

Autômatos celulares estocásticos bidimensionais aplicados à simulação de propagação de incêndios em florestas homogêneas

Henrique A. Lima¹, Danielli A. Lima¹

¹Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) – Campus Avançado Patrocínio
Av. Líria Terezinha Lassi Capuano nº 255 – 38.740-000 – Patrocínio – MG – Brazil

henriquebrmg@gmail.com, danielli@iftm.edu.br

***Abstract.** This article describes a model for forest fire spread simulation via cellular automata. This approach took into account important environmental factors such as wind direction, the flame intensity, wind speed and flammability. The model simulates a dense artificial environment through a two-dimensional lattice with identical trees. Fire is represented on a microscopic level as groups of flames that interact with their environment and may spread throughout the forest according to some rules of interaction. Preliminary results showed that the simulation can present interesting behaviors that transcribe many aspects of propagation in a real world scenario.*

***Resumo.** Este artigo descreve um modelo para simulação de propagação de incêndio florestal via autômatos celulares. Nesta abordagem levou-se em conta uma série de fatores ambientais importantes, tais como, a direção do vento, a intensidade da chama, a velocidade do vento e a inflamabilidade. O modelo simula um ambiente artificial denso através de um reticulado bidimensional com árvores idênticas. O fogo é representado em um nível microscópico como grupos de chamas que interagem com seu ambiente, podendo se espalhar por toda a floresta de acordo com algumas regras de interação. Os resultados preliminares mostraram que esta simulação pode apresentar comportamentos interessantes que imitam muitos aspectos da propagação em um cenário do mundo real.*

1. Introdução

Por muitos anos, particularmente, a fim de prever o comportamento do fogo e seu espalhamento nas florestas, a modelagem e simulação tem sido aplicadas à gestão e ao combate de incêndios, sob vários cenários de condições meteorológicas e de condições estruturais da floresta. Geralmente, o objetivo de um modelo para a previsão da propagação de incêndios é a determinação da evolução do fogo frente ao tempo em uma paisagem física. Direção do vento e velocidade são fatores determinantes num incêndio de grande porte, por isso é um parâmetro imprescindível neste tipo de modelagem. Esses modelos matemáticos e computacionais podem ser parte de um sistema real que combinam um sistema de informação geográfica (GIS) e imagens de satélite com um modelo de propagação de incêndio florestal [Beer 1990]. Entretanto, esta abordagem envolvendo processamento de imagens de satélite não será investigada no presente trabalho.

Uma ferramenta útil na elaboração de simulações gerenciadas por computador são estabelecidas por modelos matemáticos conhecidos como Autômatos Celulares (ACs).

Existem diversas aplicações no uso de autômatos celulares, dentre elas, podemos citar a modelagem de fenômenos naturais, físicos ou biológicos, que seriam muito difíceis de serem modelados pelas equações diferenciais, sendo estas as mais utilizadas nesse tipo de tarefa. Além disso, os ACs possuem alto nível de paralelismo, quando implementados em um hardware paralelo [Lima and Castro 2013].

Este trabalho tem por objetivo a proposição de um modelo de propagação de incêndios florestais com alterações lógicas de implementação do cálculo de espalhamento das chamas utilizando-se autômatos celulares bidimensionais estocásticos. As características principais dos modelos precursores serão preservadas. A fim de avaliar o modelo sugerido, testes em diferentes situações foram realizados. As simulações fornecem o tempo de propagação total em uma floresta homogênea e a partir de várias simulações é possível obter a média geral do tempo de propagação.

2. Fundamentação teórica e trabalhos relacionados

2.1. Autômatos celulares

Um AC é composto por um reticulado com uma dimensão d dividido em células ou unidades processadoras, sendo que, cada célula C é representada por um estado. As células modificam seus estados a cada passo de iteração de acordo com uma regra de transição. Podemos aplicar a regra de transição por T passos de tempo para obter a evolução espaço-temporal do reticulado do AC. A regra estabelecida por uma função de transição indica o novo símbolo a ser escrito na célula do reticulado de acordo com seu estado atual e dos estados de suas vizinhas (regra local). Em sua definição mais usual, a atualização dos estados se dá de forma síncrona e utiliza uma regra determinística, isto é, a cada passo de tempo todas as N células do reticulado são atualizadas. No modelo proposto neste trabalho, o sistema de regras é probabilístico, ou seja, é possível alterar o estado de uma célula a partir de uma função de probabilidade, isso significa que as regras de atualização são probabilísticas e, portanto, o estado de uma célula em um determinado instante depende probabilisticamente dos estados de suas células vizinhas no passo de tempo imediatamente anterior.

