

# Simulando padrões de incêndios no Parque Nacional das Emas, Estado de Goiás, Brasil

Rodolfo M. Almeida<sup>1</sup>, Elbert E. N. Macau<sup>2</sup>, Helena França<sup>3</sup>,  
Fernando M. Ramos<sup>2</sup>, Tiago G. de Senna Carneiro<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Programa de pós-graduação em Computação Aplicada, INPE

<sup>2</sup>Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada, INPE

<sup>3</sup>Divisão de Geofísica Espacial, INPE

<sup>4</sup>Departamento de Computação, UFOP

{rodolfo, elbert, fernando}@lac.inpe.br, helena@dge.inpe.br, tiago@iceb.ufop.br

**Resumo.** *Apresentamos neste trabalho um modelo probabilístico e espacialmente explícito para simular padrões de incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas, Estado de Goiás, Brasil. Aplicamos conceitos da teoria de percolação para representar os fenômenos de ignição e propagação. O fogo se propaga de uma célula queimando para qualquer uma das oito células vizinhas como um evento estocástico independente com probabilidade  $I$ , onde  $I$  pode variar de 0 a 1. Uma célula com material combustível permanece em seu estado caso nela não ocorra a ignição. Uma vez levada à ignição, seu estado será, nas duas iterações seguintes, queimando e queimado. A extinção do incêndio ocorre se novas células não forem levadas à ignição em um dada iteração. Efeitos do acúmulo de combustível são incluídos no modelo mediante escolhas de distintos valores de probabilidade de propagação. Os efeitos do vento são introduzidos com um incremento na probabilidade de propagação para vizinhos adjacentes situados na direção do vento.*

## 1. Introdução

O fogo sempre foi um elemento fascinante para o homem, tornando-se com o evoluir dos tempos, num dos elementos da natureza mais utilizados no seu cotidiano. No entanto, quando o fogo ocorre sob condições descontroladas, pode se torna perigoso e destruidor. Um incêndio florestal é caracterizado pela presença indesejada do fogo que se alastra em condições fora de controle consumindo a vegetação. Incêndios florestais indesejáveis são um dos maiores desastres naturais que ameaçam diversas regiões do mundo. Cada ano, milhares de hectares de áreas cobertas por vegetação são consumidas pelo fogo, pondo em risco o meio-ambiente e a vida do homem.

O interesse em se modelar o comportamento do fogo em incêndios florestais tem sido o objetivo de muitos grupos de pesquisa em várias partes do mundo nas últimas décadas. Nesse nível de abstração destacam-se os *modelos de propagação do fogo*, que simulam o avanço do fogo sobre a superfície por um conjunto de regras ou equações que levam em conta variáveis relacionadas com a vegetação, topografia e condições atmosféricas [15]. Os modelos de propagação do fogo podem ser tanto originados das

leis que governam a mecânica dos fluidos, combustão e transferência de calor quanto de leis empíricas obtidas a partir de informações extraídas de dados experimentais ou de incêndios históricos.

Neste trabalho vamos nos ater a uso de um modelo empírico que utilizam técnicas de *percolação* e *autômatos celulares*. Modelos baseados em autômatos celulares - também chamados *modelos espacialmente explícitos* [2] - descrevem a paisagem em sub-unidades de área, chamadas *células*. Cada célula possui uma localização, uma vizinhança e a ela são incorporados atributos correspondentes às características ambientais. Cada célula possui um conjunto finito de estados e um conjunto de regras determinam a transição entre eles, levando em conta o estado da própria célula, das células vizinhas e fatores ambientais [13, 12, 1].

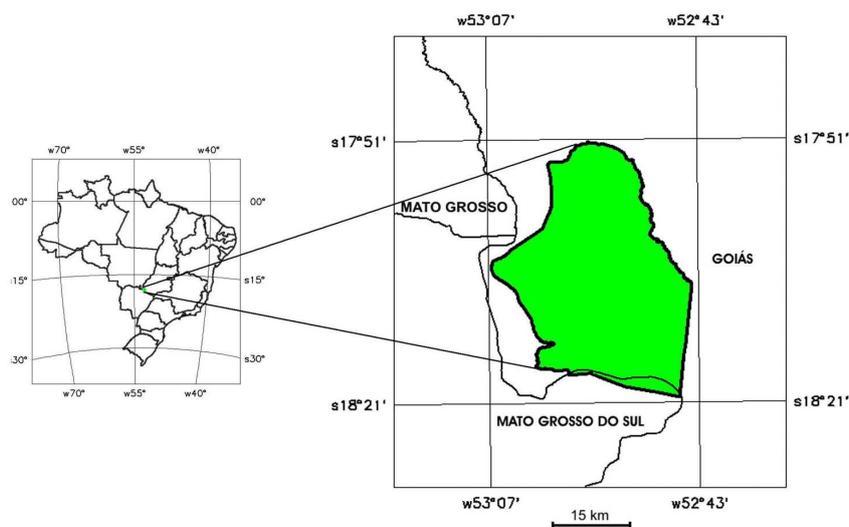
Na simulação da propagação de incêndios florestais por *percolação*, o fogo se propaga de uma célula para suas vizinhas de acordo com uma probabilidade específica, que depende de condições ambientais. Esta probabilidade é ajustada a dados de experimentos ou de históricos de incêndios. Modelos de percolação têm sido amplamente utilizados para representar o comportamento do fogo [6, 10, 14, 7]. Este trabalho visa aplicar os conceitos de teoria de percolação na simulação de cenários de propagação do fogo em paisagens naturais, com o objetivo de obter as proporções atingidas por um incêndio em função de determinadas condições ambientais. Tais resultados se configuram como uma informação muito importante para órgãos responsáveis pelo manejo do fogo em unidades de conservação. A região-alvo de aplicação do modelo é o Parque Nacional das Emas, situado no Estado de Goiás - Brasil.

