

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Geraldo Rodrigues de Melo Neto

**Desenvolvimento de um Modelo Baseado em
Autômatos Celulares para Simular a
Propagação de Incêndios Florestais**

Uberlândia, Brasil

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Geraldo Rodrigues de Melo Neto

**Desenvolvimento de um Modelo Baseado em Autômatos
Celulares para Simular a Propagação de Incêndios
Florestais**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
a Faculdade de Computação da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos requi-
sitos exigidos para a obtenção do título de
Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Luiz Gustavo Almeida Martins

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Computação

Bacharelado em Ciência da Computação

Uberlândia, Brasil

2025

Geraldo Rodrigues de Melo Neto

Desenvolvimento de um Modelo Baseado em Autômatos Celulares para Simular a Propagação de Incêndios Florestais

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Computação da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

Trabalho aprovado. Uberlândia, Brasil, 22 de setembro de 2025:

Luiz Gustavo Almeida Martins
Orientador

**Professor Doutor Claudiney Ramos
Tinoco**

**Professora Giullia Rodrigues de
Menezes**

Uberlândia, Brasil
2025

*Dedico este trabalho a minhas falecidas avós, que sempre me apoiaram e me davam
forças para seguir em frente.*

Resumo

As ocorrências de incêndios florestais no Cerrado Brasileiro, apesar de serem comuns em seu ciclo natural, vêm se intensificando a cada ano, principalmente devido às ações humanas, de modo que esses ambientes não conseguem se recuperar adequadamente. Portanto, tal fenômeno se torna uma constante preocupação para a preservação da fauna e flora brasileira. Dessa maneira, o uso de ferramentas computacionais podem auxiliar no entendimento da propagação do fogo nos incêndios, ajudando na definição de ações de controle para a preservação do meio ambiente. A fim de contribuir com essa preservação, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo computacional baseado em AC para simular a propagação de incêndios florestais no Cerrado brasileiro. O modelo implementado é fortemente baseado em um trabalho da literatura, que representa a influência de fatores ambientais como vários tipos de vegetação, umidade do ar e vento. Além disso, também foi adicionado o relevo da região monitorada como mais um fator para determinar a dinâmica de propagação do fogo. Os experimentos demonstraram que o modelo é capaz de reproduzir comportamentos similares aos simulados a partir do modelo de referência. Simulações com relevo mostraram um espalhamento mais rápido das chamas em aclives, refletindo o comportamento físico do fogo em terrenos inclinados. Entretanto, embora o relevo afete a velocidade de propagação das chamas, o impacto do vento ainda é predominantemente na dinâmica do incêndio. Os resultados obtidos também evidenciaram a alta sensibilidade do modelo aos parâmetros utilizados, possibilitando a simulação de diversos cenários de incêndios florestais e fornecendo uma ferramenta útil para estudos e prevenção de incêndios.

Palavras chave: Autômatos Celulares, Modelo de Propagação de Fogo ,Incêndios Florestais, Relevo, Simulação Computacional.

Abstract

Wildfires in the Brazilian Cerrado, although part of its natural cycle, have been intensifying each year, mainly due to human activities, preventing these ecosystems from adequately recovering. This phenomenon poses a constant concern for the preservation of Brazilian flora and fauna. Computational tools can aid in understanding fire propagation, supporting the development of effective control strategies for environmental preservation. This work presents the development of a computational model based on Cellular Automata (CA) to simulate wildfire spread in the Brazilian Cerrado. The implemented model is strongly based on a reference study, incorporating environmental factors such as different vegetation types, air humidity, and wind. Additionally, the terrain's topography was included as a factor influencing fire dynamics. Experiments demonstrated that the model can reproduce behaviors similar to those generated by the reference model. Simulations including topography showed faster fire spread on slopes, reflecting the physical behavior of fire in inclined terrains. Although terrain influences the fire's propagation speed, wind remains the predominant factor in fire dynamics. The results also highlighted the model's high sensitivity to parameter variations, enabling the simulation of diverse wildfire scenarios and providing a useful tool for research and fire prevention.

Keywords: Celular Automata, Fire Propagation Model, Forest Fires, Relief, Computer Simulation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de diferentes dimensões do reticulado (WOLFRAM, 2002).	14
Figura 2 – Exemplo de formatos das células de um AC. Adaptado de Fraga, Oliveira e Martins (2020).	14
Figura 3 – Regras de evolução do autômato celular elemental de Wolfram Wolfram (2002).	15
Figura 4 – Regras de transição - Regra 30.	16
Figura 5 – Evolução de um autômato celular unidimensional utilizando a regra 30 de Wolfram, iniciando com uma célula central viva e mostrando padrões emergentes ao longo de múltiplas iterações.	16
Figura 6 – Vizinhança de von Neumann.	17
Figura 7 – Vizinhança de Moore.	17
Figura 8 – Representações de configurações iniciais para o Jogo da Vida.	18
Figura 9 – Evolução de um <i>glider</i> .	18
Figura 10 – Evolução de um <i>block</i> .	19
Figura 11 – Evolução de um <i>blinker</i> .	19
Figura 12 – Estados do modelo adaptado de Ferreira et al. (2023).	23
Figura 13 – Representação da matriz de combustão (TINOCO et al., 2022).	23
Figura 14 – Representação de um reticulado com relevo. À direita estão as células com menor altitude, representadas pelas cores mais escuras, enquanto à esquerda estão as células com maiores altitudes, representadas por cores mais claras.	26
Figura 15 – Simulações do modelo implementado, considerando incêndios em cenários com uma (a - c) e duas vegetações (d - f).	29
Figura 16 – Simulações do modelo original, considerando incêndios em cenários com uma (a - c) e duas vegetações (d - f). Fonte: retirada de (FERREIRA et al., 2023).	29
Figura 17 – Evolução do incêndio sobre diferentes umidades.	30
Figura 18 – Evolução dos incêndios simulados com o modelo original, considerando diferentes umidades. Retirado de Ferreira et al. (2023).	31
Figura 19 – Propagação das chamas em cenários de floresta em função da umidade do ar.	31
Figura 20 – Evolução dos incêndios considerando diferentes coeficientes de relevo (μ).	34
Figura 21 – Impacto do relevo ($\mu = 0,5$) nas simulações de incêndios, considerando diferentes vegetações e a presença de vento ($\delta = 0,5$): (a-c) simulações sem relevo; e (d-f) simulações com relevo.	35

Figura 22 – Impacto do relevo nas simulações de incêndios, considerando diferentes vegetações e a presença de vento ($\delta = 0,24$): (a-c) simulações com coeficiente $\mu = 0,5$; e (d-f) simulações com coeficiente $\mu = 0,76$	35
Figura 23 – Impacto do relevo nas simulações de incêndios, considerando diferentes vegetações e a presença de vento ($\delta = 0,24$) e coeficiente de relevo $\mu = 0,76$: (a-c) simulações com diferença de altura ($E = 1$); e (d-f) simulações com diferença de altura ($E = 3$).	36
Figura 24 – Impacto do relevo ($\mu = 0,5$) nas simulações de incêndios, considerando diferentes vegetações e a presença de vento ($\delta = 0,5$): (a-c) simulações sem relevo; e (d-f) simulações com relevo.	36

Lista de símbolos

μ	Coeficiente de elevação da vegetação, que influencia a propagação do fogo
β	Intensidade base do fogo, representando a quantidade mínima de energia necessária para iniciar a combustão.
γ	Percentual de umidade da vegetação, que afeta diretamente a facilidade de ignição e tempo de vida do fogo.
δ	Coeficiente de decaimento da intensidade do fogo, representa o quão direcionado é o vento.
λ	Valor calórico da vegetação, indicando a quantidade de calor gerado por unidade de massa durante a combustão.
a	Expoente da equação de regeneração da vegetação, relacionado à velocidade de recuperação após a ocorrência de um incêndio.
r	Fator de direção do vento representado pela orientação ($\{cardinal\} \cup \{colateral\}$).
ts	Numero de passos de tempo que uma célula viveu

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivos	11
1.3	Estrutura do Documento	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Autômatos Celulares	13
2.1.1	Autômatos Celulares Unidimensionais	15
2.1.2	Autômatos Celulares Bidimensionais	16
2.1.3	Autômatos Celulares Probabilísticos	18
2.2	Trabalhos Relacionados	20
3	MODELO DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO	22
3.1	Modelo de Referência	22
3.2	Dinâmica do Relevo	25
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	27
4.1	Validação do Modelo de Referência	28
4.2	Influência da Umidade nas Chamas	28
4.3	Efeito do Relevo na Propagação do Fogo	30
5	CONCLUSÕES	37
	REFERÊNCIAS	38

1 Introdução

Incêndios florestais no Cerrado brasileiro são comuns e ocorrem por diversas causas naturais (COUTINHO, 1990). Entretanto, ações humanas, como o desmatamento ilegal e a poluição, têm aumentado consideravelmente as ocorrências desses incêndios e, por consequência, os tornam mais devastadores para a vegetação local. Dessa maneira, a vegetação não possui tempo para se recuperar, provocando perdas substanciais na fauna e flora do Cerrado. Por conseguinte, tais eventos se tornaram uma constante preocupação para as diversas entidades governamentais e de pesquisa que buscam a preservação do meio ambiente.

Nesse contexto, se torna necessário entender esse fenômeno e desenvolver mecanismos para controlá-lo. Apesar de ser importante desenvolver técnicas para evitar as ocorrências de incêndios florestais, ferramentas que auxiliam na mitigação dos danos causados por eles são igualmente fundamentais. Dentre as técnicas investigadas, o uso de modelos de simulação se destaca por possibilitar compreender a dinâmica de espalhamento das chamas em diferentes condições e ambientes, auxiliando os órgãos competentes no planejamento de ações preventivas ou de controle.

Autômatos Celulares são sistemas dinâmicos discretos no tempo, no espaço e no estado, utilizados para a representação de fenômenos complexos por meio da aplicação de regras locais. Esses modelos têm sido amplamente explorados em diferentes áreas de pesquisa, como em estudos epidemiológicos (CAMPOS, 2023) e em aplicações de robótica autônoma (NAMETALA; MARTINS; OLIVEIRA, 2020), nos quais se evidencia a capacidade de agentes simples, atuando de forma descentralizada, produzirem comportamentos coletivos emergentes. Essa característica confere aos ACs um papel de destaque na modelagem de fenômenos físicos e naturais, com especial relevância para a simulação da propagação de incêndios, pois permitem simular a evolução do fogo em distintas condições ambientais, considerando variáveis como direção e velocidade do vento, topografia do terreno, densidade da vegetação e teor de umidade. Dessa forma, os ACs possibilitam estimar a velocidade e a trajetória de propagação das chamas, subsidiando ações de prevenção e planejamento de estratégias de manejo e controle voltadas à mitigação dos impactos ocasionados por incêndios florestais.

Este trabalho tem como foco principal desenvolver um modelo baseado em autômatos celulares probabilísticos para representar a propagação de incêndios em áreas florestais. A abordagem implementada é baseada no modelo proposto por Ferreira et al. (2023), que considera a dinâmica de espalhamento do fogo em diferentes tipos de vegetação e considera fatores ambientais e climáticos, como fator de combustão, umidade do

ar e direção do vento. Além disso, estendeu-se o modelo prévio com a incorporação do impacto do relevo da região no comportamento das chamas. Resultados experimentais indicam que o modelo foi capaz de representar adequadamente a dinâmica de propagação das chamas em função da vegetação predominante, evidenciando ainda a influência significativa de fatores externos, como umidade, velocidade e direção do vento, além das características de relevo. Observou-se que tais variáveis contribuem de maneira distinta para o comportamento do fogo, sendo o vento o fator de maior impacto sobre a trajetória de propagação, enquanto o relevo exerce influência secundária, embora ainda relevante na determinação dos padrões de espalhamento.