A estruturação de um AC unidimensional (1D) é a forma mais estudada. Para um AC com regra de atualização determinística, a mudança de estado de uma célula depende de m vizinhas expressas por $m = (2r + 1)$, sendo r o raio do AC [Oliveira 2003]. Para ilustrar um AC unidimensional com regra de atualização determinista, considere a Figura 1 (a), que aborda uma modelagem conhecida como regra 30 [Wolfram 2002], contendo um reticulado de 6 células sendo que o estado inicial de cada célula é apresentado em $t = 0$. Uma regra binária de raio 1 é aplicada, sendo que a vizinhança de cada célula é formada por três elementos: a própria célula e suas duas vizinhas adjacentes (à esquerda e à direita). Como esse AC é binário (2 estados possíveis), existem 8 diferentes vizinhanças, da 000 a 111. A regra em si é dada pelos 8 bits de saída associados a cada vizinhança possível: 01111000. Na Figura 1 (b) vemos a atualização do reticulado de $N = 6$ por 2 passos de tempo a partir de sua configuração inicial 101110 em $t = 0$. A cada passo, cada célula do reticulado é atualizada identificando-se sua vizinhança e seu novo estado é dado pelo bit de saída correspondente na regra de transição. Observe como exemplo, a célula de símbolo 1, destacada em $t = 0$, seu próximo estado será 0 em $t = 1$. O reticulado é submetido a condições periódicas de contorno, sendo que a primeira célula é vizinha imediata da última, e vice-versa. Aplicando-se esse procedimento para todas as células

do reticulado de forma síncrona, tem-se a nova configuração do reticulado a cada passo de tempo.

Os ACs fundamentados em duas dimensões (2D) são amplamente conhecidos na literatura. ACs bidimensionais também são muito usados para a representação de padrões gráficos, já que sua execução assemelha-se a uma imagem pixelizada. Essa dimensão contempla variadas formas para a consideração da vizinhança de uma célula, sendo que as duas principais estão apresentadas na Figura 1 (c) e (d), tal que o símbolo \odot representa a célula central e o símbolo \blacksquare identifica a célula vizinha. Dentre as aplicações de ACs bidimensionais, o modelo mais conhecido é o jogo matemático proposto por Conway em 1970 denominado *Game of Life*.

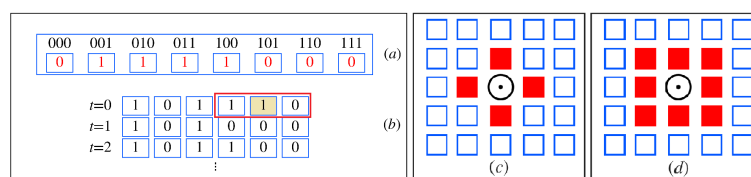


Figura 1. (a) Regra de transição de raio 1. (b) Evolução do AC por $T=2$ passos de tempo. (c) Vizinhança de Von Neumann. (d) Vizinhança de Moore.

2.2. Modelos para propagação de incêndios florestais baseados em ACs

Um dos primeiros trabalhos conhecidos nessa temática foi o estudo matemático para modelagem de incêndios proposto por [Rothermel 1972]. Nesse trabalho o autor define o comportamento de incêndios em florestas, analisando a quantidade de combustíveis (árvores) presentes numa determinada área. Ele esquematizou várias regras envolvendo a propagação, tais como, velocidade de propagação das chamas, intensidade das chamas, alteração em função dos combustíveis e como cada um destes parâmetros influencia uma queimada. O trabalho de [Rothermel 1972] serviu como base para toda estruturação dos modelos para propagação de incêndios via ACs que surgiram posteriormente.