Nosso artigo é dividido em quatro partes. Na primeira, discutimos a respeito do comportamento do fogo em incêndios no Parque Nacional das Emas e sobre os dados ambientais utilizados nesse trabalho. Na segunda parte, apresentamos os conceitos envolvidos na aplicação de teoria da percolação na modelagem do comportamento do fogo e descrevemos o modelo de propagação do fogo que estamos aplicando na região-alvo. Na terceira parte experimentos de simulações são realizados visando prever o cenário de propagação de alguns incêndios históricos. Finalmente, efetuamos as conclusões e direcionamentos futuros.

## **2. O fogo no Parque Nacional das Emas**

Criado em 1961, o Parque Nacional das Emas (PNE) possui uma área de um pouco mais que 131.000 hectares e está localizado no extremo sudoeste do Estado de Goiás, próximo às divisas com o Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, entre as latitudes 17°51' e 18°21' S e longitudes 52°43' e 53°07' W, conforme mostra a Figura 1.

O comportamento do fogo em incêndios florestais resulta do efeito conjunto de fatores como vegetação, condições climáticas e topografia [16]. A estrutura da vegetação do Parque - quando enquadrada na descrição de tipos fisionômicos gerais como formações florestais, savânicas e campestre - indica a predominância de fisionomias abertas (savânicas e campestre) [17], caracterizando assim um ambiente para a ocorrência de incêndios de superfície, onde predominam a queima com chamas da vegetação seca acumulada sobre a superfície. Como grande parte do Parque está situada no topo de uma chapada, onde altitudes variam entre 800 m e 890 m [17], a topografia influencia pouco no comportamento do fogo. Dentre os demais fatores destacam-se como mais importantes a



**Figura 1. Localização do Parque Nacional das Emas.**

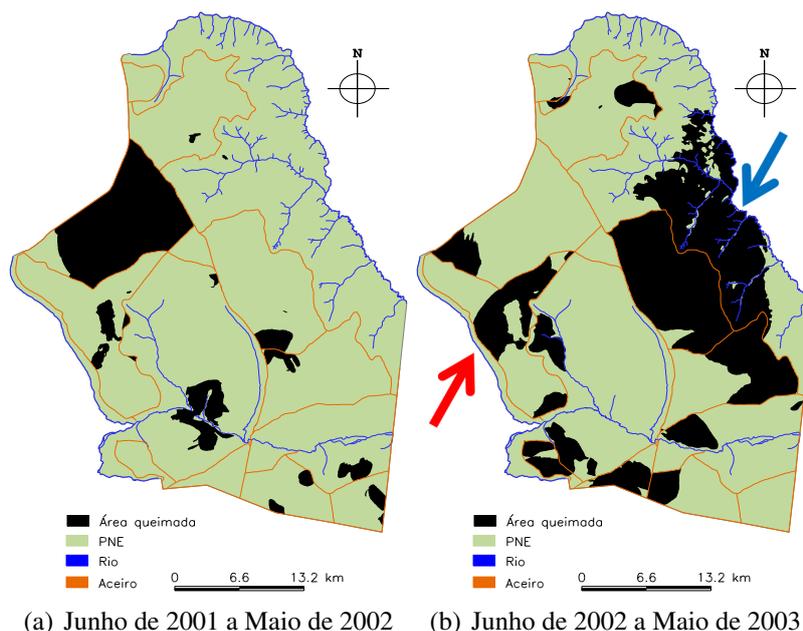
velocidade e direção do vento, e a distribuição de combustível (acúmulo e continuidade) sobre a superfície.

A continuidade do combustível pode ser interrompida por causas naturais, como a presença de rios, ou por causas artificiais, como os aceiros<sup>1</sup> e estradas do interior do Parque, que atuam como barreiras ao avanço do fogo. As Figuras 2(a) 2(b) mostram, respectivamente, os padrões finais dos incêndios ocorridos nos períodos de Junho de 2001 a Maio de 2002 e de Junho de 2002 a Maio de 2003. Percebe-se nas imagens que os aceiros (linhas marrons) e rios (linhas azuis) atuam como barreiras na propagação dos incêndios (áreas pretas), contendo-os ou induzindo-os a contornar os obstáculos encontrados. A seta vermelha na Figura 2(b) indica um incêndio que ultrapassou o aceiro devido à falha na manutenção dos mesmos.