1.1 Justificativa

Incêndios florestais, quando ocorrem de forma natural, nem sempre representam uma ameaça ao meio ambiente. Em alguns biomas, como o Cerrado brasileiro, o fogo faz parte do ciclo ecológico e contribui para a renovação da vegetação e o equilíbrio dos ecossistemas (COUTINHO, 1990). Entretanto, esse ciclo ecológico é comprometido por ações humanas, que intensificam os incêndios em ritmo tão acelerado que a vegetação não consegue se recuperar.

Diante desse cenário, torna-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na compreensão e no monitoramento da propagação do fogo, com o objetivo de apoiar estratégias de prevenção e mitigação de danos. Modelos computacionais são ferramentas que apresentam grande potencial na prevenção de incêndio, permitindo a análise de padrões de espalhamento das chamas, com base de variáveis locais bem definidas, como vegetação, umidade, direção do vento e até relevo. Nesse sentido, os autômatos celulares possuem características favoráveis à modelagem de fenômenos dinâmicos complexos e, portanto, uma boa alternativa para representar a dinâmica do fogo, auxiliando na prevenção da propagação excessiva do incêndio.

Nesse contexto, este trabalho desenvolve um modelo de AC capaz de reproduzir o comportamento de um incêndio florestal no bioma do Cerrado, empregando metodologias já consolidadas. O objetivo é aproximar as simulações de cenários de incêndios reais, considerando fatores climáticos e ambientais locais específicos, de modo a contribuir com as pesquisas na área e auxiliar na formulação de estratégias mais eficazes de prevenção e mitigação de incêndios.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de autômato celular para simulação da propagação de incêndios florestais, considerando variáveis locais relevantes

e incorporando informações de relevo a fim de que permitam aproximar a dinâmica das simulações aos comportamentos de incêndios ocorridos no Cerrado brasileiro.

Para a obtenção dessa meta, se faz necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Reproduzir modelos de autômatos celulares apresentados na literatura, com base nos trabalhos de [Ferreira et al. \(2023\)](#) e [Tinoco et al. \(2022\)](#);
- Validar a corretude do modelo por meio da comparação com experimentos realizados em trabalhos anteriores;
- Implementar uma técnica de representação de relevo como nova funcionalidade do modelo;
- Realizar experimentos visuais e gráficos para demonstrar o impacto do relevo na propagação do fogo.

1.3 Estrutura do Documento

O restante do documento está organizado da seguinte forma:

1. Capítulo 2: Apresenta os fundamentos e conceitos relacionados aos modelos de autômatos celulares investigados neste trabalho, bem como os principais estudos correlatos. Esses conceitos fornecem a base necessária para a compreensão do modelo desenvolvido;
2. Capítulo 3: Descreve em detalhes o modelo de propagação de incêndios baseados em autômatos celulares assim como a implementação do relevo;
3. Capítulo 4: São apresentados os resultados e análises dos experimentos efetuados;
4. Capítulo 5: Apresenta considerações finais, conclusões e perspectivas futuras.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo introduz o embasamento teórico necessário para o entendimento do modelo implementado. Inicialmente, abordam-se os conceitos fundamentais de autômatos celulares, apresentando suas principais definições e explicando sua estrutura e funcionamento básico. Em seguida, é apresentada uma breve descrição de trabalhos da literatura relacionados ao tema.

2.1 Autômatos Celulares

Os ACs são modelos computacionais discretos tanto no tempo quanto no espaço e estado (conjunto finito de valores). Eles são eficazes para representar sistemas dinâmicos, a partir de agentes/células simples e suas interações locais, possibilitando que fenômenos complexos surjam da coletividade entre suas células (computação emergente). Em outras palavras, a partir de interações simples e conhecidas é possível obter comportamentos imprevisíveis, revelando que dinâmicas globais não evidentes podem surgir a partir de características individuais (CHOPARD, 2009).

Inicialmente, autômatos celulares foram introduzidos por von Neumann e Ulam na década de 1960 com o objetivo de desenvolver sistemas replicantes em um viés biológico (CHOPARD, 2009). No entanto, o interesse pelo assunto apenas se expandiu na década 1970 com o surgimento do Jogo da Vida de Conway (1970). Esse modelo, bidimensional, consiste em células binárias (vivas ou mortas), cuja evolução é determinada por regras simples baseadas no número de vizinhas vivas: uma célula viva com menos de duas ou mais de três vizinhas vivas morre, enquanto uma célula morta com exatamente três vizinhas vivas torna-se viva. Apesar da simplicidade das regras, o Jogo da Vida é capaz de gerar padrões extremamente complexos e imprevisíveis, tornando-se um marco importante no estudo de dinâmicas emergentes. Outro grande marco para autômatos celulares foram as pesquisas de Stephen Wolfram na década de 1980, demonstrando fenômenos complexos na física, biologia e até na computação por meio de regras simples aplicadas às células de seus modelos (WOLFRAM, 1994).

O projeto de um AC consiste na definição de dois componentes fundamentais: espaço celular e regra de transição. Estruturalmente, um autômato celular consiste em um arranjo uniforme de células, conhecido como reticulado. Esse reticulado pode assumir diferentes dimensionalidades de modo a adequar a estrutura do AC às necessidades do problema, como ilustrado na Figura 1.

As células de um autômato celular são semelhantes em relação ao seu tamanho

e formato, podendo assumir diferentes formas geométricas, como: quadrados, triângulos equiláteros ou hexágonos, como mostrado na Figura 2. Vale ressaltar que o espaço e formato de células utilizadas são cruciais para a estruturação do modelo, já que suas definições afetam o número de vizinhos de uma célula.

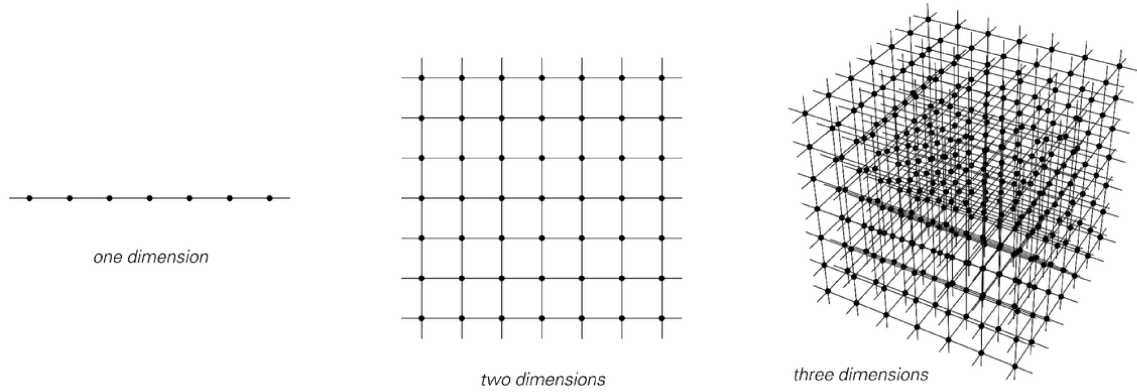


Figura 1 – Exemplo de diferentes dimensões do reticulado (WOLFRAM, 2002).

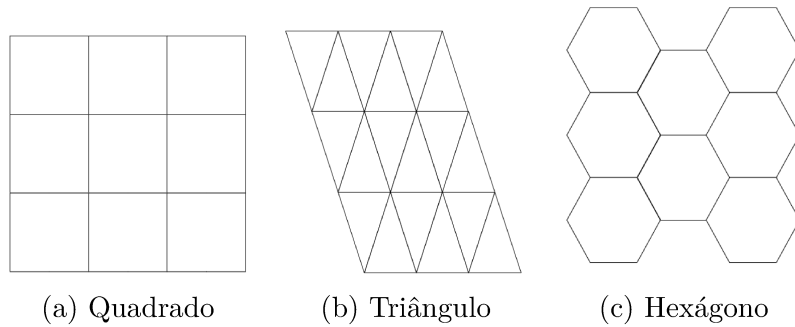


Figura 2 – Exemplo de formatos das células de um AC. Adaptado de Fraga, Oliveira e Martins (2020).

O estado de uma célula estabelece sua condição atual (t) e afeta a evolução do reticulado ao longo do tempo. O termo configuração irá se referir ao padrão dos estados locais em toda o reticulado (MITCHELL; CRUTCHFIELD; HRABER, 1994).

As regras de transição determinam como o estado de uma célula é atualizado no próximo passo de tempo ($t+1$). Tais regras são definidas com base no estado atual da célula e de sua vizinhança, proporcionando mudanças determinísticas ou estocásticas sobre todas as células do reticulado. Portanto, a definição da regra de transição e da configuração inicial do reticulado determinam o comportamento dinâmico decorrente da evolução temporal do AC, permitindo que eles se ajustem a uma ampla variedade de sistemas complexos com devida facilidade e eficiência. Quando se trata das células localizadas nas extremidades do reticulado, adotam-se três estratégias principais para o tratamento da vizinhança. Na abordagem de bordas fixas, um mesmo estado é atribuído a todas as células

que complementam a vizinhança das extremidades. Nas bordas periódicas, estabelece-se uma conexão entre cada borda e a borda oposta, criando uma continuidade cíclica do reticulado. Já nas bordas reflexivas, o estado das células da borda é replicado para complementar a vizinhança, simulando um efeito de espelhamento.

A eficácia desses modelos para representar sistemas dinâmicos complexos é evidente em diversas áreas de aplicação, permitindo englobar a modelagem de fenômenos físicos (WOLFRAM, 1994), métodos criptográficos (LIMA, 2012), modelos epidemiológicos (CAMPOS, 2023), robótica autônoma (NAMETALA; MARTINS; OLIVEIRA, 2020), entre outros.

2.1.1 Autômatos Celulares Unidimensionais

Um autômato celular unidimensional utiliza a estrutura mais simples, sendo seu reticulado representado por um arranjo linear de células (vetor) e sua vizinhança definida pelo raio de alcance (r), o qual determina o número de células à direita e à esquerda que compõem seus vizinhos.

A forma mais simples desse tipo de modelo é o autômato celular elementar (WOLFRAM, 2002). Este AC possui dois estados, 0 e 1, e adota uma vizinhança de raio 1. Assim, cada mudança de estado da célula central depende de seu próprio valor e de seus vizinhos imediatos à esquerda e a direita, totalizando 3 células na vizinhança ($2r+1$). Tais interações possuem um total de 8 combinações, dado que existem 2 valores possíveis de estado para cada uma dessas 3 células ($2^3 = 8$). Por sua vez, como cada combinação pode resultar em um dos estados binários no próximo instante de tempo, existe 256 regras de transição distintas ($2^8 = 256$), conforme ilustrado na Figura 3.

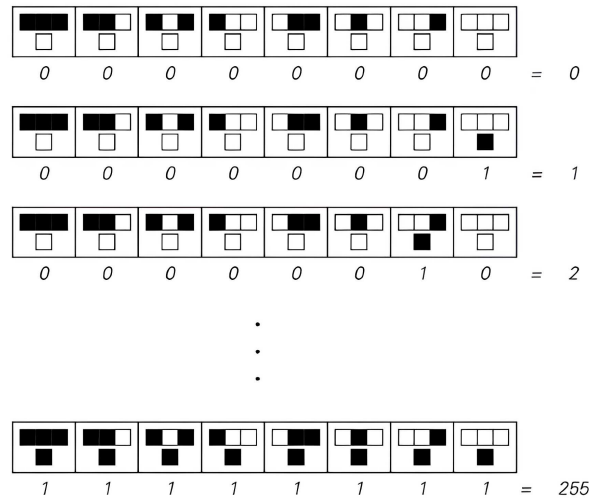


Figura 3 – Regras de evolução do autômato celular elementar de Wolfram (Wolfram (2002)).

Para ilustrar a evolução de um AC unidimensional, considera-se a regra 30, uma

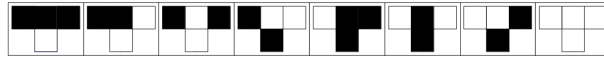


Figura 4 – Regras de transição - Regra 30.

das 256 regras possíveis. Nesta regra, o estado da célula central no próximo instante é determinado segundo 8 regras ilustradas pela Figura 4. Apesar da simplicidade da regra, ao longo de múltiplas iterações, a configuração inicial evolui para padrões complexos e não triviais, como mostrado na Figura 5. Este exemplo demonstra de forma prática como regras simples podem gerar comportamento emergente e imprevisível, característico dos autômatos celulares elementares.