No estudo de [Dilão 1993] foi apresentado de maneira simplificada um modelo baseado em ACs para simulação de propagação de incêndios florestais. Este modelo considerava que as células eram quadradas e poderiam estar em um dos estados: viva, em chamas ou morta. Este modelo já continha a estruturação do vento como fator determinante no direcionamento das chamas. Posteriormente, em [Clarke et al. 1994] formalizou um modelo de ACs com células quadradas e vizinhanças aleatórias e com vários fatores incrementados: direção e magnitude do vento, umidade relativa do ar e temperatura. A modelagem foi baseada nos dados da queimada do ano de 1986 ocorrido em uma floresta real experimental, San Dimas, situada próximo de Glendora na Califórnia nos Estados Unidos.

A elaboração de um modelo com mais parâmetros utilizando ACs para propagação das chamas foi publicado em [Karafyllidis and Thanailakis 1997]. O modelo apresentado simulava incêndios em florestas homogêneas e heterogêneas. Foi constatado que a heterogeneidade afeta na propagação das chamas. No modelo ainda foi abordado os fatores de condições climáticas e topografia do terreno. Mais tarde, no trabalho de [Hernandez et al. 2007] uma modelagem mais complexa sobre a utilização dos ACs com células hexagonais na propagação de incêndios foi elaborada.

O estudo baseou-se no modelo proposto por [Karafyllidis and Thanailakis 1997] com algumas alterações. O objetivo final de seu trabalho foi a criação uma estrutura de ACs baseada na transferência fracionária da área queimada. O modelo foi estruturado em duas partes, a primeira considerava floresta homogênea e a segunda uma floresta não homogênea. Além disso, ele considerou os fatores vento e topografia como eventos que alteram a probabilidade de contaminação por um foco de incêndio. No trabalho de [Santos et al. 2007], os autores trabalharam na aplicação de um modelo de autômatos celulares para propagação de fogos no Parque Natural da Serra da Arrabida. Diversos outros trabalhos baseados em ACs foram elaborados utilizando-se parâmetros de incêndios reais e foram realizadas análises críticas sobre o incêndio modelado [Chopard and Droz 1998, Alexandridis et al. 2008, Arai 2013].

3. Modelo proposto

O modelo proposto é fortemente baseado nos modelos de [Dilão 1993], [Karafyllidis and Thanailakis 1997] e [Hernandez et al. 2007]. Um modelo inicial básico foi criado, posteriormente mais parâmetros foram sendo agregados ao modelo a fim de proporcionar realismo às simulações realizadas com intuito experimental. A seguir o modelo será apresentado e será detalhada cada modificação que foi realizada em relação aos modelos precursores.

No modelo proposto neste trabalho considera-se uma rede bidimensional com simetria quadrada, vizinhança de Moore e cada célula da malha representa o estado de uma árvore. A ideia básica do modelo proposto neste trabalho é fortemente baseada no modelo de [Dilão 1993], sendo que no trabalho de Dilão considera-se três estados possíveis de uma célula, o estado associado à cor verde representa uma árvore viva, à cor vermelha uma árvore que está queimando e à cor preta uma árvore queimada. Entretanto, no modelo aqui apresentado, o estado queimando (célula vermelha) foi subdividido em quatro sub-estados. Esta modificação foi inspirada no modelo de [Hernandez et al. 2007] que também subdividiu o estado queimando em outros estados a fim de dar mais realismo à simulação. A Figura 2 (a) e (b) apresenta a nova divisão do estado queimando no modelo precursor de [Dilão 1993] e no modelo aqui apresentado, respectivamente.

A regra de atualização do modelo proposta neste trabalho é probabilística e os estados da malha são atualizados a cada iteração de forma síncrona, sendo que a mesma é fortemente baseada no modelo de [Dilão 1993]. A ideia geral da regra de atualização será descrita a seguir. Se num certo instante uma célula está no estado verde (árvore viva) e uma das células vizinhas está no estado queimando, existe uma probabilidade não nula de, no instante seguinte, a célula mudar para o estado amarelo escuro (Figura 2 (b) cor 1). A cada $t = 2$ o estado da célula é alterado incrementando-se a cor (ver Figura 2 (b) cor 2 até cor 4). Ou seja, quando uma célula está no estado queimando, ela vai manter-se nesse estado durante um tempo finito (neste caso, $t = 8$). Se uma célula da malha está no estado preto (árvore queimada), então ficará nesse estado indefinidamente ($t = \infty$). Se existir vento numa certa direção, a probabilidade de transição verde \rightarrow para o estado queimando é maior nessa direção. Assim, define-se o caráter não-determinístico na evolução do autômato celular. No modelo aqui apresentado, a partir do momento que a célula entra no estado queimando, cada estado muda de acordo com o tempo de queimada ($t = 2$), enquanto que no modelo de [Hernandez et al. 2007] essa mudança era dada por uma regra estocástica.