O recente regime de incêndios ocorridos no PNE, com predominância de incêndios naturais iniciados por raios e quase total ausência de incêndios antrópicos, criou um verdadeiro mosaico na cobertura vegetal do Parque [9]. Com a ausência dos grandes incêndios que deixavam quase a totalidade do Parque homogênea quanto ao estado de desenvolvimento da vegetação e biomassa seca acumulada, os incêndios naturais de tamanhos, datas e localizações variadas deram origem a áreas com diferentes densidades de biomassa e fases fenológicas. Áreas recém queimadas não atingem densidade de biomassa suficiente para propagação do fogo, agindo como barreiras para incêndios vizinhos. A seta vermelha na Figura 2(b) indica um incêndio ocorrido em novembro de 2002 que contornou uma área queimada em março de 2002 (ver Figura 2(a)).

O mosaico da vegetação pode ser mapeado em função do número de anos sem queima e essa informação é muito importante para prever o risco e padrões de queimadas futuras. Assim, áreas que não foram atingidas pelo fogo há mais tempo acumulam maior

<sup>1</sup>O aceiro é uma técnica para prevenção de incêndios onde regiões de descontinuidades são estabelecidas na vegetação visando evitar a propagação do fogo. A malha de aceiros do PNE inclui também as estradas no seu interior e totaliza 348 km, dividindo o parque em 20 blocos. Manutenções periódicas devem ser executadas visando manter a descontinuidade de combustível acumulado na superfície.



**Figura 2. Incêndios identificados para os períodos (a) Junho de 2001 a Maio de 2002 e (b) Junho de 2002 e Maio de 2003. Em (b) a seta azul indica um incêndio que ultrapassou os aceiros e a seta vermelha indica um incêndio que não queimou uma área com pouco acúmulo de combustível, a qual foi originalmente queimada em (a).**

quantidade de biomassa combustível, tornando-se portanto, mais suscetíveis ao fogo. Inversamente, as regiões mais recentemente atingidas pelo fogo têm menor risco de queimar novamente.

### 3. Modelo de propagação do fogo

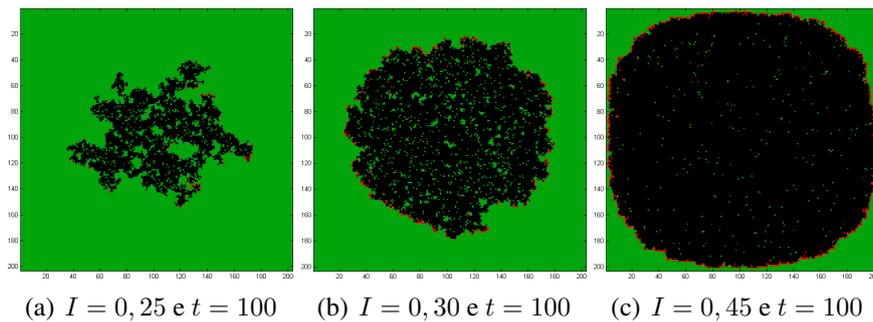
O modelo aqui proposto trata a paisagem como um reticulado bidimensional de células quadradas com dimensões 30 metros x 30 metros (900 metros quadrados de área). O atributo ambiental de cada célula corresponde ao tipo de cobertura, podendo ser célula combustível (vegetação) ou célula não-combustível (aceiro e rio). Células com material não-combustível não sofrem transição de estado. Uma célula com material combustível mudará seu estado caso seja levada à ignição. Consideramos que uma célula queima em um simples passo de tempo. Uma vez ocorrendo a ignição, o estado da célula combustível nas duas iterações seguintes serão, na respectiva seqüência, *queimando* e *queimado*. A Figura 3 ilustra as transições de estados assumidos em função das características ambientais da célula.

O conceito de *percolação de ligação simples* é aqui utilizado para representar o fenômeno de ignição e propagação. O fogo propaga de uma célula que está *queimando* para uma célula combustível vizinha como um evento estocástico independente, com probabilidade  $I$ , onde  $I$  pode variar entre 0 e 1. A vizinhança de cada célula compreende as oito células no seu entorno e a cada iteração do modelo as possíveis ligações são efetivadas ou não segundo a probabilidade  $I$ . A propagação do fogo se extingue em uma dada iteração se novas células não forem levadas à ignição em uma dada iteração. No modelo, baixos valores para a probabilidade de propagação  $I$  produzem padrões de queima



**Figura 3. Transições de estado das células em função do atributo ambiental. Uma célula não-combustível, que pode ser aceiro ou rio, sempre permanece em seu estado. Uma célula combustível permanece em seu estado caso ela não seja levada à ignição. Uma vez ocorrendo a ignição no passo de tempo  $i$ , o estado da célula combustível no passo de tempo  $i + 1$  será queimando (cor vermelha) e depois em  $i + 2$  será queimado (cor preta).**

“dendríticos”, onde a propagação flui de forma suave e lenta e o fogo aos poucos se extingue, enquanto altos valores de probabilidade produzem padrões sólidos, similares a incêndios que se propagam rapidamente. Esses efeitos podem ser vistos na Figura 4. Acima de um valor de probabilidade crítica  $I_c$ , chamada de *limiar de percolação*, o fogo “percola” livremente pela superfície [18]. O valor utilizado aqui para esse limiar de percolação foi extraído da literatura [10] e equivale a  $I_c = 0,25$ .

