



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/11.01.13.13-TDI

**MODELAGEM DA PROPAGAÇÃO DO FOGO COMO  
FERRAMENTA DE AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO  
NO COMBATE E PREVENÇÃO DE INCÊNDIOS NO  
PARQUE NACIONAL DAS EMAS, GO**

Rodolfo Maduro Almeida

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Elbert Einstein Macau, e Fernando Manuel Ramos, aprovada em 30 de maio de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3CTKFU8>>

INPE  
São José dos Campos  
2012

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**

### **Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/11.01.13.13-TDI

**MODELAGEM DA PROPAGAÇÃO DO FOGO COMO  
FERRAMENTA DE AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO  
NO COMBATE E PREVENÇÃO DE INCÊNDIOS NO  
PARQUE NACIONAL DAS EMAS, GO**

Rodolfo Maduro Almeida

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Elbert Einstein Macau, e Fernando Manuel Ramos, aprovada em 30 de maio de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3CTKFU8>>

INPE  
São José dos Campos  
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Almeida, Rodolfo Maduro.

Al64m Modelagem da propagação do fogo como ferramenta de auxílio à tomada de decisão no combate e prevenção de incêndios no Parque Nacional das Emas, GO / Rodolfo Maduro Almeida. – São José dos Campos : INPE, 2012.

xxii + 121 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/11.01.13.13-TDI)

Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Orientadores : Drs. Elbert Einstein Macau, e Fernando Manuel Ramos.

1. incêndios de vegetação. 2. modelo de propagação do fogo. 3. autômatos celulares. I.Título.

CDU 004.94

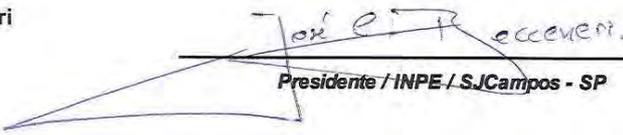
---

Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Doutor(a)** em  
**Computação Aplicada**

Dr. José Carlos Becceneri

  
\_\_\_\_\_  
**Presidente / INPE / SJCampos - SP**

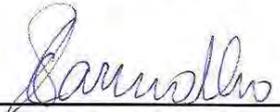
Dr. Elbert Einstein Nehrer Macau

  
\_\_\_\_\_  
**Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP**

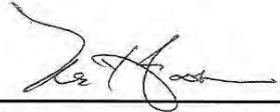
Dr. Fernando Manuel Ramos

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
**Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP**

Dr. Solon Venâncio de Carvalho

  
\_\_\_\_\_  
**Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP**

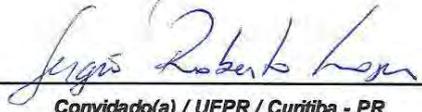
Dr. Manoel Ferreira Cardoso

  
\_\_\_\_\_  
**Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP**

Dr. Pedro Paulo Balbi de Oliveira

  
\_\_\_\_\_  
**Convidado(a) / MACKENZIE / São Paulo - SP**

Dr. Sérgio Roberto Lopes

  
\_\_\_\_\_  
**Convidado(a) / UFPR / Curitiba - PR**

**Este trabalho foi aprovado por:**

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Rodolfo Maduro Almeida**

**São José dos Campos, 30 de Maio de 2012**



*“For every complex problem, there is a solution that is simple, neat,  
and wrong.”*

HENRY LOUIS MENCKEN (1880 - 1956)  
em *“Seis Caminhos a Partir de Newton”*.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior) por ter fomentado esta pesquisa de doutorado com bolsa cedida via curso de Pós-graduação em Computação Aplicada.

Agradeço ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), local onde eu vivenciei 7 anos de minha formação acadêmica, momento de muito amadurecimento científico, que contribuiu significativamente para o “*know-how*” de professor-pesquisador que pratico hoje na Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA.

Agradeço aos dois principais colaboradores desta tese, Dra. Helena França e Dr. Mário Barroso Ramos Neto, cujo o esforço e a dedicação em suas atividades de pesquisa em ecologia do fogo no Cerrado me serviram de inspiração e motivação para a condução este trabalho.

Agradeço a meus orientadores, Dr. Elbert Macau e Dr. Fernando Ramos, pela confiança em mim depositada, e pelos inúmeros ensinamentos, tanto de valor acadêmico e quando de valor humano, a mim transmitidos.

Agradeço aos meus pais, Guilherme Lisboa Almeida e Reneite Maria Maduro Almeida, aos meus irmãos, Rogerio Maduro Almeida e Guilherme Junio Maduro Almeida, aos demais familiares, e aos meus inúmeros amigos, pelo inquestionável apoio e incentivo para eu ir em busca da realização dos meus sonhos.



## RESUMO

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro estendendo-se por uma área que cobre em torno de 2 milhões de km<sup>2</sup> do Brasil Central, sendo caracterizado por uma vasta biodiversidade animal e vegetal. Embora o fogo seja um evento endógeno e importante para o seu funcionamento, nos dias de hoje, a pressão humana sobre este bioma gera um outro impacto negativo: o fogo exógeno ou de origem antrópica. O uso indiscriminado do fogo, que ocorre principalmente em atividades agro-pastoris durante a estação seca, torna as reservas ecológicas deste bioma susceptíveis a perigosos e devastadores incêndios, que causam impacto negativo sobre este bioma. O estudo do comportamento do fogo em incêndios de vegetação no Cerrado ainda é incipiente. Esta tese visa contribuir a esta questão científica, propondo uma metodologia para modelagem e simulação da propagação de incêndios de vegetação no bioma Cerrado. Neste sentido, o modelo de propagação de incêndios de vegetação surge como uma importante ferramenta para práticas, possibilitando a simulação de cenários de propagação de incêndios em função das condições ambientais. O formalismo de modelagem, baseado em autômatos celulares, possibilita estabelecer uma relação explícita dos parâmetros do modelo com dados meteorológicos e dados cartográficos obtidos por sistemas de informações geográficas. A região-alvo de aplicação do modelo é o Parque Nacional das Emas, uma unidade de conservação de Cerrado de proteção integral localizada na região sudoeste do estado de Goiás. Um amplo acervo cartográfico que inclui: inventário histórico de incêndios mapeados por meio de interpretação visual de imagens de satélite, mapa de vegetação, mapa de altimetria, rede de drenagem, obstáculos artificiais, como estradas e aceiros; somado a dados registrados por estações meteorológicas são a principal fonte de informações que possibilitam compreender e modelar o comportamento do fogo nesta Unidade de Conservação. A metodologia de ajuste proposta permite que o modelo seja capaz de reproduzir o comportamento do fogo em incêndios reais. Os resultados obtidos indicam a capacidade do modelo proposto em reproduzir incêndios reais, em termos de extensão e tempo de duração, captando a dinâmica de propagação em função da variação espacial e temporal das condições ambientais.



# **FIRE SPREAD MODELING AS A SUPPORT TOOL TO FIRE MANAGEMENT DECISION MAKING IN EMAS NATIONAL PARK, GOIAS STATE, BRAZIL**

## **ABSTRACT**

The Cerrado is a Brazilian savanna like biome with a rich biodiversity characterized by a large quantity of plant and animal specimens. Fire is a natural ecological force in the Cerrado that has driven the evolution of specimen and controls the characteristics of the vegetation. However, the increasing use of fire by people means that conservation areas are subject to dangerous and devastating burns that occurs mainly during the dry season. The anthropogenic fire generate a negative impact on the Cerrado biodiversity. This work aims to contribute to this scientific question, proposing a methodology for modeling and simulating de spreading of vegetation fires in the Cerrado. In this sense, a vegetation fire spread model can be considered as an important practical tool in fire management activities. The proposed model is based on stochastic cellular automata. The model parameterizations make capable the establishment of an explicit relationship between the model parameters with weather and cartographical data obtained from geographic information systems. The model is applied in Emas National Park, a Cerrado ecological reserve with full protection, located in the southwest region of the Goiás state. A calibration methodology is applied to model reproduce the behavior of a real fire. The results indicate the ability for the model to reproduce real fires in terms of burned area and fire time duration, capturing the dynamics of spread as a function of spatial and temporal variation of environmental conditions.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1	Localização da área de abrangência do Cerrado no território brasileiro. . . . . 2
1.2	Diagrama esquemático da propagação do fogo em um incêndio de vegetação de superfície. . . . . 5
1.3	Ilustração da aplicação do princípio de Huygens para a modelagem do perímetro da frente de fogo em incêndios de vegetação. Em (a) é ilustrado o modelo básico de uma elipse que se expande a partir de um ponto inicial. Em (b) é ilustrada a aplicação do princípio de Huygens para expansão de um trecho do perímetro da frente de fogo. . . . . 7
1.4	Ilustração da representação discreta da paisagem e de dois tipos de configurações de vizinhança, sendo em vermelho a célula e amarelo sua vizinhança. . . . . 9
2.1	Localização do Parque Nacional das Emas. . . . . 13
2.2	As imagens caracterizam a pressão humana nos entornos do Parque Nacional das Emas ao longo das últimas décadas. A linha em preto representa os limites do Parque Nacional das Emas. . . . . 14
2.3	Diagrama climático para a região da cidade de Mineiros, estado de Goiás. A escala à esquerda corresponde à temperatura média mensal, representada pela linha pontilhada no gráfico. A escala à direita corresponde à precipitação, representada pela linha sólida no gráfico. . . . . 15
2.4	Mapas de altimetria e declividade do Parque Nacional das Emas e entorno. As linhas em azul representam a rede de drenagem e a linha em preto indica os limites do Parque. . . . . 17
2.5	Áreas úmidas do Parque Nacional das Emas. . . . . 18
2.6	Vegetação do Parque Nacional das Emas. . . . . 18
2.7	Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de 1973 a 1978. . . . . 22
2.8	Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de 1979 a 1983. . . . . 23
2.9	Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de 1984 a 1989. . . . . 24
2.10	Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de 1990 a 1994. . . . . 25

2.11	Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de Junho de 1994 a Maio de 2001. . . . .	27
2.12	Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de Junho de 2001 a Maio de 2007. . . . .	28
2.13	Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de Junho de 2007 a Maio de 2010. . . . .	29
2.14	Efeito do mosaico de incêndios de diferentes datas, tamanhos e localizações sobre a vegetação. Para os incêndios (1) e (2) em (b), áreas queimadas a menos de 1 ano, conforme observadas em (a), atuam como barreiras à propagação do fogo. No incêndio (3), vemos que, nem sempre, rios e aceiros atuam como barreiras à propagação. . . . .	30
2.15	Mapa de anos sem queima até maio de 2002. . . . .	31
2.16	Área de abrangência das fisionomias abertas presentes no Parque Nacional das Emas sobre a qual definiu-se o processo de amostragem. . . . .	32
2.17	Valores de distribuição de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa observados e estimados pela função de Weibull para o tempo de retorno do fogo obtido no período de 1984-2010 no Parque Nacional das Emas. . . . .	33
2.18	Taxa de risco de queima para as fisionomias abertas do Parque Nacional das Emas estimada a partir de dados de tempo de retorno do fogo para o período de 1984-2010. . . . .	35
3.1	Relação entre a probabilidade de percolação com a porosidade. . . . .	38
3.2	(a) Vizinhança de Moore incluindo a célula central (amarelo) e as oito células vizinhas mais próximas. (b) Diagrama de transição de estado das células, onde setas indicam o caminho das transições. A seta dupla indica que a transição é condicionada ao estado de células vizinhas. . . . .	40
3.3	Diferentes padrões de propagação do fogo para $t = 100$ , usando um espaço celular de dimensões $201 \times 201$ com ignição pontual partindo da célula central $\mathcal{S}_{(100,100)}^0 = F$ . Os valores de $D$ , $B$ e $I$ utilizados nas simulações são mostrados imediatamente abaixo das figuras. . . . .	42
3.4	(a)–(c) Padrões de propagação do fogo ligeiramente diferentes para $D = 1,00$ , $B = 0,70$ , $I = 0,25$ e $t = 100$ , usando um espaço celular de dimensões $201 \times 201$ com ignição pontual partindo da célula central $\mathcal{S}_{(100,100)}^0 = F$ . Em (d) é mostrado a probabilidade de alcance do incêndio para $D = 1,00$ , $B = 0,70$ , $I = 0,25$ e $t = 100$ , usando um total de 1000 simulações individuais. . . . .	44

3.5	Valores de $\langle S \rangle$ calculados para diferentes valores de $D$ , variando os valores de $B$ (eixo-x) e $I$ (eixo-y). . . . .	46
3.6	Velocidade adimensional de propagação do fogo $R_a$ , expressa em unidades de posição das células por iterações para $D = 1, 0$ , diferentes valores de $B$ e variando $I$ de 0 a 1. . . . .	48
3.7	Classificação dos padrões de propagação do modelo e valores da velocidade adimensional de propagação. . . . .	49
3.8	Ilustração das propagação (a) isotrópica e (b) anisotrópica para uma ignição pontual. As linhas vermelhas tracejadas representam as posições da frente de fogo e as setas pretas indicam a direção de expansão da frente de fogo. O ponto preto representa o início do incêndio. . . . .	55
3.9	Representação da direção do vento e das possíveis direções de propagação no modelo. . . . .	58
3.10	Parametrizações do modelo: (a) fator relativo do efeito do teor de umidade do combustível sobre a propagação do fogo; (b) fator relativo do teor de umidade do combustível sobre a persistência do fogo; (c) fator relativo da influência da inclinação da superfície; (d) fator relativo da velocidade do vento; (e) e (f) fator relativo da velocidade e direção do vento sobre a forma da frente de fogo. . . . .	59
3.11	Síntese dos dados de entrada do modelo parametrizado. . . . .	60
3.12	Diagrama de transição de estados para as classes utilizadas na avaliação das parametrizações do modelo. . . . .	63
3.13	Estados das células para a simulação de um cenário de incêndio com ignição na borda esquerda do espaço celular utilizando distintas classes de acúmulo de combustível vegetal. . . . .	64
3.14	Estados das células para a simulação de um cenário de incêndio com ignição pontual no centro do espaço celular, utilizando a classe de acúmulo CL1 e na presença de obstáculos em preto. . . . .	65
3.15	Estados das células para a simulação de um cenário de incêndio com ignição em linha na borda esquerda do espaço celular para três cenários de incêndios simulados utilizando os diferentes valores de umidade do combustível vegetal $M = 5\%$ (primeira linha), $M = 10\%$ (segunda linha) e $M = 15\%$ (terceira linha). . . . .	67
3.16	Feição topográfica hipotética. . . . .	68
3.17	Estados das células para a simulação de um cenário de incêndio com ignição em linha na borda esquerda do espaço celular, utilizando a classe de acúmulo FL1 e uma feição topográfica hipotética. As linhas em escuro representam as curvas de nível a cada 2 unidades de medida. . . . .	69

3.18	Valores de $\lambda_s$ ( $a = 0,05$ ) calculados para as oito direções de propagação do fogo, utilizando uma superfície plana, com diferentes valores de inclinação $\theta_s$ . . . . .	70
3.19	Estados das células para a simulação de um cenário de incêndio com ignição em linha na borda esquerda do espaço celular, utilizando a classe de acúmulo FL1 e diferentes valores de velocidade do vento: $U = 0$ m/s (primeira linha), $U = 2$ m/s (segunda linha), $U = 6$ m/s (terceira linha) e $U = 10$ m/s (última linha). A direção do vento é horizontal, soprando no sentido da esquerda para a direita. . . . .	71
3.20	Valores de $f(\omega)$ ( $c_3 = 0,05$ ) calculados para as oito direções vizinhas de uma célula queimando diferentes valores de velocidade do vento. . . . .	72
3.21	Estados das células para a simulação de um cenário de incêndio com ignição em linha na borda esquerda do espaço celular, propagando sobre as classes FL1, FL2 e FL3, com umidade do combustível vegetal de $M = 15\%$ ( $b_1 = 0,1$ e $b_2 = 0,05$ ) e velocidade do vento $U = 15$ m/s ( $c_1 = 0,10$ , $c_2 = 0,9$ , e $c_3 = 0,05$ ). A direção do vento é horizontal, soprando no sentido da esquerda para a direita. . . . .	73
4.1	Classes de tipo de combustível vegetal utilizadas no modelo. . . . .	77
4.2	Ilustração do processo de obtenção do mapa de classes de acúmulo. . . . .	79
4.3	Dados de entrada e construção do espaço celular. . . . .	82
4.4	Diagrama transições de estados das células do modelo. . . . .	83
4.5	Escala comparativa entre as classes de combustível vegetal definida a partir da capacidade de suportar a propagação do fogo. . . . .	85
4.6	Valores de $B_0$ e $I_0$ posicionado sobre as curvas de nível da velocidade de propagação do fogo no espaço de parâmetros do modelo. . . . .	86
4.7	Imagem composição colorida das bandas 2, 4 e 3 do sensor CCD do satélite CBERS 2 registrada em 21/08/2007 ilustrando um incêndio de causa antropogênica que atingiu a porção noroeste do Parque Nacional das Emas. . . . .	89
4.8	Localização das estações meteorológicas utilizadas como fonte de informações das condições atmosféricas. . . . .	90
4.9	Avaliação da melhor solução candidata por iteração para todas as execuções independentes algoritmo de vaga-lumes. As linhas em cor cinza mostram a evolução em cada execução independente e a linha em cor preta mostra o valor médio. . . . .	91
4.10	Comparação entre as áreas dos incêndios real e simulado. . . . .	92
4.11	Progressão do incêndio simulado. . . . .	93

4.12	Análise de sensibilidade variando os valores das probabilidades elementares $I_0$ e $B_0$ . . . . .	94
4.13	Análise de sensibilidade variando os valores das constantes empíricas do modelo. Um total de 1000 simulações foram executadas utilizando diferentes valores das constantes empíricas e a frequência relativa de queima foi calculada. . . . .	96
4.14	Imagem composição colorida das bandas 5, 4 e 3 do satélite LANDSAT 5 registrada em 16/10/1999 ilustrando recentes incêndios ocorridos no extremo sudeste do Parque Nacional das Emas. . . . .	97
4.15	Comparação entre as áreas dos incêndios real e simulado. . . . .	98
4.16	Progressão do incêndio simulado. . . . .	98
A.1	Curva que define o variação do parâmetro de aleatoriedade $\alpha_n$ ao longo de $n = 100$ iterações, partindo de $\alpha_1 = 0,5$ até $\alpha_{100} = 0,01$ . . . . .	121
A.2	Pseudo-código para o algoritmo de vaga-lumes. . . . .	121



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1	Parâmetros estimados no ajuste da distribuição de Weibull e erro de ajuste. 33
3.1	Resumo das parametrizações do modelo . . . . . 61
3.2	Valores escolhidos para as probabilidades elementares $I_0$ e $B_0$ para as três classes de acúmulo de um tipo de combustível vegetal utilizadas. . . 63
4.1	Descrição dos dados de entrada do modelo. . . . . 81
4.2	Valores para as probabilidades elementares $I_0$ e $B_0$ escolhidos para as classes de combustível vegetal e respectivas classes de acúmulo. . . . . 86
4.3	Informações de ocorrência do incêndio do estudo de caso 2. . . . . 89
4.4	Dados meteorológicos durante ocorrência do incêndio do estudo de caso 2. 90
4.5	Valores que definem os limites do espaço de busca das soluções candidatas. 91
4.6	Valores estimados das constantes empíricas do modelo durante o ajuste. . 92
4.7	Análise de sensibilidade variando os valores das probabilidades elementares $B_0$ e $I_0$ . . . . . 95
4.8	Informações de ocorrência do incêndio. . . . . 95
4.9	Dados meteorológicos durante ocorrência do incêndio. . . . . 96



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução ao problema, motivação e contribuição científica . . . . .	1
1.2 Objetivos da tese . . . . .	11
1.2.1 Objetivo geral . . . . .	11
1.2.2 Objetivos específicos . . . . .	11
1.3 Organização do texto . . . . .	11
<b>2 O PARQUE NACIONAL DAS EMAS . . . . .</b>	<b>13</b>
2.1 Localização . . . . .	13
2.2 Clima . . . . .	15
2.3 Topografia . . . . .	16
2.4 Vegetação . . . . .	16
2.5 Histórico de ocorrência de incêndios . . . . .	20
2.5.1 O período de 1973 a 1983 . . . . .	21
2.5.2 O período de 1983 a 1994 . . . . .	21
2.5.3 O período de 1995 até o presente . . . . .	25
2.6 Análise temporal da ocorrência de incêndios nas fisionomias abertas . . . . .	29
<b>3 MODELO DE PROPAGAÇÃO DO FOGO . . . . .</b>	<b>37</b>
3.1 Concepção e descrição do modelo . . . . .	37
3.2 Análise exploratória do modelo . . . . .	41
3.2.1 Análise qualitativa dos padrões de propagação do fogo . . . . .	41
3.2.2 Probabilidade efetiva de propagação do fogo . . . . .	43
3.2.3 Velocidade de propagação do fogo . . . . .	47
3.2.4 Fronteira crítica e padrões de propagação do fogo . . . . .	47
3.3 Parametrização do modelo . . . . .	49
3.3.1 Parametrização da probabilidade D . . . . .	51
3.3.2 Parametrização da probabilidade B . . . . .	51
3.3.3 Parametrização da probabilidade I . . . . .	53
3.3.4 Resumo das parametrizações . . . . .	58
3.4 Avaliação das parametrizações do modelo . . . . .	62
3.4.1 Efeitos da variação no acúmulo de combustível vegetal . . . . .	63
3.4.2 Efeitos da umidade do combustível vegetal . . . . .	65

3.4.3	Efeitos da topografia . . . . .	66
3.4.4	Efeitos da velocidade e direção do vento . . . . .	70
<b>4</b>	<b>AJUSTE E APLICAÇÃO DO MODELO . . . . .</b>	<b>75</b>
4.1	Especialização do modelo para a região-alvo de estudo . . . . .	75
4.1.1	Dados geográficos utilizados . . . . .	75
4.1.2	Caracterização do combustível vegetal . . . . .	76
4.1.3	Dados de entrada, estados das células e regras locais . . . . .	80
4.2	Metodologia de ajuste do modelo . . . . .	83
4.2.1	Definição dos valores das probabilidades elementares . . . . .	83
4.2.2	Definição dos valores das constantes empíricas . . . . .	86
4.3	Estudos de caso . . . . .	88
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>99</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE A - ALGORITMO DE VAGA-LUMES . . . . .</b>	<b>119</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Introdução ao problema, motivação e contribuição científica

Ao dominar o fogo, o homem primitivo alterou profundamente os seus hábitos, permitindo utilizá-lo para benefício próprio, abrindo caminho para muitas inovações como iluminar as moradas; aperfeiçoar instrumentos utilizados na caça e na pesca; cozinhar os alimentos, até ali comidos crus; defender-se melhor dos animais que os cercavam, ou afugentá-los para locais pretendidos durante a caça; ou limpeza da superfície tanto para práticas agro-pastoris quanto para torná-la habitável. Até os dias de hoje, o homem moderno continua utilizando o fogo a seu favor, extraindo a energia dos materiais da natureza, como no caso do princípio de geração de energia a partir da combustão, e moldando a natureza em seu benefício, como no caso da metalurgia ou do uso do fogo em técnicas agro-pastoris.

Em todas as circunstâncias mencionadas anteriormente, o homem domina e utiliza o fogo como ferramenta. No entanto, quando o fogo ocorre sob condições fora de controle do homem, este pode ser nocivo e destruidor. O tema desta pesquisa de doutorado envolve a presença indesejada do fogo em paisagens naturais. Neste caso, temos o *incêndio de vegetação*, que é o fogo que ocorre sem controle, e se propaga sobre qualquer forma de vegetação, podendo ocorrer tanto por causas antropogênicas, que pode ser intencional, acidental ou negligente, quanto ocorrer por causa natural, associada principalmente às descargas atmosféricas ou raios (PYNE et al., 1996). Os incêndios de vegetação são considerados catástrofes naturais, não só pelos danos ambientais, mas também pelos danos econômicos e humanos, podendo destruir bens materiais, e pôr em risco a vida de populações. Em relação à presença indesejada do fogo em paisagens naturais, o homem é considerado o principal responsável, pois, até os dias de hoje, ainda utiliza o fogo como técnica de limpeza de superfície.

A *queimada* é a prática agro-pastoril de limpeza de superfície mais primitiva que existe, e seu uso frequente nos dias de hoje é reflexo de seu baixo custo laboral e financeiro. Nesta prática, o fogo é empregado tanto como ferramenta de manejo de pastagens, provocando a rebrota da vegetação para ser consumida por rebanhos, quanto como ferramenta de limpeza da superfície para a agricultura de corte e queima, onde a vegetação indesejada é cortada e em seguida queimada para tornar o solo disponível para plantio (COCHRANE, 2009). A prática de queimada exige procedimentos que a torne controlada, reduzindo o risco de ocorrência de incêndios. No Brasil, o Decreto 2661 de 8 de julho de 1998 (GOVERNO FEDERAL, 1998), em seu artigo 2º, permite o emprego do fogo em práticas agropastoris e florestais, medi-

ante a execução de queimada controlada, desde que sejam observadas as normas de segurança e condições estabelecidas, onde o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, é o órgão responsável pela fiscalização, controle e licenciamento das queimadas controladas.

Ao mesmo tempo em que as queimadas trazem benefícios em curto prazo para as atividades agro-pastoris, seu uso indiscriminado pode causar sérios problemas ambientais. O Cerrado é o bioma brasileiro mais prejudicado pela ação do homem. Conforme exibe a Figura 1.1, o Cerrado estende-se por uma área de 2.045.064 km<sup>2</sup>, abrangendo oito estados do Brasil Central: Minas Gerais, Goiás, Tocantins, Bahia, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Piauí e o Distrito Federal. Desde a década de 1960 vem sendo ameaçado pelo uso do fogo relacionados ao avanço da ocupação humana, crescimento das monoculturas, pecuária intensiva e carvoarias. Como resultado, nos dias de hoje, a eminente fragmentação das áreas remanescentes tem definido um cenário em que as áreas remanescentes tornaram-se “ilhas de conservação”, cada vez mais suscetíveis ao fogo (CARVALHO et al., 2009).



Figura 1.1 - Localização da área de abrangência do Cerrado no território brasileiro.

A presença do fogo e seu papel em áreas de preservação de Cerrado é um tema de ampla discussão. Embora seja conhecido como um evento natural fundamental para origem e dinâmica de funcionamento do seu ecossistema (MIRANDA et al., 2002; SIMON et al., 2009), a sua presença, na maioria das vezes, é encarada como indesejada, com fortes recomendações para ser combatido. Apesar da estreita ligação com a ação

humana, o homem não é o único responsável pela presença do fogo no Cerrado. A principal característica do regime de fogo nas unidades de conservação de Cerrado é a existência de um regime de incêndios de causas antropogênicas e outro regime de incêndios de causas naturais (MIRANDA et al., 2002).

Os raios são o principal agente causador do fogo natural no Cerrado (RAMOS NETO; PIVELLO, 2000; MIRANDA et al., 2002). Estes tipos de incêndios possuem sua maior incidência concentrada durante a transição da estação seca para a chuvosa e na estação chuvosa, quando o teor de umidade na superfície do solo e na vegetação está bem mais elevado. No Parque Nacional das Emas, estado de Goiás, queimadas naturais durante a estação seca são eventos raros (FRANÇA et al.). Normalmente, os incêndios naturais são seguidos por chuvas que os extingue limitando-os a pequenas áreas. Além disso o estado de vigor da vegetação, que permanece com elevado teor de umidade durante a estação de chuvas, favorece que os incêndios naturais possuam queima de baixa intensidade (MIRANDA et al., 2002).

O grande perigo está nos incêndios antropogênicos, que ocorrem durante o período seco, período no qual se concentram as atividades de uso do fogo em atividades agro-pastoris. Estes incêndios costumam ser oriundos de áreas externas às unidades de conservação. Possuem característica de serem devastadores, pois há maior dificuldade para a vegetação se regenerar durante o período seco, pois devido as condições climáticas não serem favoráveis, o brotamento é reduzido até o começo do próximo período chuvoso (RAMOS NETO, 2000). Durante a estação seca as condições ambientais tais como elevada temperatura da atmosfera, baixa umidade relativa do ar, vegetação seca e ventos fortes, são propícias ao desenvolvimento de grandes e incontroláveis incêndios.

Neste contexto surge a motivação desta tese, que é estudar e modelar a dinâmica de propagação do fogo em incêndios de vegetação no Cerrado. A modelagem da propagação do fogo em incêndios de vegetação é uma área essencialmente experimental, que surgiu pela necessidade de o homem querer conhecer, e conseqüentemente, controlar este fenômeno. O foco principal de investigação é descrever e modelar os mecanismos relacionados à propagação do fogo sobre a vegetação em função dos fatores que a condiciona (WEBER, 2001; PASTOR et al., 2003).

Segundo Pyne et al. (1996), *combustão* é o nome dado à reação química exotérmica que surge à partir da rápida combinação de um comburente com um combustível, e na presença indispensável de uma fonte de calor. Como resultado ocorre a produção de calor, que auto-sustenta a reação até o consumo total do combustível. A reação

de combustão que produz luz é vulgarmente chamada de *fogo*, onde a *chama* é a sua porção visível e emissora de luz, entendida como uma entidade gasosa decorrente da combustão (SATIO, 2001). Nos incêndios de vegetação, o oxigênio presente no ar é o comburente, a celulose, substância produzida através da fotossíntese e que constitui predominantemente a vegetação, é o combustível, e a fonte de calor que inicia o fogo pode ser de causa natural ou antropogênica.