Em relação à probabilidade de infecção de uma árvore (célula) vizinha por um foco de incêndio, foram realizadas três considerações para uma árvore (i, j) entrar em queimada. Uma primeira adaptação que considera que uma célula (i, j) tem a probabilidade $p_{ij} = x$ de se queimar, sendo que $x \in [0, 1]$, mesma ideia do modelo de Dilão. Ou seja, basta uma célula ter uma vizinha no estado queimando que ela tem uma probabilidade não nula de no próximo instante de tempo passar do estado viva para o estado queimando. Uma segunda adaptação que considera que uma árvore tem maior probabilidade de se queimar à medida que tem mais vizinhas queimando, ou seja, a célula (i, j) tem a probabilidade $p_{ij} = \frac{1}{m^2-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m s_{ij}$ de se queimar, sendo que m^2 é a quantidade de vizinhas da célula central e $s_{ij} = 1$, se tem uma vizinha no estado queimando e $s_{ij} = 0$, caso contrário. Neste caso, quando todas as vizinhas estão queimando, a célula central (i, j) entrar no estado queimando é de $(p_{ij} = 1)$. Uma terceira modificação considera que o fogo perde sua intensidade com o passar da queimada. Neste caso, a célula (i, j) tem a probabilidade p_{ij} associada ao tempo t (abscissa) de se queimar associada com a distribuição do gráfico (ordenada) da Figura 2 (c). Observa-se que $p_{ij} = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{m-1} s_{ij} v_{ij}$, sendo que s_{ij} é a variável que armazena as vizinhas em chamas e v_{ij} relaciona cada vizinha com o valor associado ao gráfico que no máximo vale $\frac{1}{m^2-1}$ (pico do gráfico). Esta modificação foi adotada, uma vez que em [Rothermel 1972] foi observado que as chamas aumentam a intensidade de reação e combustão, à medida que o calor no processo aumenta, e diminui, à medida que a massa e a área do comburente diminuem. Considerando que a intensidade do fogo varia com o passar do tempo, o modelo aqui apresentado propõe que essa intensidade possua uma simetria, ou seja, o poder de inflamabilidade do fogo vai progredir até atingir seu ápice e posteriormente regressará de maneira simétrica à progressão ocorrida.

Em relação ao fator vento, duas propostas foram consideradas neste trabalho

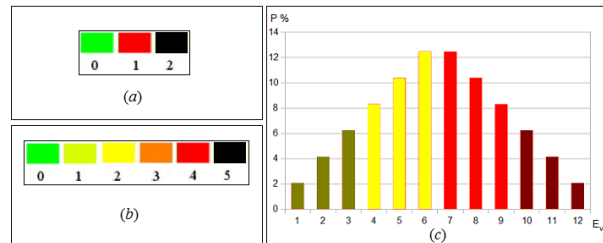


Figura 2. Cores correspondes aos estados das células: (a) modelo proposto por Dilão. (b) primeiro modelo proposto neste trabalho. (c) Gráfico da probabilidade que uma célula tem de infectar sua vizinha, dependendo do seu estado de queimada.

e ambas utilizam uma matriz de preferências de dimensão $m \times m$, que representa a vizinhança de Moore, adotada em modelos de ACs para dinâmica de partículas. De acordo com [Schadschneider 2001], essa matriz de preferências indica uma maior preferência da partícula para uma determinada direção e também foi muito eficaz para modelar o fator vento. A primeira proposta apresenta uma matriz de preferências, tal que essa dimensão representa a vizinhança do AC com raio $r = 1$. Neste caso, a matriz de preferências indica que a velocidade do vento é de $v_{max} = 1$. A matriz de preferências utilizada no modelo pode ser vista na Figura 3. Caso seja necessário alterar a direção do vento, basta rotacionar a matriz para a direção desejada, conforme proposto nos algoritmos de dinâmica de partículas [Schadschneider 2001, Pereira et al. 2011]. Além

disso, uma segunda variação do modelo foi proposta, modificando a velocidade máxima do vento, ou seja, neste caso, utilizou-se um AC com raio $r = 2$ e conseqüentemente, a velocidade máxima do vento $v_{max} = 2$ é aumentada. Neste segundo caso, temos que a matriz de preferências permite que uma célula não adjacente à célula central também entre em chamas e esse fenômeno desencadeia uma queima da vegetação de maneira mais acelerada que nos modelos anteriores. A probabilidade de infecção de uma árvore no estado viva é dada por $p_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m mat_{ij}s_{ij}$, sendo que mat_{ij} é o valor da matriz de preferências.