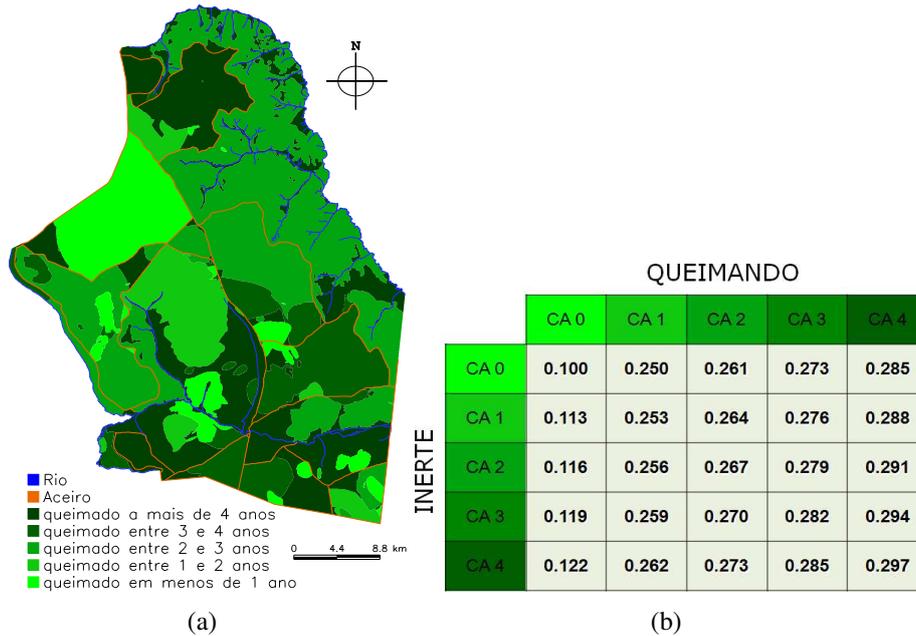


**Figura 4. Padrões produzidos após 100 passos de tempo para diferentes valores de  $I$  em uma paisagem homogênea definida sobre uma grade de  $200 \times 200$  células. Células na cor verde representam a vegetação, células na cor vermelha estão queimando em  $t = 100$  e a células pretas queimaram antes de  $t = 100$ . Como condição inicial a célula no centro da grade é levada à ignição em  $t = 0$ . Em (a) temos o padrão de queima dendrítico ( $I = 0,25$ ). Percebemos em (b)  $I = 0,30$  e (c)  $I = 0,45$  que aumentos no valor de  $I$  produzem padrões mais sólidos.**

### 3.1. Incluindo efeito de acúmulo de combustível

Como a probabilidade  $I$  associa-se à facilidade do fogo percolar a vegetação, podemos inferir diferentes valores de probabilidade de propagação para diferentes classes de acúmulo de combustível. Esses valores são aqui inferidos com base no valor do limiar de percolação e também usando o conceito que, quanto maior for o acúmulo de combustível na célula, mais intensamente ela queimará e mais provável será ela incendiar uma célula vizinha. A matriz resultante desses conceitos aparece na Figura 5(b) e contém as probabilidades de propagação entra cada par de classes de combustível. As colunas representam a classe de combustível da célula que está queimando, enquanto que as linhas correspondem às classes de combustível das células adjacentes que ainda não queimaram. Conforme observado nos incêndios mapeados, regiões queimadas há menos de um ano não possuem

combustível seco acumulado suficiente para favorecer a propagação do fogo. Assim, o valor de probabilidade de propagação nessa classe de acúmulo é menor que o valor limiar  $I_c$ . Quanto maior o acúmulo de combustível, mais facilmente o fogo se propaga e, logo, maior será o valor de  $I$ . A Figura 5(a) mostra um exemplo de mapa de acúmulo de distribuição de combustível sobre a superfície. As classes de acúmulo aqui escolhidas são: queimado há menos de 1 ano (CA 0), queimado entre 1 e 2 anos (CA 1), queimado entre 2 e 3 anos (CA 2), queimado entre 3 e 4 anos (CA 3), e queimado há mais de 4 anos (CA 4).

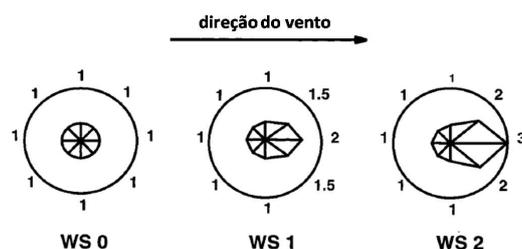


**Figura 5. (a) Mapa de acúmulo de combustível para o mês de junho de 2002. (b) Probabilidade de propagação do fogo entre as classes de acúmulo de material combustível. As cores das classes corretas correspondem às mesmas da legenda da Figura 5(a).**