Dentre os tipos de incêndios de vegetação, o incêndio de superfície é o mais comum e conseqüentemente o mais estudado (PASTOR et al., 2003). Neste tipo de incêndio, o termo *combustível vegetal* refere-se a toda vegetação viva ou morta com potencial de ignição que encontra-se imediatamente acima da superfície, sendo responsável por conduzir a propagação do fogo. A Figura 1.2 ilustra um incêndio de superfície. A *frente de fogo* compreende a região do combustível vegetal onde há intensa combustão em chamas, com uma grande quantidade de calor produzida. A *região de aquecimento* é a região do combustível vegetal próxima à frente de fogo e que sofre *pirólise*<sup>1</sup> ocasionada pela ação do calor emitido pela frente de fogo. A decomposição pirolítica da celulose sofre dois caminhos diferentes, dependendo se estiver ocorrendo sob as condições de baixa ou alta temperatura (WARD, 2001). Usualmente, sob baixas temperaturas (200-280°C), na chamada *pirólise lenta* ou fase de pré-aquecimento, a celulose sofre desidratação, perdendo teor de umidade e gerando vapor de água, CO<sub>2</sub>, CO e outros componentes. Sob condição de alta temperatura (280-340°C), na chamada *pirólise rápida*, há a produção de *levoglucosan*, um volátil que suporta a combustão em chamas. Tal combustível interage com o oxigênio contido no ar, formando uma mistura gasosa inflamável que, ao alcançar temperatura maior ou igual a aproximadamente 327°C, ou entrar em contato com alguma fonte de calor nesta temperatura, entra em ignição e assim surge a chama. Na queima da mistura, grande quantidade de calor é liberada, e parte desse calor é transferido ao combustível, induzindo-o a um processo de pirólise rápida, fazendo-o emitir maior quantidade de voláteis, que se misturam ao oxigênio e queimam. As chamas são realimentadas por este processo de sucessivas pirólises rápidas, que se mantêm à medida que o combustível vegetal vai sendo consumido. Quando a intensa emissão de voláteis cessa, o combustível remanescente é consumido lentamente através de um processo de combustão em brasas, com a ocorrência de algumas pequenas chamas. Nesta última condição, temos a fase da chamada região de extinção do fogo, que corresponde à queima do combustível vegetal remanescente após a passagem da frente de fogo.

---

<sup>1</sup>Pirólise é um processo onde ocorre uma ruptura da estrutura molecular original de um determinado composto pela ação do calor.



Figura 1.2 - Diagrama esquemático da propagação do fogo em um incêndio de vegetação de superfície.

O comportamento do fogo em incêndios de vegetação é conduzido pela interação de três principais conjuntos de fatores, que são: vegetação, condições atmosféricas e topografia (PYNE et al., 1996). A vegetação provê a fonte de energia para o fogo, e é caracterizada em termos de arranjo e teor de umidade. Fatores que caracterizam as condições atmosféricas tais como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação e estabilidade atmosférica, combinam-se e influenciam tanto a velocidade e a direção de propagação do fogo, quanto no teor de umidade da vegetação. Dentre os fatores relacionados com as condições atmosféricas, a vento tem relativa importância em conduzir uma tendência na direção de propagação da frente de fogo. A topografia também influencia diretamente a velocidade e a direção propagação da frente de fogo, pois o fogo se propaga mais rapidamente em superfícies com elevação, quando comparadas a superfícies planas.

No estudo da propagação de incêndios de vegetação, existem os chamados *modelos de comportamento do fogo*, cujo processo de obtenção das equações é essencialmente empírico ou semi-empírico (SULLIVAN, 2009a), e relacionam os conjuntos de fatores que influenciam no comportamento do fogo, fornecendo estimativas das principais variáveis que o descrevem, que são, velocidade de propagação, consumo de combustível, intensidade de calor emitido pela frente de fogo, e propriedades geométricas médias da frente de fogo, como o comprimento das chamas, inclinação das chamas e profundidade da frente de fogo (MCARTHUR, 1966; ROTHERMEL, 1972; LAWSON et al., 1985).

O principal fruto no estudo do comportamento do fogo em incêndios de vegetação

são os chamados *modelos de propagação do fogo*, que simulam a dinâmica de propagação da frente de fogo sobre a vegetação, em termos espaço-temporais médios (WEBER, 2001). Estes modelos tem como dados de entrada as informações dos principais conjuntos de fatores diretamente relacionados com o comportamento do fogo, e projetam cenários de propagação de incêndios de vegetação. O desenvolvimento de programas de computador que integrem modelos de propagação do fogo com dados geográficos produzidos por sistemas de informações geográficas, tem levado a um salto qualitativo no desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliam na tomada de decisão em ações envolvendo a prevenção, a supervisão, e o combate aos incêndios de vegetação (PASTOR et al., 2003).

De maneira geral, os modelos de propagação do fogo em incêndios de vegetação diferem entre si pela representação da paisagem ou domínio espacial, que pode ser contínua ou discreta, e pelo critério utilizado para modelar a propagação da frente de fogo, onde podemos ter os métodos determinísticos ou os métodos probabilísticos (PASTOR et al., 2003; SULLIVAN, 2009b). Para a representação contínua do domínio espacial, temos como método mais comumente aplicado o princípio de Huygens (ANDERSON et al., 1982), que é um método de natureza determinística, onde a propagação da frente de fogo é modelada como um problema de propagação de uma frente de onda. Já na representação discreta, a paisagem é representada por um reticulado, onde a propagação do fogo é modelada como uma série de ignições ou contágios ao longo das unidades discretas que constituem o reticulado. Para a representação discreta temos abordagens determinísticas e estocásticas, e o formalismo de modelagem mais comumente empregado são os autômatos celulares (SULLIVAN, 2009b).

O princípio de Huygens, originalmente proposto para a propagação da luz, foi proposto no contexto da propagação do perímetro da frente de fogo por Anderson et al. (1982). Pela abordagem, o perímetro da frente de fogo é considerado uma frente de onda, cujo modelo básico que a representa é uma elipse que se expande ao longo do tempo. A Figura 1.3(a) ilustra a aplicação deste modelo básico, onde o ponto é a posição de início da expansão e as setas indicam a direção de expansão. A dinâmica de expansão da elipse é modelada em termos das suas dimensões, definidas a partir de sua excentricidade ou razão comprimento-largura (*length-to-breadth ratio*) (ANDERSON et al., 1982). Se o fogo se propaga em condições homogêneas de vegetação e sem vento ou elevações na superfície, a razão comprimento-largura será uma unidade, e o perímetro assume forma isotrópica ou circular. Havendo uma direção dominante na propagação do fogo, o perímetro assume forma elíptica.

Para simular a expansão da frente de fogo usando o princípio de Huygens, cada ponto do perímetro da frente de fogo em um dado instante de tempo  $t$ , é considerada a origem de frentes de ondas elípticas secundárias, representadas pelo modelo básico, e que se propagam por um intervalo de tempo  $\Delta t$ . A nova posição da frente de fogo  $\phi(t + \Delta t)$ , após o intervalo de tempo  $\Delta t$ , será definida pelas expansões das frentes de onda secundárias, expandidas a partir da posição da frente de fogo no tempo  $t$ ,  $\phi(t)$ . A direção de rotação das elipses e velocidade de expansão das elipses são determinadas em função de modelos de comportamento do fogo, que consideram o efeito combinado dos fatores que direcionam a propagação (FINNEY, 2004). A Figura 1.3 ilustra este princípio, onde a Figura 1.3(a) exibe o modelo básico de uma elipse que se expande a partir de um ponto inicial, e a Figura 1.3(b) exibe a aplicação do princípio de Huygens para a expansão da posição da frente de fogo no tempo  $t$ ,  $\phi(t)$ , até a posição no tempo  $t + \Delta t$ ,  $\phi(t + \Delta t)$ . Richards (1990) propôs uma solução analítica para esta abordagem de princípio, na forma de equações diferenciais. Um algoritmo computacional desenvolvido por Richards e Bryce (1996), e que utiliza estas equações, foi desenvolvido e subsequentemente incorporado em simuladores de incêndios, incluindo o *FARSITE* (FINNEY, 2004), do Serviço Florestal Americano, e o *Prometheus* (TYMSTRA et al., 2009), do Serviço Florestal Canadense. Este algoritmo opera de maneira conjunta com modelos de comportamentos de fogo, pois a forma das elipses (velocidade e direção de expansão) é determinada em função de estimativas da velocidade e direção de propagação do fogo, incluindo efeitos do vento e topografia (FINNEY, 2004).

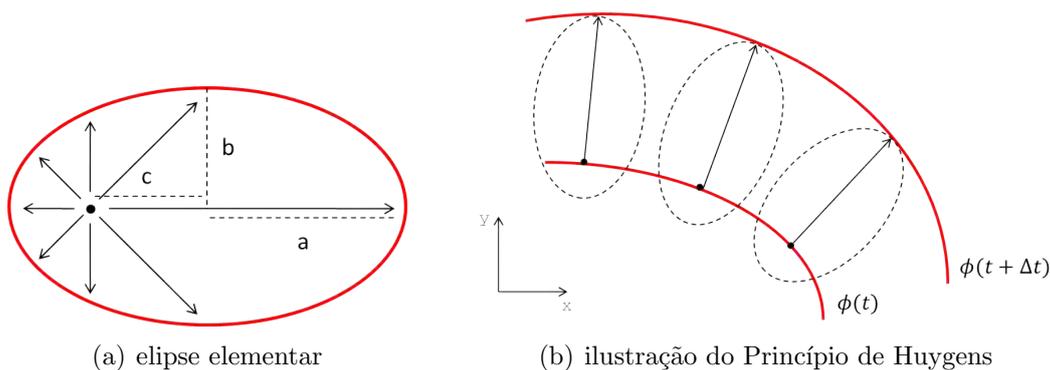


Figura 1.3 - Ilustração da aplicação do princípio de Huygens para a modelagem do perímetro da frente de fogo em incêndios de vegetação. Em (a) é ilustrado o modelo básico de uma elipse que se expande a partir de um ponto inicial. Em (b) é ilustrada a aplicação do princípio de Huygens para expansão de um trecho do perímetro da frente de fogo.

Os modelos de propagação que representam o domínio espacial de forma discreta, descrevem a paisagem por um reticulado bidimensional, que geralmente assume a forma regular e quadrada, conforme ilustra a Figura 1.4. O fogo se propaga como um processo de contágio, avançando paulatinamente sobre as unidades do reticulado. O formalismo de modelagem comumente empregado são os autômatos celulares<sup>2</sup>, que são modelos matemáticos onde o espaço, o tempo e as variáveis de estado são discretos. O domínio espacial é chamado de *espaço celular*, e cada unidade constituinte recebe o nome de *célula*. Cada célula possui um conjunto discreto e finito de estados que caracteriza a região da paisagem que esta representa. Os estados geralmente são *célula combustível*, que representa regiões com vegetação em potencial de ignição, *célula não-combustível*, que representa regiões sem vegetação como rios ou estradas, *célula queimando*, que representa células com vegetação que foram levadas à ignição, e *célula queimada*, que representa uma região com vegetação que fora consumida pelo fogo. Uma configuração espacial de vizinhança define o possível caminho que o fogo pode percorrer, partindo de uma célula queimando, e pode incluir as quatro ou oito células vizinhas próximas, conforme ilustra a Figura 1.4. O comportamento dinâmico do modelo é procedido em passos discretos, e uma função de transição local define as regras de mudança de estado das células ao longo do tempo. O estado da célula num tempo  $t + 1$  é função do estado da célula no tempo  $t$  e dos estados das células vizinhos no tempo  $t$ . Dependendo da natureza da função de transição, temos os modelos baseados em autômatos celulares determinísticos e os modelos baseados em autômatos celulares probabilísticos.

Nos modelos determinísticos, como por exemplo, o proposto por Karafyllidis e Thanailakis (1997), e posteriormente aperfeiçoado por Berjak e Hearne (2002) e Encinas et al. (2007), a função de transição de estados parte de uma estimativa da velocidade de propagação do fogo no interior da célula, excluindo os efeitos do vento e da topografia. Coeficientes que incluem os efeitos do vento e topografia são combinados, introduzindo uma estimativa espacial da velocidade de propagação do fogo, possibilitando calcular os valores das velocidades de propagação na direção das células vizinha. As regras que definem a transição dos estados das células são função do tempo de queima da célula, e do tempo de propagação do fogo às células vizinhas. Os modelos determinísticos sempre necessitam ser combinados com modelos de

---

<sup>2</sup>Originalmente propostos por John Von Neumann na década de 40 (VON NEUMANN, 1966), foi na década de 70 que tornaram-se amplamente conhecidos no meio acadêmico por meio do famoso “jogo da vida”, um autômato celular idealizado por John H. Conway (GARDNER, 1970). Porém, foi na década de 80, a partir dos trabalhos de Stephen Wolfram (WOLFRAM, 2012), que a comunidade científica conhece o potencial dos autômatos celulares como modelos matemáticos de sistemas complexos (WOLFRAM, 1983; WOLFRAM, 1984).

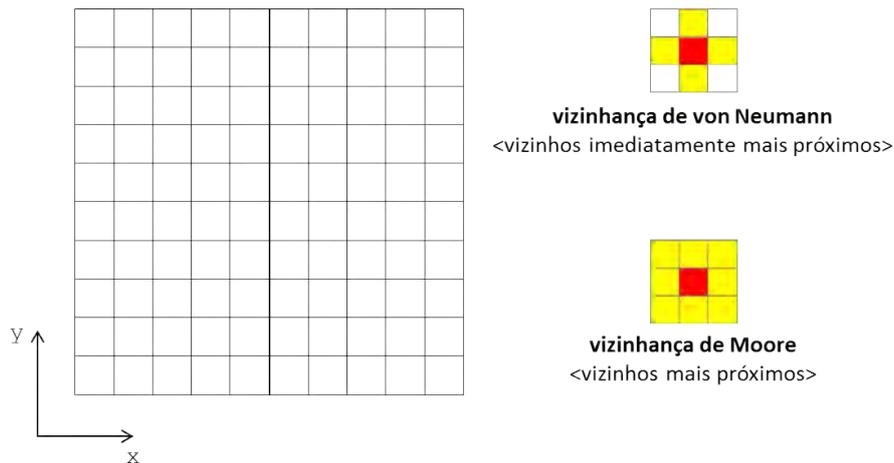


Figura 1.4 - Ilustração da representação discreta da paisagem e de dois tipos de configurações de vizinhança, sendo em vermelho a célula e amarelo sua vizinhança.

comportamento do fogo. No caso do modelo de Karafyllidis e Thanailakis (1997), foi utilizado o modelo de Rothermel (1972) e outros modelos empíricos que quantificam o efeito do vento e topografia sobre a velocidade de propagação do fogo.

Nos modelos probabilísticos, a propagação do fogo é modelada como um evento aleatório, e a transição entre os estados é descrita em termos probabilísticos. A dinâmica de ignição das células, transição de *célula queimando* para *célula queimada*, é avaliada por meio de probabilidades, cujo valores são função do tipo de vegetação, combustível vegetal acumulado e teor de umidade. Ajustes direcionais ajustam o valor da probabilidade de propagação do fogo, e projetam a direção dominante de propagação do fogo em função do efeito combinado do vento e da topografia. Estes modelos são de natureza puramente empírica, onde a função de transição de estados, e respectivos valores de probabilidade de propagação do fogo, são obtidos por técnicas de ajuste baseada em dados de experimentos ou de incêndios documentados. Dentre estes modelos, destacam-se os modelos baseados nas abordagens markoviana (BOYCHUK et al., 2009), de redes (PORTERIE et al., 2007; ADOU et al., 2010), e de teoria de percolação (HARGROVE et al., 2000; FAVIER, 2004; ALEXANDRIDIS et al., 2008; ALMEIDA; MACAU, 2011). No caso dos modelos de rede, configurações de vizinhanças mais complexas são utilizadas, como o caso das redes pequeno-mundo (WATTS; STROGATZ, 1998).

Nesta tese, optou-se por desenvolver e aplicar modelos de propagação do fogo com domínio espacial discreto, essencialmente empírico e de natureza probabilística. Embora seja uma área consolidada há mais de cinco décadas, a compreensão deste

fenômeno ainda é incompleta, e o método empírico surge como alternativa para descrever uma variedade de hipóteses e expressões para processos fundamentais da combustão e transferência de calor (FINNEY et al., 2012). A adoção de uma estratégia de modelagem essencialmente empírica, permite o desenvolvimento de um modelo de propagação que possua nível significativo de confiança com as características particulares da região de estudo.

Nos dias de hoje tem-se optado pela inclusão de estocasticidade na previsão do comportamento do fogo. Por ser um fenômeno altamente complexo, onde uma vasta gama de fatores interagem e variam em diferentes escalas de espaço e de tempo, a estocasticidade busca representar flutuações significativas que ocorrem em pequena escala. Uma alternativa é o uso de técnicas de *ensemble*, onde estocasticidade é inserida nas condições atmosféricas de maneira sistemática ao longo do tempo, gerando incertezas nas previsões de modelos determinísticos (CRUZ, 2010; FINNEY et al., 2011). Outra alternativa, que é a adotada nesta tese, é o uso de modelos probabilísticos de propagação do fogo, onde a componente estocástica é introduzida implicitamente no comportamento do fogo, tanto espacialmente quanto temporalmente, em função da vegetação, das condições atmosféricas e da topografia (HARGROVE et al., 2000; ALEXANDRIDIS et al., 2008; BOYCHUK et al., 2009).

Neste trabalho, um modelo de propagação de incêndios de vegetação baseado em autômatos celulares probabilísticos é idealizado e aplicado para modelar incêndios reais. A abordagem de modelagem utilizada permite estabelecer uma relação explícita dos parâmetros do modelo com dados meteorológicos e dados cartográficos obtidos por sistemas de informações geográficas. O modelo é aplicado no contexto do bioma Cerrado, onde o Parque Nacional das Emas, uma unidade de conservação de Cerrado com proteção integral localizada na região sudoeste do estado de Goiás, é utilizada com região-alvo. Um amplo acervo de incêndios mapeados, combinado com outros dados cartográficos da região, permitiram melhor compreender os fatores relacionados com a ocorrência de incêndios no fogo no Parque. Uma metodologia de ajuste permite que o modelo seja capaz de reproduzir o comportamento do fogo em incêndios reais. Os resultados obtidos indicam a capacidade do modelo proposto em reproduzir incêndios reais, em termos de extensão e tempo de duração, captando a dinâmica de propagação em função da variação espacial e temporal das condições ambientais.

## **1.2 Objetivos da tese**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral desta tese é propor um modelo de propagação do fogo, fundamentado no estado-da-arte da modelagem do comportamento do fogo em incêndios de vegetação, e uma metodologia de ajuste, que permite ao modelo projetar cenários de propagação de incêndios reais no contexto do Bioma Cerrado.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Formular o modelo a partir do formalismo de autômatos celulares;
- Investigar a capacidade do modelo idealizado em representar o comportamento do fogo;
- Propor parametrizações que relacionem explicitamente o comportamento do modelo em função de características da vegetação, topografia e condições atmosféricas, e em seguida avaliá-las visando verificar se elas captam o efeito esperado na dinâmica de propagação do fogo;
- Propor uma metodologia de ajuste do modelo para que seja possível aplicar o modelo para simular incêndios de vegetação no bioma Cerrado e validá-lo em uma região-alvo.

## **1.3 Organização do texto**

As partes deste documentos serão descritas a seguir. No Capítulo 2, a região-alvo de aplicação do modelo, o Parque Nacional das Emas, é apresentada, e seu histórico de fogo é delineado. No Capítulo 3, o modelo de propagação do fogo é idealizado, descrito e avaliado. Na Capítulo 4, o modelo é ajustado e aplicado para simular incêndios no Parque Nacional das Emas. No Capítulo 5, considerações finais e perspectivas futuras são discutidas.



## 2 O PARQUE NACIONAL DAS EMAS

Este capítulo foca-se na caracterização da região-alvo de estudo desta tese, o Parque Nacional das Emas, e do seu regime de fogo. O capítulo começa com a descrição da localização e atual contexto geográfico onde se encontra o Parque, seguido pela descrição do seu clima, da topografia e da vegetação. Em seguida, o histórico de ocorrência de fogo dos últimos 40 anos são apresentados. E por fim, a análise da dependência temporal da ocorrência do fogo para as fisionomias abertas é realizada.

### 2.1 Localização

Criado em 1961, o Parque Nacional das Emas (PNE) possui uma área de um pouco mais que 132.000 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 2.1.

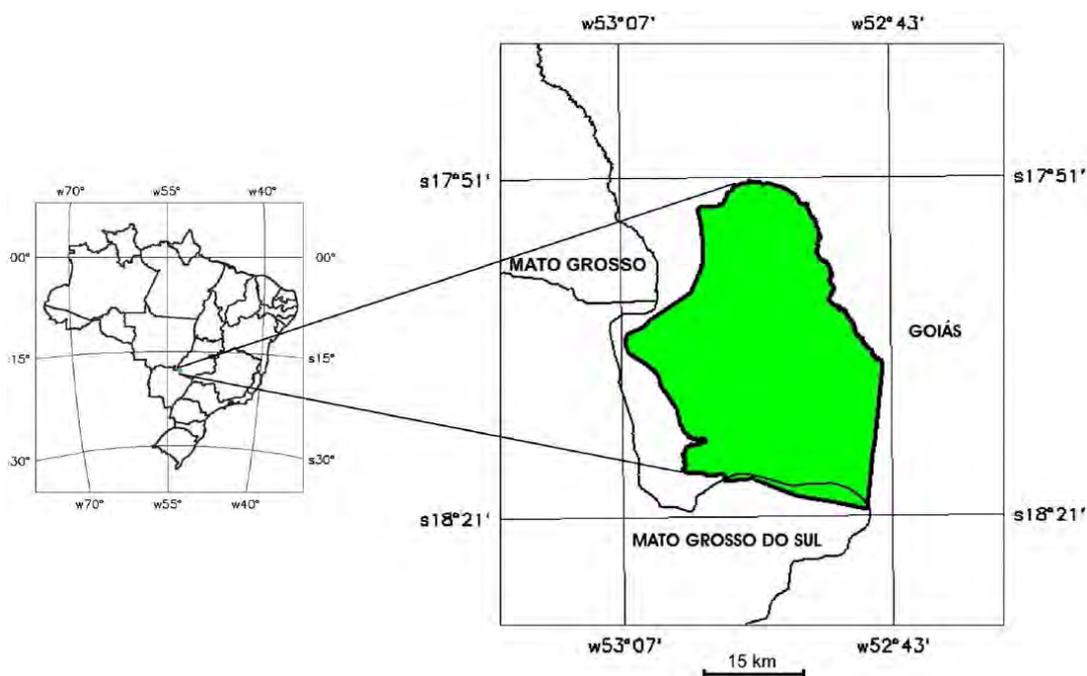


Figura 2.1 - Localização do Parque Nacional das Emas.  
Fonte: França et al. (2007).

Depois da Mata Atlântica, o Cerrado é o bioma brasileiro que mais sofreu a pressão humana nas últimas décadas. As tendências atuais de alterações deste bioma têm definido um cenário de fragmentação da paisagem onde as áreas de preservação

existentes tornaram-se “ilhas de conservação” (CARVALHO et al., 2009). As imagens da figura 2.2 exibem este cenário de fragmentação para a região do Parque Nacional das Emas, desde 1973 até recentemente. Conforme indicado na Figura 2.2(d), nos seus entornos predominam como forçantes deste cenário a monocultura intensiva de grãos e a pecuária extensiva de baixa tecnologia. Um dos principais efeitos da fragmentação é interferir na movimentação dos seres vivos (biota), além de favorecer a invasão e a dispersão de espécies exóticas (PIVELLO, 2007).

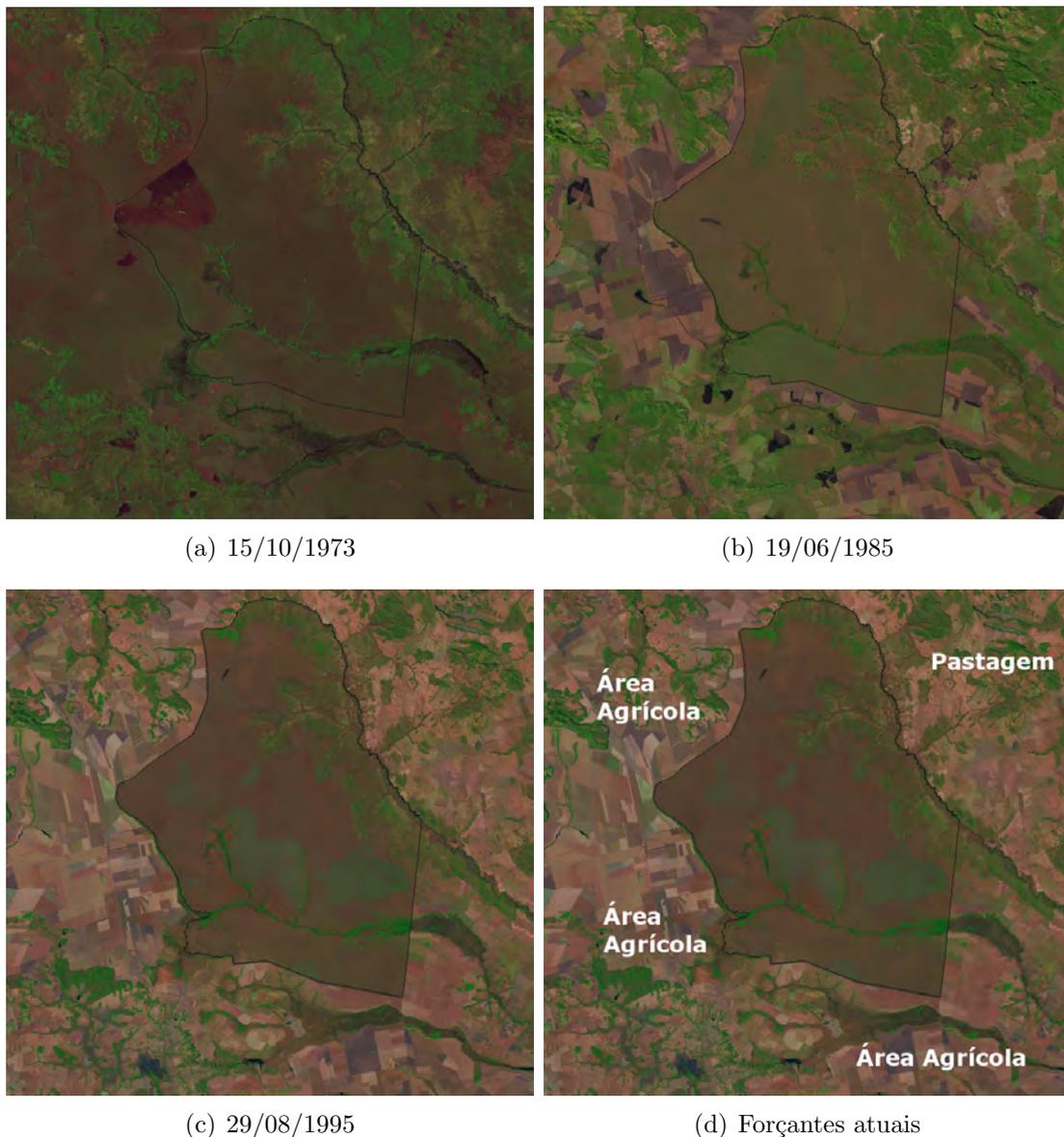


Figura 2.2 - As imagens caracterizam a pressão humana nos entornos do Parque Nacional das Emas ao longo das últimas décadas. A linha em preto representa os limites do Parque Nacional das Emas.

## 2.2 Clima

O clima da região do Parque é sazonal tropical e a temperatura anual varia entre 22°C e 24°C. A amplitude térmica diária é da ordem de 15°C, podendo chegar a mais de 20°C. A pluviosidade anual atinge entre 1500 e 1700 mm, mas a sua distribuição não é homogênea. O diagrama climático mostrado na Figura 2.3, publicado por Ramos Neto (2000) e elaborado segundo a metodologia proposta por (WALTER, 1971), apresenta as médias mensais de precipitação e temperatura ao longo do ano para dados de uma estação meteorológica situada na cidade de Mineiros, estado de Goiás, situada acerca de 60km a nordeste do Parque numa altitude de 760 metros. A escala à esquerda corresponde à temperatura média mensal,  $T(^{\circ}\text{C})$ , representada pela linha pontilhada no gráfico. A escala à direita corresponde à precipitação,  $P(\text{mm})$ , representada pela linha sólida no gráfico. Para se efetuar a comparação da precipitação com a temperatura, o diagrama climático deve obedecer a proporção de escalas  $T(^{\circ}\text{C}) = 2 \times P(\text{mm})$ .

