <https://github.com/SEU-USUARIO/ufrpe-cellular-automata-2025>

Referências

- [1] Albuquerque, J. *Cellular Automata - INdisciplina*. Disponível em: <https://jonesalbuquerque.blogspot.com/2016/10/CellularAutomata.html>. Acesso em: 18 fev. 2026.
- [2] Sedgewick, R.; Wayne, K. *Computer Science: An Interdisciplinary Approach*. Princeton University.
- [3] Wolfram, S. *A New Kind of Science*. Wolfram Media, 2002.

- [4] Nobre, C. A.; et al. "Land-use and climate change risks in the Amazon". *PNAS*, 113(39), 2016.
- [5] Lovejoy, T. E.; Nobre, C. "Amazon tipping point". *Science Advances*, 4(2), 2018.