### 3.2. Incluindo efeito da velocidade e direção do vento

De forma geral, quanto maior é a velocidade do vento, maiores serão a intensidade da queima e a velocidade de propagação do incêndio na direção do vento. Ou seja, o vento induz uma tendência de propagação do fogo [16]. Conforme relatado em [10], podemos dividir os efeitos da velocidade do vento em três classes: ventos fracos (WS 0), com velocidades variando entre 0 a 5 km/h; ventos moderados (WS 1), com velocidades variando entre 5 a 20 km/h e; ventos fortes (WS 2), com velocidades maiores do que 20 km/h. Para cada uma dessas três classes de velocidades do vento, um *fator de tendência direcional*  $b_j$  é usado para modificar a probabilidade de propagação para as células vizinhas (ver Figura 6). Para WS 0 todos os fatores de tendência são iguais a 1. Valores maiores de velocidade do vento para WS 1 e WS 2 aumentam a probabilidade de propagação do fogo para células na direção do vento (ver Figura 6).

Os valores das tendências  $b_j$  são utilizados para modificar  $I$  e assim produzir uma *probabilidade direcional de propagação do fogo corrigida para o vento*,  $i_{wj}$ , na  $j$ -ésima direção ( $j = 1, \dots, 8$ ). O ajuste é uma probabilidade binomial cumulativa:  $i_{wj} = 1 -$



**Figura 6.** Representação dos fatores de tendências direcionais usado para simular os efeitos da direção do vento. Sem vento ou vento fraco (WS 0: 0-5 km/h), vento moderado (WS 1: 5 - 20 km/h) e vento forte (WS 2: maior que 20 km/h). A flecha indica a direção do vento. Para WS 0 todos os fatores de tendências são iguais a 1 (sem tendência). O vento pode ser simulado vindo de qualquer uma das oito direções através da rotação da matriz de fatores de tendências até que o maior fator está posicionado a favor do vento. Figura adaptada de [10].

$(1 - I)^{b_j}$ , onde  $b_j$  é o fator de tendência direcional apropriado, obtido através de uma matriz de oito possíveis direções relativas do vento (ver Figura 6). A posição da célula não queimada adjacente relativa a célula que está queimando determina qual fator de tendência é utilizado. Quando não existe vento,  $b = 1$  e  $i_{wj} = I$ .

#### 4. Simulações e Resultados

O modelo computacional foi desenvolvido no TerraME (*Terra Modelling Environment*), um ambiente de modelagem integrado a um sistema de informações geográficas, proposto por [5], que oferece uma linguagem de alto-nível para descrição de modelos baseados em espaços celulares.

Nesta seção simulamos dois cenários de incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas, conforme destacado na Figura 7 (indicados pelas setas vermelhas). Para se descobrir maiores informações sobre os incêndios, como data de início e fim e condições atmosféricas durante a ocorrência, combinaram-se informações dos mapas de cicatrizes de incêndios, dados de focos de calor gerados pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), relatórios de ocorrência de incêndios emitidos pelo IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Renováveis) e dados meteorológicos registrados por duas plataformas de coleta de dados, uma no próprio Parque e outra na cidade de Chapadão do Céu, estado de Goiás, situada a cerca de 30 km da sede do Parque.

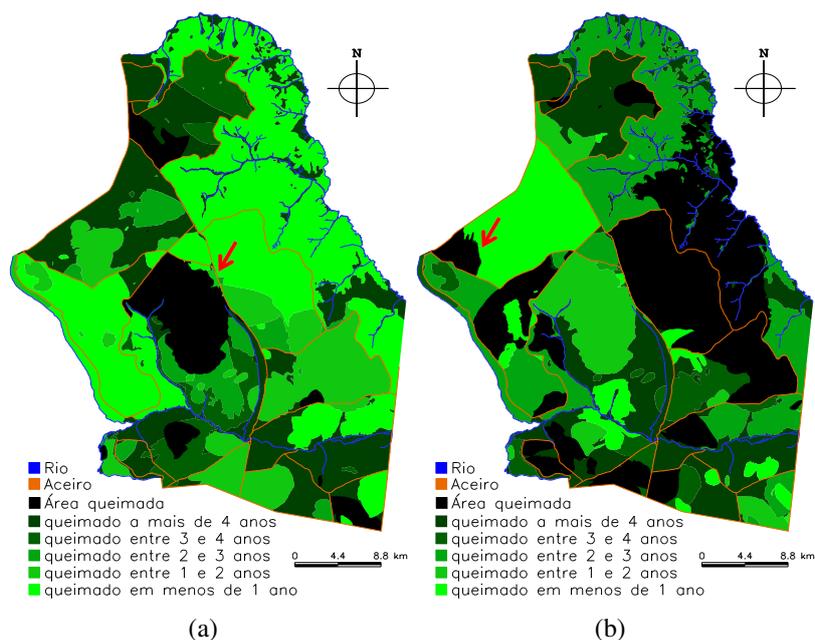
Através de consultas sobre o banco de dados geográficos obtiveram-se as seguintes informações dos incêndios:

A) Incêndio 1 (indicado na Figura 7(a)):

- Local de início: desconhecido;
- Data: 01-06-2000;
- Velocidade média do vento: 17 km/h (ventos moderados - WS1)
- Direção do vento: leste