As vantagens e desvantagens de cada parâmetro do modelo serão discutidas

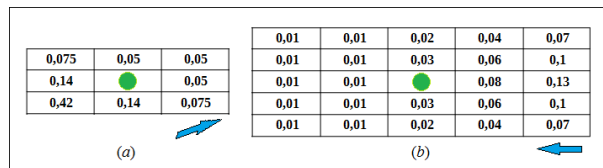


Figura 3. (a) Matriz de preferências para raio 1. (b) Matriz de preferências para raio 2. As setas azuis indicam a direção do vento para cada uma das matrizes de probabilidade e os círculos verdes indicam uma árvore intacta.

na próxima seção através de simulações e dados extraídos dos experimentos. As três primeiras modificações realizadas são em relação à probabilidade de infecção da célula alvo (árvore intacta). Posteriormente, foram realizadas modificações que inserem o fator vento e a velocidade do mesmo como um parâmetro do modelo, os quais aumentam a probabilidade de infecção de uma célula alvo para uma determinada direção.

4. Resultados experimentais

4.1. Análise visual

Inicialmente foram realizados alguns testes para a verificação da evolução do incêndio e a formação de padrões durante a propagação de incêndios que ocorre com as adaptações de parâmetros do modelo proposto. Os experimentos consistiam em um reticulado de dimensões 80×80 , com um foco de incêndio na célula central do reticulado. Para fins experimentais foram observados os instantes de tempo $t = 5, 15, 30, 40$ e 50 .

O primeiro modelo simulado está apresentado na Figura 4 e refere-se ao modelo de [Dilão 1993]. Neste caso, temos que a propagação ocorreu de maneira radial e no último instante de tempo observado ($t = 50$), o fogo ocupou quase todo o reticulado. Este fato pode ser observado, uma vez que o tempo finito do estado queimando é de $t = 5$ e por considerar apenas três estados com $p_{ij} = 0.7$, o modelo apresentou um processo inflamatório bastante acelerado.

Posteriormente, foram realizados testes alterando-se alguns parâmetros do modelo de proposto neste trabalho. Nesta primeira análise, a probabilidade de contaminação ($p_{ij} = 0.7$) é a mesma, quando tem-se uma ou mais células vizinhas contaminadas. A primeira alteração realizada foi o aumento de estados do modelo, neste caso, o estado queimando apresentou quatro sub-estados, sendo que a alteração para o estado seguinte ocorre a cada $t = 2$ passos de tempo. O resultado da simulação desta primeira adaptação pode ser mostrado na Figura 5 (a), conforme é observado, a área de queimada foi menor neste modelo, em relação ao modelo de [Dilão 1993] sob condições similares, e este

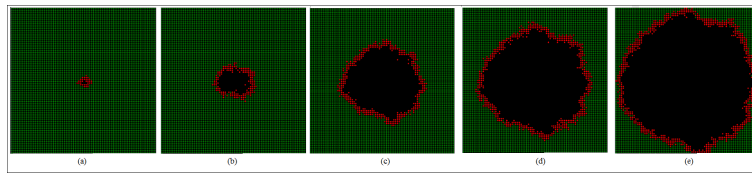


Figura 4. Modelo de [Dilão 1993] em cada instante de tempo. (a) $t = 5$. (b) $t = 15$. (c) $t = 30$. (d) $t = 40$. (e) $t = 50$.

atraso na inflamação é ocasionado devido ao tempo do estado “queimando” em sua totalidade ser maior ($t = 8$). Em seguida, foi realizada uma simulação com o parâmetro que altera a probabilidade de inflamação da célula central a partir das células vizinhas. Conforme é observado na Figura 5 (b), a área queimada também é radial. No entanto, a área devastada pelo incêndio foi menor. Este fator é devido a diminuição da probabilidade de queima, sendo que neste caso, o poder de inflamabilidade está ligado à quantidade de vizinhas no estado queimando e não mais a um valor fixo de probabilidade p_{ij} que determinava a simulação anterior. O último experimento realizado sem o parâmetro vento, apresentou uma área de queimada bastante inferior às adaptações anteriormente analisadas (Figura 5 (c)), uma vez que, o poder de contaminação do fogo é reduzido à medida que é atingido o ápice e este fator altera a força da propagação do incêndio ao longo do reticulado.