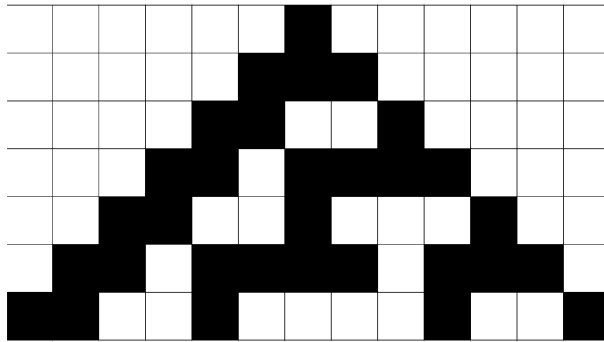


Figura 5 – Evolução de um autômato celular unidimensional utilizando a regra 30 de Wolfram, iniciando com uma célula central viva e mostrando padrões emergentes ao longo de múltiplas iterações.

Apesar de sua simplicidade estrutural, estes modelos de ACs revelam um comportamento notavelmente rico e complexo. Wolfram demonstrou que diferentes regras podem produzir padrões que variam de repetições triviais a estruturas caóticas e auto-organizadas. Dentre essas 256 regras, duas ganharam destaque, como a regra 30, associada a comportamentos pseudoaleatórios, e a regra 110, que possui computabilidade universal, uma vez que é capaz de reproduzir o comportamento de uma máquina de Turing (WOLFRAM, 2002).

Em síntese, apesar de sua simplicidade estrutural, os ACs unidimensionais ainda são capazes de expressar sistemas complexos e lidar com problemas pertinentes a diversas áreas da ciência moderna, como a criptografia, segmentação de imagens e escalonamento de tarefas.

2.1.2 Autômatos Celulares Bidimensionais

Em autômatos celulares bidimensionais, as células são organizadas em reticulados no plano R^2 , geralmente representados por matrizes. Os tipos de vizinhança mais utilizados nesse tipo de AC são: Vizinhança de Moore ou de von Neumann. A vizinhança de von Neumann considera apenas os 4 vizinhos adjacentes, na horizontal e vertical, como ilustrado pela Figura 6. Já a vizinhança de Moore considera todas as 8 células adjacentes,

como é ilustrado pela Figura 7. Para a evolução de um AC 2D, assim como sua versão unidimensional, a regra de transição muda o estado das células no próximo instante de tempo, com base no seu valor atual e de seus vizinhos, mas considerando a distribuição planar do reticulado.

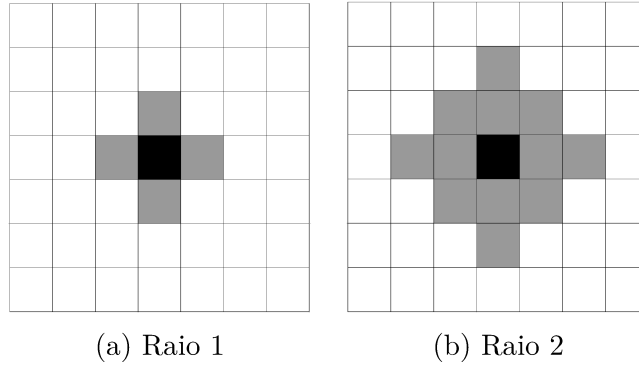


Figura 6 – Vizinhança de von Neumann.

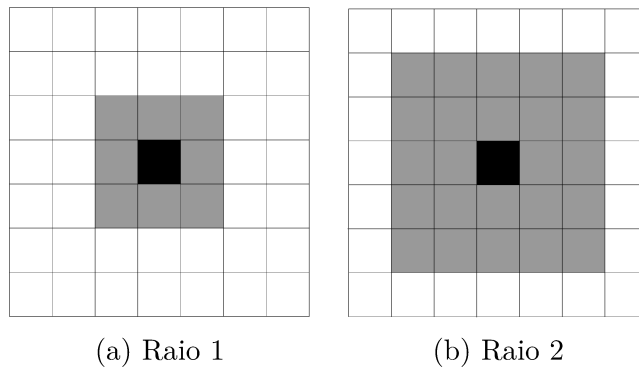


Figura 7 – Vizinhança de Moore.

Um exemplo bem conhecido de ACs bidimensionais, é o Jogo da Vida de Conway (CONWAY, 1970), que usa células de estados binários e vizinhança de Moore para criar um modelo de evolução de populações determinadas pela configuração do reticulado inicial, a partir de regras simples, do tipo:

- Qualquer célula viva com menos que dois vizinhos vivos morre;
- Qualquer célula viva com dois ou três vizinhos vivos permanece viva para a próxima geração;
- Qualquer célula viva com mais de três vizinhos morre;
- Qualquer célula morta com exatamente 3 vizinhos vivos se torna uma célula viva.

Na Figura 8 são apresentadas configurações iniciais clássicas do Jogo da Vida, amplamente estudadas na literatura: o *glider*, o *block* e o *blinker*. Durante a evolução do *glider*, observa-se que o padrão realiza um deslocamento diagonal ao longo de cinco

iterações, conforme ilustrado na Figura 9. O *block*, por sua vez, constitui uma configuração estável que permanece inalterada ao longo do tempo, como mostrado na Figura 10. Já o *blinker* apresenta um comportamento periódico, alternando entre duas configurações distintas e retornando à sua forma inicial a cada duas iterações, conforme evidenciado na Figura 11. Esses exemplos demonstram como padrões simples, regidos pelas regras básicas do autômato celular, podem gerar comportamentos estáveis, periódicos ou móveis, evidenciando a dinâmica emergente característica do Jogo da Vida.

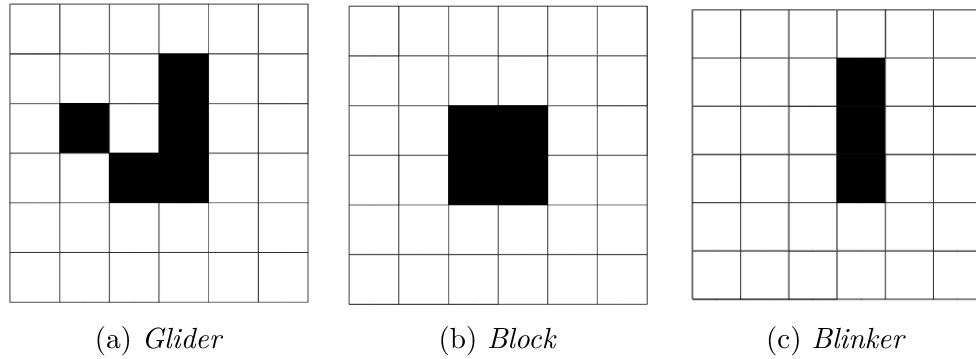


Figura 8 – Representações de configurações iniciais para o Jogo da Vida.

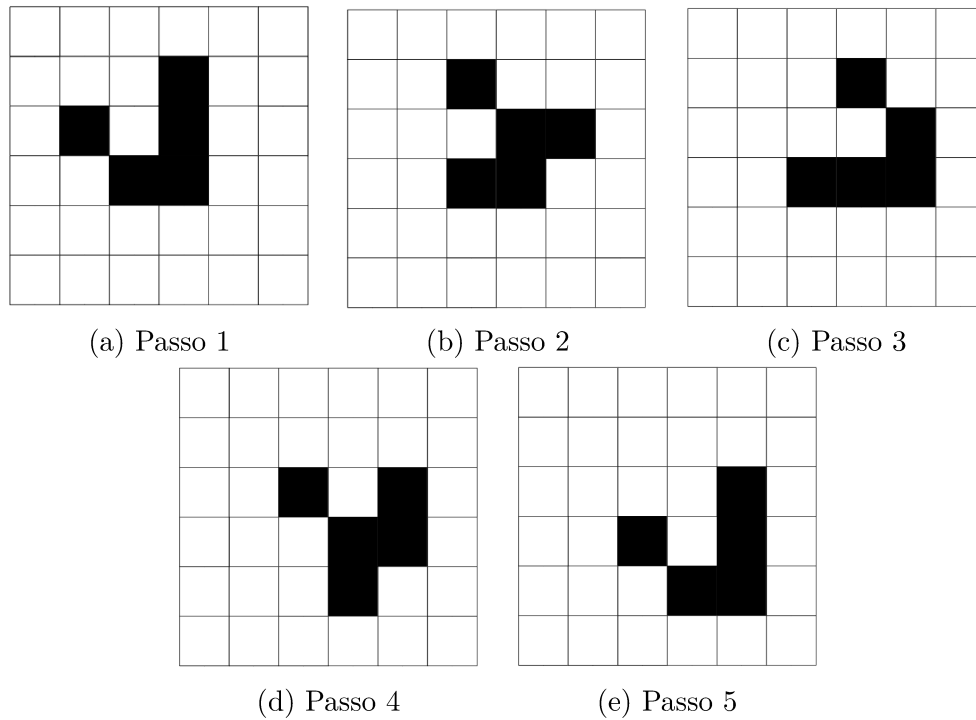
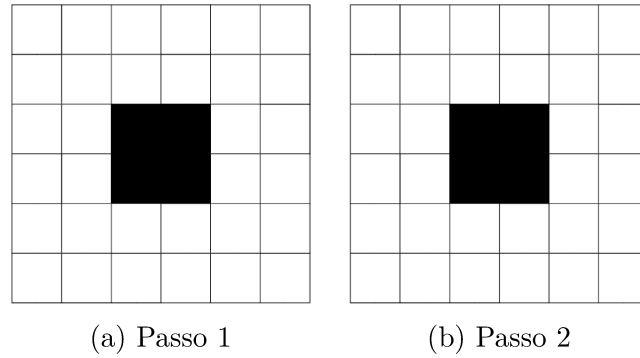
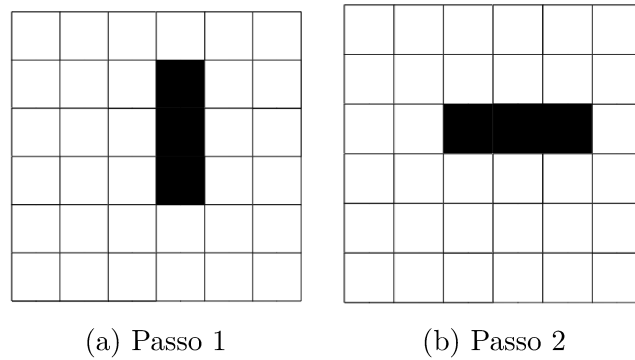


Figura 9 – Evolução de um *glider*

A bidimensionalidade desses sistemas proporciona representações espaciais mais coesas à ambientes físicos e reais. Em outras palavras, os reticulados bidimensionais são mais adequados para simulações de fenômenos físicos e naturais (ex: propagação de incêndios) ou mapear ambientes reais, como aqueles usados na navegação de robôs autônomos, permitindo simulações mais realistas e aplicáveis em diferentes áreas do conhecimento.

Figura 10 – Evolução de um *block*.Figura 11 – Evolução de um *blinker*.

2.1.3 Autômatos Celulares Probabilísticos

Os modelos citados anteriormente são capazes de representar sistemas complexos a partir de regras simples e determinísticas. Entretanto, situações do mundo real muitas vezes envolvem incertezas e variação estocástica. Nesse contexto, autômatos celulares probabilísticos são introduzidos com o objetivo de promoverem regras de transição que introduzem probabilidades associadas a configuração de vizinhança de cada célula. Dessa forma, um mesmo reticulado inicial pode evoluir diferentes resultados por conta do caráter estocástico presente nessas regras.