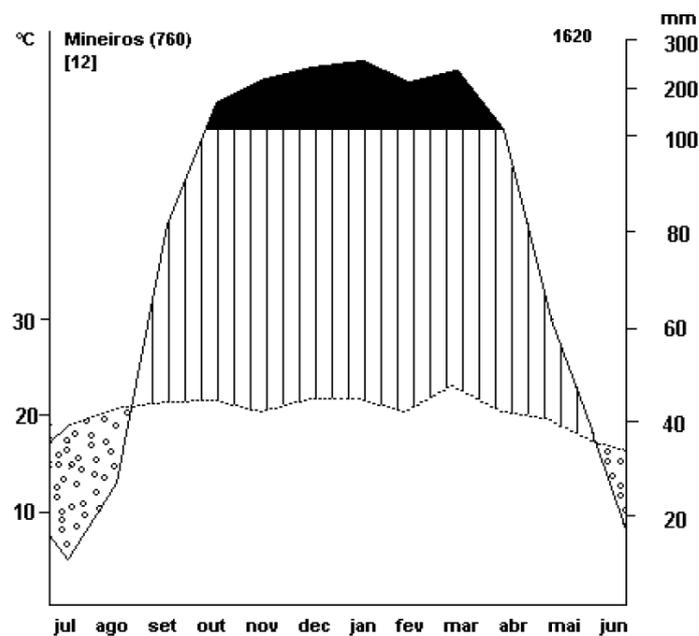


Figura 2.3 - Diagrama climático para a região da cidade de Mineiros, estado de Goiás. A escala à esquerda corresponde à temperatura média mensal, representada pela linha pontilhada no gráfico. A escala à direita corresponde à precipitação, representada pela linha sólida no gráfico. Fonte: Ramos Neto (2000).

O diagrama climático indica se existe água suficiente para a vegetação. Se a curva

de pluviosidade média em um mês é menor que a da temperatura média, ou seja, quando  $P(\text{mm}) < 2 \times T(^{\circ}\text{C})$ , então existe estresse hídrico para a vegetação. O período de seca corresponde aos meses junho, julho e agosto. Durante o mês de setembro ocorre a transição entre a estação seca e a úmida. A estação úmida se estende de outubro a abril. Durante o mês de maio ocorre a transição entre a estação úmida e a estação seca.

### 2.3 Topografia

Para toda a área de abrangência do Parque podemos identificar duas unidades de forma de relevo. A primeira, que corresponde à maior parte da área do Parque, é situada no topo de uma chapada e apresenta relevo predominantemente plano. A segunda, situada a nordeste do Parque, apresenta relevo ondulado, com vales mais acentuados nas drenagens. A Figura 2.4(a) mostra a altimetria da região do Parque e entorno.

Conforme observado nos mapas de altimetria (Figura 2.4(a)) e de declividade<sup>1</sup> (Figura 2.4(b)), na primeira unidade, o terreno encontra-se em altitudes que variam de 800 a 890 metros em maior proporção com vales abertos e declividade predominantemente plana, seus rios tem poucos afluentes e com declividade suave ondulado. Já na segunda unidade, apresenta relevo ondulado, vales acentuados e a drenagem é mais densa.

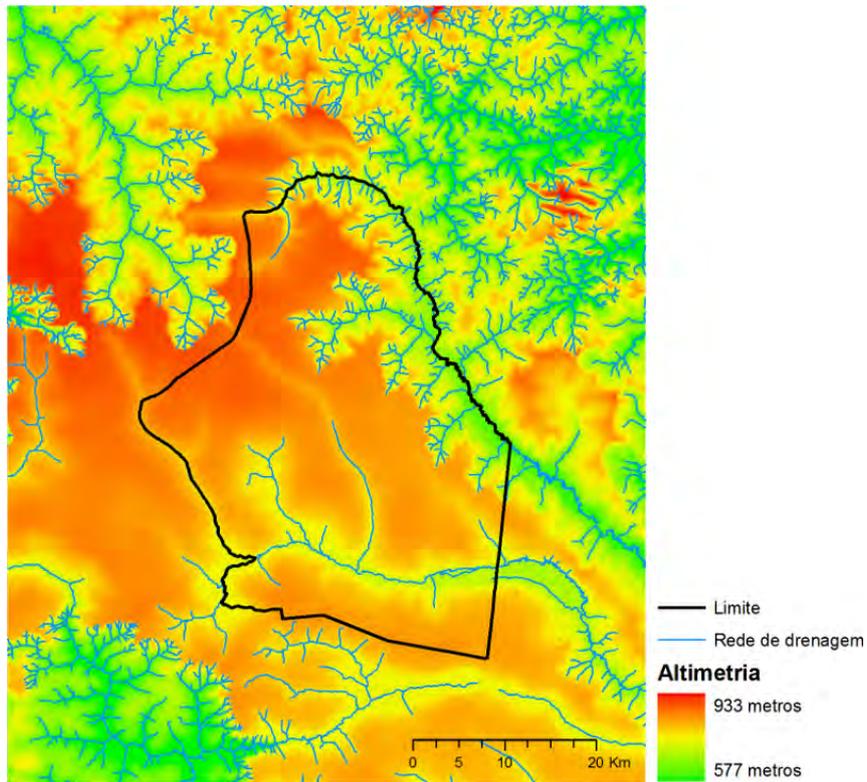
Áreas planas, com declividade suave, e sujeitas a inundações sazonais ou permanentes devido à dificuldade de escoamento das águas pluviais, ocorrem principalmente acompanhando as áreas de drenagem. A Figura 2.5 identifica estas áreas.

### 2.4 Vegetação

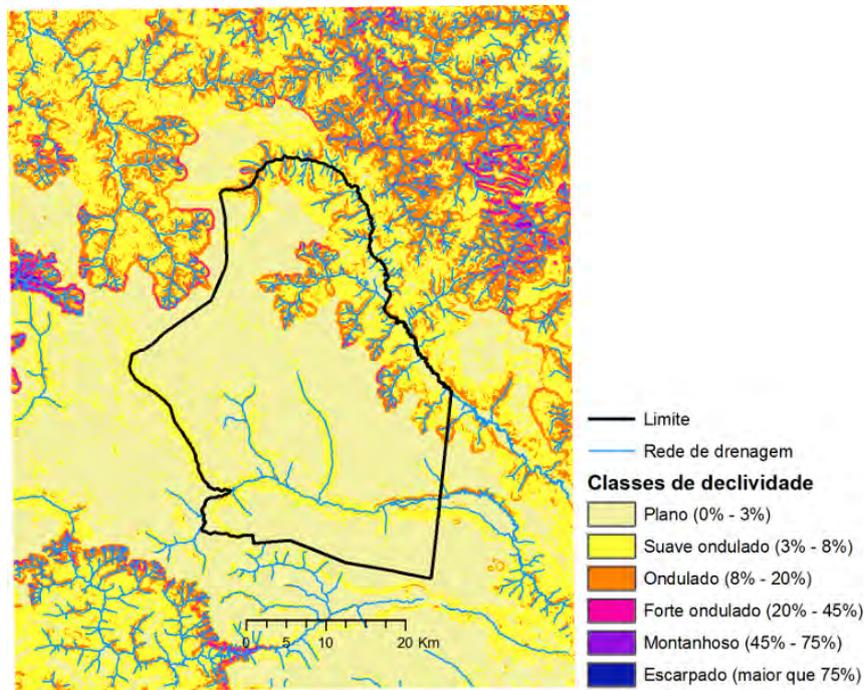
O Parque Nacional das Emas apresenta quase todas as variações fisionômicas encontradas para este bioma, e nele predominam as fisionomias abertas da vegetação de cerrado. Estimativas obtidas a partir da interpretação de imagens do satélite LANDSAT indicam que os campos limpos, campos sujos e campos cerrados somam cerca de 78,5% da área (RAMOS NETO, 2000). A Figura 2.6 mostra o mapa de vegetação do Parque Nacional das Emas.

---

<sup>1</sup>A declividade é definida como o ângulo de inclinação (zenital) da superfície do terreno em relação à horizontal. Seus valores podem variar de  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ , embora seja mais comumente expressa em porcentagem, de zero a infinito. Ou seja, em um terreno com 45% de declividade, a cada 100 metros que pudéssemos andar no sentido horizontal, subimos 45 metros em termos de altura. As classes de declividade utilizadas são baseadas na classificação proposta em (EMBRAPA, 1999).



(a) altimetria



(b) declividade

Figura 2.4 - Mapas de altimetria e declividade do Parque Nacional das Emas e entorno. As linhas em azul representam a rede de drenagem e a linha em preto indica os limites do Parque.

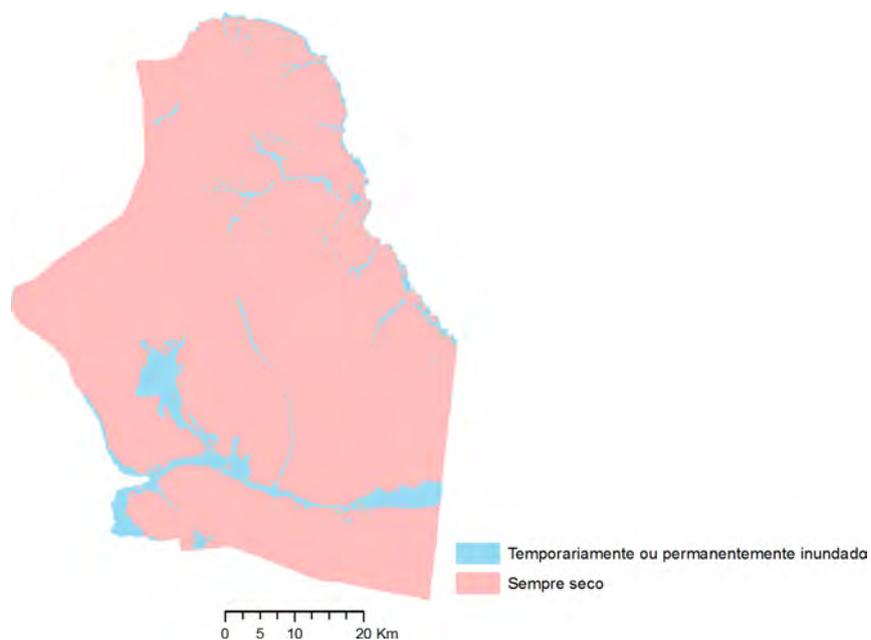


Figura 2.5 - Áreas úmidas do Parque Nacional das Emas.

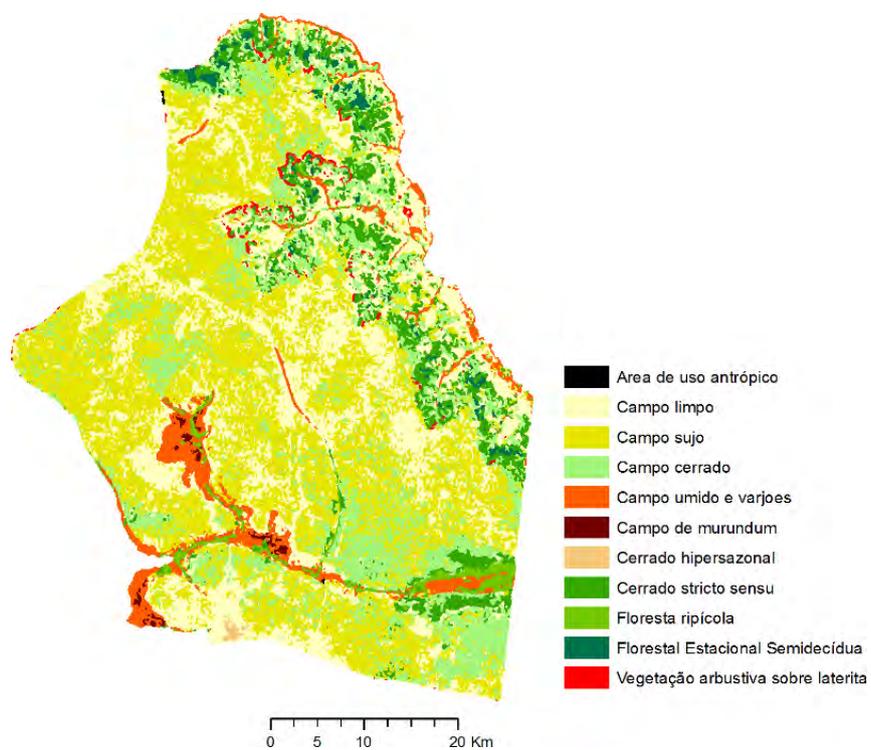


Figura 2.6 - Vegetação do Parque Nacional das Emas.  
Fonte: (FRANÇA et al., 2007)

Os principais tipos fisionômicos encontrados no Parque Nacional das Emas são brevemente descritas como:

- **Campo limpo:** predomínio de espécies herbáceo-subarbustivas, densidade muito baixa de arbustos e sem indivíduos arbóreos. Ocorre nas áreas mais planas, em que o lençol freático é profundo;
- **Campo sujo:** predomínio de espécies herbáceo-subarbustivas, mas com densidade maior de arbustos e alguns indivíduos arbóreos esparsos. Como o campo limpo, também ocorre nas áreas mais planas e mal drenadas. A gramínea mais abundante é, da mesma forma, o capim-flecha;
- **Campo cerrado:** predomínio de espécies herbáceo-subarbustivas, mas com uma densidade razoável de arbustos e árvores. Ocorre em áreas mais íngremes, em que o lençol freático é menos profundo;
- **Cerrado stricto sensu:** predomínio de espécies arbustivo-arbóreas, em densidades muito altas. Ocorre também em áreas mais íngremes e com lençol freático menos profundo.
- **Floresta estacional semidecídua:** ocorre sobre solos provavelmente mais férteis, em áreas de interflúvio. O dossel fica em torno de 20 m de altura;
- **Floresta ripícola:** ocorre associada aos cursos de água, com dossel em torno de 15 m. A floresta ripícola pode ser subdividida em floresta galeria, quando as copas das árvores das duas margens se tocam, floresta ciliar, quando as copas das árvores das duas margens não se tocam, e floresta paludícola, quando situada em solo permanentemente encharcado;
- **Campo úmido e varjões:** ocorre nas várzeas dos rios, entre a floresta ripícola ou a vereda e o cerrado, bem como nas nascentes, em que há o afloramento do lençol freático. A densidade de espécies herbáceas é muita alta, com até 1 m de altura;
- **Campo de Murundum:** ocorre entre o campo úmido e o cerrado, como pequenas elevações de cerca de 1 m de raio e de 0,2 a 0,5 de altura, nas quais aparecem espécies de cerrado, em meio às espécies de campo úmido nos locais mais baixos.

Os campos limpos, os campos sujos e os campos cerrados predominam nas áreas planas situadas de topo da chapada. Nas partes baixas da chapada predominam

áreas de cerrado stricto sensu. A vegetação de cerrado mais fechada como o caso das florestas estacionais semidecíduas e florestas ripícolas ocorre em maior predomínio nas drenagens. Campos úmidos e campos de murunduns ocupam áreas planas sazonalmente ou permanentemente inundadas situadas nas regiões de declividade suave às margens das drenagens.

## 2.5 Histórico de ocorrência de incêndios

Ecologistas consideram o fogo como um importante agente abiótico que atua sobre um ecossistema (distúrbio ecológico) (COCHRANE; RYAN, 2009), podendo ocorrer tanto como um processo natural, quanto como um processo de causa antropogênica. No caso do Cerrado, estudos comprovam que o fogo é o seu principal elemento estruturante, e que a diversificação na vegetação induzida pelo fogo iniciou entre 10 e 4 milhões de anos atrás (SIMON et al., 2009). Os raios são o principal agente causador do fogo natural no Cerrado (RAMOS NETO; PIVELLO, 2000; MIRANDA et al., 2002).

Embora o fogo seja um evento endógeno e importante para a estruturação do Cerrado, nos dias de hoje, a pressão humana sobre este bioma gera um outro impacto negativo: o fogo exógeno ou de origem antrópica. O uso indiscriminado do fogo visando a limpeza da superfície para plantio e renovação de pastagens, é nocivo e devastador, ao contrário dos incêndios de causas naturais (RAMOS NETO; PIVELLO, 2000).

Os incêndios naturais possuem a sua maior incidência durante a transição da estação seca para a chuvosa, e na estação chuvosa. Normalmente são seguidos por chuvas. Durante esses períodos, o teor de água no solo e umidade atmosférica encontra-se elevado, a temperatura do ar encontra-se amena, desfavorecendo a ocorrência de estresse hídrico da vegetação. Ou seja, as condições ambientais em que os incêndios naturais ocorrem favorecem incêndios de baixa intensidade e limitados a pequenas áreas. Já os incêndios de causa antropogênica ocorrem geralmente no período seco, onde predominam elevadas temperatura da atmosfera, baixa umidade relativa do ar, vegetação seca e ventos fortes, ocorrem em um cenário propício ao desenvolvimento de incêndios de grandes magnitudes.

França et al. (2007) reconstruiu o histórico de ocorrência de incêndios no Parque Nacional das Emas, baseado em mapeamento sistemático obtido pela interpretação visual da resposta espectral de “cicatrices” deixadas por incêndios em imagens dos satélites LANDSAT (séries 3, 5 e 7) e CBERS (séries 2 e 2B), que datam desde 1973

até o período atual. Estas informações compreendem um ingrediente essencial para o desenvolvimento de estudos que visem compreender o comportamento do fogo no Parque, as suas causas e os efeitos. A partir deste mapeamento, França et al. (2007) identificaram três regimes de ocorrência de incêndios pelos quais o Parque passou nas últimas décadas. Estes regimes são descritos a seguir.

### **2.5.1 O período de 1973 a 1983**

Neste período predominaram os grandes incêndios de causa antropogênica (FRANÇA et al., 2007). Eles ocorreram durante a estação seca para manejo de pastagens naturais. Os fazendeiros realizavam queimadas frequentes e programadas em suas terras visando provocar a rebrota da vegetação que alimentava o gado. Alguns rebanhos eram inclusive criados dentro dos limites do Parque. Como não haviam medidas para impedir este tipo de uso indiscriminado do fogo, que era realizado tanto dentro do Parque quanto nas propriedades dos seus entornos, ocorriam incêndios que se propagavam por extensas áreas no interior do Parque. Os incêndios documentados para este período de mapeamento<sup>2</sup> são exibidos nas Figuras 2.7 (1973–1978) e 2.8 (1979–1983).

### **2.5.2 O período de 1983 a 1994**

Uma das principais ações de prevenção do fogo incluída no Plano de Manejo do Parque, elaborado em 1981, foi construir uma rede de aceiros que percorressem seu interior e seus entornos. O aceiro é uma técnica de prevenção de incêndios onde regiões de descontinuidades são traçadas na vegetação visando conter uma possível propagação do fogo. A rede começou a ser confeccionada em 1984 e foi concluída em 1987, totalizando 348 km de comprimento, e dividindo o Parque em 20 blocos. A ideia é que, caso o incêndio ocorra em algum bloco, este fica contido nesta região devido a ação dos aceiros que impossibilitam o avanço do fogo para os demais blocos. Aceiros também foram confeccionados para conter o fogo vindo de áreas exteriores ao Parque. Um dos grandes desafios da confecção desta rede de aceiros seria a sua manutenção anual, meta que nunca foi cumprida e sua manutenção sempre foi parcial durante este período. O Plano de Manejo também aboliu o uso e como consequência a queima intencional de pastagens no interior do Parque. Como consequência dessas medidas, a vegetação passou a desenvolver-se sem interferência, e a biomassa seca passou a

---

<sup>2</sup>Esta série de de queimadas mapeadas estão, em geral, subestimadas por motivos diversos como imagens indisponíveis, como o caso de 1974, ou insuficientes, pois quando disponíveis, as mesmas não cobriam toda a extensão do Parque. A informação do incêndio de 1978 foi baseada em depoimento oral.

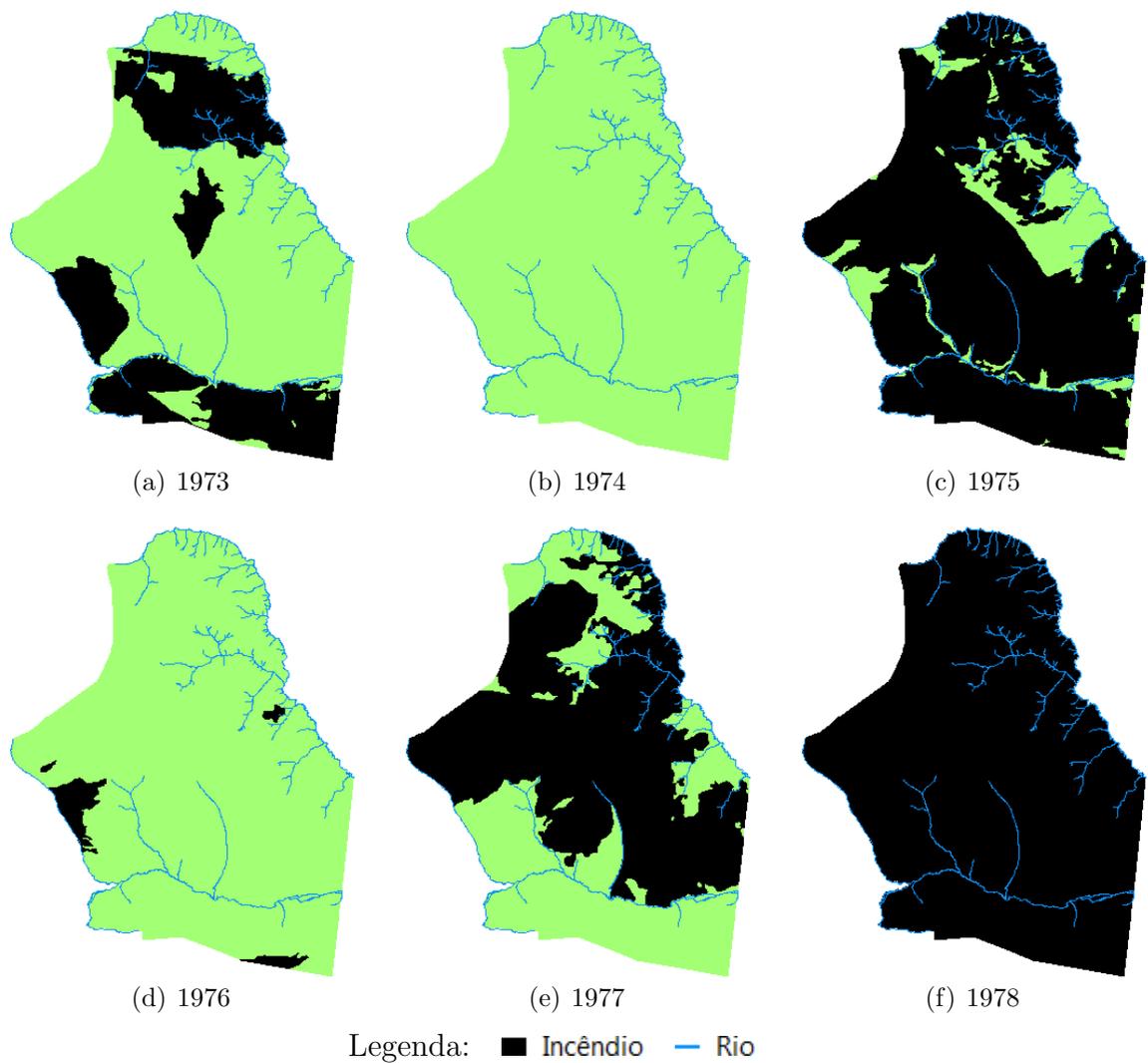


Figura 2.7 - Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de 1973 a 1978.

Fonte: (FRANÇA et al., 2007)

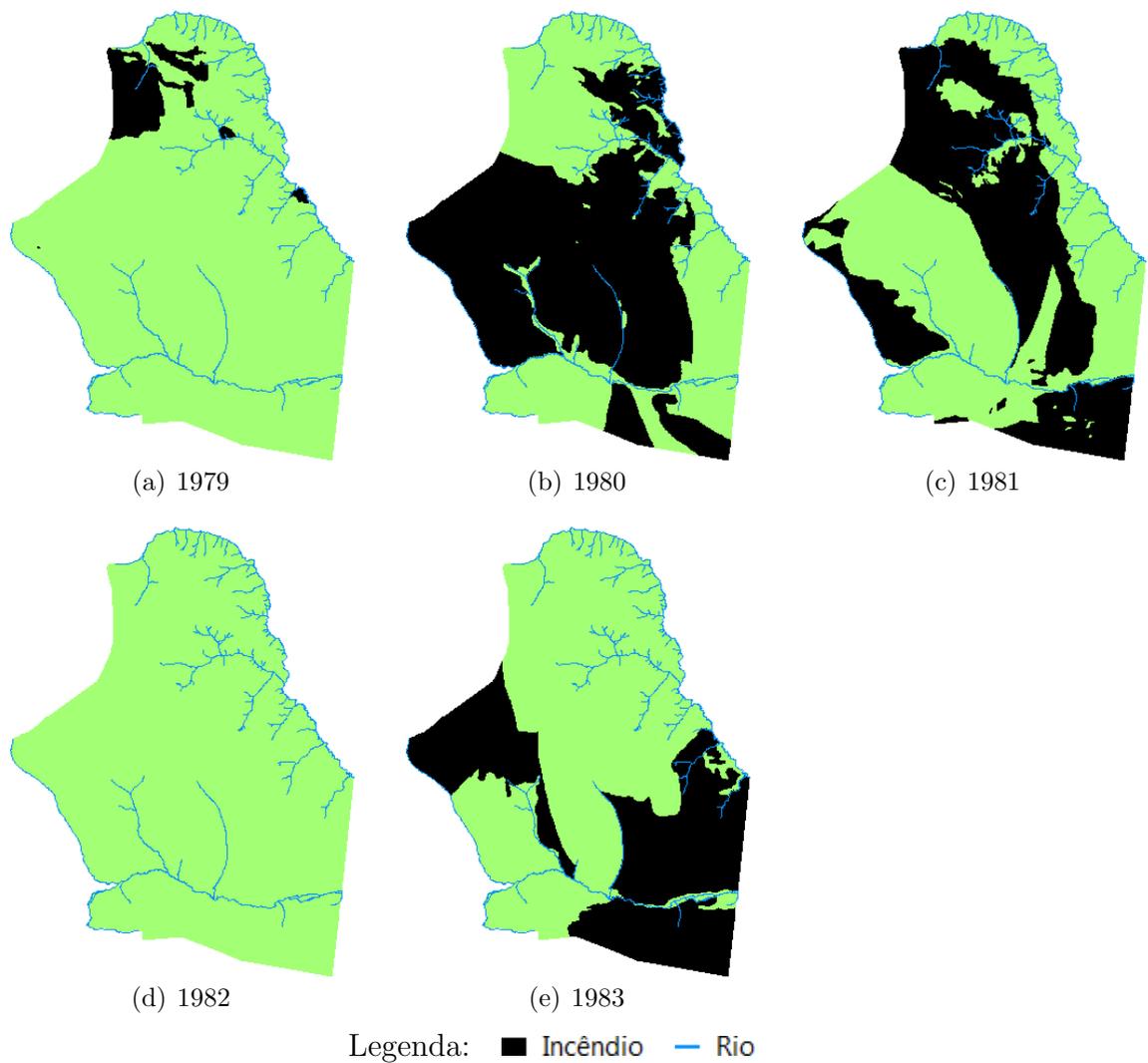


Figura 2.8 - Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de 1979 a 1983.

Fonte: (FRANÇA et al., 2007)

acumular ano a ano até atingir um valor crítico ao final de três anos. Medidas para evitar a entrada do fogo vindo de áreas exteriores ao Parque foram inefetivas e esse período é marcado por grandes e incontroláveis incêndios que ocorriam de 3 em 3 anos. Os incêndios documentados para este período de mapeamento são exibidos nas Figuras 2.9 (1984–1989) e 2.10 (1990–1994).