B) Incêndio 2 (indicado na Figura 7(b)):

- Local de início: desconhecido
- Data: 09-07-2002
- Velocidade média do vento durante a ocorrência: 35 km/h (ventos fortes - WS2)



**Figura 7. Incêndios mapeados para o período (a) Junho de 2001 a Maio de 2002 e (b) Junho de 2002 a Maio de 2003 e suas respectivas classes de acúmulo de combustível para antes do período de mapeamento. Setas vermelhas indicam os incêndios simulados.**

- Direção do vento: nordeste

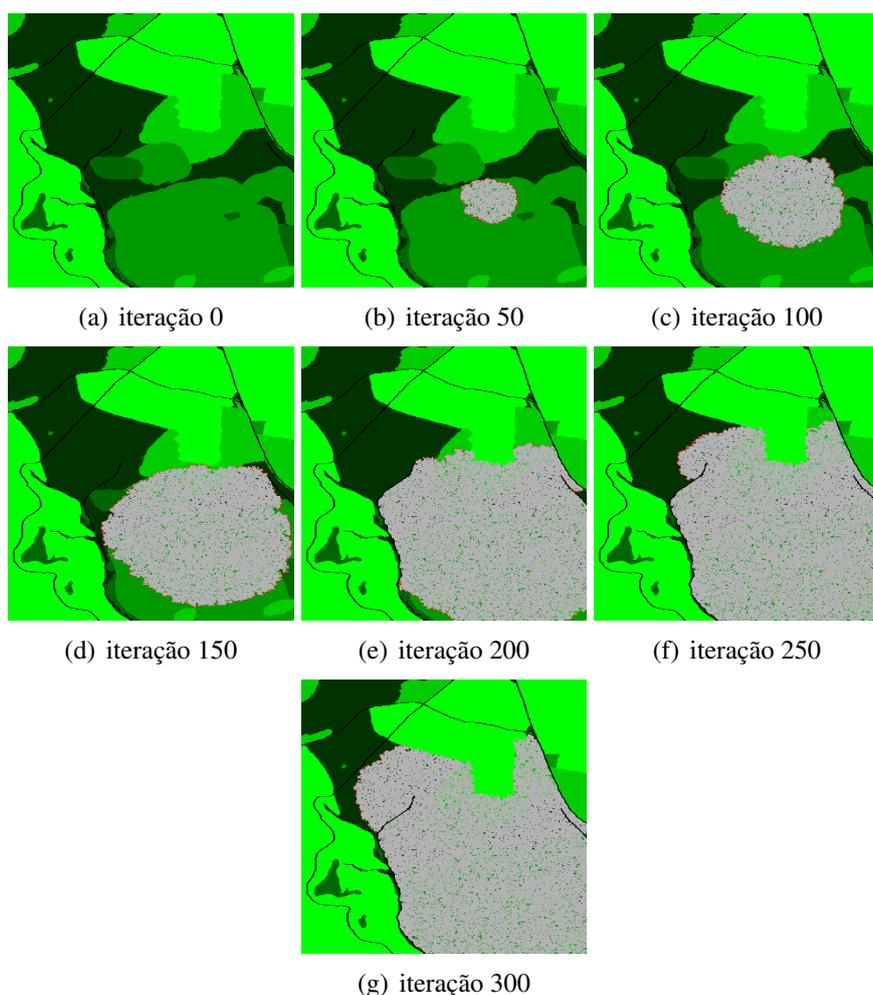
O local onde começou o incêndio é uma informação muito difícil de ser obtida, pois os incêndios são mapeados através de cicatrizes encontradas em imagens de satélite. Dados de focos de calor, obtidos de imagens termais de satélites de baixa resolução espacial, não são precisos o suficiente para se dizer onde ocorreu o foco.

A princípio, deve-se indicar como condição inicial qual célula (ou conjunto de células) está queimando. Essa escolha é feita aqui por hipótese, levando em conta a direção do vento e a extensão da área queimada. Após estabelecida a condição inicial, o modelo prevê o avanço da frente de fogo como um evento estocástico. As Figuras 8 e 9 apresentam a evolução dos cenários simulados para os dois incêndios.

Observa-se que o modelo apresenta distintos comportamentos da frente de fogo, dependendo da classe de distribuição de combustível na qual a célula se encontra. Células com alto acúmulo de material combustível apresentam maior facilidade de propagação do fogo, enquanto que células com baixo acúmulo favorecem a estagnação da propagação. As probabilidades direcionais induzem uma deformação da frente de fogo, favorecendo uma maior facilidade de propagação na direção do vento. Esse efeito pode ser evidenciado na Figura 9, onde a frente de fogo apresenta uma forma elíptica, indicando uma maior facilidade de propagação na direção do vento, que sopra para a direção leste.