Tal característica torna esses sistemas especialmente úteis em simulações de fenômenos físicos e naturais, nos quais fatores aleatórios desempenham papel fundamental. Por exemplo, em modelos de propagação de incêndios florestais, a mudança de estado de uma célula de vegetação para fogo é realizada a partir de uma probabilidade definida a partir da configuração de seus vizinhos e por fatores externos do ambiente, como a direção e intensidade do vento, concentração de material combustível presente na vegetação e umidade. Outro exemplo se dá na epidemiologia, onde uma célula saudável pode ser infectada por um de seus vizinhos doentes, de acordo com uma probabilidade definida pela regra de transição do modelo. Dessa maneira, os ACs ampliam seu potencial como uma ferramenta de modelagem computacional, permitindo representar não apenas uma evolução determinística, mas também as incertezas e complexidades da realidade.

2.2 Trabalhos Relacionados

Nesta seção é apresentada uma revisão literária, descrevendo alguns trabalhos que modelam a propagação de incêndios florestais, destacando as diferentes abordagens de cada modelo.

O modelo apresentado em [Clarke, Brass e Riggan \(1994\)](#) introduziu o uso de autômatos celulares para modelar a propagação de incêndios, utilizando técnicas de Monte Carlo para estabelecer probabilidades para a queimada. Nesse modelo, fatores como o vento, temperatura e umidade foram considerados e calibrados com base nos dados de incêndios de Lodi Canyon na floresta experimental de San Dimas na Califórnia.

O trabalho apresentado em [Alexandridis et al. \(2008\)](#) propõe um modelo bidimensional de autômatos celulares aplicado a regiões montanhosas, considerando fatores como tipo e densidade da vegetação, velocidade e direção do vento, além da propagação do incêndio por brasas transportadas pelo vento. Nesse contexto, o estudo demonstra a eficácia do modelo em reproduzir a dinâmica espacial de incêndios florestais em terrenos complexos.

Em [Freire e DaCamara \(2019\)](#), é apresentada uma simulação do incêndio florestal ocorrido no Algarve, sul de Portugal, em julho de 2012. Essa abordagem consiste em uma adaptação do modelo anterior para o cenário português, incorporando uma regra de propagação não local que permite ao vento espalhar o fogo para células além das adjacentes, melhorando a representação da propagação em condições de vento intenso.

Em [Byari et al. \(2022\)](#), é apresentada uma abordagem de AC com o objetivo de explicar conceitos de propagação e vulnerabilidade, utilizando incêndios florestais como um estudo de caso. O modelo consiste em um AC tridimensional que emprega um reticulado hexagonal para representar o solo, vegetação ou ar. Os possíveis estados das células são: inflamável (solo, ar e fumaça), suscetível ao fogo e queimando. O modelo descreve a propagação do incêndio como a transferência de calor e a interação com o ambiente, onde calcula-se o grau de umidade (ou secura) de uma célula a partir de elementos como a umidade do ar e quantidade material combustível disponível.

Em [Tinoco et al. \(2022\)](#), é proposto um modelo de AC bidimensional com seis possíveis estados: vegetação, fogo inicial, fogo estável, brasa, cinzas e água. A mudança entre esses estados é definida a partir da vizinhança de Moore de raio 1 e uma regra de transição que considera a influência do vento e do fator de combustão de cada tipo de vegetação para determinar o espalhamento do fogo. Além disso, o modelo também considera a recuperação da vegetação, i.e. células que estão no estado de cinzas são capazes de voltar a queimar com o passar do tempo.

Esse modelo foi estendido em [Ferreira et al. \(2023\)](#) de modo a representar características baseadas no Cerrado Brasileiro, presentes em algumas vegetações típicas desse

bioma, como: floresta, savana e prado. O modelo passou a considerar a umidade do ar no cálculo da probabilidade de queima das células do reticulado. Nos experimentos existe um cenário construído a partir de um pedaço do mapa de vegetação do Parque do Pau Furado, mas não foram utilizados dados reais.

Uma abordagem probabilística baseada em modelos epidêmicos é proposta em [Beneduci e Mascali \(2024\)](#), a fim de descrever a evolução do fogo. O modelo utiliza de equações diferenciais parciais não-lineares e estocásticas, levando em conta fatores como o vento, umidade, tempo e espaço. Portanto, árvores normais, árvores em chamas e árvores queimadas são consideradas, tomando por base as suas probabilidades em dado momento e local.

3 Modelo de Propagação de Incêndio

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo baseado em autômatos celulares para representar a dinâmica de propagação de incêndios florestais. Inicialmente, reproduziu-se a abordagem proposta em [Ferreira et al. \(2023\)](#), a qual serviu de base para a nossa implementação (modelo de referência). Em seguida, foi incorporado o conceito de relevo, com base nos trabalhos de [Freire e DaCamara \(2019\)](#) e [Alexandridis et al. \(2008\)](#). Assim, espera-se construir uma nova versão do modelo que seja capaz de simular cenários mais realísticos e dinâmicas de espalhamento do fogo mais complexas.

3.1 Modelo de Referência

O modelo de [Ferreira et al. \(2023\)](#) apresenta um AC bidimensional, onde cada célula pode possuir um de oito estados possíveis (Figura 12), os quais são descritos a seguir:

- **Água:** não interage com seus vizinhos, funcionando como barreira natural à propagação do incêndio;
- **Vegetação:** representa o combustível básico para a propagação do fogo. Esse estado pode ser dividido em subestados, possibilitando que o modelo represente tipos de vegetação com características e dinâmicas de queima diferentes. Na Figura 12, essa subdivisão é representada por um retângulo tracejado, que contempla as vegetações do tipo floresta, savana e pradaria. As células possuem coeficientes distintos de calor (λ), que influenciam diretamente na probabilidade de ignição (chances da célula pegar fogo);
- **Fogo Inicial:** caracteriza uma fagulha ou foco inicial de incêndio, com capacidade de propagação limitada;
- **Fogo Estável:** representa uma vegetação em chamas com maior intensidade, possuindo maiores probabilidades de propagar o fogo;
- **Brasa:** indica a fase final da queima da vegetação, com menor chance de propagação;
- **Cinzas:** estado final do ciclo de queima, podendo, ao longo do tempo, regenerar-se em vegetação.

As células mudam de estado de acordo com suas regras de propagação, influenciadas pela vizinhança de Moore e um raio de alcance igual a 1, i.e. seus vizinhos mais

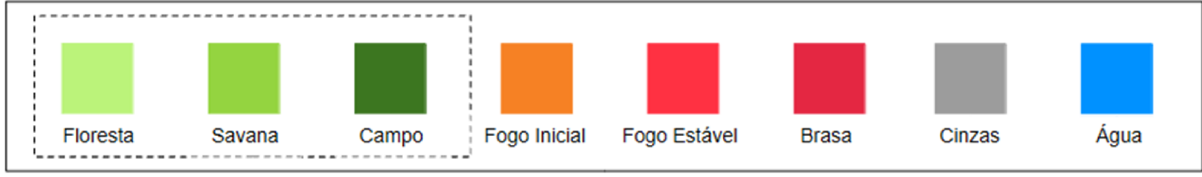


Figura 12 – Estados do modelo adaptado de [Ferreira et al. \(2023\)](#).

próximos influenciam na troca de estado. Como se trata de um processo estocástico, a propagação é modelada por probabilidades que dependem de parâmetros como direção e intensidade do vento, além da intensidade local do incêndio.

O modelo adota uma estratégia para determinar a influência do vento em relação à propagação do fogo, ela altera tanto a direção quanto a intensidade que o incêndio pode se alastrar. Essa estratégia é baseada na matriz de combustão apresentada na Figura 13. Cada posição da matriz, exceto a central, representa o quanto aquela vizinha influência (intensidade) na probabilidade de queima da célula central, i.e. a matriz representa a direção do vento. Por exemplo, a matriz da figura ilustra um vento direcionado para nordeste, uma vez que os maiores valores estão posicionados no canto contrário (sudoeste).










 0.50	 0.25	 0.125
 0.75		 0.25
 1.00	 0.75	 0.50

Figura 13 – Representação da matriz de combustão ([TINOCO et al., 2022](#)).

Com essa matriz de combustão, define-se a probabilidade de propagação básica dada por:

$$\phi_{i,j} = \beta - (\delta * r) \quad (3.1)$$

onde: $\phi_{i,j}$ é a probabilidade de cada célula vizinha (i, j) propagar o fogo para a célula central; β é a intensidade base do fogo; δ é o coeficiente de decaimento da intensidade base fogo, sendo que, quanto maior, mais direcionado é o vento; e r é o fator de direção do vento obtido diretamente a partir da matriz de combustão mostrada na Figura 13, combinando a orientação da célula vizinha com a intensidade relativa do vento nas diferentes direções ($\{cardinal\} \cup \{colateral\}$).

Além do vento, o incêndio também é influenciado pela umidade do ar, de modo que, quanto maior for a umidade, mais difícil é a propagação do fogo. Isto é representado

pelo modelo a partir de uma taxa de umidade do ar (γ), a qual afeta diretamente a probabilidade de propagação definida anteriormente, como segue:

$$\phi_{i,j} = \omega * (\beta - (\delta * r)) \quad (3.2)$$

onde: ω representa um fator multiplicativo influenciado, de forma categorizada, pela umidade do ar γ e que é definido da seguinte forma:

$$\omega = \begin{cases} 1.5, & \text{se } 0\% \leq \gamma \leq 25\% \\ 1, & \text{se } 25\% < \gamma \leq 50\% \\ 0.8, & \text{se } 50\% < \gamma \leq 75\% \\ 0.6, & \text{se } 75\% < \gamma \leq 100\% \end{cases} \quad (3.3)$$

A umidade do ar também influencia a duração dos estados de combustão. Células com estado de fogo inicial mudam para fogo estável com apenas 2 passos de tempo; células em fogo estável transitam para brasa em 4 passos de tempo; e células que estão em brasa viram cinzas em 10 passos. Regiões mais secas ($\gamma < 30\%$) fazem com que a transição de estado de fogo estável para brasa aumenta por um fator de 5, e a transição de brasa para cinzas diminua por um fator de 3. Em outras palavras, o tempo de transição de estado de fogo estável para brasa passa de 2 passos de tempo para 10 passos de tempo e para a transição de brasa para cinzas passam de 10 passos de tempo para apenas 3.

Além da propagação do incêndio, o modelo também apresenta a recuperação do estado de cinza para vegetação, por meio da seguinte equação exponencial:

$$P_r(x_{i,j}) = \begin{cases} 0, & \text{em período de recuperação} \\ (ts_r)^2 / 10^a, & \text{caso contrario, tal que } ts_r \geq 1 \text{ e } a \geq 1 \end{cases} \quad (3.4)$$

Essa equação considera um período de recuperação (definido em quantidade de passos do AC) que mantém a célula no estado de cinzas, enquanto ele não for atingido. Durante o período de recuperação, não há alterações de estado. A partir desse período, a probabilidade de recuperação aumenta a cada passo de tempo que a célula permanece no estado de cinzas, em função da expressão exponencial, onde a variável a representa a expansão longitudinal dessa distribuição probabilística.

Desta forma, a regra de transição que determina a dinâmica de mudança de estado das células do autômato celular implementado pode ser descrita da seguinte forma:

1. Células de vegetação com nenhuma vizinha em chamas não mudam de estado;
2. Células de vegetação com uma célula vizinha (i, j) em algum estado de fogo possui probabilidade $P(FogoInicial)$ de mudar para o estado de fogo inicial, dado por:

$$P(FogoInicial) = \phi(i, j) * \eta * \lambda \quad (3.5)$$

sendo $\phi(i, j)$ a probabilidade de propagação da célula vizinha em chamas; η a intensidade da célula em chamas, definida pelo estado de fogo em que ela se encontra; e λ o fator de calor determinado de acordo com o tipo de vegetação da célula central;

3. Célula em fogo inicial mantém seu estado por 2 passos e, no passo seguinte, muda para o estado de fogo estável;
4. Célula em fogo estável mantém seu estado por 4 passos e, no passo seguinte, muda para o estado de brasa;
5. Célula brasa mantém seu estado por 10 passos e, no passo seguinte, muda para o estado de cinzas;
6. Células em cinzas possuem probabilidade de se regenerarem e voltarem a ser vegetação de acordo com a Equação 3.4;
7. Células de água não mudam para outros estados, mas, funcionam como barreira natural para o fogo.