Em seguida as adaptações com o parâmetro vento foram analisadas. Primeira-

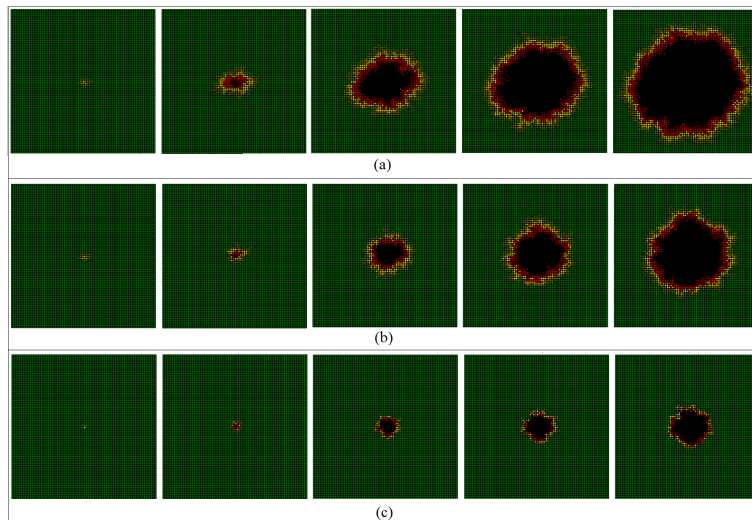


Figura 5. Observações nos instantes de tempo $t = 5, 15, 30, 40$ e 50 . (a) Alteração do modelo com acréscimo com mais sub-divisões do estado queimando. (b) Alteração do modelo com acréscimo interferência da quantidade de vizinhas queimando. (c) Alteração do modelo com base na hipótese de que o fogo perde sua intensidade de propagação com o passar do tempo.

mente, o parâmetro vento com velocidade $v_{max} = 1$ foi introduzido ao modelo, com a adição deste parâmetro é possível perceber que a área infectada não apresenta o formato radial, conforme foi observado nas adaptações precursoras. Além disso, pode-se notar uma contaminação relativamente grande na área do reticulado (Figura 6 (a)). Este fenômeno pode ser explicado pelo fato da área de contato ser irregular e propiciar maior

flexibilidade de contaminação de novas células vizinhas. Além disso, com a adição de maior velocidade no modelo, outro fator observado é apresentado na Figura 6 (b). Neste caso, percebe-se que a área infectada foi ainda maior em relação à velocidade $v_{max} = 1$ e este fenômeno pode ser entendido pelo aumento da velocidade $v_{max} = 2$ do vento, o que provoca um espalhamento mais acelerado e de forma não radial no modelo, uma vez que, infecta árvores intactas não vizinhas de uma célula no estado queimando. Um aspecto importante observado durante as simulações, é que ao mesmo tempo que tem-se um espalhamento com área maior pelo reticulado, quando utiliza-se o fator vento, o mesmo inibe a propagação oposta à direção do vento, o que dificulta o seu espalhamento nesta direção.

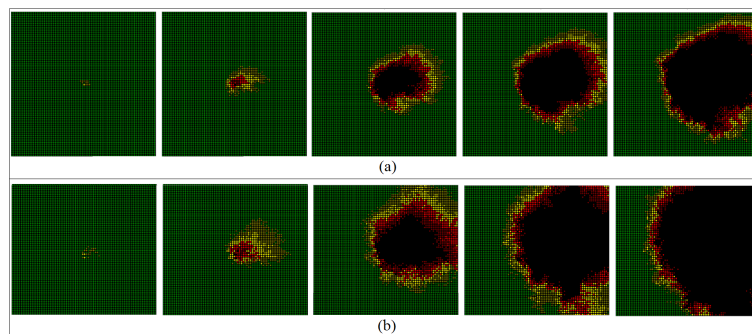


Figura 6. Observações nos instantes de tempo $t = 5, 15, 30, 40$ e 50 . (a) Alteração do modelo com velocidade do vento 1. (b) Alteração do modelo com velocidade do vento 2.