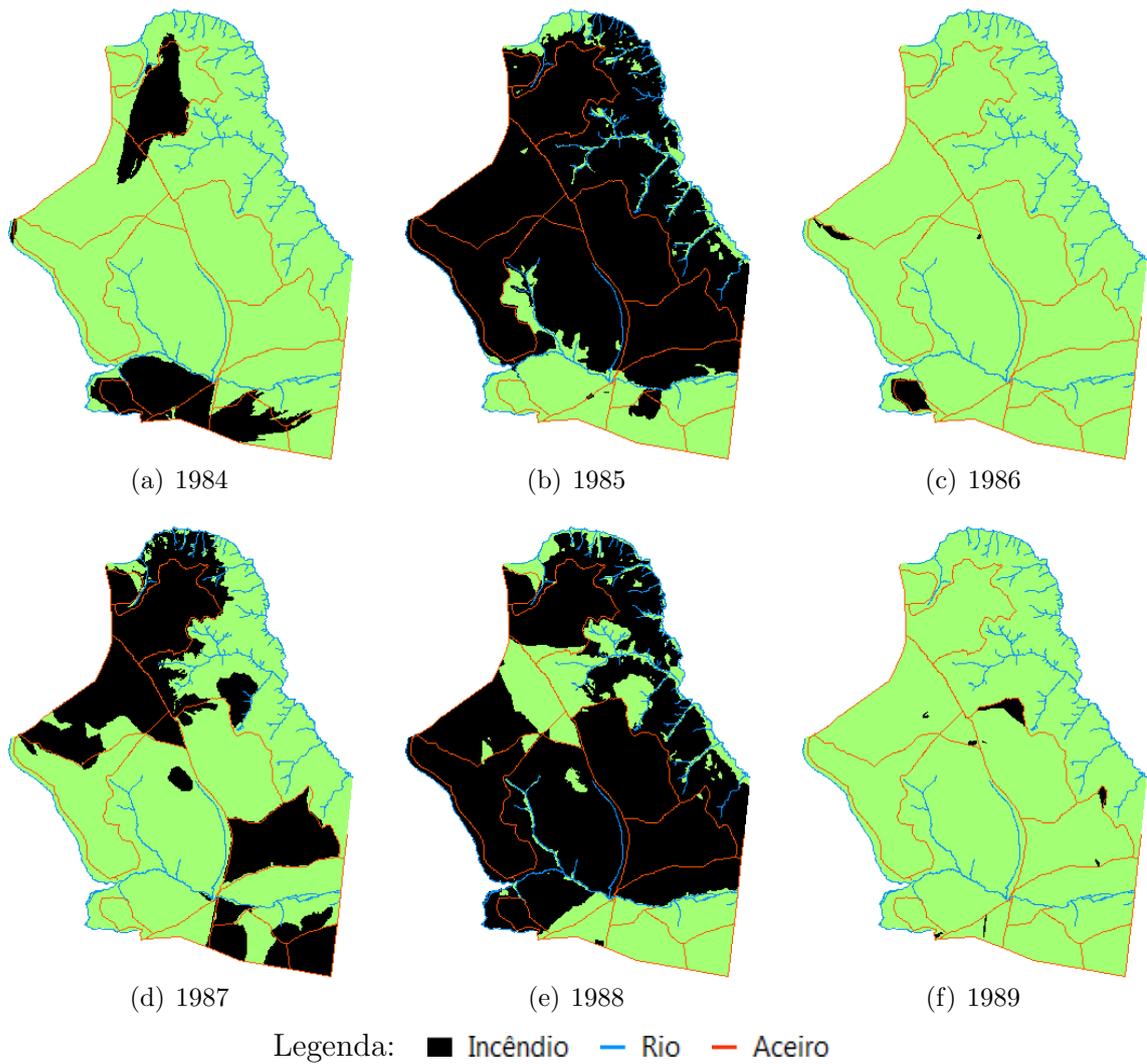


Figura 2.9 - Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de 1984 a 1989.

Fonte: (FRANÇA et al., 2007)

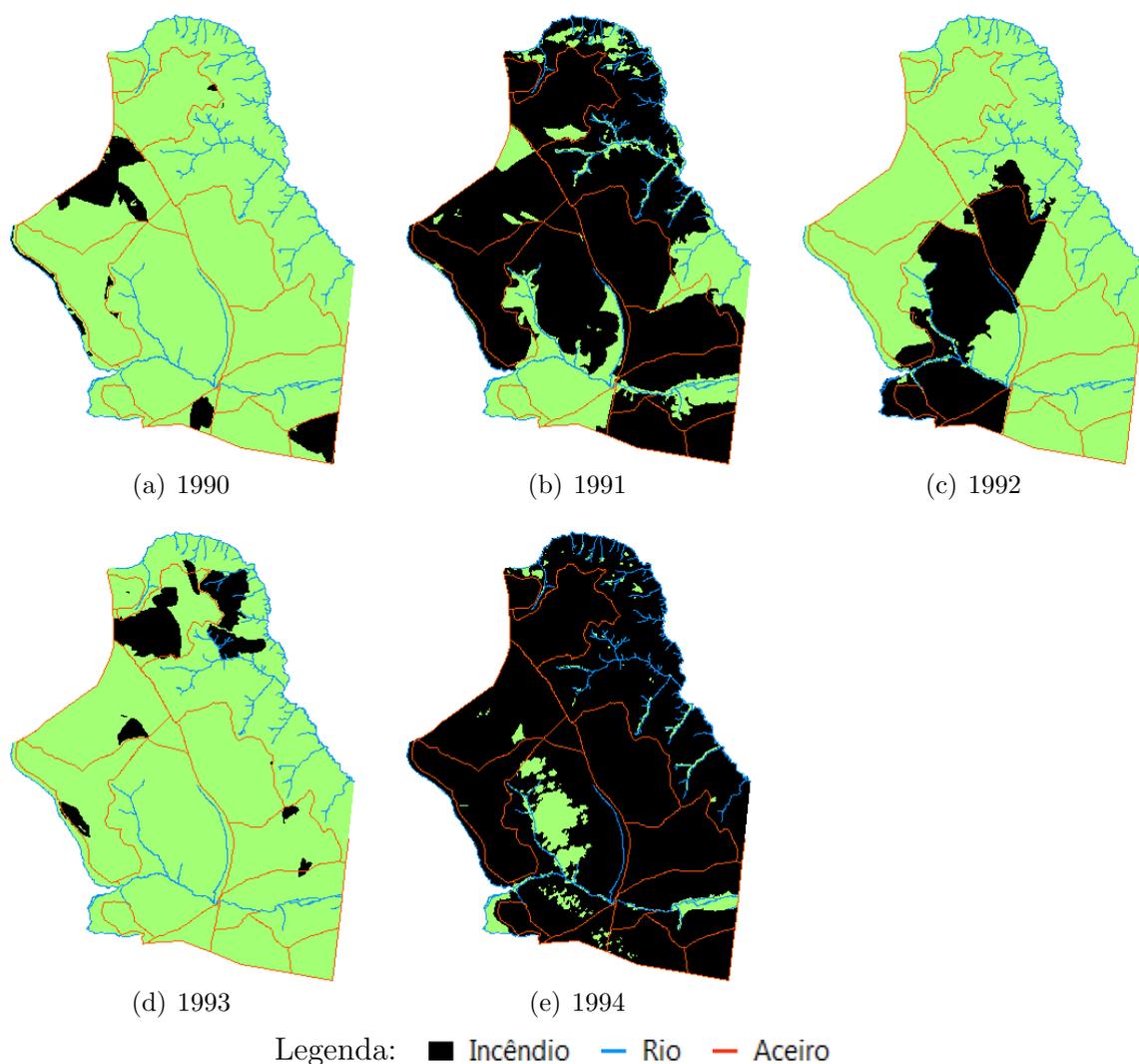


Figura 2.10 - Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de 1990 a 1994.

Fonte: (FRANÇA et al., 2007)

### 2.5.3 O período de 1995 até o presente

O grande incêndio ocorrido em 1994, onde toda a extensão do Parque foi consumida pelo fogo<sup>3</sup>, conforme mostrado na Figura 2.10(e), teve repercussão muito negativa entre os segmentos da sociedade envolvidos com questões ambientais. A partir de então, o órgão responsável pela gestão do Parque passou a aplicar mais rigorosamente

<sup>3</sup>No grande incêndio de 1994, com exceção de algumas áreas úmidas, toda a extensão do Parque foi consumida pelo fogo. Na Figura 2.10(e), as áreas não identificadas como área queimada na região central e próximo ao extremo norte são áreas cobertas por nuvens que não permitiram o mapeamento. Porém, o próprio IBAMA considera que a ocorrência de 1994 abrangeu 100% do Parque.

as medidas de prevenção de incêndios de origem antrópicas no seu interior e no seu entorno. A manutenção dos aceiros passou a ser feita anualmente, mostrando-se eficiente na prevenção da entrada do fogo vindo de áreas externas ao Parque. Somado a isso, uma brigada de combate ao fogo passou a permanecer no Parque durante a estação seca. Desde então, incêndios de causa antropogênica tornaram-se raros. Alguns deles ocorreram por acidentes durante a confecção dos aceiros, onde o fogo é utilizado neste processo.

Os incêndios passaram a ser identificados em relação à sua causa (antrópica ou natural) e os intervalos anuais de observação foram modificados, passando a ter início no mês de junho, princípio da estação seca, e término no mês de maio do ano seguinte. Os incêndios documentados para o período de Junho de 1995 até Maio de 2010 são mostrados nas Figuras 2.11 (Junho de 1994 – Maio de 2001), 2.12 (Junho de 2001 – Maio de 2007) e 2.13 (Junho de 2007 – Maio de 2010).

O regime atual de incêndios no Parque, ao contrário dos períodos anteriores onde ocorriam incêndios que atingiam quase toda a área do Parque, é definido por incêndios de menores proporções, com diferentes tamanhos e localizações. Como resultado temos um verdadeiro mosaico sobre a vegetação do Parque, onde as áreas queimadas recentemente não atingem densidade de biomassa suficiente para a propagação do fogo e estas atuam como barreiras à propagação do fogo. Na Figura 2.14(b) os incêndios (1) e (2), que ocorreram dentro do período de Junho de 2002 a Maio de 2003, contornaram áreas queimadas no período de mapeamento anterior, conforme observado na Figura 2.14(a). O incêndio (3), também indicado na Figura 2.14(b), é um exemplo de incêndio onde as barreiras naturais (rios ou áreas úmidas) e artificiais (aceiros) não foram suficientes para conter a propagação do fogo. Evento este pode estar consequência ou da ineficiente manutenção dos aceiros, ou de eventos extremos, onde a velocidade do vento é suficiente intensa, a ponto de fagulhas ou pedaços de vegetação em chamas serem transportados para o outro lado do obstáculo, fenômeno conhecido na literatura pelo termo em inglês *spotting* (PYNE et al., 1996).

O mosaico de diferentes classes de densidade de biomassa combustível sobre a vegetação pode ser obtido a partir do mapeamento das classes de anos sem queima. Com o grande incêndio de 1994, a densidade de biomassa combustível ao longo de toda a extensão do Parque atingiu um nível inicial nulo uniforme, ou seja, todo o Parque foi consumido pelo fogo. Com isso, a partir desta data tornou-se possível mapear as classes de anos sem queima, calculado como o tempo em anos contado desde o última vez que o fogo ocorreu em uma dada região do Parque. A Figura 2.15

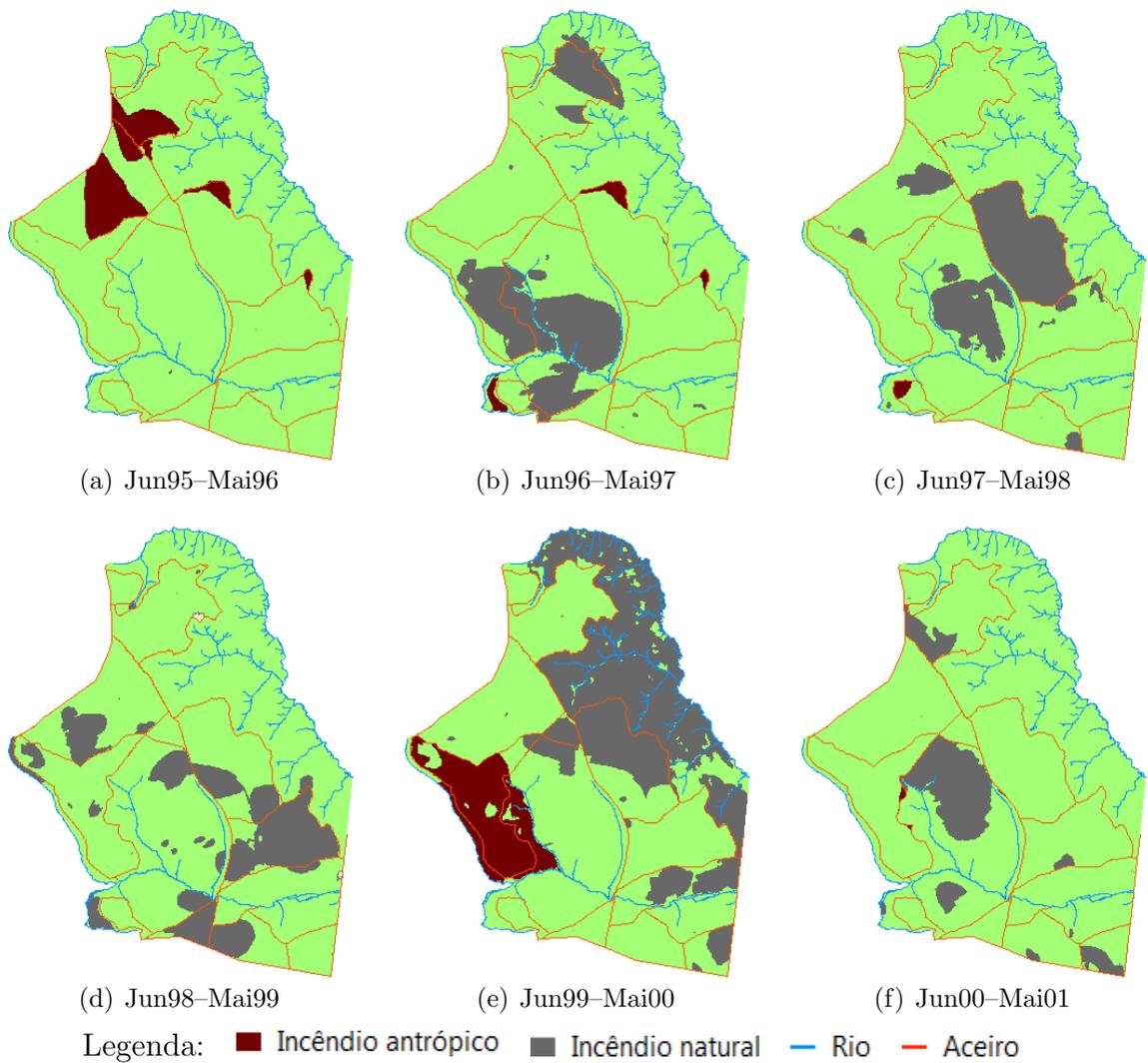


Figura 2.11 - Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de Junho de 1994 a Maio de 2001.  
 Fonte: (FRANÇA et al., 2007).

mostra o mapa de anos sem queima contado desde o grande incêndio de 1994 até Junho de 2002. Podemos verificar que o incêndio (1) na Figura 2.14(b) se extinguiu ao atingir uma região queimada entre 0 e 1 ano atrás, além de ser contido pelos aceiros nas outras extremidades. Já o incêndio (2), sua área queimada contornou uma área queimada entre 0 e 1 anos.

O mosaico de anos sem queima é uma informação importante que nos permite inferir sobre a susceptividade ou capacidade de suportar o fogo, e a severidade ou intensidade da queima. Pelo mosaico é possível, por exemplo, identificar áreas que não são atingidas pelo fogo há mais tempo e que, portanto, devem ter uma maior

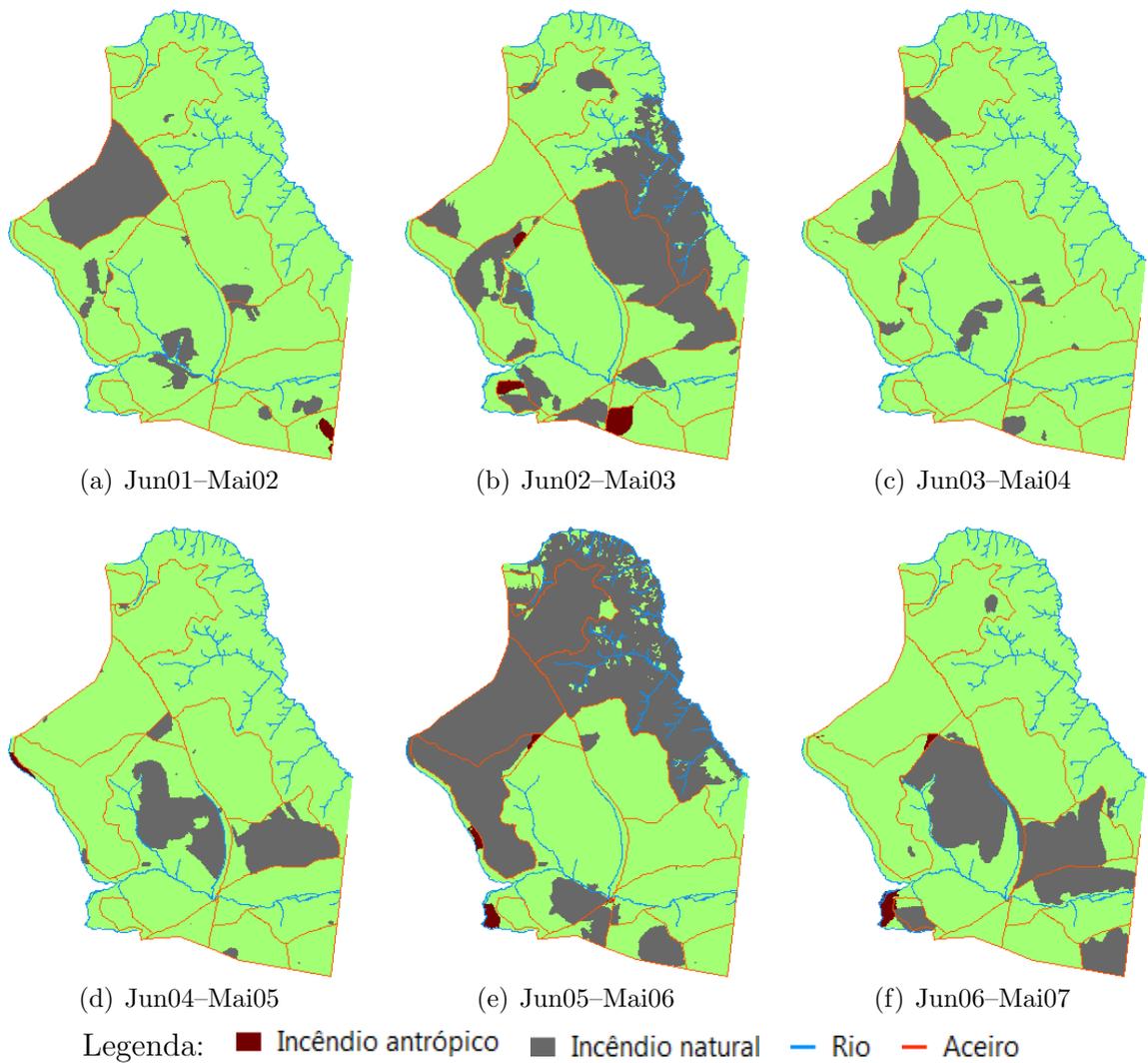


Figura 2.12 - Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de Junho de 2001 a Maio de 2007.  
 Fonte: (FRANÇA et al., 2007).

densidade biomassa combustível acumulada, sendo então mais susceptíveis ao fogo que regiões atingidas pelo fogo mais recentemente. Quanto mais biomassa combustível acumulada, mais intensa será a queima, logo, regiões que não são atingidas pelo fogo há mais tempo são mais propensas à ocorrência de grandes e incontrolláveis incêndios. De maneira inversa, as regiões recentemente atingidas pelo fogo possuem menor quantidade de densidade de biomassa combustível, são menos susceptíveis a suportar o fogo e, caso o fogo ocorra, a severidade da queima será menor, e, uma vez iniciado, o fogo pode inclusive se extinguir. Esta dependência pode se dar também em função da estrutura da vegetação, ou seja, cada tipo de vegetação pode possuir

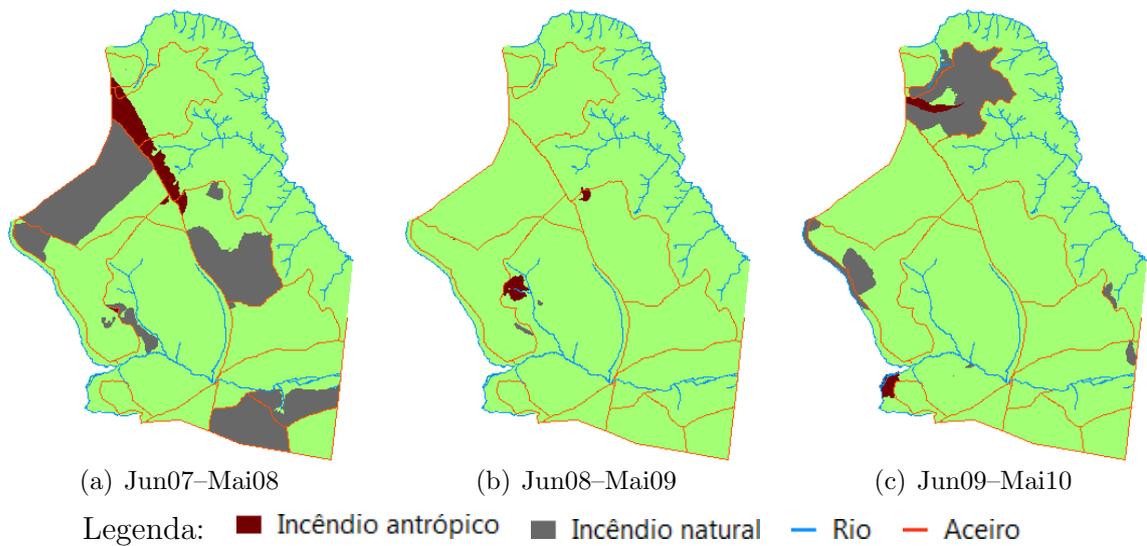


Figura 2.13 - Incêndios ocorridos no Parque Nacional das Emas para o período de Junho de 2007 a Maio de 2010.

Fonte: Dados não publicados.

uma específica susceptividade ao fogo ao longo de tempo.

## 2.6 Análise temporal da ocorrência de incêndios nas fisionomias abertas

Segundo Falk et al. (2007), o fogo é parte estruturante de um ecossistema, e a sua incidência e ocorrência é governada por uma série de fatores como: (i) as condições climáticas e meteorológicas, definida principalmente em termos de duração e de intensidade das estações secas e chuvosas; (ii) as características da vegetação, onde o tipo de vegetação, a distribuição espacial, a sensibilidade ao fogo e consequente regeneração pós-queima, e a dinâmica de acúmulo de combustível vegetal, são importantes fatores que condicionam a ocorrência do fogo; e (iii) as características do relevo, onde as feições topográficas podem contribuir para a incidência e ocorrência de certos regimes de incêndios.

Uma importante variável ecológica, que caracteriza o regime de fogo para um dado ecossistema, é o chamado tempo de retorno do fogo  $t$  ( $t > 0$ ), definido como o intervalo de tempo entre dois eventos de queima (POLAKOW; DUNNE, 1999). A dependência temporal da inflamabilidade dos combustíveis vegetais para um dado tipo de vegetação define-se a partir da análise estatística do tempo de retorno do fogo (POLAKOW; DUNNE, 1999; MORTIZ, 2003; DÍAZ-DELGADO et al., 2004; OLIVEIRA; MARQUIS, 2002; FERNANDES et al., 2012).

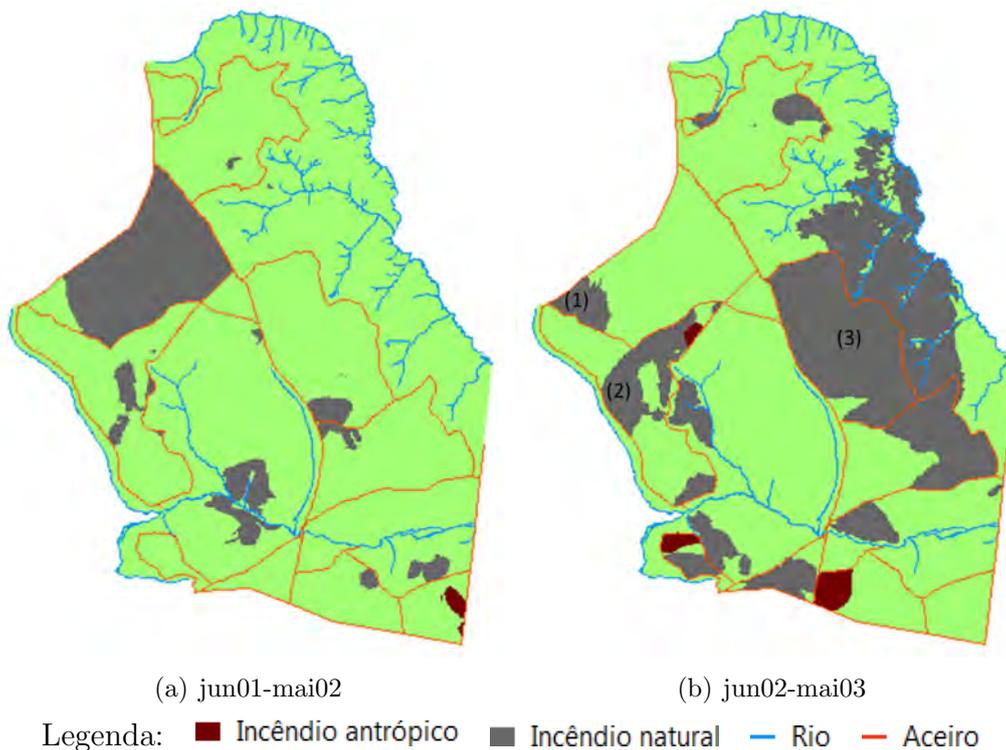


Figura 2.14 - Efeito do mosaico de incêndios de diferentes datas, tamanhos e localizações sobre a vegetação. Para os incêndios (1) e (2) em (b), áreas queimadas a menos de 1 ano, conforme observadas em (a), atuam como barreiras à propagação do fogo. No incêndio (3), vemos que, nem sempre, rios e aceiros atuam como barreiras à propagação.

Fonte: (FRANÇA et al., 2007)

Com base na cronologia de ocorrência de incêndios, que abrange o período de 1984 à 2010, investigamos a dependência temporal da ocorrência do fogo nas fisionomias abertas do Parque Nacional das Emas. Esta região amostral, que inclui as fisionomias campo limpo, campo sujo e campo cerrado, ocupa um pouco mais de 80% da extensão do Parque, sendo situada principalmente na área de topo de chapada, e concentra a maioria das ocorrências de incêndios. A Figura 2.6 mostra a região de cerrado aberto do Parque.

A análise estatística parte de uma amostragem pontual e uniformemente distribuída sobre a área de cerrado aberto, com pontos regularmente espaçados a uma distância de 90 metros. Para cada amostra pontual, recuperamos o histórico de ocorrência de incêndios para o período de estudo, e os intervalos de tempo entre dois eventos de incêndios são contabilizados. A contabilização do tempo de retorno considera apenas eventos ocorridos a partir de 1984, desprezando qualquer evento ocorrido antes deste

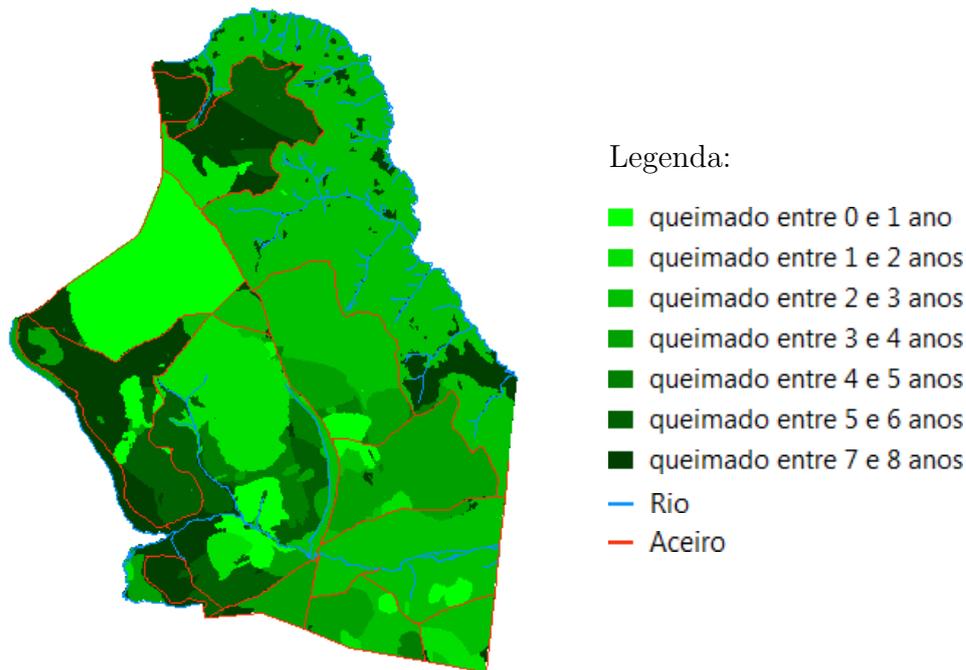


Figura 2.15 - Mapa de anos sem queima até maio de 2002.  
 Fonte: (ALMEIDA et al., 2008)

período. Os valores obtidos para a variável aleatória tempo de retorno do fogo  $t$  são armazenados, e em seguida a análise estatística é executada.

O modelo paramétrico mais comumente utilizado em estudos da frequência do fogo é o modelo de Weibull (JOHNSON; GUTSELL, 1994; JOHNSON, 1996). A função de distribuição de anos sem queima, também chamada de função de sobrevivência (*survivorship*) ao fogo,  $A(t)$ , é a função que nos dá a probabilidade de o fogo não ocorrer até um tempo  $t < T$  é dada por:

$$A(t) = \Pr(t < T) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{b} \right)^c \right]. \quad (2.1)$$

Quando  $t = 0$  temos  $A(t) = 1$ , e  $\lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = 0$ . Os parâmetros  $b$  e  $c$  do modelo de Weibull são denominados, respectivamente, parâmetro de escala e parâmetro de forma.