3.2 Dinâmica do Relevo

O relevo do local é também um fator muito importante para se considerar quando se trata de incêndios florestais, pois o calor tende a subir, portanto, aumentando a probabilidade de queima em áreas com aclives. Diante disso, o modelo prévio foi modificado a fim de considerar o efeito do relevo no espalhamento das chamas. Para isso, incorporou-se a estratégia descrita em Freire e DaCamara (2019) e Alexandridis et al. (2008), a qual introduz uma probabilidade de queima associada ao relevo da vizinhança, baseada em uma equação exponencial, e a utiliza para determinar probabilidade de queima da célula central.

A equação da probabilidade de queima do relevo é dada por:

$$p_{relevo}(x_{ij}) = \exp(\mu_s \theta_s) \quad (3.6)$$

sendo θ o ângulo de inclinação do terreno em radianos; e μ um parâmetro experimental regulador da probabilidade. O valor de θ é definido como:

$$\theta_s = \frac{(E_{adj} - E_{central})}{D} \quad (3.7)$$

onde, E_{adj} representa a altitude da célula adjacente; $E_{central}$ representa a altitude da célula central; e D é a distância entre cada célula, o que pode ser definido em função do lado da célula e sua posição em relação à vizinha analisada. Caso estejam adjacentes na lateral, $D = l$. Caso contrário (células diagonais), $D = l\sqrt{2}$. Essa diferença ocorre porque as células diagonais estão mais afastadas da célula central, o que reduz o ângulo

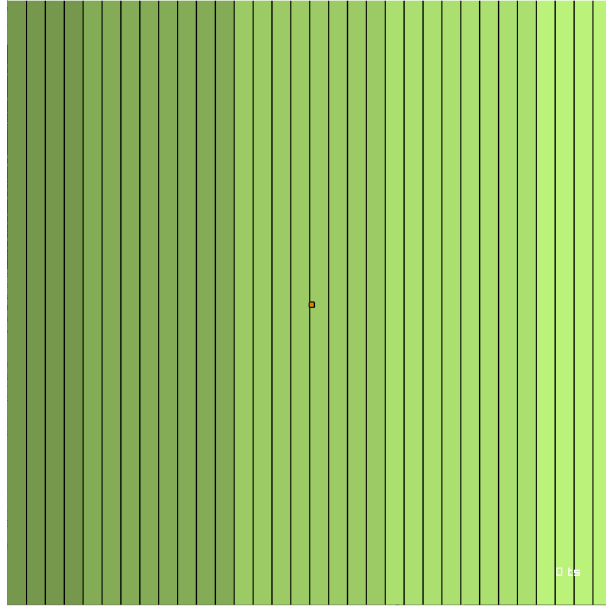


Figura 14 – Representação de um reticulado com relevo. À direita estão as células com menor altitude, representadas pelas cores mais escuras, enquanto à esquerda estão as células com maiores altitudes, representadas por cores mais claras.

de inclinação associado à diferença de altitude entre elas e, conseqüentemente, reduzindo a taxa de propagação.

A introdução do relevo na dinâmica de evolução do modelo consiste na alteração da Equação 3.5, de modo a adicionar a probabilidade de queima do relevo (p_{relevo}) como um fator ponderador, resultando na 3.8.

$$P(FogoInicial) = \phi(i, j) * \eta * \lambda * p_{relevo} \quad (3.8)$$

Assim, mesmo pequenas inclinações aumentam a probabilidade de ignição nas encostas ascendentes, enquanto reduzem em descidas, reproduzindo o comportamento observado em incêndios reais.

Embora não impacte no modelo em si, também foi necessário realizar adaptações no módulo de simulação, a fim de possibilitar a visualização do relevo presente na área monitorada. Nesse sentido, foi adotado um gradiente de cores para cada vegetação modelada, onde quanto mais escura é uma célula menor a sua altitude e quanto mais clara maior sua altitude. Além disso, inspirado em mapas topológicos, é desenhada uma linha em volta das vizinhanças que possuem uma diferença de elevação para ajudar na sua identificação. A Figura 14 ilustra o efeito dessas mudanças na visualização de um reticulado com relevo.

Portanto, o modelo proposto expande o modelo de referência ao incorporar o relevo como fator determinante na propagação do fogo, tornando-o mais próximo da realidade observada em incêndios florestais.

4 Experimentos e Resultados

Este capítulo apresenta os resultados e análises obtidos a partir dos experimentos realizados, bem como a comparação com o modelo de referência, de modo a avaliar o desempenho e a validade do modelo proposto. A fim de facilitar a reprodução dessa pesquisa, o código do modelo implementado e as bases de dados utilizadas em sua avaliação estão disponíveis no Github¹.

O modelo proposto foi implementado na linguagem C, por conta de sua alta velocidade de execução. Para viabilizar a exibição da evolução do AC, também foi empregada a biblioteca para criação de jogos Raylib (DOVIS, 2013) para estabelecer a interface gráfica. Esses experimentos foram executados por 300 passos de tempo (ts), realizando capturas de reticulados nos passos $ts = \{20, 50, 100, 200, 300\}$. Vale ressaltar que estes experimentos foram realizados sobre uma semente de geração de números pseudoaleatórios fixa para garantir a reprodutibilidade da dinâmica simulada pelo modelo, necessária para as comparações visuais dos reticulados. Já os experimentos em massa ou quantitativos consistem em 100 execuções sem a presença de uma semente fixa do AC sobre 500 passos de tempo cada a fim de eliminar ou, pelo menos, minimizar variabilidade inerente à natureza estocástica do modelo. Para esse tipo de experimento, foi desenvolvida uma versão do código sem a interface gráfica, dado que envolve análises quantitativas em vez de comparações visuais. Ambos experimentos foram realizados a partir de um reticulado de 128×128 células, com o ponto inicial do incêndio no centro do reticulado.

Nos experimentos conduzidos, a configuração do modelo adotou parâmetros definidos com base nas referências de Ferreira et al. (2023) e Tinoco et al. (2022):

- Intensidade local do fogo inicial (η) = 0,6;
- Intensidade local do fogo estável (η) = 1,0;
- Intensidade local da brasa (η) = 0,2;
- Caloria da floresta (λ) = 0,16;
- Caloria da savana (λ) = 0,24;
- Caloria da vegetação campestre (λ) = 0,08.

¹ <https://github.com/Gezeroo/Cellular-Automata-Fire-Propagation-Model>, Acessado em: 12/09/2025.

4.1 Validação do Modelo de Referência

Este experimento visa validar nossa implementação do modelo proposto em [Ferreira et al. \(2023\)](#). Inicialmente, é realizada uma dinâmica visual do espalhamento do fogo sobre as três diferentes vegetações implementadas no modelo. O principal objetivo é demonstrar como a concentração de combustível (fator de caloria) em cada tipo de vegetação pode influenciar a propagação do fogo. O modelo foi ajustado com um o valor de umidade fixo em $\gamma = 30\%$; fator de decaimento da intensidade $\delta = 0$, i.e. não há influência do vento; intensidade base do fogo fixa em $\beta = 0,55$. A Figura 15 demonstra as simulações resultantes. As Figuras 15a, 15b e 15c representam, respectivamente, a propagação do fogo em áreas de floresta, savana e campo (pradaria). As Figuras 15d, 15e e 15f representam as combinações das vegetações dois a dois.

A vegetação campestre proporciona uma menor propagação do fogo, na qual durante os 300 passos de tempo, nenhuma simulação conseguiu chegar nas bordas do reticulado. Já na vegetação savânica, o fogo se propaga mais rapidamente, aproximando-se das bordas do reticulado após 200 passos de tempo. Essas diferenças entre a propagação também são facilmente vistas nos experimentos 15d ao 15f, onde as vegetações são colocadas lado a lado para comparação. Apesar dos valores de caloria estarem igualmente esparçados entre as vegetações, é evidente que o comportamento da floresta se aproxima mais da savana do que a campestre. Isso ocorre porque fatores de caloria acima de 1 (floresta e savana) ocasionam um aumento na probabilidade de queima. Por outro lado, valores menores que 1 (campestre) proporcionam um efeito atenuador. Além disso, quando diferentes tipos de vegetação são dispostos lado a lado, aquela com maior capacidade de espalhamento tende a influenciar a propagação do fogo na vizinha, ao gerar um número maior de células em chamas adjacentes, como pode ser observado na Figura 15f, a propagação na vegetação campestre torna-se mais intensa devido à influência da propagação proveniente da floresta. Também é possível notar que a caloria afeta significadamente no crescimento do incêndio, sendo que pequenas mudanças na caloria já aumentam consideravelmente a propagação do fogo.

Quando comparadas aos resultados simulados com aqueles apresentados em [Ferreira et al. \(2023\)](#), os quais são reproduzidos na Figura 16, é possível notar que o modelo desenvolvido conseguiu comportamentos similares aos reportados no trabalho original, com pequenas variações decorrentes da natureza estocástica do modelo e de eventuais diferenças na implementação.

4.2 Influência da Umidade nas Chamas

Este experimento analisa a influência do parâmetro de umidade do ar no espalhamento do fogo. Para isso, um mesmo cenário de incêndio foi simulado a partir de diferentes

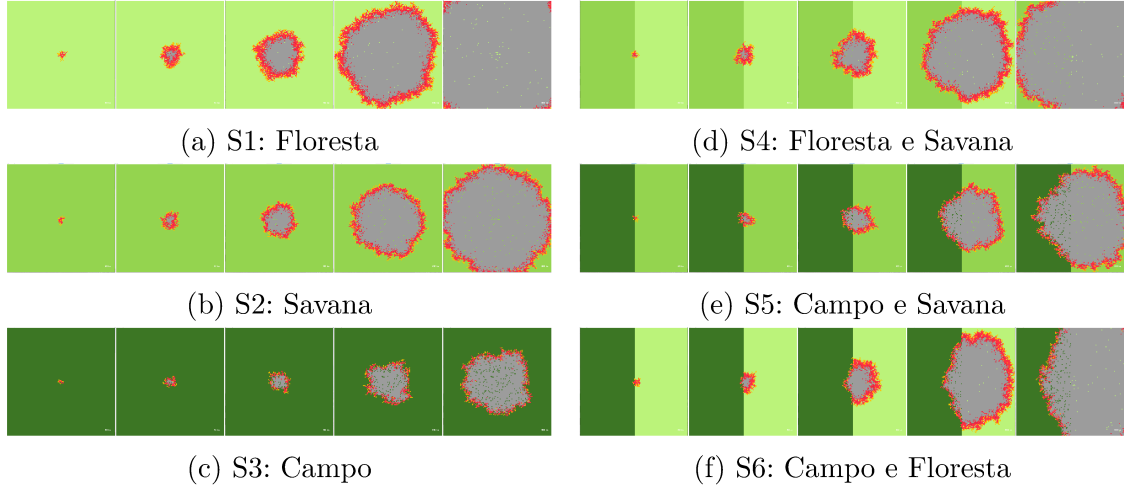


Figura 15 – Simulações do modelo implementado, considerando incêndios em cenários com uma (a - c) e duas vegetações (d - f).