## 5. Conclusões

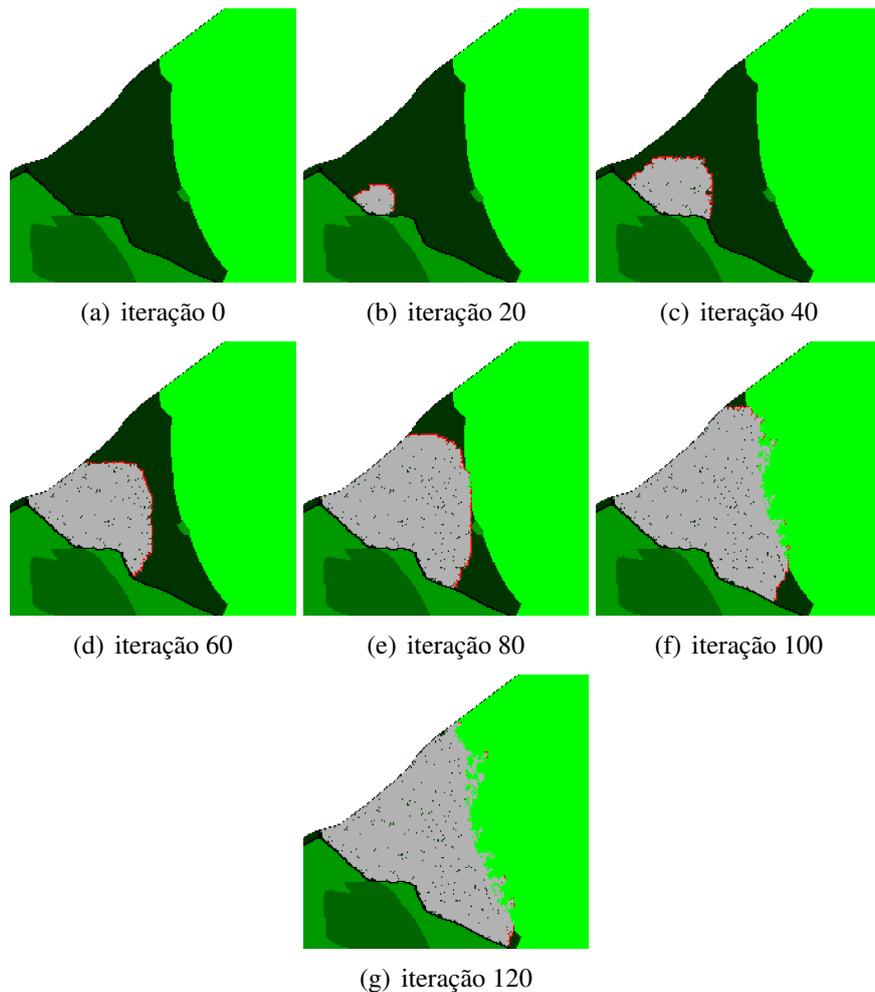
O modelo utilizado neste trabalho se baseia na teoria da percolação. Os valores de probabilidade podem ser inferidos a partir de uma base de dados com histórico de incêndios ao longo dos anos e também com informações referentes aos fatores ambientais que,



**Figura 8. Sucessivos cenários de propagação previstos pelo modelo para o incêndio 1. Células cinza estão queimadas e vermelhas estão queimado no instante de tempo. As classes de distribuição de combustível são as mesmas conforme mostradas na Figura 7(a). As probabilidades de propagação utilizadas são mostradas na Figura 5(b).**

evidentemente, influenciam na propagação do fogo. Os valores supostos para as probabilidades de propagação utilizados neste trabalho foram escolhidos também com base em evidências relacionadas às classes de anos sem queima. Regiões queimadas há menos de um ano não propagavam o fogo e, à medida que o tempo desde o último incêndio aumenta, a propagação é mais intensa. Esses valores serão substituídos por outros mais coerentes, obtidos através de correlações empíricas extraídas dos dados históricos e que levem em conta melhores efeitos do combustível, como curvas de acúmulo de biomassa seca, dominância de espécies e tipo de vegetação (ou tipo fitofisionômico).

A dominância, ou não, do capim-flecha (*tristachya Ieiostachya Ness*) é uma informação relevante para modelar a dinâmica do fogo no PNE. Esta gramínea, pelas suas características fenológicas e alta densidade, tem a capacidade de tornar o ambiente mais susceptível à ocorrência de incêndios intensos [17]. Assim, curvas de acúmulo de biomassa seca para regiões com e sem o capim-flecha fornecem informações adicionais para ajuste das probabilidades. Um outro fator que deve ser considerado é a classificação



**Figura 9.** Sucessivos cenários de propagação previstos pelo modelo para o incêndio 2. Células cinza estão queimadas e vermelhas estão queimando no instante de tempo. As classes de distribuição de combustível são as mesmas conforme mostradas na Figura 7(b). As probabilidades de propagação utilizadas são mostradas na Figura 5(b).

da vegetação do Parque, como por exemplo, em função dos tipos fisionômicos.

Para efetuarmos simulações que possam prever a dinâmica do incêndio durante seu acontecimento faremos o mapeamento de cada iteração do modelo com o tempo real, incluiremos no modelo um *tempo de queima da célula* (que depende de fatores como velocidade do vento e classe de acúmulo de combustível da célula). A possibilidade do fogo avançar de uma célula para a sua vizinha só será avaliada após ultrapassado o tempo de queima da célula. Com esse caráter dinâmico, podemos incluir no modelo eventuais mudanças na velocidade e direção do vento, possibilitando a simulação de cenários mais realísticos que auxiliem na tomada de decisão em estratégias de combate à incêndios.