A função de distribuição complementar de  $A(t)$ , dada por:

$$F(t) = \Pr(t \geq T) = 1 - A(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{b} \right)^c \right], \quad (2.2)$$

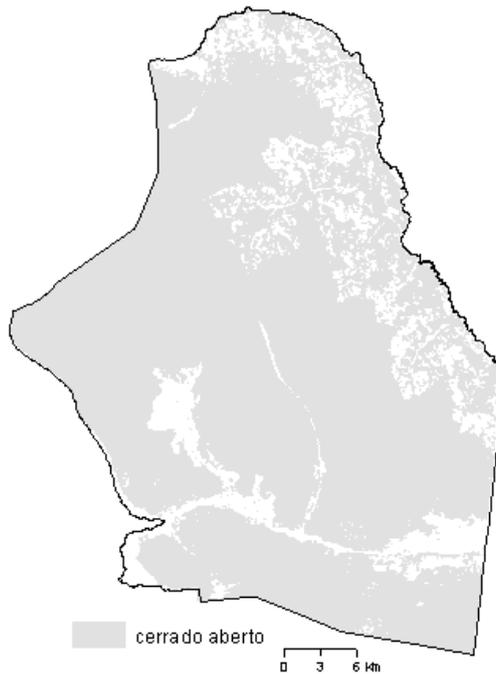


Figura 2.16 - Área de abrangência das fisionomias abertas presentes no Parque Nacional das Emas sobre a qual definiu-se o processo de amostragem.

é conhecida como função de distribuição cumulativa de ocorrência do fogo, e corresponde à probabilidade de o fogo ocorrer para  $t \leq T$ . Quando  $t = 0$  temos  $F(t) = 0$ , e  $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$ .

A função de densidade de probabilidade do tempo de retorno do fogo, também conhecida como função de distribuição de ocorrência do fogo, corresponde à probabilidade de o fogo ocorrer em um intervalo de tempo de  $T$  a  $T + \Delta t$  por unidade de tempo, é dada por:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Pr(T < t < T + \Delta t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{ct^{c-1}}{b^c} \exp \left[ - \left( \frac{t}{b} \right)^c \right], \quad (2.3)$$

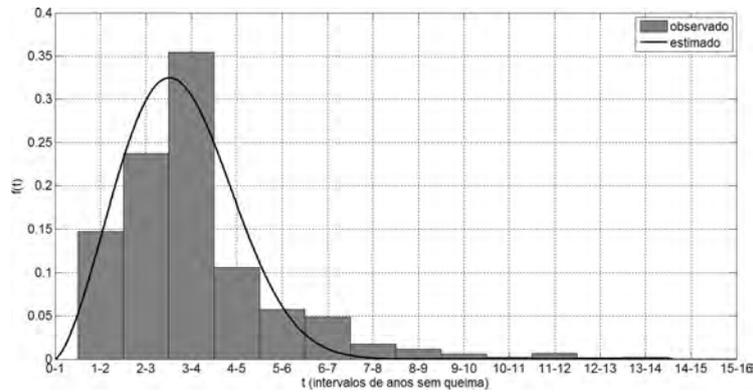
onde  $\int_0^\infty f(u) du = 1$ .

Com base nos valores de tempo de retorno do fogo obtidos, a função de distribuição cumulativa e a função de densidade de probabilidade são ajustadas, e os parâmetros da distribuição ( $b$  e  $c$ ) são obtidos. O ajuste foi realizado via método de mínimos-quadrados não-lineares utilizando as ferramentas estatísticas e de ajuste de curvas do programa MATLAB (MATLAB, 2010). Para avaliar o ajuste, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov (MASSEY JR, 1951), teste de hipótese que avalia, com deter-

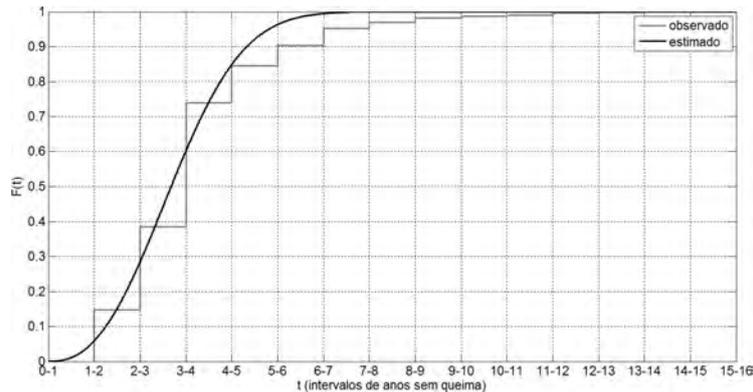
minado nível de significância, se um conjunto de dados são bem representados pela distribuição obtida no ajuste. A hipótese nula,  $H_0$ : os dados seguem a distribuição do ajuste, foi aceita com nível de significância de 0,01. Os valores estimados para os parâmetros  $b$  e  $c$ , e o erro obtido no ajuste (raiz quadrada do erro quadrático médio) são mostrados na Tabela 2.1. Os gráficos da Figura 2.17 mostram as funções de distribuição cumulativa e a função de densidade de probabilidade observadas e ajustadas para o período de análise.

Tabela 2.1 - Parâmetros estimados no ajuste da distribuição de Weibull e erro de ajuste.

$b$	$c$	$RMSE$
3,10	2,49	0,03



(a)  $f(t)$



(b)  $F(t)$

Figura 2.17 - Valores de distribuição de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa observados e estimados pela função de Weibull para o tempo de retorno do fogo obtido no período de 1984-2010 no Parque Nacional das Emas.

O gráfico 2.17(a) descreve a distribuição de densidade de tempo de retorno do fogo para o período de análise. Percebe-se o pico concentrado no intervalo de queima entre 3 e 4 anos, que é consequência do comportamento fenológico do capim-flecha (*Tristachya leiostachya*), a gramínea que domina as fisionomias abertas do Parque Coutinho (1990). Esta gramínea é responsável por um grande incremento de fitomassa combustível, que atinge um valor crítico no período de 3 a 4 anos sem queima, criando condições para grandes e incontroláveis incêndios (RAMOS NETO, 2000). Conforme a distribuição cumulativa de tempo de retorno do fogo obtida para o período de estudo, a probabilidade de o fogo ocorrer até o intervalo de 3 a 4 anos sem queima, é em torno de 75%, caracterizando uma condição crítica de acúmulo de fitomassa combustível.

A taxa de risco de ocorrência do fogo,  $\lambda(t)$ , definida como:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{A(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{ct^{c-1}}{b^c}, \quad (2.4)$$

caracteriza a taxa instantânea (probabilidade por unidade de tempo) de ocorrência do fogo, dado que ele ainda não ocorreu. A função  $\lambda(t)$ , também chamada de taxa de risco de queima, contém os mecanismos essenciais relacionados com o regime do fogo, e caracteriza como se dá a inflamabilidade ou capacidade de ocorrência do fogo na vegetação ao longo do tempo (JOHNSON; GUTSELL, 1994). Uma função  $\lambda(t)$  constante significa que o tempo não influencia na probabilidade de ocorrência do fogo. Se  $\lambda(t)$  for uma função crescente, significa dizer que a inflamabilidade aumenta ao longo do tempo. Para o modelo de Weibull, a função de risco de ocorrência do fogo será crescente para  $c > 1$  e constante para  $c = 1$ . A Figura 2.18 mostra a taxa de risco de queima estimada para as fisionomias abertas do Parque. Como o valor estimado do parâmetro  $c$  é maior que 1, a função  $\lambda(t)$  é crescente, mostrando a que a inflamabilidade da vegetação aumenta ao longo do tempo.

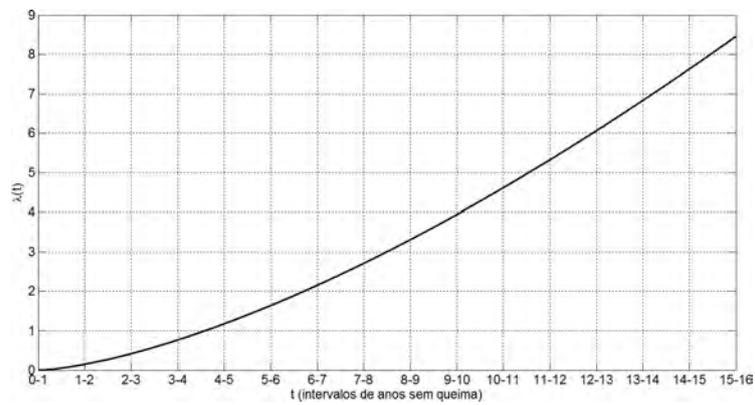


Figura 2.18 - Taxa de risco de queima para as fisionomias abertas do Parque Nacional das Emas estimada a partir de dados de tempo de retorno do fogo para o período de 1984-2010.



### 3 MODELO DE PROPAGAÇÃO DO FOGO

Este capítulo apresenta as etapas de concepção, análise exploratória, parametrização e avaliação do modelo de propagação do fogo proposto nesta tese. Primeiramente, o modelo é idealizado e descrito. Em seguida, é realizada uma análise exploratória visando verificar a capacidade do modelo em representar a dinâmica de propagação do fogo. Na etapa conseguinte, denominada etapa de parametrização, equações que relacionam os parâmetros do modelo com as condições ambientais de um incêndio são apresentadas. Estas equações incluem o tipo de vegetação, a quantidade de combustível vegetal acumulado, a umidade da vegetação, as feições topográficas, a velocidade e direção do vento. Por fim, na última etapa, as parametrizações são avaliadas independentemente, visando verificar se conseguem representar o efeito esperado sobre a dinâmica propagação do fogo.

#### 3.1 Concepção e descrição do modelo

Conforme McKenzie e Kennedy (2011), podemos descrever um incêndio como um distúrbio ecológico que se dá por um processo de contágio, no qual o fogo se alastra sobre a vegetação ao longo do tempo. Este processo de contágio é representado por duas componentes, o momento e a conectividade, que juntas condicionam a ocorrência do incêndio. O momento ou energia relaciona-se com a queima da vegetação e os mecanismos de transferência de calor. Já a conectividade relaciona-se com a abundância e a distribuição espacial da vegetação. Com base nesta descrição, podemos quantificar valores para estas componentes que, conjuntamente, condicionam a ocorrência de um incêndio. Aqui, o conceito de percolação é utilizado para representar este condicionamento (STAUFFER; AHARONY, 1994).

A teoria de percolação começou com o estudo da propagação de fluídos em meios desordenados. Nestes meios, como por exemplo, uma rocha porosa, a propagação do fluído se dá em função da porosidade, de uma forma não linear. Ou seja, existem dois regimes bem definidos, a propagação e a extinção, separados por uma transição brusca - a chamada transição de percolação. Assim, para baixos valores de porosidade, o fluído não percola o meio. Para valores acima de um valor crítico, chamado de limiar de percolação, existe uma probabilidade de percolação do fluído pelo meio poroso. A Figura 3.1 ilustra essa dependência, onde o valor limiar de percolação para a porosidade em questão é 0,5.

A teoria de percolação, quando aplicada em incêndios de vegetação, temos o meio representado pela vegetação, e o fogo como agente percolante. Neste caso, a porosi-

dade do meio é definida em termos da proporção entre áreas com vegetação e áreas sem vegetação. Nahmias et al. (2000) conduziram uma série de experimentos de propagação do fogo sobre diversos tipos de combustíveis vegetais, tanto em laboratório quanto em campo, e comprovaram a existência de um valor crítico para a proporção entre áreas com combustível e sem combustível que condicionam a propagação do fogo. Assim, para a nossa abordagem, partimos do pressuposto que existam limiares que condicionam a propagação do fogo sobre a vegetação, e que estes ficam definidos em termos das componentes momento e conectividade.

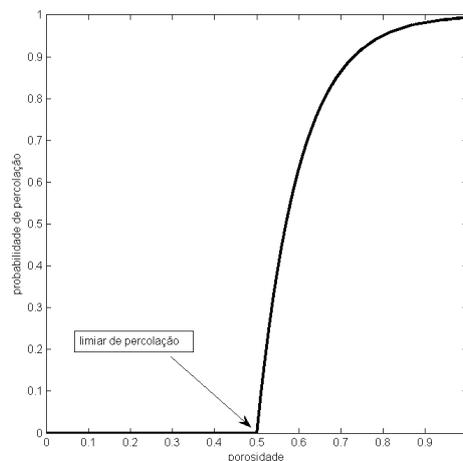


Figura 3.1 - Relação entre a probabilidade de percolação com a porosidade.

A dinâmica de propagação do fogo é modelada usando o formalismo de autômatos celulares. Os autômatos celulares são modelos matemáticos onde o espaço, o tempo e as variáveis de estado são discretos. O domínio espacial, que corresponde à paisagem, é representado por um reticulado bidimensional, quadrado e regular. O reticulado é chamado de espaço celular, e cada unidade que o constitui é chamada de célula. Cada célula possui um estado, definido a partir de um conjunto finito de possíveis estados, e um conjunto de células vizinhas, definidas a partir de uma dada configuração de vizinhança. Existe uma função local de transição de estados que representa o comportamento dinâmico das células, que determina o estado futuro da célula em função do estado presente da célula e das células vizinhas. O comportamento dinâmico das células evolui em passos discretos de tempo ou iterações.

O modelo de propagação proposto descreve a paisagem por um espaço celular bidimensional de dimensões  $L_x \times L_y$ . Cada célula possui:

- uma posição  $(i, j) \in \mathbb{Z}^2$  no espaço celular, onde  $i = 1, \dots, L_x$  é a coluna e

$j = 1, \dots, L_y$  é a linha;

- uma variável de estado  $\mathcal{S}_{(i,j)}^t$  em uma dada iteração  $t$ , que é definida a partir de um conjunto finito de possíveis estados,  $\mathcal{S}_{(i,j)}^t \in \{E, V, F, O\}$ , onde o estado  $E$  representa uma célula vazia (célula sem combustível), o estado  $V$  representa uma célula com vegetação ou célula combustível, o estado  $F$  representa uma célula queimando, e o estado  $O$  representa uma célula cuja vegetação foi consumida pelo fogo;
- uma vizinhança  $\mathcal{N}(i, j)$ , onde a vizinhança de Moore, conforme ilustra a Figura 3.2(a), é assumida no modelo, e compreende a célula e as oito células mais próximas, ou seja,  $\mathcal{N}(i, j) = \{(i^*, j^*) : |i - i^*| \leq 1, |j - j^*| \leq 1\}$ ;
- uma função de transição  $\Phi$ , que dita a regra local para a mudança de estado das células, e determina o estado da célula na iteração  $t + 1$ , como função do estado da vizinhança da célula na iteração  $t$ ,  $\mathcal{S}_{(i,j)}^{t+1} = \Phi(\mathcal{S}_{\mathcal{N}(i,j)}^t)$ . É assumida natureza estocástica para a função de transição do modelo. Logo, as possíveis transições entre os estados das células são avaliada por meio de probabilidades (autômato celular probabilístico).

A propagação do fogo ao longo do espaço celular é condicionada por uma probabilidade efetiva de propagação  $S$ , que é função de outras três probabilidades, que são:

- a probabilidade  $D$ , que define a proporção de células com vegetação ao longo do espaço celular;
- a probabilidade  $B$ , que representa o processo de combustão, onde, a cada passo de tempo do modelo, uma célula cuja vegetação está queimando tem a probabilidade  $B$  para se tornar uma célula queimada;
- a probabilidade  $I$ , que representa o processo de ignição, e existe uma probabilidade  $I$  de o fogo avançar de uma célula queimando para uma célula com vegetação.

O diagrama de transição de estados das células é mostrado na Figura 3.2(b). O estado célula vazia é imutável. A propagação do fogo de uma célula queimando para uma célula com vegetação é condicionada pela probabilidade  $I$ . Dadas duas células vizinhas, uma queimando e a outra com vegetação, a cada passo de tempo

e, enquanto a célula permanece queimando, existe uma probabilidade  $I$  de a célula vizinha entrar em ignição. Assim, a transição  $V \rightarrow F$  é condicionada a uma célula com vegetação e depende do estado da célula vizinha. Uma vez levada à ignição, a cada passo de tempo, uma célula queimando permanece em seu estado segundo a probabilidade  $1 - B$ . Ou seja, a transição de estado de uma célula queimando para uma célula queimada,  $B \rightarrow O$ , fica condicionada pela probabilidade  $B$ .

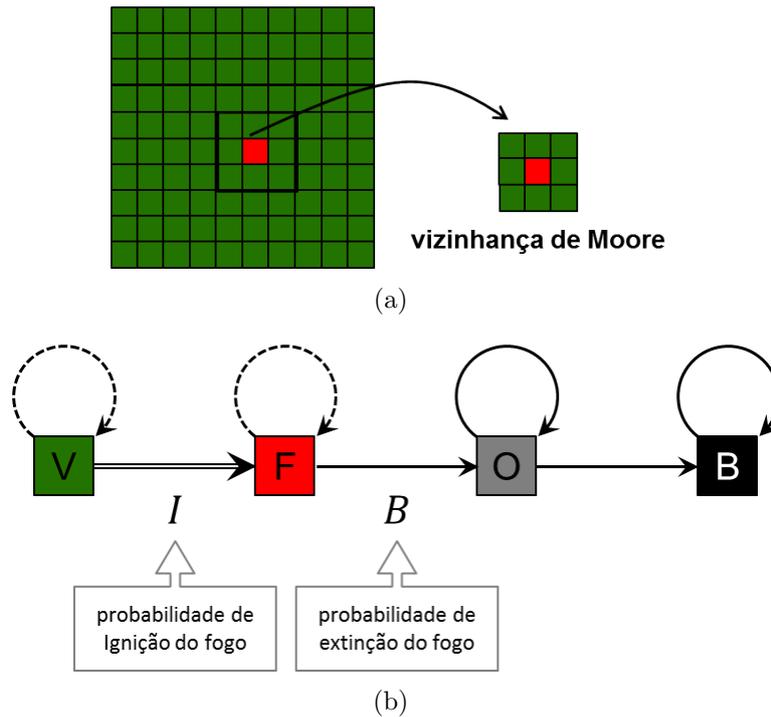


Figura 3.2 - (a) Vizinhança de Moore incluindo a célula central (amarelo) e as oito células vizinhas mais próximas. (b) Diagrama de transição de estado das células, onde setas indicam o caminho das transições. A seta dupla indica que a transição é condicionada ao estado de células vizinhas.

As variáveis de entrada do modelo são as probabilidades  $D$ ,  $B$  e  $I$ , o tamanho do espaço celular  $L_x$  e  $L_y$ , e número máximo de iterações  $N$ . Uma simulação do modelo é executada em dois estágios: inicialização e algoritmo de propagação do fogo. O estágio de inicialização inclui as seguintes etapas: (1) defina os valores dos parâmetros de entrada e inicialize o espaço celular. As condições de contorno são fixas, onde todas as células nos extremos do espaço celular assumem o estado  $E$ , (2) percorra cada célula do espaço celular e atribua o estado célula com vegetação com probabilidade  $D$  e célula vazia com probabilidade  $1 - D$ ; e (3) defina o foco do incêndio selecionando uma ou mais células com vegetação e mude seu estado para

célula queimando. O algoritmo de propagação do fogo inclui as seguintes etapas consecutivas: para  $t = 1, 2, \dots, N$  percorra cada célula do espaço celular e, (1) se a célula está queimando, avalie a transição  $V \rightarrow F$  para cada célula vizinha e, (2) avalie a transição  $B \rightarrow O$  para a célula. A simulação pára quando  $t = N$  ou quando o incêndio se extingue, ou seja, não existirem células queimando.

## 3.2 Análise exploratória do modelo

### 3.2.1 Análise qualitativa dos padrões de propagação do fogo

Diferentes padrões de propagação do fogo podem ser obtidos variando os valores das probabilidades  $D$ ,  $B$  e  $I$ . A Figura 3.3 caracteriza alguns desses padrões para diferentes valores destas probabilidades,  $t = 100$ , usando um espaço celular de dimensões  $201 \times 201$  com ignição pontual partindo da célula central  $\mathcal{S}_{(100,100)}^0 = F$ . Cada estado é caracterizado por uma cor onde células vazias possuem a cor preta, células com vegetação possuem a cor verde, células queimando possuem a cor vermelha, e células queimadas possuem a cor cinza.

A probabilidade  $D$  relaciona-se com a abundância e a distribuição espacial de células com vegetação ao longo do espaço celular. Elevado valor de  $D$  representa maior disponibilidade de combustível vegetal e, portanto, o fogo encontra melhores condições para se propagar. Este efeito pode ser observado comparando as Figuras 3.3(c) e 3.3(e) ou, as Figuras 3.3(d) e 3.3(f). Na comparação, observa-se que para  $t = 100$ , o aumento no valor de  $D$  implica em maiores proporções atingidas pelo incêndio, devido uma maior abundância de combustível vegetal.

A probabilidade  $B$  expressa a eficiência do processo de combustão da célula. O valor de  $B^{-1}$  é o tempo médio de queima da célula. Quando  $B = 1$ , a célula queima em uma iteração. Quando  $0 < B < 1$ , a célula pode queimar em mais de uma iteração. Baixos valores de  $B$ , quando comparados a valores elevados, implica em uma maior persistência do fogo na célula. Quanto mais o fogo persiste na célula, melhores são as chances do fogo manter-se propagando no espaço celular, pois a ignição de célula vizinha com vegetação é avaliada por um maior número vezes. Como consequência, a propagação do fogo com valores baixos de probabilidade de ignição  $I$  pode ocorrer somente para valores baixos da probabilidade de extinção  $B$ . Este efeito da persistência sobre o condicionamento da ignição será melhor discutido e caracterizado mais adiante. Um outro efeito que se percebe é que com uma maior persistência a frente de fogo torna-se mais espessa, conforme observa-se comparando as Figuras 3.3(c) e 3.3(d), ou as Figuras 3.3(e) e 3.3(f).

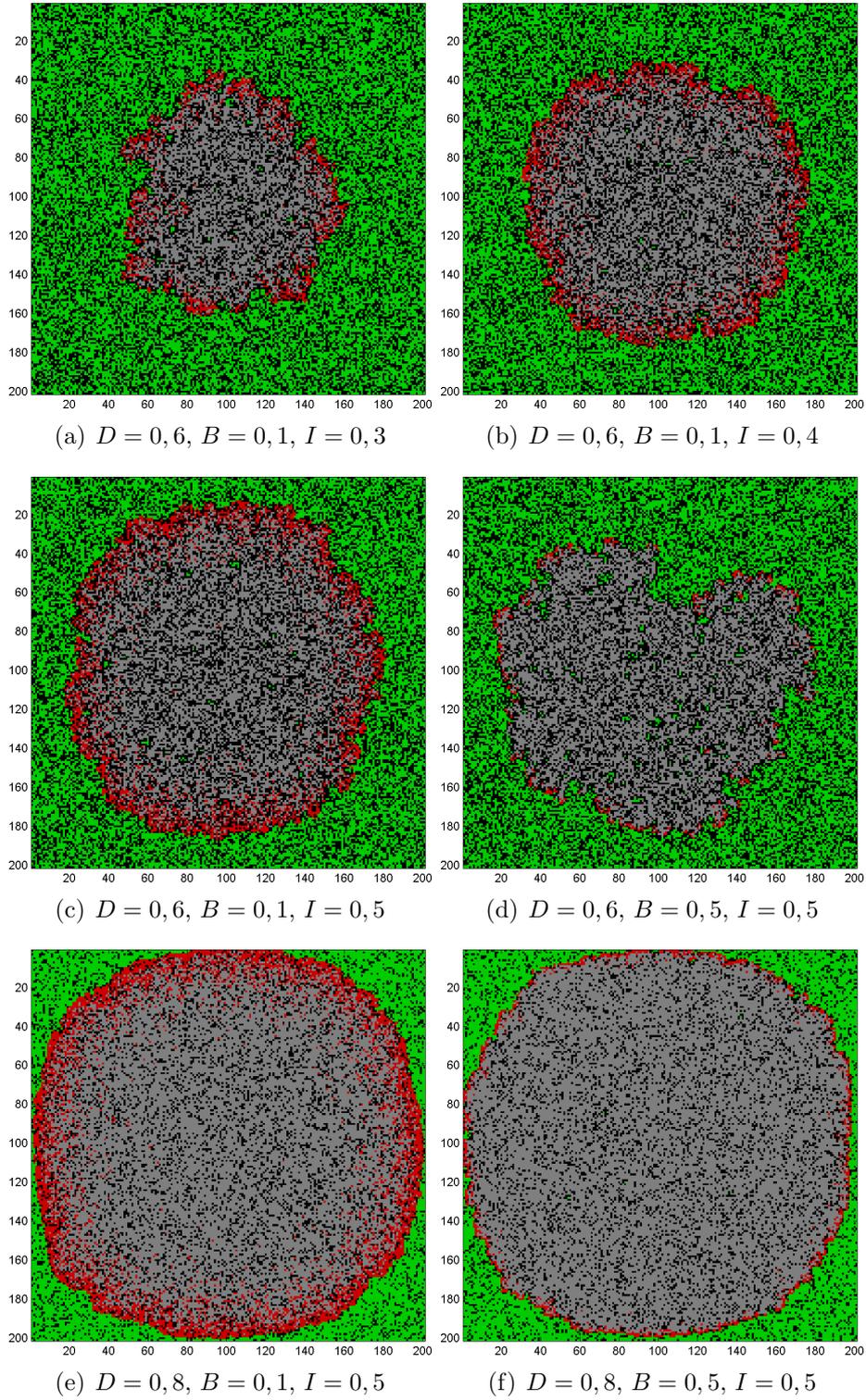


Figura 3.3 - Diferentes padrões de propagação do fogo para  $t = 100$ , usando um espaço celular de dimensões  $201 \times 201$  com ignição pontual partindo da célula central  $\mathcal{S}_{(100,100)}^0 = F$ . Os valores de  $D$ ,  $B$  e  $I$  utilizados nas simulações são mostrados imediatamente abaixo das figuras.

A probabilidade  $I$  relaciona-se com a facilidade de ignição das células com vegetação ao longo do espaço celular. Quanto maior o valor de  $I$ , mais ligeiramente o fogo se propaga ao longo das células com vegetação. Mantendo  $D$  e  $B$  constantes, o aumento no valor de  $I$  implica em uma maior rapidez na propagação do fogo, logo a área atingida pelo incêndio torna-se maior, como pode-se observar comparando as Figuras 3.3(a), 3.3(b) e 3.3(c).

Devido à natureza probabilística do modelo, várias simulações independentes<sup>1</sup>, utilizando um mesmo conjunto de parâmetros, geram padrões de propagação do fogo ligeiramente diferentes. As Figuras 3.4(a), 3.4(b) e 3.4(c) nos mostram estes padrões de propagação do fogo ligeiramente diferentes. Para estas simulações, foram utilizados  $D = 1,00$ ,  $B = 0,70$ ,  $I = 0,25$  e  $t = 100$ . Uma outra forma de representar o padrão de propagação do fogo é calculando o comportamento médio resultante de um número  $N$  grande de simulações individuais para um mesmo conjunto de parâmetro do modelo. Esta é a essência da simulação de Monte-Carlo. Para um dado conjunto de parâmetros do modelo de propagação, uma grande quantidade de simulações individuais são realizadas, e calcula-se o número de vezes que cada célula queimou. Este valor, dividido pelo número de simulações, nos dá uma estimativa espacial da probabilidade de alcance do incêndio. A Figura 3.4(d) nos dá a probabilidade de alcance do incêndio para  $D = 1,00$ ,  $B = 0,70$ ,  $I = 0,25$  e  $t = 100$ , usando um total de 1000 simulações individuais.

### 3.2.2 Probabilidade efetiva de propagação do fogo

A dinâmica de propagação do fogo no modelo, que é considerada como um evento aleatório, é caracterizada pela probabilidade efetiva de propagação do fogo  $S$ , que é efeito combinado das probabilidades  $D$ ,  $B$  e  $I$ . Estudos em teoria de percolação (STAUFFER; AHARONY, 1994) indicam que existe um valor crítico  $S^*$ , chamado de limiar de percolação, tal que quando  $S > S^*$ , sempre existirá um caminho ou agrupamento de células com vegetação sobre o qual o fogo se propagará livremente, sem interrupção, ao longo do espaço celular. Ou seja, o limiar de percolação define uma fronteira crítica que separa os regimes de propagação e extinção para os parâmetros do modelo.

O interesse aqui é de estimar o valor da probabilidade efetiva de propagação do

---

<sup>1</sup>Simulações independentes partem de diferentes sequências de números pseudo-aleatórios gerados no computador. O gerador de números pseudo-aleatórios uniformemente distribuídos entre 0 e 1 que o software MATLAB<sup>®</sup> utiliza é o algoritmo Mersenne-Twister (MATSUMOTO; NISHIMURA, 1998).