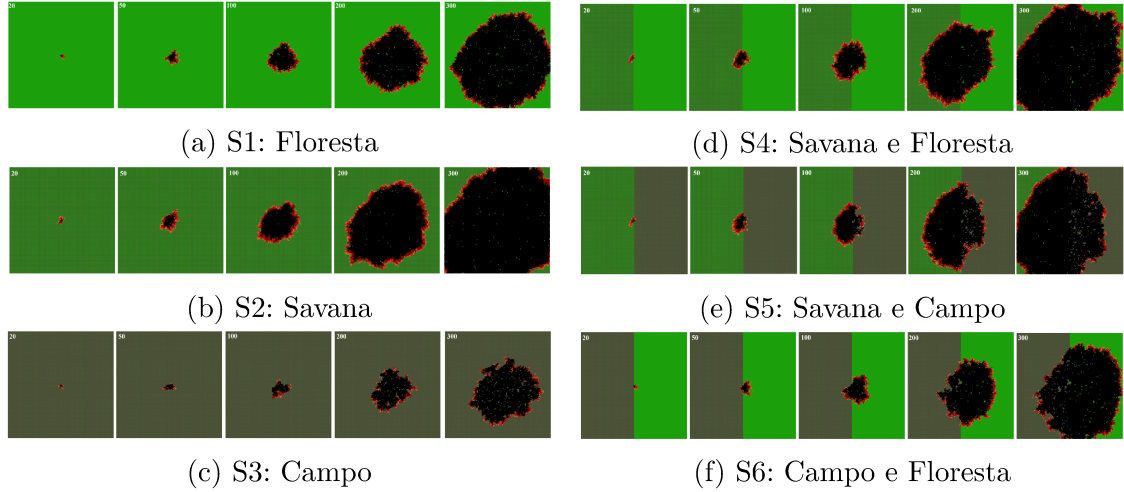


Figura 16 – Simulações do modelo original, considerando incêndios em cenários com uma (a - c) e duas vegetações (d - f). Fonte: retirada de (FERREIRA et al., 2023).

valores de γ (20%, 40%, 60% e 80% de umidade). Os comportamentos observados nos três tipos de vegetações foram analisados graficamente.

A Figura 17 apresenta os resultados obtidos a partir das simulações com o modelo desenvolvido, enquanto a Figura 18 mostra dos resultados reportados em Ferreira et al. (2023). Observe que nas simulações geradas pelo nosso modelo, as chamas estão se propagando mais rapidamente que nas simulações com o modelo original. Acredita-se que isso acontece porque nem todos os parâmetros utilizados estão disponíveis no trabalho de referência, portanto, foram necessárias diversas análises para se aproximar a dinâmica simulada daquela reportada. Apesar das diferenças de comportamento, é possível notar que a umidade está afetando na velocidade de propagação dos incêndios. Em situações extremas, como a umidade em 20%, as simulações atingem valores máximos maiores mais rapidamente que nos demais cenários. Como esperado, essa velocidade de propagação vai diminuindo a medida que a umidade do ar aumenta, atingindo seus níveis mais baixos

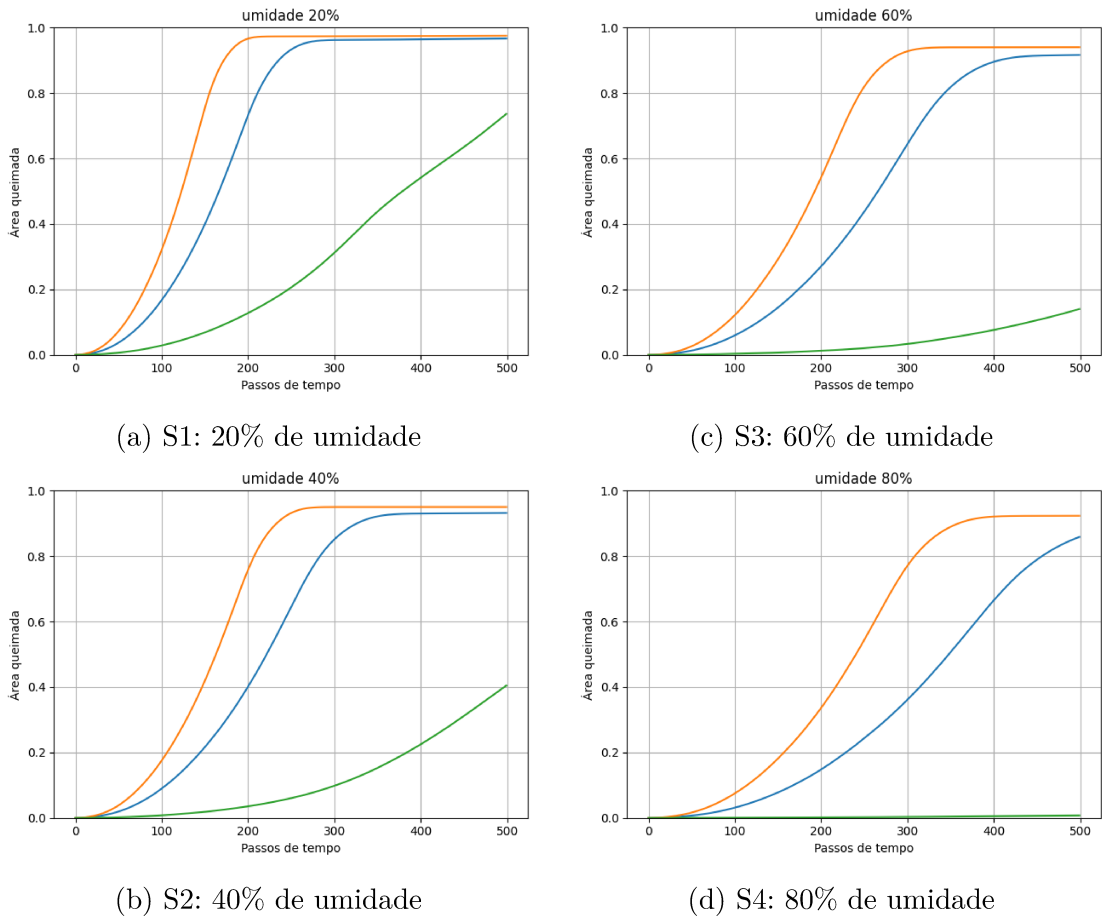


Figura 17 – Evolução do incêndio sobre diferentes umidades.

para gamma ($\gamma = 80\%$).

Outro fator importante para se analisar quando se trata da umidade são as bordas do incêndio (área em chamas). A Figura 19 demonstra a evolução do fogo no cenário de floresta, considerando os valores extremos de umidade do ar (20% e 80%). É possível observar que em situações com baixa umidade, a borda do incêndio apresenta um formato contínuo e mais denso, presente por todo o seu contorno. Já em situações com mais umidade, a propagação não é tão forte e as chamas da borda são mais finas e esparsas no entorno do incêndio, demonstrando assim a dificuldade do fogo se espalhar nessas situações. Portanto, os resultados indicam que a umidade reduz significativamente a continuidade das frentes de fogo, sendo um fator mais determinante que a caloria da vegetação.

4.3 Efeito do Relevo na Propagação do Fogo

Para analisar a dinâmica imposta pelo relevo, foram realizadas simulações, considerando a altura (E) e distância (D) entre as células do reticulado, necessárias para determinar o ângulo (θ) de inclinação em relação à vizinhança, empregado no cálculo do

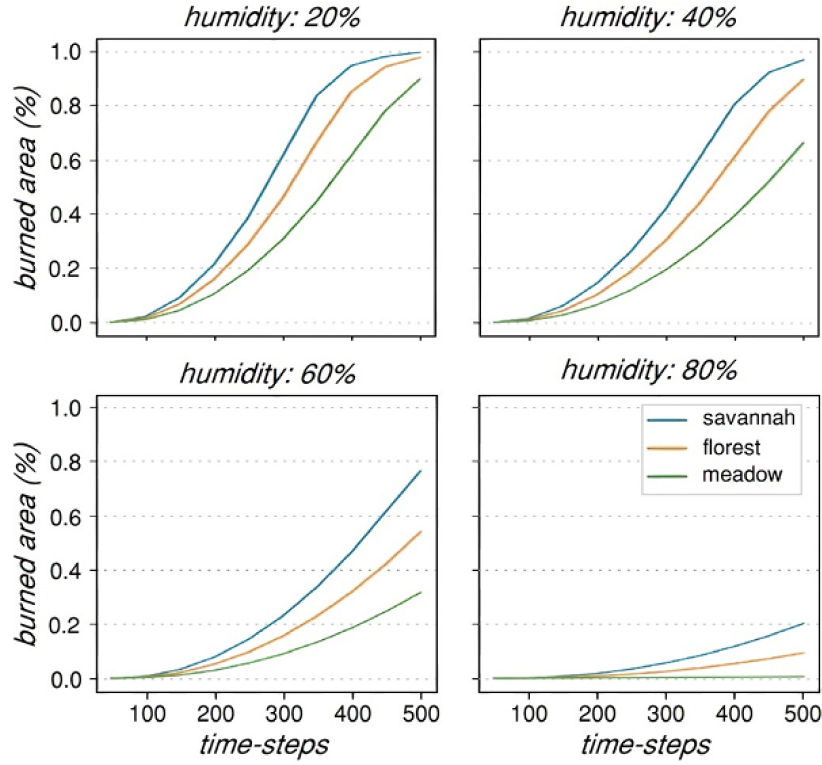
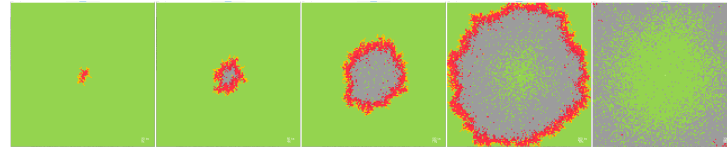
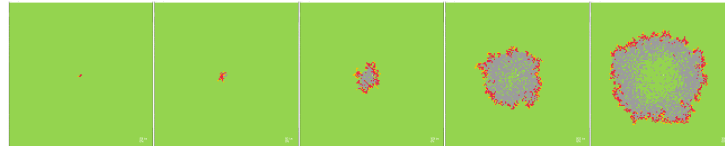


Figura 18 – Evolução dos incêndios simulados com o modelo original, considerando diferentes umidades. Retirado de [Ferreira et al. \(2023\)](#).



(a) S1: 20% de umidade.



(b) S2 80% de umidade

Figura 19 – Propagação das chamas em cenários de floresta em função da umidade do ar.

coeficiente de propagação do relevo (p_{relevo}). Neste experimento, foi adotada uma distância entre células de 8 metros e uma altura padrão entre cada célula de 1 metro.

Inicialmente, analisa-se graficamente diferentes valores de μ a fim comparar a dinâmica de propagação do fogo na subida e na descida. A ideia é identificar um valor de μ proporcione um avanço do fogo mais rápido em áreas com aclive e mais lento em regiões com declive. Para isso, foram avaliados 5 cenários diferentes, sem a interferência do vento e umidade fixa em 30%. Cada cenário possui valor distinto de μ (0,078; 0,24; 0,5; 0,76; e 1), sendo o primeiro foi escolhido a partir do valor utilizado nos trabalhos de [Freire e DaCamara \(2019\)](#) e [Alexandridis et al. \(2008\)](#). Os demais valores foram determinados

de forma a manter intervalos aproximadamente uniformes entre si, até atingir o valor máximo de 1.

A Figura 20 mostra os resultados obtidos neste experimento. Cada gráfico mostra a evolução do incêndio para um valor de μ , onde cada vegetação é representada por duas curvas que correspondem à quantidade de células queimadas na descida e na subida, respectivamente. Como pode ser observado em todos os cenários, o coeficiente de relevo proporciona uma maior propagação na subida em relação a descida. Além disso, o aumento do coeficiente ajuda a aumentar a disparidade entre essas dinâmicas. Entretanto, apesar dos trabalhos de referencia utilizarem $\mu = 0,078$ em seus modelos, por mais que seu comportamento esteja correto, esse valor promove pouca diferença nos comportamentos do incêndio em função do relevo. Por outro lado, coeficientes maiores (ex: $\alpha = 1$) resultam em um espalhamento mais rápido das chamas em áreas de aclave e retardam sua propagação em declives. A escolha do valor mais adequado para esse parâmetro demanda informações de incêndios reais na área monitorada, a fim de determinar aquele que melhor aproxima a simulação da dinâmica observada nos dados históricos.