4.2. Análise estatística do tempo de propagação

Para validar os resultados obtidos anteriormente, foram realizadas algumas simulações para validar o modelo estatisticamente. Os experimentos consistiam em um reticulado de dimensões 50×50 , com um foco de incêndio na célula central do reticulado. Foram realizadas 100 simulações para cada um dos parâmetros propostos e foram observados os tempos de propagação gastos para que todas as árvores do reticulado fossem queimadas. Um histograma foi plotado para a definição das classes de cada um dos modelos (Figura 7 (a)). Pode observar que a partir deste gráfico as distribuições de todas as adaptações realizadas, inclusive o modelo de [Dilão 1993], apresentam um comportamento de distribuição próximo a normal. Uma atenção especial para este gráfico é o parâmetro do modelo com a alteração de intensidade de inflamabilidade que encontrou um valor *outlier*. Ou seja, em uma das simulações não foi possível queimar todas as árvores do reticulado. Um gráfico das frequências acumuladas foi plotado (Figura 7 (b)) e sugere que todos os parâmetros considerados tem um crescimento em homogêneo, exceto o parâmetro com vento e $v_{max} = 1$ que apresentou uma curva mais acentuada, o que indica que os valores ficaram mais próximos da média e existiram poucos valores fora da classe central. Por fim, um gráfico das médias e desvios foram apresentados e indica que a maior média do tempo de propagação foi observada com o parâmetro que considera a diminuição do potencial de inflamação do fogo, esse fator inserido no sistema provoca um atraso na queima da vegetação. Os valores exatos de cada gráfico podem ser observados na Tabela 1. Além disso, é possível contrastar as alterações dos parâmetros do modelo a partir da média, moda, mediana, desvio padrão e coeficiente curtose.

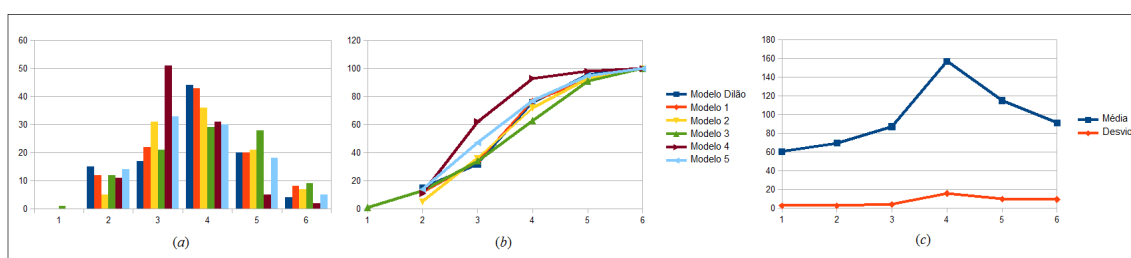


Figura 7. (a) Histograma dos tempos de propagação. (b) Gráfico da frequência acumulada. (c) Média e desvio padrão.

Table 1. Resultados de análise temporal extraídos da simulação dos parâmetros analisados.

Índice	Nome	Média	Mediana	Moda	Desvio Padrão	Coefficiente Curtose
1	Modelo Dilão	60,51	60,5	60,0	$\cong 2,5980$	$\cong 0,0952$
2	1º Modelo	69,6	69,5	69,0	$\cong 2,6230$	$\cong -0,3347$
3	2º Modelo	87,31	87,0	86,0	$\cong 3,9741$	$\cong -0,0819$
4	3º Modelo	157,13	158,5	158,0	$\cong 15,6510$	$\cong 2,6253$
5	4º Modelo	115,19	115,0	116,0	$\cong 9,8221$	$\cong 2,1968$
6	5º Modelo	91,29	90,5	93,0	$\cong 9,2274$	$\cong -0,0819$

5. Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho foi investigado um modelo de autômatos celulares bidimensionais estocásticos fundamentado em modelos precursores aplicados à simulação de propagação de incêndios em florestas homogêneas. Para a modelagem do AC detalhado no trabalho, considerou-se a implementação descrita por [Dilão 1993] e as complementações idealizadas por [Hernandez et al. 2007] e [Alexandridis et al. 2008]. Todas as adaptações lógicas foram concebidas com a análise desses modelos precursores. Além disso, uma análise das características do modelo desenvolvido foi abordada.