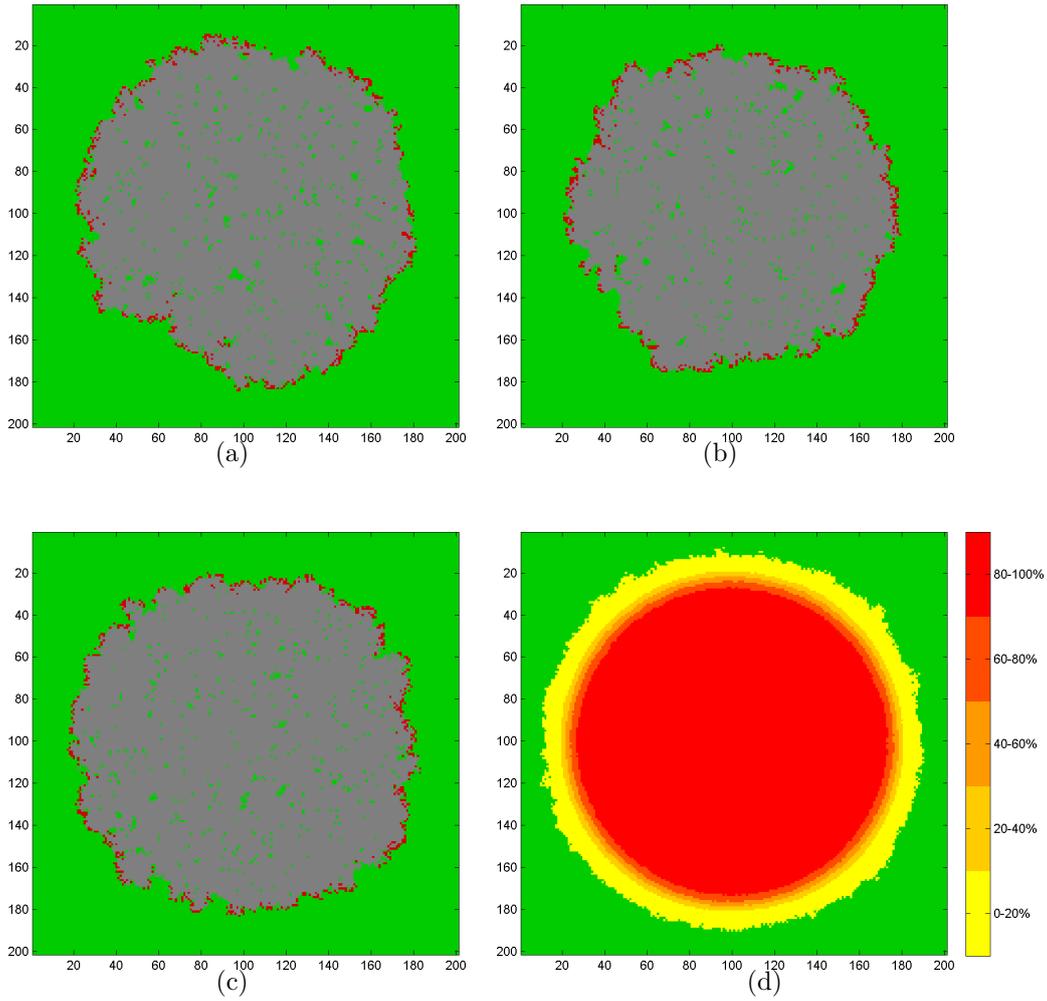


Figura 3.4 - (a)–(c) Padrões de propagação do fogo ligeiramente diferentes para  $D = 1,00$ ,  $B = 0,70$ ,  $I = 0,25$  e  $t = 100$ , usando um espaço celular de dimensões  $201 \times 201$  com ignição pontual partindo da célula central  $S_{(100,100)}^0 = F$ . Em (d) é mostrado a probabilidade de alcance do incêndio para  $D = 1,00$ ,  $B = 0,70$ ,  $I = 0,25$  e  $t = 100$ , usando um total de 1000 simulações individuais.

fogo  $S$  e caracterizar a fronteira crítica, em função dos parâmetros  $D$ ,  $B$  e  $I$  para o modelo. Este procedimento é realizado por meio de simulações Monte-Carlo, onde um conjunto de  $N$  simulações independentes são executadas, utilizando diferentes valores dos parâmetros  $D$ ,  $B$  e  $I$ . O fogo começa em uma borda do espaço celular e, ao longo das simulações, calcula-se o número de vezes que o fogo atinge a borda do lado oposto. Se o fogo se propaga de uma borda para a outra oposta, dizemos que o fogo percola o espaço celular. Assim, para cada valor dos parâmetros  $D$ ,  $B$  e  $I$ , a

aproximação de  $S$ , denotada por  $\langle S \rangle$ , é calculada como:

$$\langle S \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N C_j, \quad (3.1)$$

onde  $C_j = 1$  se o fogo percolar o espaço celular e  $C_j = 0$  caso contrário.

As Figuras 3.5(a)–3.5(f) mostram os valores de  $\langle S \rangle$  calculados para diferentes valores de  $D$ , variando os valores de  $B$  (eixo-x) e  $I$  (eixo-y). Para cada valor dos parâmetros  $D$ ,  $B$  e  $I$ , um conjunto de  $N = 1000$  simulações Monte-Carlo são executadas utilizando um espaço celular de dimensões  $64 \times 64$  células. O mapa de cores mostra os valores calculados variando de  $\langle S \rangle = 0$  (preto) a  $\langle S \rangle = 1$  (branco). Se  $\langle S \rangle = 0$ , o fogo não percola o espaço celular, ou seja, o regime de extinção predomina, e, para estes valores de parâmetros associados, qualquer incêndio que começar, se extingue. Caso contrário, se  $\langle S \rangle = 1$ , o regime de propagação predomina e o fogo espalha incessantemente pelo espaço celular.

As Figuras 3.5(a)–3.5(f) indicam a existência de uma fronteira crítica que separa os regimes de propagação e extinção no espaço de parâmetros do modelo. À medida que o valor da probabilidade  $D$  aumenta, esta fronteira se desloca para a direita, aumentando a proporção de valores de  $B$  e  $I$  para os quais o fogo se propaga sem cessar. Este condicionamento se dá porque a condição mínima para que o fogo se propague livremente é a presença de um caminho contínuo de células com vegetação. Para valores baixos de  $D$ , este caminho torna-se pouco provável, pois a distribuição de células com vegetação ao longo do espaço celular é muito esparsa. À medida que o valor de  $D$  aumenta, este caminho contínuo torna-se mais provável. No limite, quando  $D = 1$ , a fronteira crítica fica condicionada apenas pelas probabilidades  $B$  e  $I$ .

A dinâmica de propagação do fogo no modelo depende dos valores de  $B$  e  $I$ . A probabilidade  $B$  caracteriza a persistência do fogo. Quanto menor o valor de  $B$ , mais tempo o fogo persiste na célula. Quanto maior o valor de  $B$ , menores são as chances do fogo se manter na célula. A probabilidade  $I$  caracteriza a difusão ou espalhamento do fogo. Quanto maior o valor de  $I$ , mais rapidamente o fogo se alastra. Quanto menor o valor de  $I$ , mais lentamente (menos provável) é o espalhamento do fogo. Analisando as Figuras 3.5(a)–3.5(f), podemos perceber que a persistência condiciona a difusão ao longo do espaço de parâmetros  $B \times I$ . Ou seja, o regime de propagação para baixos valores de  $I$ , só ocorre para valores baixos de  $B$ . Mantendo o valor de  $I$  baixo, e aumentando o valor de  $B$ , os parâmetros já caracterizam a

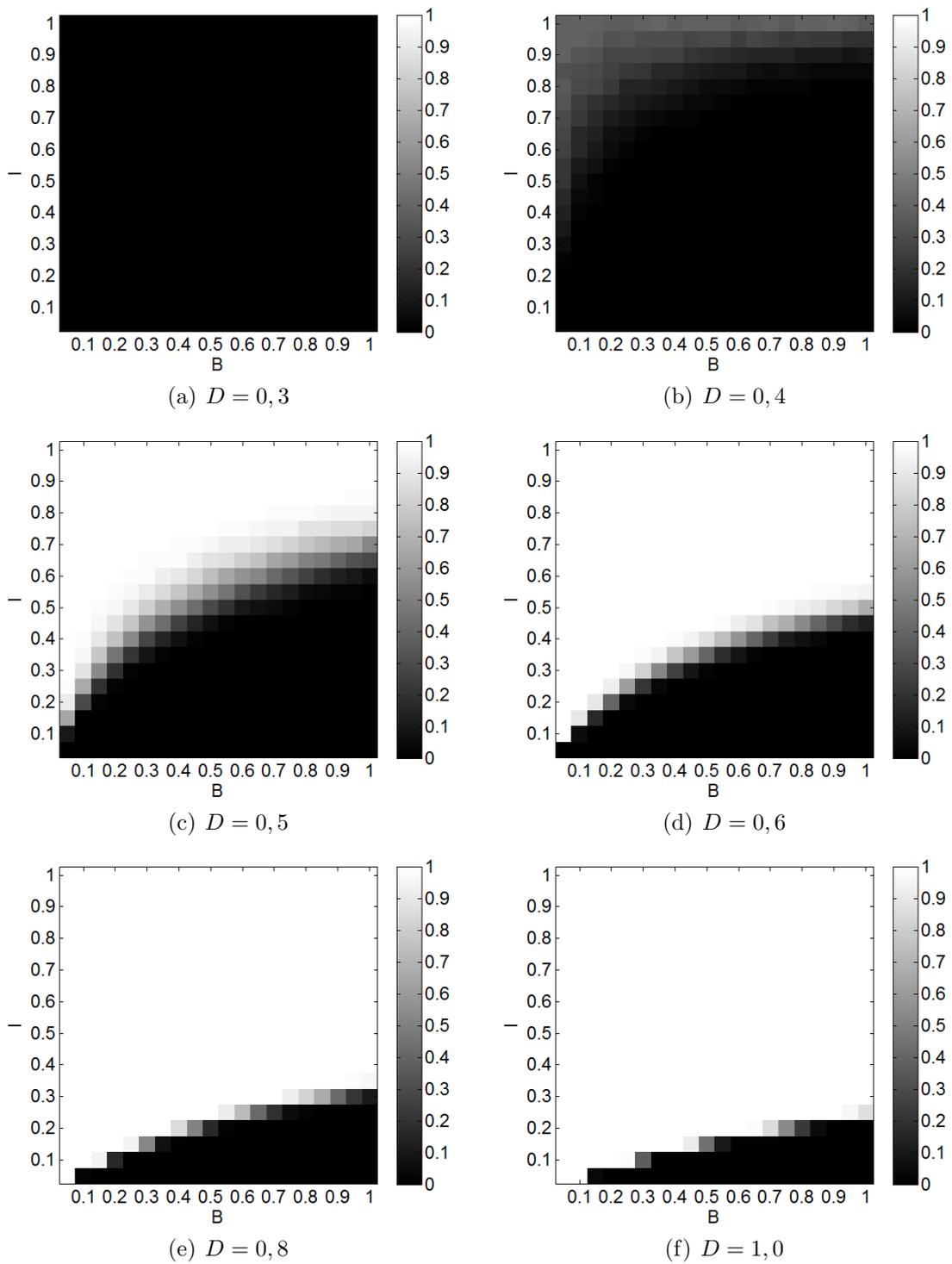


Figura 3.5 - Valores de  $\langle S \rangle$  calculados para diferentes valores de  $D$ , variando os valores de  $B$  (eixo-x) e  $I$  (eixo-y).

região de extinção.

### 3.2.3 Velocidade de propagação do fogo

A velocidade de propagação do fogo, é uma variável fundamental para quantificar a progressão de um incêndio. Ela expressa a taxa de avanço do perímetro da frente de fogo ao longo do tempo. Os valores da velocidade de propagação do fogo foram estimados utilizando valores fixos de  $D$  e  $B$ , e variando  $I$ . Para calcular esta relação da velocidade de propagação com os parâmetros  $D$ ,  $B$  e  $I$ , foram realizadas 1000 simulações Monte-Carlo utilizando um espaço celular de dimensões  $64 \times 64$ . O incêndio inicia-se em uma borda do espaço celular e, para todas as 1000 simulações, o tempo médio que o fogo leva para atingir a borda oposta é contabilizado. A distância percorrida pela frente de fogo, que é a dimensão do espaço celular, dividida pelo tempo médio de propagação, expresso em iterações, nos dá uma estimativa da velocidade de propagação do fogo. Esta velocidade adimensional de propagação do fogo, denotada por  $R_a$ , possui seus valores variando entre 0 e 1, e sua unidades é expressa em posições de grade por iteração. A Figura 3.6 mostra a velocidade de propagação do fogo estimada para  $D = 1,0$ , diferentes valores de  $B$ , e variando  $I$  de 0 a 1.

Observando os gráficos da Figura 3.6, percebe-se que a probabilidade de ignição influencia diretamente a velocidade de propagação do fogo  $R_a$ . Quanto maior o valor de  $I$ , mais rápido o fogo se alastra. Valores baixos de probabilidade de ignição  $I$  só condicionam a propagação do fogo quando o valor de  $B$  é baixo. Ou seja, o valor crítico  $I_c$  para qual  $R_0 > 0$  se desloca para a esquerda, à medida que  $B$  aumenta.

### 3.2.4 Fronteira crítica e padrões de propagação do fogo

Observando as Figuras 3.5(a)–3.5(f), podemos identificar uma região de transição, que separa o regime de propagação ( $S = 1$ ) do regime de extinção ( $S = 0$ ). Nesta região, onde os valores da probabilidade de propagação estão entre 0 e 1 ( $0 < S < 1$ ), os valores de  $B$  e  $I$  produzem padrões de propagação dendríticos, onde a frente de fogo se propaga de maneira não-uniforme, sem forma definida, e com chances de se extinguir. Já para a região do espaço de parâmetros onde  $S = 1$ , os valores de  $B$  e  $I$  produzem padrões sólidos de propagação do fogo, onde a frente de fogo se propaga de forma bem definida e sem chances de se extinguir. O gráfico da Figura 3.7 identifica estas regiões e também exhibe as curvas de nível para os valores da velocidade adimensional de propagação  $R_0$  quando  $S > 0$ .

Analisando as curvas de nível da velocidade de propagação na Figura 3.7, nota-se que o aumento no valor da probabilidade de ignição  $I$  reflete em aumento na velocidade

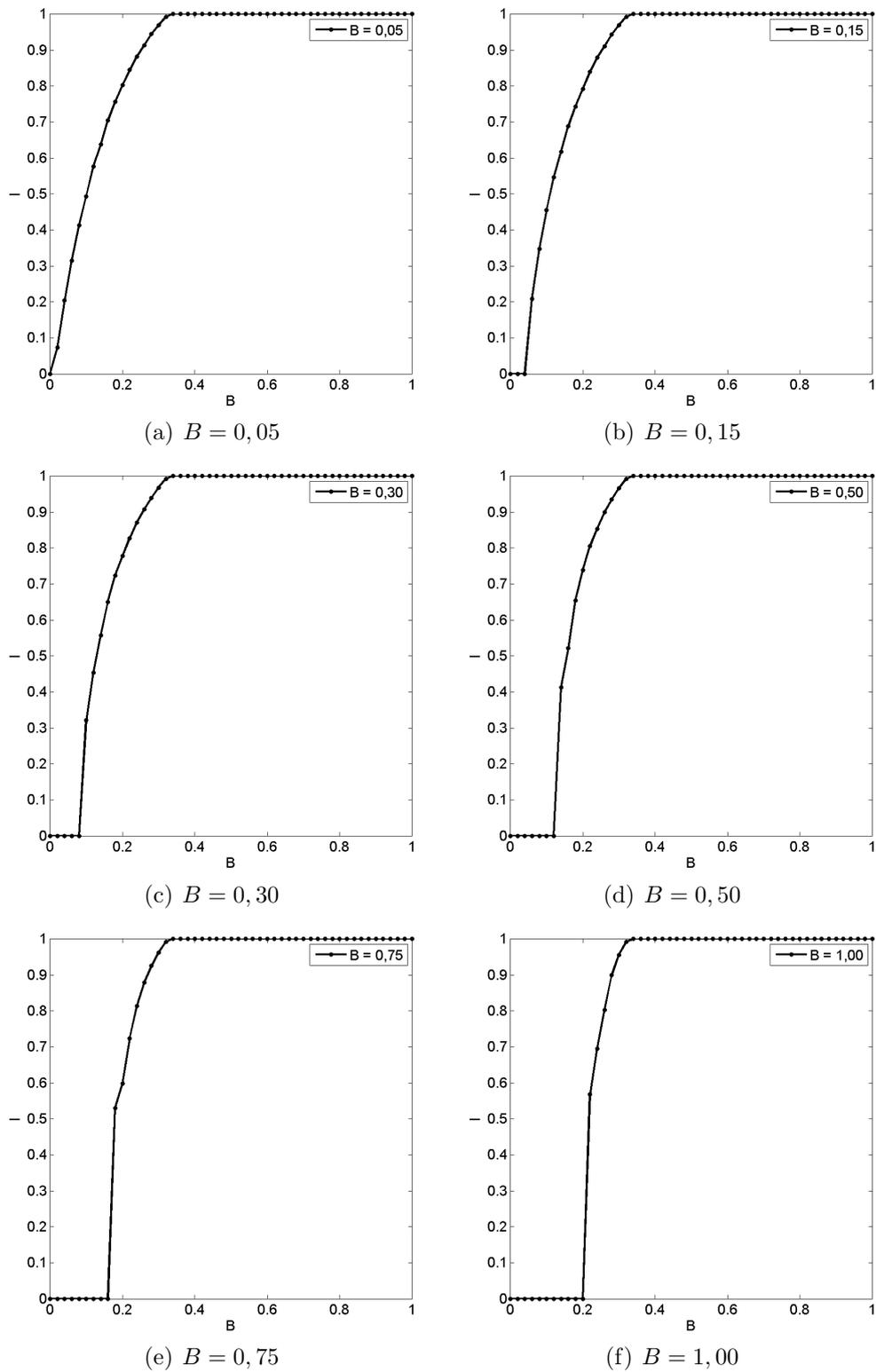


Figura 3.6 - Velocidade adimensional de propagação do fogo  $R_a$ , expressa em unidades de posição das células por iterações para  $D = 1,0$ , diferentes valores de  $B$  e variando  $I$  de 0 a 1.

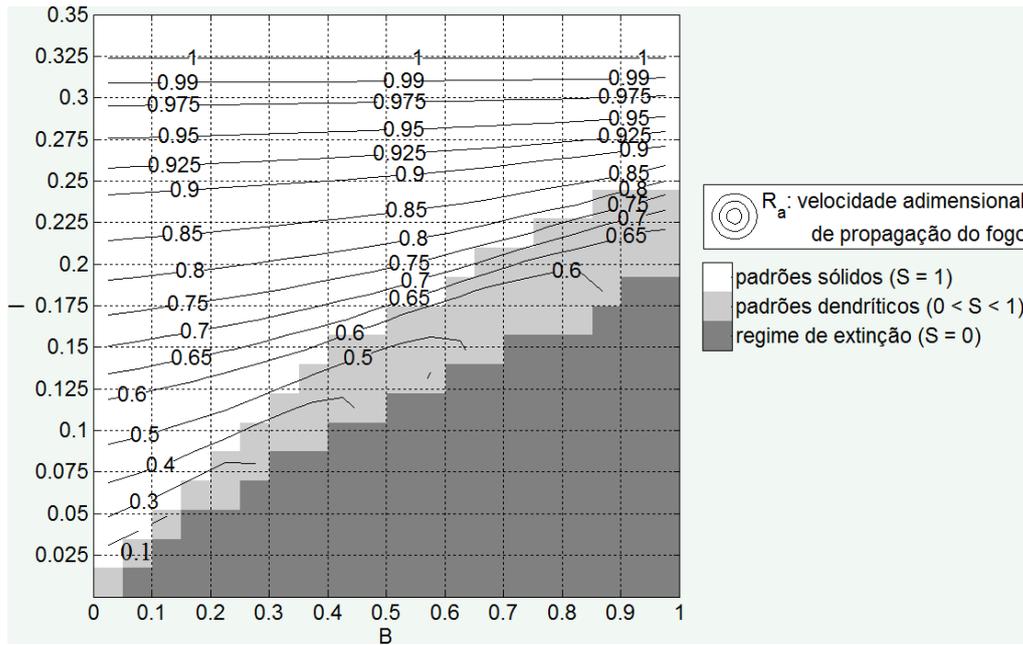


Figura 3.7 - Classificação dos padrões de propagação do modelo e valores da velocidade adimensional de propagação.

de propagação  $R_0$ . No entanto, esta resposta não é uniforme para todos os valores de  $I$ . Existe um breve intervalo de valores de  $I$  que geram valores de  $R_0$  contidos entre 0 e 1. Para um valor  $I \geq I_{max}$ , temos que  $R_0 = 1$ . Com base nas estimativas realizadas, o valor de  $I_{max}$  encontrado fica em torno de 0,325. Este limite superior de  $I$  define a máxima velocidade de propagação que o modelo pode representar, que é quando o fogo avança uma unidade de reticulado por iteração. A partir deste valor, os padrões de incêndios simulados já passam a sofrer influência da geometria do espaço celular (HARGROVE et al., 2000), e o padrão de propagação de uma frente de fogo passa a apresentar formas quadradas, ao invés de apresentar formas arredondadas. Hargrove et al. (2000) destaca que esta distorção pode ser evitada mediante a definição de um limite superior para a probabilidade de propagação que, para o modelo proposto, é representado pelo valor de  $I_{max}$ .

### 3.3 Parametrização do modelo

A etapa de parametrização consiste do processo de especificação do modelo visando representar incêndios reais. Neste procedimento, uma simplificação do problema é realizada, onde processos complexos que ocorrem em pequena escala no fenômeno, são representados nos parâmetros do modelo por expressões empíricas, simples e generalistas, baseadas na física do problema.

O procedimento de parametrização do modelo inclui: (i) a definição das resoluções espaciais e temporais; (ii) a seleção das variáveis que influenciam na dinâmica de propagação do fogo; e (iii) a especificação da relação explícita entre os parâmetros do modelo e estas variáveis. A parametrização considera os efeitos dos seguintes fatores que influenciam no comportamento do fogo em incêndios de vegetação: efeitos da vegetação, que incluem o tipo de combustível vegetal, o acúmulo de combustível vegetal, e o teor de umidade do combustível; efeitos das condições atmosféricas, que incluem a umidade relativa do ar, a velocidade do vento, e a direção do vento; e os efeitos da topografia, que incluem declividade e orientação de vertentes. As expressões matemáticas explícitas que relacionam estas variáveis com os parâmetros do modelo serão mostradas a seguir.

A geometria escolhida para o espaço celular é a quadrada, onde cada célula é representada por um quadrado de dimensões iguais a  $\Delta l \times \Delta l$ . A resolução espacial do modelo corresponde ao tamanho ou dimensão lateral de cada célula, representado aqui por  $\Delta l$ . Já a resolução temporal do modelo, corresponde ao intervalo de tempo  $\Delta t$ , que define uma iteração discreta do modelo. Assume-se valores fixos para  $\Delta l$  e  $\Delta t$ .

Uma vez definidas a ordem de grandeza (escala) das resoluções espacial e temporal, e os seus respectivos sistemas de unidades, podemos, a partir da velocidade adimensional de propagação  $R_a$ , obter a velocidade (real) de propagação do fogo. A velocidade de propagação do fogo  $R$  (metros/segundos) relaciona-se com  $R_a$  pela fórmula:

$$R = R_a \frac{\Delta l}{\Delta t}, \quad (3.2)$$

onde  $\Delta l$  é medido em metros e  $\Delta t$  em segundos.

Atenção especial deve ser tomada na escolha do valor da resolução temporal, pois o modelo deve ser hábil a captar a gama de todos os possíveis valores da velocidade de propagação do fogo. Em um caso extremo, temos a velocidade adimensional máxima de propagação do fogo de uma posição do reticulado por iteração. Este valor está associado a um limite máximo, e possível,  $R_{max}$  para a velocidade real de propagação do fogo. Desta forma, a partir da Equação 3.2, a resolução temporal do modelo é definida por:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{R_{max}}. \quad (3.3)$$

No que diz respeito às influências dos combustíveis vegetais sobre a propagação do fogo, Anderson (1970) indica três características fundamentais: potencial de ignição,

sustentabilidade e combustibilidade. Estas três características estão intimamente ligadas com as fases da dinâmica de propagação do fogo, conhecidas como, pré-aquecimento, ignição, combustão em chamas e extinção (PYNE et al., 1996). Dada uma fonte de calor, entende-se potencial de ignição como a facilidade que a vegetação possui para entrar em ignição. Uma vez ocorrida a ignição, a sustentabilidade é a capacidade do combustível vegetal continuar queimando, em outras palavras, é a estabilidade da taxa de queima ou capacidade da combustão se auto-sustentar. E por último, a combustibilidade compreende-se como a velocidade na qual o combustível vegetal é consumido, ou seja, é uma medida de quão facilmente ou rapidamente o combustível queima. No modelo de propagação, a probabilidade  $I$  relaciona-se com o potencial de ignição, e a probabilidade  $B$  relaciona-se com a sustentabilidade e a combustibilidade. No restante desta seção, discute-se acerca das variáveis ambientais que influenciam em cada uma destas e, em seguida, as parametrizações propostas são apresentadas.

### 3.3.1 Parametrização da probabilidade $D$

Uma variável importante que condiciona a propagação do fogo é a continuidade do combustível vegetal (PYNE et al., 1996; CHENEY; SULLIVAN, 2008). A continuidade é o termo utilizado para descrever a distribuição espacial da vegetação. No modelo, a probabilidade  $D$  quantifica esta variável. Uma superfície 100% coberta por vegetação é representada por  $D = 1$ . Já uma superfície que contém vegetação esparsa, pode ser representada por  $0 < D < 1$ . Como iremos nos ater a modelar incêndios em vegetação com distribuição espacial não-esparsa, adotamos  $D = 1$ . A quebra na continuidade pode ocorrer por uma interrupção abrupta da vegetação, que pode ser ocasionada tanto por obstáculos naturais, como rios ou superfícies rochosas, quanto por obstáculos artificiais, como estradas e aceiros. Estes obstáculos são incluídos no modelo e células sem vegetação representa-os.

### 3.3.2 Parametrização da probabilidade $B$

A combustão é uma reação química onde fazem-se presentes três ingredientes essenciais: combustível, comburente e fonte de ignição. O combustível mistura-se com o comburente, produzindo uma mistura inflamável que, ao entrar em contato com uma fonte de ignição, a reação ocorre. O combustível vegetal, quando submetido a uma fonte intensa de calor, sofre pirólise rápida, e um dos voláteis emitidos é a *levoglucosan*, que entra em ignição ao se misturar com o oxigênio contido no ar, e na presença de uma fonte de calor com temperatura maior ou igual a  $327^{\circ}\text{C}$ , dando origem à chama (WARD, 2001). Deste modo, a sustentabilidade e combustibilidade

sofrem interferência de qualquer variável ambiental que influencia em um dos três ingredientes essenciais da combustão.

O estado da atmosfera é um fator importante, que define a capacidade dos combustíveis vegetais sustentarem o fogo. Os combustíveis vegetais absorvem umidade por meio de contato físico com a água, tal como chuva ou orvalho, e também absorvem o vapor de água da atmosfera (NELSON JR, 2001). A umidade relativa do ar nos diz o quanto de água, na forma de vapor, existe na atmosfera, em relação ao máximo que poderia existir para a temperatura observada. O combustível vegetal ganha ou perde umidade interagindo com a atmosfera, dependendo das suas características físicas (PYNE et al., 1996). Os combustíveis finos, tais como gramíneas, galhos e arbustos, podem responder às variações na umidade da atmosfera em poucas horas<sup>2</sup>. O teor de umidade do combustível é a proporção, em porcentagem, da massa de água contida no combustível em relação ao seu peso seco.

Nelson Jr (2001) observa que a umidade do combustível vegetal influencia tanto na eficiência da queima quanto na capacidade de ignição. Durante a propagação do fogo, antes de entrar em ignição, o combustível vegetal recebe calor emitido pela frente de fogo. Quanto mais úmido estiver o combustível, maior será a quantidade de calor necessária para levá-lo a ignição, pois parte do calor recebido servirá para evaporar a quantidade de água contida no combustível. Albini e Reinhardt (1995) sugerem que este acréscimo no tempo de ignição se dá pelos acréscimos na condutividade térmica e na capacidade térmica do combustível vegetal, como consequência de um maior teor de umidade no combustível. Quando o teor de umidade do combustível vegetal é elevado o suficiente, de modo que, o calor necessário para levar o combustível à ignição seja maior que o calor produzido na frente de fogo, a propagação do fogo cessa. O limite inferior deste valor é o chamado teor de umidade de extinção, e seu valor é específico do tipo de combustível de vegetal (PYNE et al., 1996).