Neste experimento, também se avaliou o comportamento do incêndio em áreas de relevo com a presença de vento, já que ambos fatores afetam na intensidade de espalhamento do fogo em cada direção. Inicialmente, foram analisados cenários em que há presença de vento na direção contrária à subida para se analisar qual dos parâmetros impacta mais o espalhamento do fogo. Para facilitar a análise, foram avaliados cenários sem e com relevo para os três tipos de vegetação. Todas as simulações foram realizadas, considerando uma umidade de 30%, intensidade do vento (δ) de 0,5 em sentido oeste e um coeficiente de relevo (μ) de 0,5.

A Figura 21 apresenta os resultados das simulações, considerando cenários sem relevo para os três tipos de vegetação (a - c) e seus equivalentes com uma elevação lateral progressiva, no sentido oposto do vento, i.e. da esquerda para a direita (d - f).

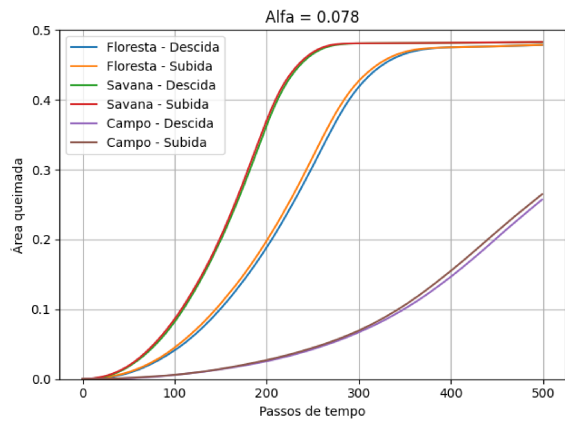
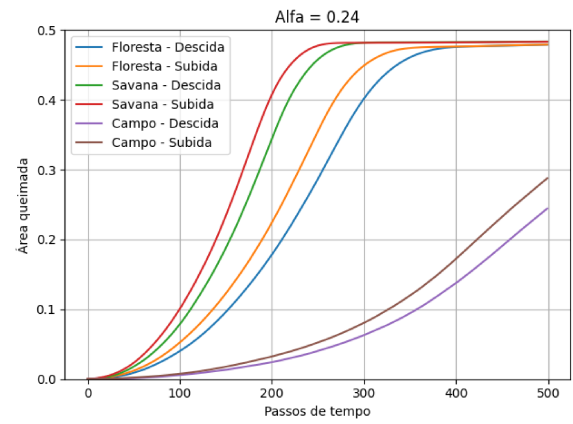
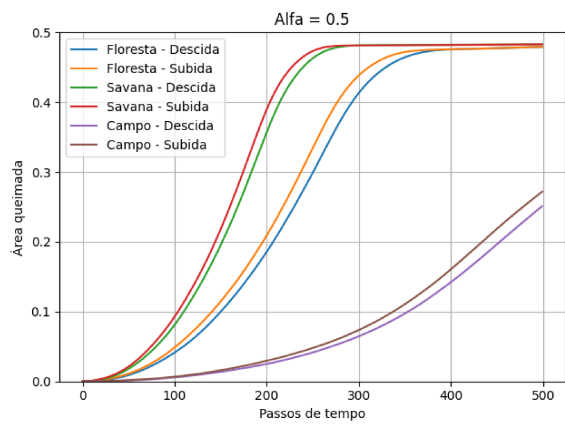
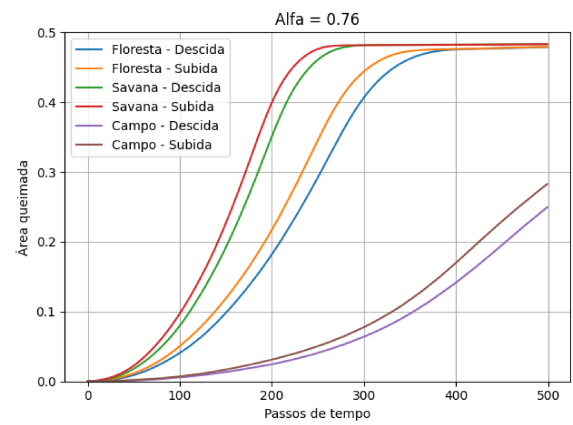
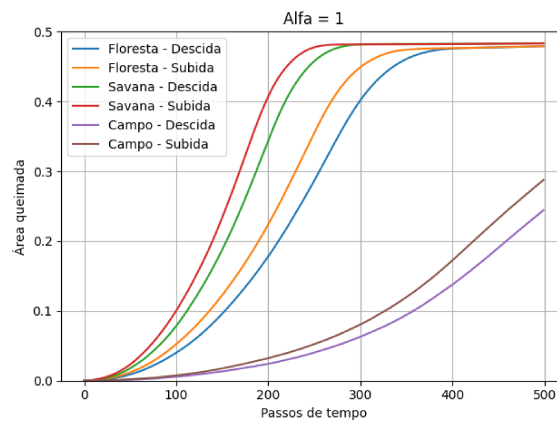
Como pode ser notado na figura, embora o aclave retarde ligeiramente a propagação do fogo, o efeito ocasionado pela presença de um vento para oeste prevalece, resultando em um espalhamento mais intenso para a esquerda do reticulado. Portanto, em cenários com o mesmo valor para a intensidade do vento e o coeficiente de relevo, a direção do vento continua sendo um fator predominante para a dinâmica do incêndio.

Para confirmar o resultado da análise, as simulações foram repetidas considerando um coeficiente de relevo superior a intensidade do vento ($\delta = 0,24$ e $\mu = 0,76$), conforme apresentado na Figura 22. Observe que apesar das diferenças de parâmetros, ainda não ocorreram diferenças muito significativas, demonstrando o vento, mesmo tendo um coeficiente de intensidade menor (cerca de 1/3 do coeficiente de relevo), ainda é o fator mais relevante para a dinâmica do incêndio. Uma possibilidade para tal comportamento está no fato do ângulo de elevação entre células adjacentes talvez não seja tão significativo.

Considerando uma distância horizontal (D) de 8 metros e uma diferença de altura (E) de 1 metro entre células, tem-se pela Equação 3.7 que $\theta = \arctan\left(\frac{\pm 1}{8}\right) \approx \pm 0,12435$ radianos. Esses valores correspondem às probabilidades de relevo (p_{relevo}) máxima e mínima de aproximadamente 1,13241 e 0,88307, respectivamente, o que indica que o efeito do relevo pode não ser suficientemente significativo para alterar de forma expressiva a propagação.

Dessa forma, para confirmar a hipótese, as simulações foram repetidas mantendo os mesmos valores de intensidade do vento e coeficiente de relevo do experimento anterior, mas considerando uma diferença de altura de 3 metros, resultando em um ângulo ($\theta \approx 0,35$) radianos. Este ângulo mais acentuado gera probabilidades de relevo (p_{relevo}) máxima e mínima de aproximadamente 1,43156 e 0,69853, respectivamente. A Figura 23 apresenta as comparações correspondentes. Observa-se que o aumento da altura intensifica a propagação em trechos ascendentes; entretanto, esse efeito não se mostrou tão expressivo quanto o esperado, indicando que, embora o relevo influencie a dinâmica de propagação, seu impacto permanece relativamente moderado frente a outros fatores, como a ação do vento.

Para analisar o comportamento do relevo em união com o vento, foram analisados cenários em que há presença de vento na mesma direção que a subida para se analisar o quanto o relevo afeta no espalhamento do fogo. Para essa análise, todas as simulações foram realizadas considerando uma umidade de 30%, diferença de altura entre células (E) de 1 metro, intensidade de vento (δ) igual a 0,5 no sentido leste e um coeficiente de relevo (μ) de 0,5. Conforme ilustrado na Figura 24, observa-se que, especialmente em áreas de vegetação campestre, há uma discreta diferença na propagação entre os cenários com e sem relevo. Embora o impacto não seja altamente expressivo, a inclusão desse fator ainda resulta em alterações na dinâmica de propagação do modelo.

S1: $\alpha = 0.078$ S2: $\alpha = 0.24$ S3: $\alpha = 0.5$ S4: $\alpha = 0.76$ S5: $\alpha = 1$ Figura 20 – Evolução dos incêndios considerando diferentes coeficientes de relevo (μ).

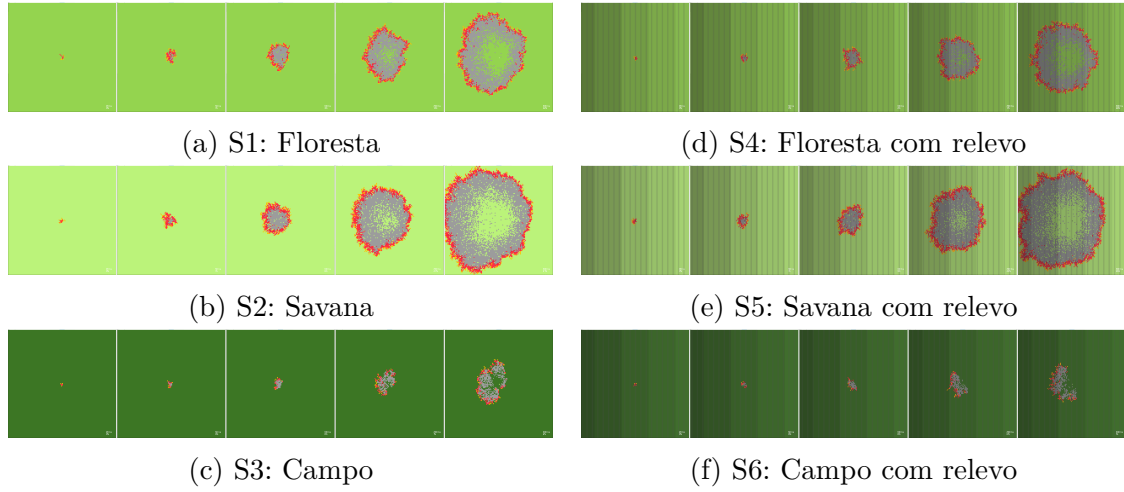


Figura 21 – Impacto do relevo ($\mu = 0,5$) nas simulações de incêndios, considerando diferentes vegetações e a presença de vento ($\delta = 0,5$): (a-c) simulações sem relevo; e (d-f) simulações com relevo.

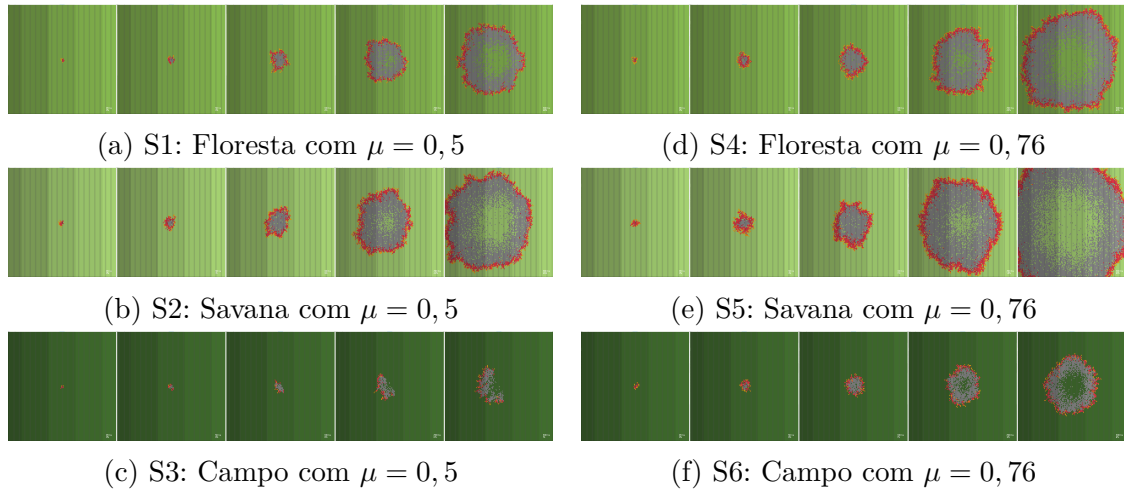


Figura 22 – Impacto do relevo nas simulações de incêndios, considerando diferentes vegetações e a presença de vento ($\delta = 0,24$): (a-c) simulações com coeficiente $\mu = 0,5$; e (d-f) simulações com coeficiente $\mu = 0,76$.