Percebe-se nas simulações apresentadas nas Figuras 8 e 9 que algumas células não queimaram durante a propagação do fogo. Isso se dá devido à natureza estocástica do modelo. A probabilidade atribuída se relaciona ao número de células vizinhas que serão ignizadas por uma célula que está queimando, a cada iteração. Para um máximo valor

de probabilidade ( $p = 1, 0$ ), todas as células vizinhas serão levadas à ignição. Como a simulação é um processo estocástico, para chegarmos a uma conclusão sobre o cenário de incêndio, realizaremos um conjunto de simulações e contabilizaremos a frequência de queima das células. O cenário será caracterizado por essa frequência de queima, fornecendo uma informação acerca da probabilidade de uma determinada célula queimar dado um conjunto de condições ambientais.

A manutenção periódica da rede de aceiros é essencial para que os incêndios não atinjam grandes proporções do Parque, delimitando-os a blocos. Percebe-se no incêndio identificado pela seta azul na Figura 2(b) que o aceiro não foi eficaz. O estado da manutenção dos aceiros pode ser incluído no mapa de disponibilidade de combustível, associando-se a cada célula aceiro o tempo decorrido desde a última manutenção. Assim, podemos considerar ineficazes trechos de aceiro cujo tempo desde a última manutenção ultrapassou um ano.

O ambiente de modelagem TerraME mostrou-se bastante robusto para este tipo de aplicação, podendo então servir de base para o desenvolvimento de um aplicativo que auxilie na tomada de decisões em atividades relacionadas ao manejo do fogo em unidades de conservação.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Cordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte à execução deste trabalho.

## Referências

- [1] BERJAK, S. G.; HEARNE, J. W. An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system. **Ecological Modelling**, v. 148, p. 133–151, 2002.
- [2] BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1986.
- [3] CÂMARA, G.; SOUZA, R.; FREITAS, U.; GARRIDO, J.; MITSUO, F. Spring: Integrating remote sensing and gis with object-oriented data modelling. **Computers and Graphics**, v. 15, n. 6, 1996.
- [4] CÂMARA, G., R. SOUZA, et al. (2000). TerraLib: Technology in Support of GIS Innovation. **II Brazilian Symposium in Geoinformatics, GeoInfo2000**, São Paulo.
- [5] CARNEIRO, T. G. d. S. **Nested-CA: A foundation for multiscale modelling of land use and land cover change**. 107 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.
- [6] DUARTE, J.; TÉPHANY, H.; NAHMIA, J. Percolation and fire spread. In: VIEGAS, D. X. (Ed.). **III International Conference on Forest Fire Research**. Luso, Portugal, 1998. v. 1, p. 361–362.
- [7] FAVIER, C. Percolation model of fire dynamics. **Physics Letters A**, v. 330, p. 396–401, 2004.

- [8] FRANÇA, H.; SETZER, A. **Regime das queimadas no Parque Nacional das Emas, GO: 1973-1995**. Relatório de Pesquisa FAPESP: Processo n. 95/2674-9, 1997.
- [9] FRANÇA, H.; Ramos-Neto, M. B.; SETZER, A. O fogo no Parque Nacional das Emas. In: **Biodiversidade**. Brasília, DF, Brasil: Ministério do Meio Ambiente, 2007.
- [10] HARGROVE, W. W.; GARDNER, R. H.; TURNER, M. G.; ROMME, W. H. Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. **Ecological Modelling**, v. 135, p. 243–263, 2000.
- [11] IERUMSALIMSCHY, T.; FIGUEIREDO, L. H.; CELES, W. Lua - an extensive extension language. **Software: Practice & Experience**, v. 26, p. 635–652, 1996.
- [12] KARAFYLLIDIS, I.; THANAILAKIS, A. A model for predicting fire spread using cellular automata. **Ecological Modelling**, v. 99, p. 87–97, 1997.
- [13] MORAIS, M. **Comparing spatially explicit models of fire spread through chaparral fuels: A new model based upon the Rothermel fire spread equation**. Dissertação (Mestrado) — University of California, Santa Barbara, CA, USA, 2001.
- [14] NAHMIA, J.; TÉPHANY, H.; DUARTE, J.; LETACONNOUX, S. Fire spreading experiments on heterogeneous fuel beds. Applications of percolation theory. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 30, p. 1318–1328, 2000.
- [15] PASTOR, E.; ZÁRATE, L.; ARNALDOS, J. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 29, 2003.
- [16] PYNE, J. S.; ANDREWS, P. L.; LAVEN, R. D. **Introduction to wildland fire**. 2nd. ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1996.
- [17] Ramos-Neto, M. B. **O Parque Nacional das Emas (GO) e o fogo: Implicações para a conservação biológica**. 159 p. Tese (Doutorado) — Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- [18] Stauffer D. and Aharony A., **Introduction to Percolation Theory** (Taylor and Francis, London) 1991.