Em relação ao acúmulo de combustível vegetal, quanto mais combustível vegetal estiver disponível, maior será a chance da sustentabilidade da reação. Para caracterizar a vegetação, assume-se classes de tipo de combustível vegetal e classes de acúmulo de combustível vegetal. Na parametrização da probabilidade  $B$ , assume-se que esta depende do tipo de vegetação, do acúmulo de combustível vegetal, e do

---

<sup>2</sup> *Timelag*, ou tempo de resposta, é a quantidade de tempo para o combustível vegetal perder ou ganhar aproximadamente dois terços da umidade acima ou abaixo do seu teor de umidade. Os combustíveis vegetais são classificados em relação ao seu tempo de resposta. Os combustíveis finos, aqueles que possuem diâmetro inferior a aproximadamente 0,6 cm (1/4"), pertencem à classe de tempo de resposta de 1 hora (PYNE et al., 1996).

teor de umidade da vegetação. Assume-se que estes efeitos são independentes e que o valor de  $B$ , calculado em função destas variáveis ambientais, é dado por:

$$B = B_0 \cdot (1/\lambda_M)^{b_2}, \quad (3.4)$$

onde  $B_0$  é a probabilidade elementar de extinção do fogo para a célula com uma dada classe de combustível vegetal e uma dada classe de acúmulo de combustível vegetal, e  $b_2$  é uma constante empírica ( $0 < b_2 < 1$ ).

Estudos teóricos e experimentais têm mostrado que a inflamabilidade da vegetação, e conseqüente velocidade de propagação do fogo, depende exponencialmente do teor de umidade do combustível vegetal (MCARTHUR, 1966; NOBLE et al., 1980; CHENEY et al., 1998; SULLIVAN, 2009a). O termo  $\lambda_M$ , que representa esta dependência no modelo, é assumido ter a seguinte equação:

$$\lambda_M = \exp(-b_1 \cdot M), \quad (3.5)$$

onde  $M$  é o teor de umidade do combustível vegetal, variando de 0 a 100%, e  $b_1$  é uma constante empírica ( $0 < b_1 < 1$ ). Quanto maior o valor da umidade, menor será o valor de  $\lambda_m$ . O fator  $1/\lambda_M$  da Equação 3.4, atribui o efeito inverso de  $M$  sobre  $B$ , ou seja, quanto maior for a umidade do combustível, maior será o valor de  $B$ , logo maior a chance do fogo se extinguir. A Figura 3.10(b) mostra o gráfico do multiplicador  $(1/\lambda_M)^{b_2}$  da Equação 3.4, para diferentes valores do parâmetro  $b_2$ .

### 3.3.3 Parametrização da probabilidade I

A frente de fogo compreende a região do incêndio dominada por chamas, e com intensa produção de calor, que separa a região de vegetação que foi consumida pelo fogo, da região com vegetação que ainda não foi conduzida à ignição. A frente de fogo pode se espalhar ao longo da superfície de diferentes formas, dependendo das condições em que ocorrem o incêndio. O que deve-se ter em mente é que nem sempre a velocidade de propagação do fogo é uniforme ao longo do perímetro da frente de fogo, pois os fatores que a condicionam podem variar no espaço e no tempo (PYNE et al., 1996).

Em relação à forma da frente de fogo, pode-se delinear as seguintes situações.

- Forma circular: Ocorre quando o fogo se propaga sob condições homogêneas de vegetação, sem vento, e em superfície plana. Partindo de uma ignição

pontual, a frente de fogo se propaga ao longo do tempo assumindo uma forma circular. Neste caso, a velocidade de propagação do fogo será constante ao longo do perímetro da frente de fogo, definindo um espalhamento isotrópico. A ilustração deste tipo de propagação é mostrada na Figura 3.8(a).

- Forma elíptica: Ocorre quando as condições da vegetação permanecem homogêneas, e a propagação do fogo com uma direção dominante, definida ou pela ação de vento constante, ou pela ação de inclinação constante na superfície, ou de ambos. Partindo de uma ignição pontual, a frente de fogo se propaga ao longo do tempo assumindo uma forma que pode ser descrita por uma elipse<sup>3</sup> (WEBER, 2001). Neste caso o espalhamento é anisotrópico, a velocidade de propagação varia o longo do perímetro da frente de fogo, e existe uma velocidade máxima que define a direção dominante de propagação do fogo. A ilustração é mostrada na Figura 3.8(b).
- Forma irregular: Ocorre quando as condições de combustível são heterogêneas ao longo do espaço, a velocidade e direção do vento variam no espaço e no tempo, e as condições do relevo são heterogêneas. Neste caso, temos uma situação mais realística, e a frente de fogo assume uma forma irregular, sem uma forma padrão de expansão.

A topografia descreve a natureza da superfície da paisagem em termos de elevação, declividade e orientação de vertentes. Mudanças na topografia implicam em mudanças no comportamento do fogo (PYNE et al., 1996). Quando se propaga em superfícies com elevação, ocorre o encurtamento da distância entre as chamas e a vegetação situada adiante a frente de fogo. Nessas condições, o calor é transferido mais intensamente e o combustível vegetal é levado a ignição mais rapidamente.

Existem vários modelos que relacionam efeitos da topografia e velocidade de propagação do fogo (SHARPLES, 2008). Uma vez que não dispomos de nenhum dado quantitativo sobre o efeito da declividade sobre a propagação do fogo no Cerrado, destacamos aqui a relação proposta por (MCARTHUR, 1966), que vem sendo empregada nos modelos de comportamento do fogo aplicados nos pastos e nas savanas australianas. Na relação proposta por McArthur (1966), um multiplicador introduz

---

<sup>3</sup>Com base em dados experimentais, em termos precisão, e pela simples representação analítica, o modelo matemático de uma frente de onda elíptica que se expande no tempo é bem apropriado para representar a expansão da frente de fogo sob condições homogêneas. A forma da frente de fogo sob condições uniformes também já foram modeladas como ovoides (PEET, 1967), duplas elipses (ANDERSON, 1983) ou como forma de leque (BYRAM, 1959).

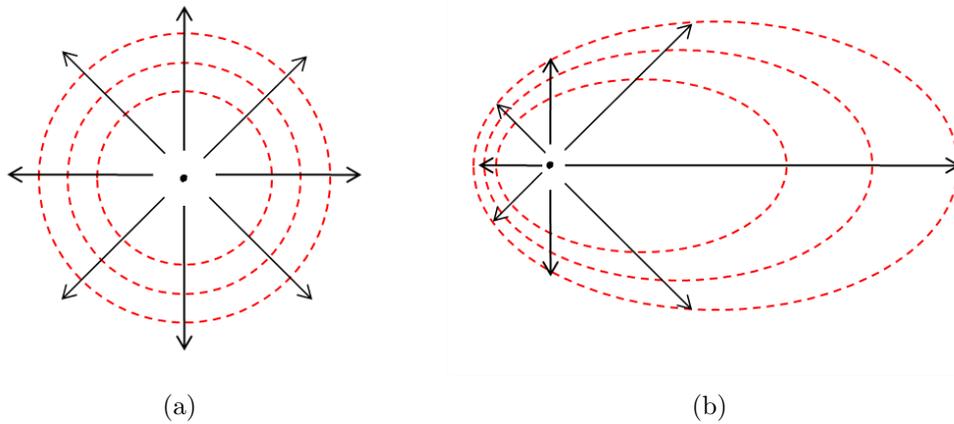


Figura 3.8 - Ilustração das propagação (a) isotrópica e (b) anisotrópica para uma ignição pontual. As linhas vermelhas tracejadas representam as posições da frente de fogo e as setas pretas indicam a direção de expansão da frente de fogo. O ponto preto representa o início do incêndio.

o efeito da topografia, e a relação é expressa por:

$$R_s = R_0 \exp(a\theta_s) \quad (3.6)$$

onde  $R_s$  é a velocidade de propagação do fogo numa superfície com declividade  $\theta_s$ ,  $R_0$  é a velocidade da propagação do fogo em superfície plana,  $\theta_s$  é o ângulo de inclinação da superfície e  $a$  uma constante empírica. Para  $\theta_s > 0$ , o fogo se propaga em inclinação para cima,  $\theta_s < 0$  o fogo se propaga em inclinação para baixo, e  $\theta_s = 0$  o fogo se propaga em superfície sem inclinação. O termo  $\exp(a\theta_s)$  é o fator relativo que quantifica a influência do ângulo de inclinação da superfície,  $\theta_s$ , sobre a velocidade de propagação do fogo.

O vento induz uma tendência na propagação do fogo, aumentando a velocidade de propagação do fogo na sua direção. Sob a ação do vento, as chamas da frente de fogo sofrem uma inclinação, e permanecem mais próximas do combustível vegetal que ainda não foi levado à ignição. Como consequência deste encurtamento na distância, uma maior quantidade de calor é transferido para o combustível, e o tempo para levá-lo à ignição é reduzido. Como consequência a frente de fogo se propaga mais rapidamente na direção à favor do vento. Dados experimentais e modelos físicos sugerem que uma função de lei de potência da velocidade do vento é um modelo bem adequado para representar a influência da velocidade do vento sobre a propagação do fogo (ROTHERMEL, 1972; NELSON JR; ADKINS, 1988; FENDELL; WOLFF, 2001; SULLIVAN, 2009a). Rothermel (1972), baseado principalmente nos trabalhos de

(MCARTHUR, 1966), estabeleceu a seguinte relação para a velocidade da propagação do fogo a favor do vento:

$$R_w = R_0(1 + \phi_w), \quad (3.7)$$

onde  $R_w$  é a velocidade de propagação a favor do vento,  $R_0$  é a velocidade de propagação do fogo sem a ação do vento, e  $\phi_w$  é um fator de correção definido como uma função potência da velocidade do vento,  $U$ , na forma  $\phi_w = A \cdot U^B$ , onde  $A$  e  $B$  são constante empíricas.

A inclusão dos efeitos do vento, de feições na topografia e da umidade do combustível vegetal sobre a forma da frente de fogo se dá mediante parametrizações para o cálculo da probabilidade de ignição  $I$ . Assume-se que estes efeitos são independentes e, para cada um deles, um multiplicador é introduzido, para amplificar ou reduzir a probabilidade de ignição para cada uma das oito células vizinhas. A parametrização da probabilidade de ignição  $I$  é definida pela equação:

$$I = I_0 \cdot \lambda_s \cdot \lambda_w \cdot \lambda_m, \quad (3.8)$$

onde  $I_0$  é a probabilidade elementar de ignição para a célula com um dada classe de combustível vegetal e uma dada classe de acúmulo de combustível vegetal, desprezando os efeitos do vento, da topografia e da umidade,  $\lambda_s$  é o fator que inclui o efeito da declividade sobre a propagação do fogo,  $\lambda_w$  é o fator que introduz o efeito do vento sobre a propagação do fogo, e  $\lambda_m$  é um fator que inclui o efeito da umidade do combustível vegetal sobre a propagação do fogo.

A Equação 3.8 parte do pressuposto que  $R \propto I$  e os efeitos das condições do combustível, da topografia e do vento podem ser representados por multiplicadores. Partindo de uma probabilidade de ignição elementar  $I_0$ , que ,multiplicadores que representam os efeitos de cada um fator são introduzidos. O uso de multiplicadores para incorporar os efeitos destes fatores sobre o comportamento do fogo é muito comum nos modelos de propagação do fogo, dentre os quais podemos citar os modelos utilizados pelos Serviços Florestais Americano (ROTHERMEL, 1972), Australiano (MCARTHUR, 1966; NOBLE et al., 1980) e Canadense (FORESTRY CANADA FIRE DANGER GROUP, 1992).

O fator  $\lambda_s$ , multiplicador que inclui a influência da topografia sobre a propagação

do fogo, é definido a partir da relação proposta na Equação 3.6, e assume a forma:

$$\lambda_s = \exp(a\theta_s), \quad (3.9)$$

onde  $\theta_s$  é o ângulo de inclinação da superfície, valor este calculado em função do valor da elevação  $E_{(i,j)}$  das células, obtidos a partir do mapa de altimetria.

Dada uma célula queimando na posição  $i, j$ , o ângulo de inclinação  $\theta_s$  na direção de uma célula vizinha na posição  $(i^*, j^*) \in \mathcal{N}(i, j)$  é calculado de duas formas, dependendo se a célula vizinha  $(i^*, j^*)$  for adjacente ou diagonal:

$$\theta_s = \tan^{-1} \left( \frac{E_{(i^*, j^*)} - E_{(i, j)}}{\Delta l} \right), \quad \text{se } (i^*, j^*) \text{ for adjacente,} \quad (3.10a)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left( \frac{E_{(i^*, j^*)} - E_{(i, j)}}{\Delta l \sqrt{2}} \right), \quad \text{se } (i^*, j^*) \text{ for diagonal.} \quad (3.10b)$$

O fator  $\lambda_w$ , multiplicador que inclui os efeitos do vento sobre a propagação do fogo, é definido a partir da relação expressa na Equação 3.7, e é calculado por:

$$\lambda_w = 1 + c_1 \cdot f(\omega) \cdot U^{c_2}, \quad (3.11)$$

onde  $U$  é a velocidade do vento,  $f(\omega)$  é um fator que introduz o efeito espacial da direção do vento sobre a probabilidade de ignição, e  $c_1$  e  $c_2$  são constantes empíricas.

A função  $f(\omega)$  pondera o efeito do vento sobre as oito possíveis direções de propagação do fogo (direções cardeais e colaterais), definidas pela vizinhança de Moore adotada no modelo. Conforme ilustrado na Figura 3.9(b), seus valores são  $0^\circ$  (N),  $45^\circ$  (NE),  $90^\circ$  (E),  $135^\circ$  (SE),  $180^\circ$  (S),  $225^\circ$  (SO) e  $270^\circ$  (O),  $315^\circ$  (NO). Seguindo a relação proposta em (ALEXANDRIDIS et al., 2008), a função  $f(\omega)$  adotada é:

$$f(\omega) = \exp(c_3 \cdot U(\cos(\omega) - 1)), \quad (3.12)$$

onde  $U$  é a velocidade do vento,  $\omega$  é o ângulo entre a direção de propagação do fogo e a direção do vento,  $\theta_w$  (em graus), e  $c_3$  é uma constante empírica. Enquanto que as possíveis direções de propagação assumem valores discretos, a direção do vento assume valores contínuos. A Figura 3.9 ilustra a representação da direção do vento, onde a referência de origem, 0 graus, corresponde à direção norte.

A Equação 3.12 introduz o efeito direcional do vento sobre a probabilidade  $I$ , atenuando ou intensificando seu valor para cada uma das oito possíveis direções de

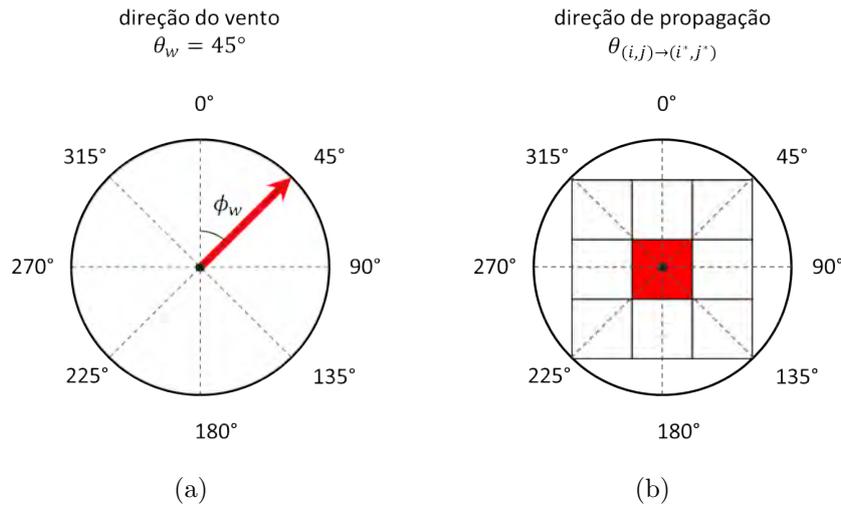


Figura 3.9 - Representação da direção do vento e das possíveis direções de propagação no modelo.

propagação, em função da velocidade e direção do vento. Uma vantagem desta relação é a utilização de valores contínuos para a direção do vento, embora a direção de propagação utilize valores discretos. As Figuras 3.10(d), 3.10(e) e 3.10(f) mostram o gráfico dos dois fatores da Equação 3.11. Note que o efeito da velocidade do vento sobre  $f(\omega)$  é de quantificar a anisotropia, intensificando a propagação na direção do vento. Observando e comparando as Figuras 3.10(e) e 3.10(f), percebe-se que tanto a velocidade do vento quanto a constante empírica  $c_3$  intensificam essa tendência na propagação, ou seja, quanto maior a velocidade do vento, ou quanto maior o valor de  $c_3$  maior a tendência de propagação na direção do vento.

O fator  $\lambda_M$ , multiplicador que representa os efeitos da umidade do combustível vegetal sobre a probabilidade de ignição, é calculado pela Equação 3.5. Neste caso, a dependência de  $I$  com a umidade do combustível vegetal é inversa. Quanto maior for a umidade do combustível vegetal, mais lenta é a propagação, e menor será o valor de  $I$ . A constante empírica  $b$  controla o efeito da umidade sobre a propagação do fogo. A Figura 3.10(a) mostra o gráfico deste efeito para diferentes valores de  $b$ .

### 3.3.4 Resumo das parametrizações

Uma síntese dos dados de entrada do modelo parametrizado é apresentada na Figura 3.11. Os dados de entrada são constituídos de dados espaciais, dados meteorológicos, e dados de ocorrência do incêndio. Os dados espaciais caracterizam o combustível vegetal e as feições topográficas, e incluem, as classes de combustível vegetal, as

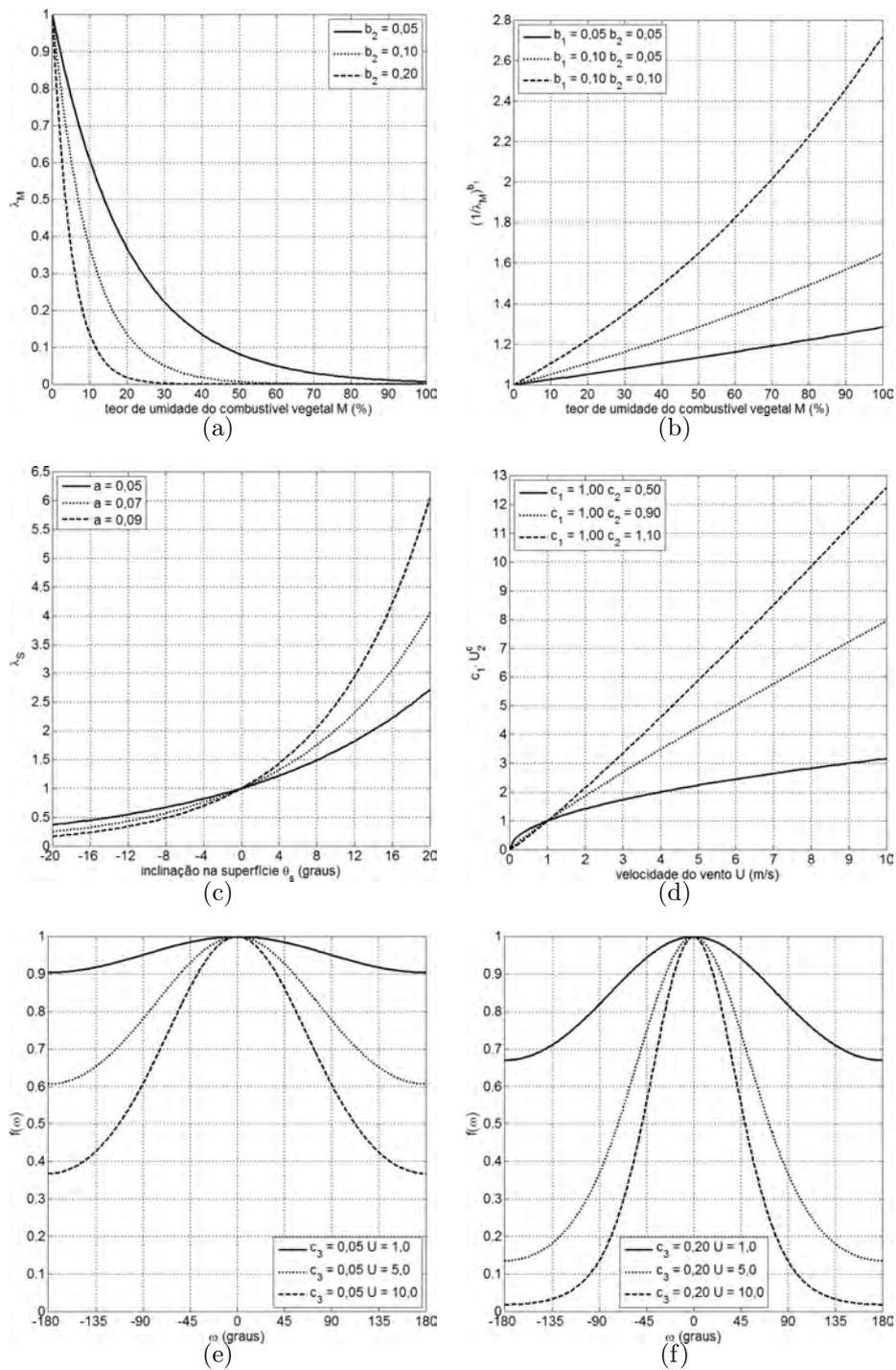


Figura 3.10 - Parametrizações do modelo: (a) fator relativo do efeito do teor de umidade do combustível sobre a propagação do fogo; (b) fator relativo do teor de umidade do combustível sobre a persistência do fogo; (c) fator relativo da influência da inclinação da superfície; (d) fator relativo da velocidade do vento; (e) e (f) fator relativo da velocidade e direção do vento sobre a forma da frente de fogo.

classes de acúmulo de combustível vegetal, o modelo digital de elevação, obstáculos naturais e artificiais (regiões sem combustível vegetal como estradas ou rios), e a posição de início do incêndio. Os dados meteorológicos incluem a velocidade e direção do vento, e a umidade relativa do ar (que influencia na umidade do combustível vegetal).

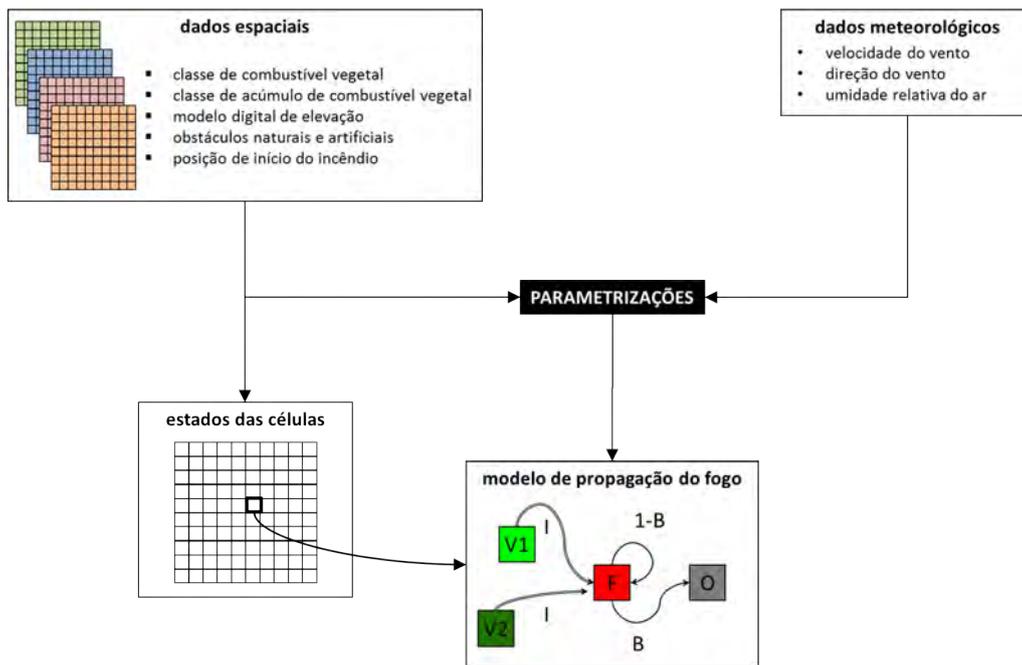


Figura 3.11 - Síntese dos dados de entrada do modelo parametrizado.

As parametrizações incluindo os efeitos das características da vegetação, das condições atmosféricas e da topografia, permitem que a dinâmica de propagação do fogo no modelo varie tanto no espaço quanto no tempo, em função destes fatores. A Tabela 3.1 resume as parametrizações incluídas no modelo.

Os valores de  $B$  e  $I$ , variam localmente em função das características da vegetação (classe de combustível vegetal e respectiva classe de acúmulo de combustível vegetal), da umidade do combustível vegetal, das condições atmosféricas e da topografia. Os efeitos destes fatores sobre a dinâmica de propagação do fogo são introduzido por fatores multiplicativos, que ajustam as probabilidades elementares, conforme podemos observar nas Equações 3.4 e 3.8.

As parametrizações permitem que o modelo descreva a heterogeneidade nas características da vegetação em termos classes de combustível vegetal e respectivas classes

Tabela 3.1 - Resumo das parametrizações do modelo

<p>Probabilidade de ignição do fogo:</p> $I = I_0 \cdot \lambda_M \cdot \lambda_s \cdot \lambda_w$
<p>Probabilidade de extinção do fogo:</p> $B = B_0 \cdot (1/\lambda_M)^{b_1}$
<p>Efeito das características da vegetação:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>I_0</math>: probabilidade elementar de ignição do fogo para uma dada classe de combustível vegetal e respectiva(s) subclasse(s) de acúmulo de combustível vegetal.</li> <li>• <math>B_0</math>: probabilidade elementar de extinção do fogo para uma dada classe de combustível vegetal e respectiva(s) subclasse(s) de acúmulo de combustível vegetal.</li> </ul>
<p>Efeito da umidade do combustível vegetal:</p> $\lambda_M = \exp(-b_2 \cdot M)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>M</math> é a umidade do combustível vegetal, expressa em % e varia de 0 a 100%.</li> <li>• <math>0 \leq b_1 \leq 1</math> é a constante empírica que ajusta o efeito da umidade do combustível vegetal sobre a probabilidade de extinção do fogo (potência do inverso de <math>\lambda_M</math>).</li> <li>• <math>0 \leq b_2 \leq 1</math> é constante empírica que ajusta o efeito da umidade do combustível vegetal sobre a dinâmica de propagação do fogo.</li> </ul>
<p>Efeito da topografia:</p> $\lambda_s = \exp(a \cdot \theta_s)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\theta_s</math> é o ângulo de inclinação da superfície na direção de propagação do fogo.</li> <li>• <math>0 \leq a \leq 1</math> é a constante empírica que ajusta o efeito da inclinação da superfície sobre a probabilidade de ignição (que é proporcional à velocidade de propagação).</li> </ul>
<p>Efeito do vento:</p> $\lambda_w = 1 + c_1 \cdot f(\omega) \cdot U^{c_2}$ $f(\omega) = \exp(c_3 \cdot U \cdot (\cos(\omega) - 1))$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>U</math> é a velocidade do vento, em metros por segundo.</li> <li>• <math>\omega</math> é o ângulo, em graus, entre a direção do vento e a direção de propagação do fogo.</li> <li>• <math>0 \leq c_1 \leq 1</math> e <math>0 \leq c_2 \leq 1</math> são as constantes empíricas que relacionam o relação entre a velocidade do vento e a probabilidade de ignição (lei de potência da velocidade do vento).</li> <li>• <math>f(\omega)</math> é o fator que distribui o efeito do vento ao longo de todas as possíveis direções de propagação, e <math>0 \leq c_3 \leq 1</math> é a constante empírica que ajusta o efeito da velocidade e da direção do vento sobre a forma da frente de fogo.</li> </ul>

de acúmulo de combustível vegetal. Deste modo, temos um estado para cada uma classe que descreve a vegetação. A Figura 3.11 ilustra dois estados,  $V1$  e  $V2$ , que representam duas classes de combustível vegetal. Um par de probabilidades elementares de ignição,  $I_0$ , e de extinção,  $B_0$ , distinguem a capacidade do fogo se propagar e se manter em cada uma classe.

A umidade do combustível vegetal atenua o valor de  $I$  e intensifica o valor de  $B$ . As constantes empíricas  $b_1$  e  $b_2$ , conforme descritas na Tabela 3.1, ajustam o efeito da umidade do combustível vegetal sobre o comportamento do fogo. A topografia e o vento (velocidade e direção) modificam o valor de  $I$ , introduzindo uma anisotropia ao longo das direções de propagação. A probabilidade  $I$  é intensificada na direção do gradiente de elevação e atenuada na direção contrária ao gradiente, e a constante empírica  $a$  ajusta o efeito da inclinação da superfície sobre a probabilidade  $I$ . Assim como a topografia, o vento altera os valores de  $I$  ao longo das possíveis direções de propagação do fogo. As constantes empíricas  $c_1$  e  $c_2$  ajustam o efeito da velocidade do vento  $U$  sobre  $I$  (segundo uma lei de potência de  $c_1 \cdot U_2^c$ ), e  $f(\omega)$  distribui o efeito da direção do vento sobre as possíveis direções de propagação do fogo. A constante empírica  $c_3$  ajusta o efeito da velocidade e da direção do vento sobre a forma da frente de fogo.

### 3.4 Avaliação das parametrizações do modelo

Uma vez que as parametrizações foram definidas, avalia-se aqui se o modelo foi construído corretamente. Vários cenários de incêndios são simulados visando verificar se o modelo consegue captar corretamente os efeitos de variações do acúmulo de combustível vegetal, da umidade do combustível vegetal, das feições topográficas, e da velocidade do vento.