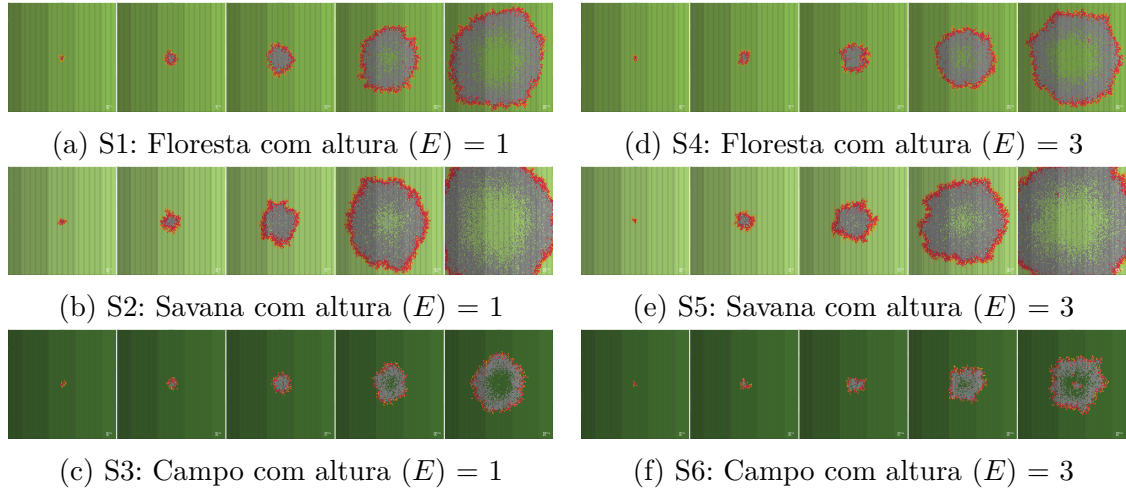


Figura 23 – Impacto do relevo nas simulações de incêndios, considerando diferentes vegetações e a presença de vento ($\delta = 0, 24$) e coeficiente de relevo $\mu = 0, 76$: (a-c) simulações com diferença de altura ($E = 1$); e (d-f) simulações com diferença de altura ($E = 3$).

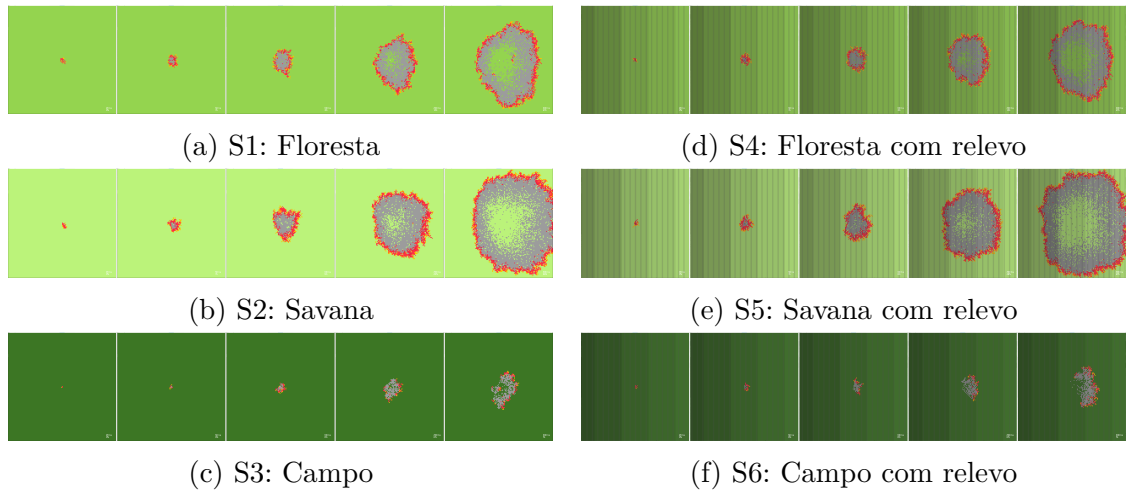


Figura 24 – Impacto do relevo ($\mu = 0, 5$) nas simulações de incêndios, considerando diferentes vegetações e a presença de vento ($\delta = 0, 5$): (a-c) simulações sem relevo; e (d-f) simulações com relevo.

5 Conclusões

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo baseado em AC capaz de simular a propagação de incêndios florestais em áreas com diferentes fitofisionomias do cerrado brasileiro. Ele representa a dinâmica de espalhamento das chamas de acordo com a vegetação predominante em cada célula e considerando as características climáticas e ambientais da região (vento, umidade do ar e relevo). O modelo produzido foi capaz de reproduzir adequadamente o comportamento do espalhamento do fogo observado nas simulações apresentadas no trabalho de [Ferreira et al. \(2023\)](#), conforme observado nos resultados experimentais.

Apesar de um comportamento similar, a diferença de parâmetros provocou diferenças nas velocidades de propagação entre os modelos desenvolvidos e o de referência, demonstrando que, a abordagem implementada é muito sensível aos seus parâmetros. Dessa maneira, é necessário um ajuste adequado desses parâmetros para atingir uma dinâmica mais próxima daquela desejada.

A estratégia de representação do relevo se demonstrou eficiente para promover um direcionamento do incêndio entre áreas com altitudes diferentes, refletindo adequadamente o comportamento esperado, que tendem a se propagar mais rapidamente em aclives devido ao aumento da transferência de calor para as camadas superiores da vegetação. Dessa forma, o novo modelo de propagação de incêndios possibilita uma simulação mais realista desse fenômeno.

Uma evolução natural desse modelo consiste na introdução de novas características ambientais, climáticas e da dinâmica dos incêndios, como a representação da propagação de faíscas pelo ar, possibilitando a ignição de áreas que não estejam adjacentes ao fogo. Nessa mesma linha, dados geoespaciais, decorrentes de imagens satélites ou mapas topográficos, podem ser integrados ao modelo a fim de proporcionar representações mais fiéis do ambiente monitorado/simulado. Outro desdobramento desta pesquisa é o uso de metaheurísticas, como os algoritmos genéticos, para ajustar automaticamente o conjunto de parâmetros do modelo, de modo a encontrar uma configuração adequada, que aproxime a dinâmica das suas simulações àquela observada nos dados históricos de incêndios. Nesse caso, também se faz necessária uma análise mais aprofundada dos resultados do modelo, adotando métricas de desempenho que permitam avaliar a qualidade e adequação das simulações frente aos dados reais. Tais medidas visam a construção de um modelo de propagação do fogo mais preciso e completo, no que diz respeito à reprodução dos comportamentos observados em incêndios florestais na região e bioma monitorados.

Referências

ALEXANDRIDIS, A.; VAKALIS, D.; SIETTOS, C. I.; BAFAS, G. V. A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through spetses island in 1990. **Applied Mathematics and Computation**, v. 204, n. 1, p. 191–201, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.06.046>>. Citado 4 vezes nas páginas 20, 22, 25 e 31.

BENEDUCI, R.; MASCALI, G. Forest fire spreading: A nonlinear stochastic model continuous in space and time. **Wiley Periodicals LLC**, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/sapm.12696>>. Citado na página 21.

BYARI, M.; BERNOUSSI, A.-s.; KASSOGUÉ, H.; AMHARREF, M. Spreadability and vulnerability via attributes for systems described by cellular automata: Application to wildfire. In: CHOPARD, B.; BANDINI, S.; DENNUNZIO, A.; HADDAD, M. A. (Ed.). **Cellular Automata**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 223–234. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-14926-9_20>. Citado na página 20.

CAMPOS, L. R. **Modelo de Propagação de COVID-19 baseado em Autômato Celular**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Mestrado em Ciências Exatas e da Terra. Disponível em: <<https://doi.org/10.14393/ufu.di.2012.341>>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 15.

CHOPARD, B. **Cellular Automata Modeling of Physical Systems**. Berlin: Springer, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_57>. Citado na página 13.

CLARKE, K.; BRASS, J.; RIGGAN, P. A cellular automaton model of wildfire propagation and extinction. **Photogrammetric Engineering Remote Sensing**, v. 60, p. 1355–1367, 01 1994. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/201996756_A_cellular_automaton_model_of_wildfire_propagation_and_extinction>. Citado na página 20.

CONWAY, J. H. The game of life. **Scientific American**, v. 223, n. 4, p. 4–10, 1970. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/scientificamerican1070-4>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 17.

COUTINHO, L. **Fire in the ecology of the Brazilian cerrado**. 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75395-4_6>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.

DOVIS, R. S. **raylib: A simple and easy-to-use library to enjoy videogame programming**. 2013. <<https://www.raylib.com/>>. Versão consultada em maio de 2025. Disponível em: <<https://www.raylib.com/>>. Citado na página 27.

FERREIRA, H. F.; TINOCO, C. R.; MARTINS, L. G. A.; OLIVEIRA, G. M. B. Stochastic model for wildfire simulation based on the characteristics of the brazilian cerrado. In: RUTKOWSKI, L.; SCHERER, R.; KORYTKOWSKI, M.; PEDRYCZ, W.; TADEUSIEWICZ, R.; ZURADA, J. M. (Ed.). **Artificial Intelligence and Soft**

- Computing**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 487–496. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42505-9_41. Citado 11 vezes nas páginas 6, 10, 12, 20, 22, 23, 27, 28, 29, 31 e 37.
- FRAGA, L. M.; OLIVEIRA, G. M. B. de; MARTINS, L. G. A. Adjustment of an epidemiological cellular automata-based model using genetic algorithm. In: **2020 IEEE 32nd International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)**. [s.n.], 2020. p. 589–594. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICTAI50040.2020.00096>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 14.
- FREIRE, J. G.; DACAMARA, C. C. Using cellular automata to simulate wildfire propagation and to assist in fire management. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 169–179, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/nhess-19-169-2019>. Citado 4 vezes nas páginas 20, 22, 25 e 31.
- LIMA, D. A. **Modelo criptográfico baseado em autômatos celulares tridimensionais híbridos**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. Mestrado em Ciências Exatas e da Terra. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2012.341>. Citado na página 15.
- MITCHELL, M.; CRUTCHFIELD, J. P.; HRABER, P. T. Evolving cellular automata to perform computations: mechanisms and impediments. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 75, n. 1-3, p. 361–391, 1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(94\)90293-3](https://doi.org/10.1016/0167-2789(94)90293-3). Citado na página 14.
- NAMETALA, S. C. S.; MARTINS, L. G. A.; OLIVEIRA, G. M. B. A new distance diffusion algorithm for a path-planning model based on cellular automata. In: **Proceedings of the 2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)**. Glasgow: IEEE, 2020. p. 1–8. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CEC48606.2020.9185818>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 15.
- TINOCO, C. R.; FERREIRA, H. F.; MARTINS, L. G. A.; OLIVEIRA, G. M. B. Wildfire simulation model based on cellular automata and stochastic rules. In: CHOPARD, B.; BANDINI, S.; DENNUNZIO, A.; HADDAD, M. A. (Ed.). **Cellular Automata**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 246–256. ISBN 978-3-031-14926-9. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-14926-9_22. Citado 5 vezes nas páginas 6, 12, 20, 23 e 27.
- WOLFRAM, S. **Cellular Automata and Complexity: Collected Papers**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1994. Disponível em: <https://www.stephenwolfram.com/publications/cellular-automata-complexity/>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.
- _____. **A New Kind of Science**. Champaign, IL: Wolfram Media, 2002. ISBN 9781579550080. Disponível em: <https://www.wolframscience.com/nks/>. Citado 4 vezes nas páginas 6, 14, 15 e 16.