Com a execução do modelo descrito foi possível gerar dados visuais, onde os comportamentos padrões de proliferação de chamas durante o processo de queimadas puderam ser observados. Além disso, dados estatísticos foram obtidos relacionando a média das iterações com as adaptações de cada um dos parâmetros. A grande vantagem de se usar o modelo desenvolvido, na simulação de propagação de incêndios florestais, encontra-se no fato que o modelo é flexível para a entrada dos parâmetros e o mesmo pode agregar com bastante facilidade novos parâmetros inseridos no sistema. Entretanto, não é possível garantir que apenas os comportamentos inseridos por si só já comprovam o com exatidão a área devastada pelo fogo no modelo. Mas, elas iniciam uma análise que pode ser aprofundada em um trabalho de pesquisa posterior.

Como continuidade desse trabalho, seria interessante a adaptação do modelo 2D para um modelo 3D, no qual as alturas do relevo pudessem ser avaliadas. Uma adaptação para florestas heterogêneas também poderia ser incorporada ao trabalho. Para alcançar o paralelismo do modelo poderia ser utilizada uma implementação em hardware paralelo, uma vez que toda a motivação para o emprego de ACs na simulação reside na possibilidade de implementação eficiente. Além disso, acredita-se que, o fato do modelo ser gerenciado por regras simples na função de transição, é possível a adição de novos parâmetros coletados dos dados de queimadas em reservas nacionais, de tal forma que outros fenômenos naturais e físicos possam ser observados no decorrer simulação. Essa

inserção tem por objetivo o alcance de uma maior fidelidade se comparado com uma situação de queimada real.

Referências

- Alexandridis, A., Vakalis, D., Siettos, C. I., and Bafas, G. V. (2008). 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*, 204(1):191–201.
- Arai, K. (2013). Cell based gis as cellular automata for disaster spreading predictions and required data systems. *Data Science Journal*, 12(0):WDS154–WDS158.
- Beer, T. (1990). The australian national bushfire model project. *Mathematical and Computer Modelling*, 13(12):49–56.
- Chopard, B. and Droz, M. (1998). *Cellular automata modeling of physical systems*, volume 122. Springer.
- Clarke, K. C., Brass, J. A., and Riggan, P. J. (1994). A cellular automation model of wild-fire propagation and extinction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(11):1355–1367.
- Dilão, R. (1993). Autômatos celulares, máquinas de turing ou a natureza como máquina de cálculo. *Colóquio Ciências*, 12:3–20.
- Hernandez, L., Hoya, S., Martan, A., and Rodriguez, G. (2007). Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata. *Applied Mathematical Modelling*, 31(6):1213 – 1227.
- Karafyllidis, I. and Thanailakis, A. (1997). A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, 99(1):87–97.
- Lima, D. A. and Castro, A. P. (2013). Autômatos celulares aplicados a modelagem de dinâmica populacional em situação de risco. In *4th Workshop of Applied Computing for the Management of the Environment and Natural Resources WCAMA 2013*, Universidade Federal de Alagoas.
- Oliveira, G. M. B. (2003). Automatos celulares: aspectos dinâmicos e computacionais. *III Jornada de Mini-cursos em Inteligência Artificial (MCIA) - Sociedade Brasileira de Computação*, 8:297 – 345.
- Pereira, L. A., Duczmal, L. H., and Cruz, F. R. (2011). Simulação de evacuação emergencial via autômatos celulares: Uma proposta de modificação do modelo de schadschneider. In *XXXII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*, pages 692–698.
- Rothermel, R. C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Master's thesis, U.S. Department of Agriculture.
- Santos, J. P. d. C. M. et al. (2007). Aplicação de um modelo de autómatos celulares à propagação de fogos no parque natural da serra da arrábida.
- Schadschneider, A. (2001). Cellular automaton approach to pedestrian dynamics-theory. *arXiv preprint cond-mat/0112117*.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media - (1st edition): 1197 - 2006-09-19T07:35:05.000+0200.