Para os cenários simulados, idealizamos três classes de acúmulo de um mesmo tipo de combustível vegetal. Estas três classes, que equivalentemente representam três estados de células com vegetação, são discriminadas por acúmulo baixo (FL1), acúmulo moderado (FL2), e acúmulo alto (FL3). Além destes três estados, as células também podem apresentar o estado célula queimando (F), célula queimada (O), e célula vazia ou sem vegetação (E). A Figura 3.12 ilustra o diagrama de transição de estados para o autômato celular utilizado nesta etapa de avaliação. Conforme ilustrado na Figura, a probabilidade  $I$  condiciona a transição de qualquer uma das células com vegetação (FL1, FL2 e FL3) para o estado célula queimando (O). A probabilidade  $B$  condiciona a transição do estado célula queimando  $B$  para célula queimada  $O$ . Os estados célula queimada  $O$  e célula vazia  $E$  são imutáveis.

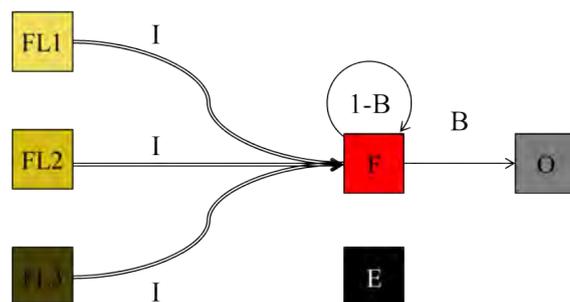


Figura 3.12 - Diagrama de transição de estados para as classes utilizadas na avaliação das parametrizações do modelo.

Conforme discutido na Seção anterior, quanto maior for o acúmulo de combustível vegetal, maior é a chance de sustentabilidade da reação de combustão (menor é o valor de  $B$ ), e maior é a facilidade ou rapidez de propagação do fogo (maior é o valor de  $I$ ). Seguindo este preceito, valores de  $I_0$  e  $B_0$  para as três classes de acúmulo de combustível vegetal foram escolhidos eventualmente, conforme mostra a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores escolhidos para as probabilidades elementares  $I_0$  e  $B_0$  para as três classes de acúmulo de um tipo de combustível vegetal utilizadas.

	FL1	FL2	FL3
$I_0$	0,20	0,25	0,35
$B_0$	0,45	0,40	0,35

### 3.4.1 Efeitos da variação no acúmulo de combustível vegetal

A quantidade de combustível acumulado na superfície é um dos fatores mais importantes que controlam a intensidade de calor produzido na frente de fogo de um incêndio de vegetação, e relaciona-se diretamente com a facilidade de propagação do fogo (PYNE et al., 1996). Dessa forma, espera-se que, quanto maior for o acúmulo de combustível, mais rapidamente a frente de fogo avança sobre a vegetação. Para avaliarmos se o modelo consegue captar o efeito da variação de acúmulo de combustível, simulamos um cenário de propagação de incêndio com ignição em linha, onde a frente de fogo parte da extremidade esquerda do espaço celular. As classes de acúmulo de combustível vegetal estão dispostas horizontalmente, de maneira perpendicular à direção de propagação do fogo. Os efeitos dos demais fatores são desprezados, ou seja, assumimos  $\lambda_s = 1$ ,  $\lambda_M = 1$  e  $\lambda_w = 1$  para todas as células. A Figura 3.13 mostra subsequentes estados das células para o cenário de incêndio

simulado.

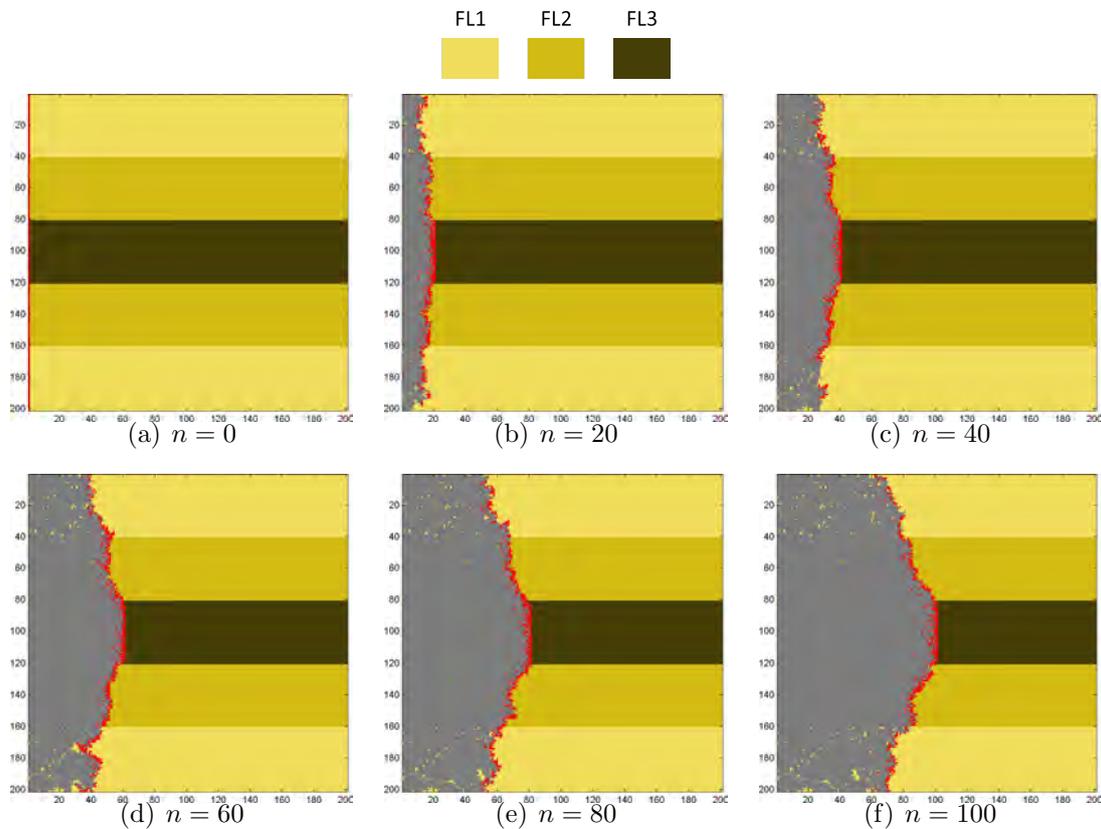


Figura 3.13 - Estados das células para a simulação de um cenário de incêndio com ignição na borda esquerda do espaço celular utilizando distintas classes de acúmulo de combustível vegetal.

Observando a posição da frente de fogo ao longo da simulação, percebe-se que o fogo avança com maior facilidade na classe com maior acúmulo FL3, situada ao longo da região central na direção horizontal. O fogo se propaga mais lentamente na classe de menor acúmulo, FL1, situada nas extremidades superior e inferior do espaço celular. Um maior acúmulo de combustível, implica numa queima mais intensa, mais calor é transmitido da frente de fogo para o combustível vegetal, e mais rápido este é levado à ignição. Assim, um maior acúmulo de combustível proporciona uma maior velocidade de propagação do fogo (PYNE et al., 1996).

Um outro efeito testado por meio de simulação, é o da presença de obstáculos à propagação. Utilizando a classe de acúmulo CL1 ocupando todo o espaço celular, uma ignição pontual na célula central do espaço celular inicia a propagação da frente de fogo. Os obstáculos no espaço celular são representados por células sem vegetação.

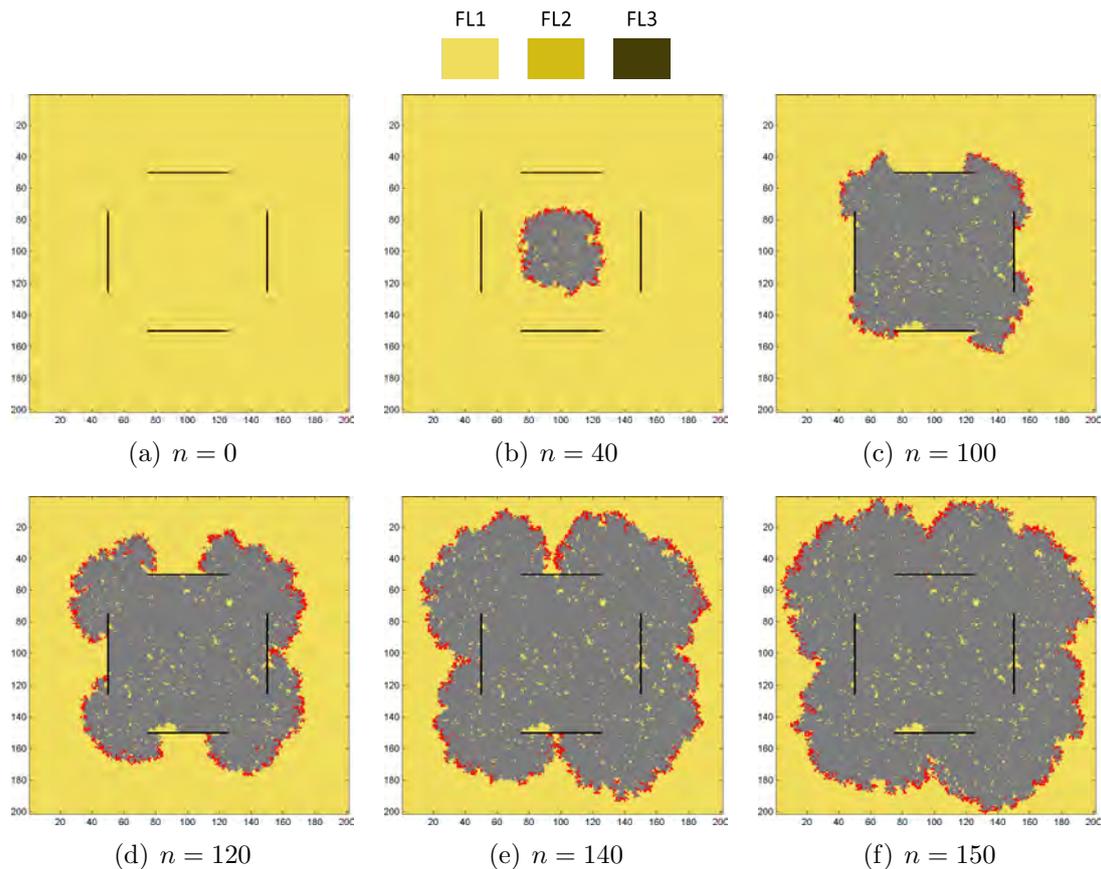


Figura 3.14 - Estados das células para a simulação de um cenário de incêndio com ignição pontual no centro do espaço celular, utilizando a classe de acúmulo CL1 e na presença de obstáculos em preto.

Observando a evolução dos padrões de propagação da Figura 3.14, a frente de fogo encontra os obstáculos e se extingue. Estes obstáculos podem ser naturais, como rios ou regiões rochosas, ou podem ser artificiais, como estradas ou aceiros. Segundo Pyne et al. (1996), obstáculos naturais ou artificiais provocam uma quebra na continuidade espacial do combustível vegetal, e quando a frente de fogo os encontra, se extingue.

### 3.4.2 Efeitos da umidade do combustível vegetal

Conforme discutido na Seção anterior, os efeitos da umidade do combustível vegetal sobre o comportamento do fogo são, reduzir a velocidade de propagação do fogo, e também diminuir a eficiência da queima do combustível, favorecendo a extinção do fogo. Para verificar este efeito no modelo, realizamos simulações de três cenários de incêndios, utilizando diferentes valores para a umidade do combustível, que são  $M = 5\%$ ,  $M = 10\%$  e  $M = 15\%$ . Os valores adotados para as constantes empíricas são  $b_1 = 0,1$  e  $b_2 = 0,05$ . Estes valores utilizados foram eventualmente escolhidos.

As três classes de acúmulo de combustível vegetal são distribuídas verticalmente em três faixas igualmente espaçadas ao longo do espaço celular. A frente de fogo parte de uma ignição em linha na extremidade esquerda do espaço celular. Despreza-se os efeitos do vento e da topografia, ou seja,  $\lambda_s = 1$  e  $\lambda_w = 1$  para todas as células.

A Figura 3.15 compara o efeito da variação da umidade do combustível vegetal sobre a propagação do fogo para os cenários utilizando diferentes valores de umidade de combustível vegetal. Percebe-se que, com o aumento da umidade do combustível vegetal, a frente de fogo encontra maior dificuldade para se propagar sobre as classes de vegetação. Isto pode ser observado comparando a posição da frente de fogo, para um mesmo valor de iteração do modelo, nos três cenários simulados. As Figuras 3.15(a), 3.15(d) e 3.15(g) mostram os estados das células para a iteração  $n = 50$ . As Figuras 3.15(b), 3.15(e) e 3.15(h) mostram os estados das células para a iteração  $n = 200$ . Já as Figuras 3.15(c), 3.15(f) e 3.15(i) mostram o estado final, definido na iteração em que a propagação cessa, e nenhuma célula encontra-se queimando.

Percebe-se nos cenários simulados, que o teor de umidade e o acúmulo de combustível vegetal atuam conjuntamente, condicionando a propagação do fogo. Embora todas as classes estejam com um mesmo teor de umidade, o fogo se propaga com maior facilidade em classes com maior acúmulo. Para a umidade de 5%, o fogo avançou sobre todas as classes de acúmulo, encontrando uma maior dificuldade de se propagar sobre a classe FL1. Para a umidade de 10%, o fogo avançou sobre as classes FL3 e FL2, e se extinguiu ao atingir a classe FL1 (menor acúmulo). Já para a umidade de 15%, o fogo se propagou sobre a classe FL3 (maior acúmulo) e se extinguiu ao atingir a classe FL2. Segundo Pyne et al. (1996), o teor de umidade de extinção é definido como o teor de umidade do combustível vegetal sob o qual o fogo não propaga, ou propaga esporadicamente e de uma forma dendrítica. Percebe-se que o efeito da umidade sobre a propagação do fogo consegue deslocar a fronteira crítica que separa o regime de propagação do regime de extinção no modelo. Considerando o efeito da umidade, o fogo encontra dificuldades de propagar, e até mesmo se extingue, em classes de acúmulo que outrora propagaria livremente sem efeito da umidade.

### 3.4.3 Efeitos da topografia

Para a análise dos efeitos da topografia sobre a propagação do fogo, simulamos um cenário de incêndio se propagando sobre a feição topográfica hipotética exibida na Figura 3.16 que define o valor de elevação das células ao longo do espaço celular. O cenário é caracterizado por uma vegetação homogênea constituída pela classe de acúmulo FL1, e com frente de fogo que parte de uma ignição em linha na extremidade

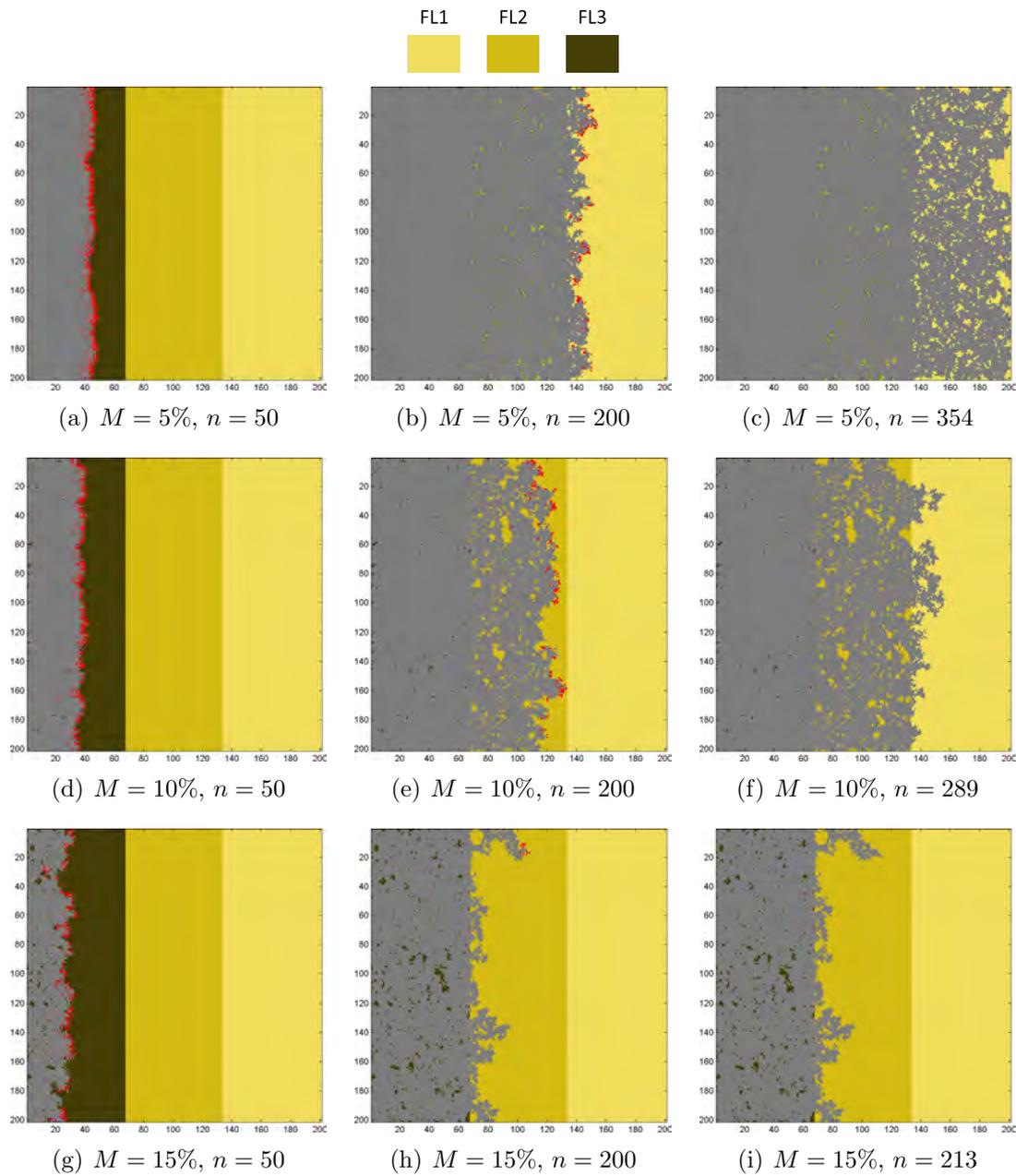


Figura 3.15 - Estados das células para a simulação de um cenário de incêndio com ignição em linha na borda esquerda do espaço celular para três cenários de incêndios simulados utilizando os diferentes valores de umidade do combustível vegetal  $M = 5\%$  (primeira linha),  $M = 10\%$  (segunda linha) e  $M = 15\%$  (terceira linha).

esquerda do espaço celular. O valor da constante empírica  $a = 0,05$  foi eventualmente escolhido. O cenário simulado despreza os efeitos do vento e da umidade do combustível vegetal, ou seja,  $\lambda_M = 1$  e  $\lambda_w = 1$  para todas as células. A Figura 3.17 mostra os subseqüentes estados das células para o cenário de incêndio simulado.

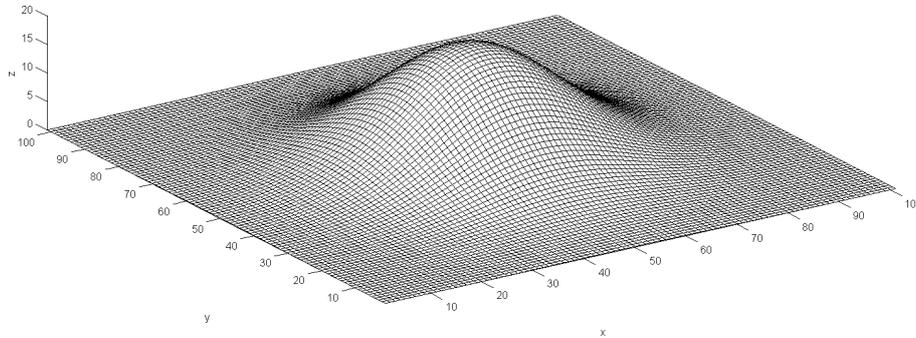


Figura 3.16 - Feição topográfica hipotética.

Percebe-se que, como consequência da feição topográfica, a frente de fogo tem sua forma alterada. A frente de fogo se propagando em linha reta até atingir a base da feição. A partir da base e até o cume da feição, a frente de fogo se propaga mais rapidamente na direção do gradiente de elevação (morro acima). A partir do cume e até atingir a outra extremidade da feição, a propagação se torna mais lenta, uma vez que a propagação se dá na direção contrária ao gradiente de elevação (morro abaixo). Deste modo, percebe-se que o modelo consegue representar qualitativamente o principal efeito da topografia sobre a propagação do fogo. Segundo Pyne et al. (1996), quando a frente de fogo se propaga a favor do gradiente de elevação, as chamas encontram-se mais próximas ao combustível vegetal que ainda não queimou, e uma maior quantidade de calor é transferida da frente de fogo ao combustível vegetal, levando-o a ignição mais rapidamente. De maneira inversa, quando a frente de fogo se propaga na direção contrária ao gradiente de elevação, as chamas encontram-se mais distantes ao combustível vegetal que ainda não queimou, e uma menor quantidade de calor é transferida ao combustível vegetal, levando-o a ignição mais lentamente. Assim, o fogo se alastra mais rapidamente morro acima, e mais lentamente morro abaixo, quando comparados com a propagação em superfície plana.

No modelo, o efeito da topografia sobre a forma da frente de fogo, se dá pela Equação 3.9, que define o multiplicador  $\lambda_s$ . Quando a superfície é plana,  $\theta_s = 0$  e  $\lambda = 1$  (fator multiplicativo neutro). Quando o fogo se propaga sobre gradiente de elevação positivo, temos que  $\theta_s > 0$  e  $\lambda_s > 1$  (fator multiplicativo que amplifica). Quando

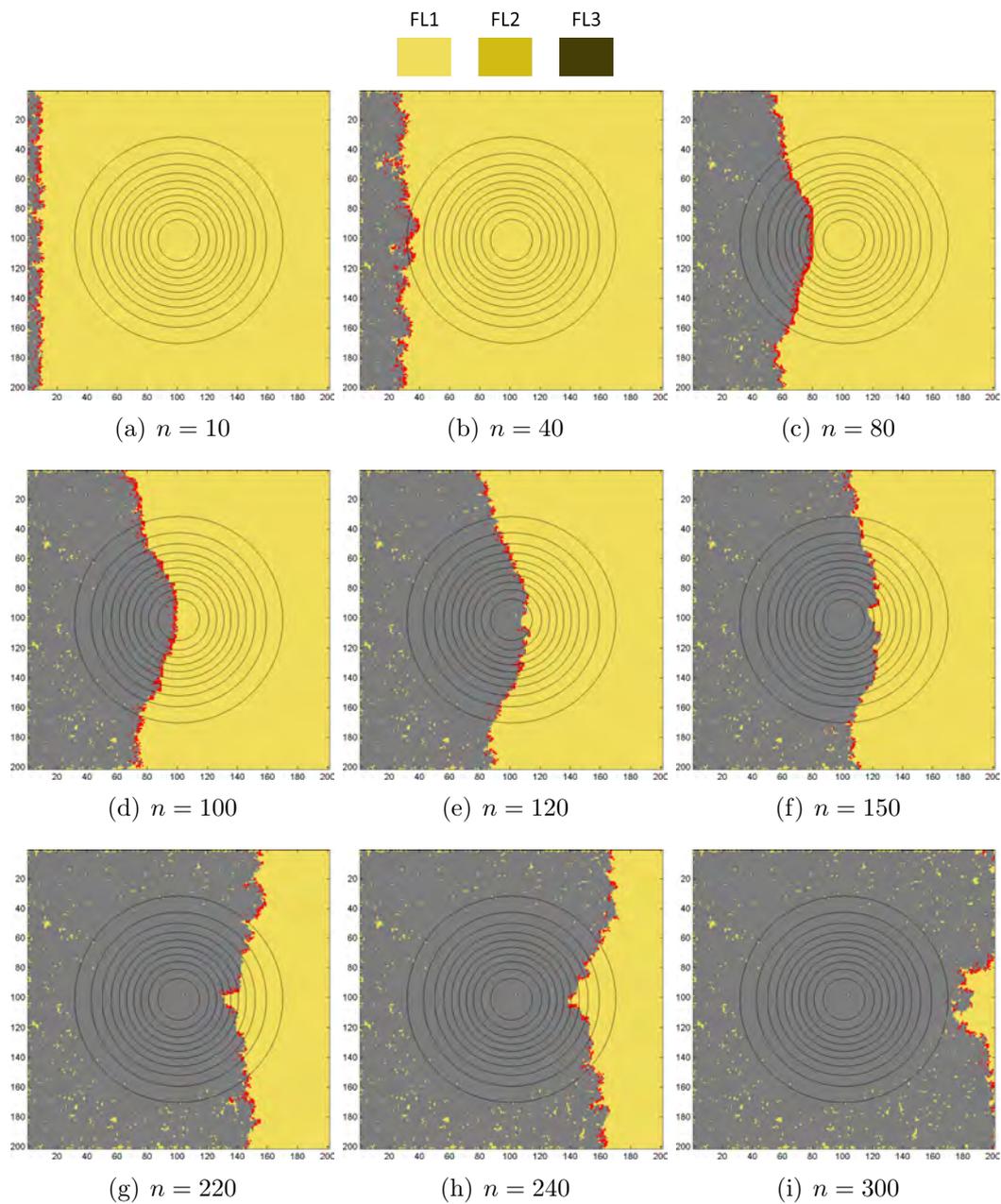


Figura 3.17 - Estados das células para a simulação de um cenário de incêndio com ignição em linha na borda esquerda do espaço celular, utilizando a classe de acúmulo FL1 e uma feição topográfica hipotética. As linhas em escuro representam as curvas de nível a cada 2 unidades de medida.

o fogo se propaga sobre gradiente de elevação negativo,  $\theta_s < 0$  e  $0 < \lambda_s < 1$  (fator multiplicativo que atenua). A Figura 3.18 mostra, para o cenário simulado ( $a = 0,05$ ), os valores de  $\lambda_s$  calculados para as oito direções de propagação do fogo, utilizando uma superfície plana, com diferentes valores de inclinação  $\theta_s$ . Percebe-se o efeito espacial que  $\lambda_s$  introduz no modelo, intensificar na direção do gradiente de elevação e reduzir na direção contrária.

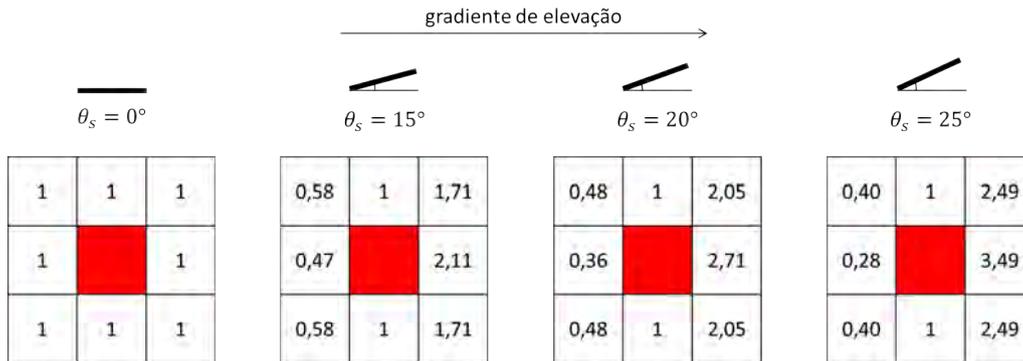


Figura 3.18 - Valores de  $\lambda_s$  ( $a = 0,05$ ) calculados para as oito direções de propagação do fogo, utilizando uma superfície plana, com diferentes valores de inclinação  $\theta_s$ .

#### 3.4.4 Efeitos da velocidade e direção do vento

O vento induz uma tendência na propagação do fogo. A Equação 3.11 quantifica este efeito, e depende de dois fatores: um fator unidimensional,  $c_1 \cdot U_2^c$ , que quantifica o efeito do vento na propagação do fogo; e um fator espacial,  $f(\omega)$ , que pondera o fator unidimensional ao longo das possíveis direções de propagação do fogo.

Para avaliarmos como o modelo descreve o efeito na variação da velocidade do vento, foram simulados quatro cenários de incêndios com diferentes valores de velocidade do vento 0 m/s, 2 m/s, 6 m/s e 10 m/s. O cenário é caracterizado por uma vegetação homogênea constituída pela classe de acúmulo FL1, e com uma frente de fogo que parte de uma ignição em linha na extremidade esquerda do espaço celular. Os valores utilizados para as constantes empíricas, eventualmente escolhidos, são  $c_1 = 0,10$ ,  $c_2 = 0,9$ , e  $c_3 = 0,05$ . Os efeitos da umidade do combustível vegetal e da topografia são desprezados, ou seja,  $\lambda_{M} = 1$  e  $\lambda_s = 1$  para todas as células. A Figura 3.19 mostra os estados das células quando  $n = 50$ ,  $n = 100$  e  $n = 150$  para os quatro cenários simulados.

Comparando os padrões de evolução para uma mesma iteração, pode-se notar que,

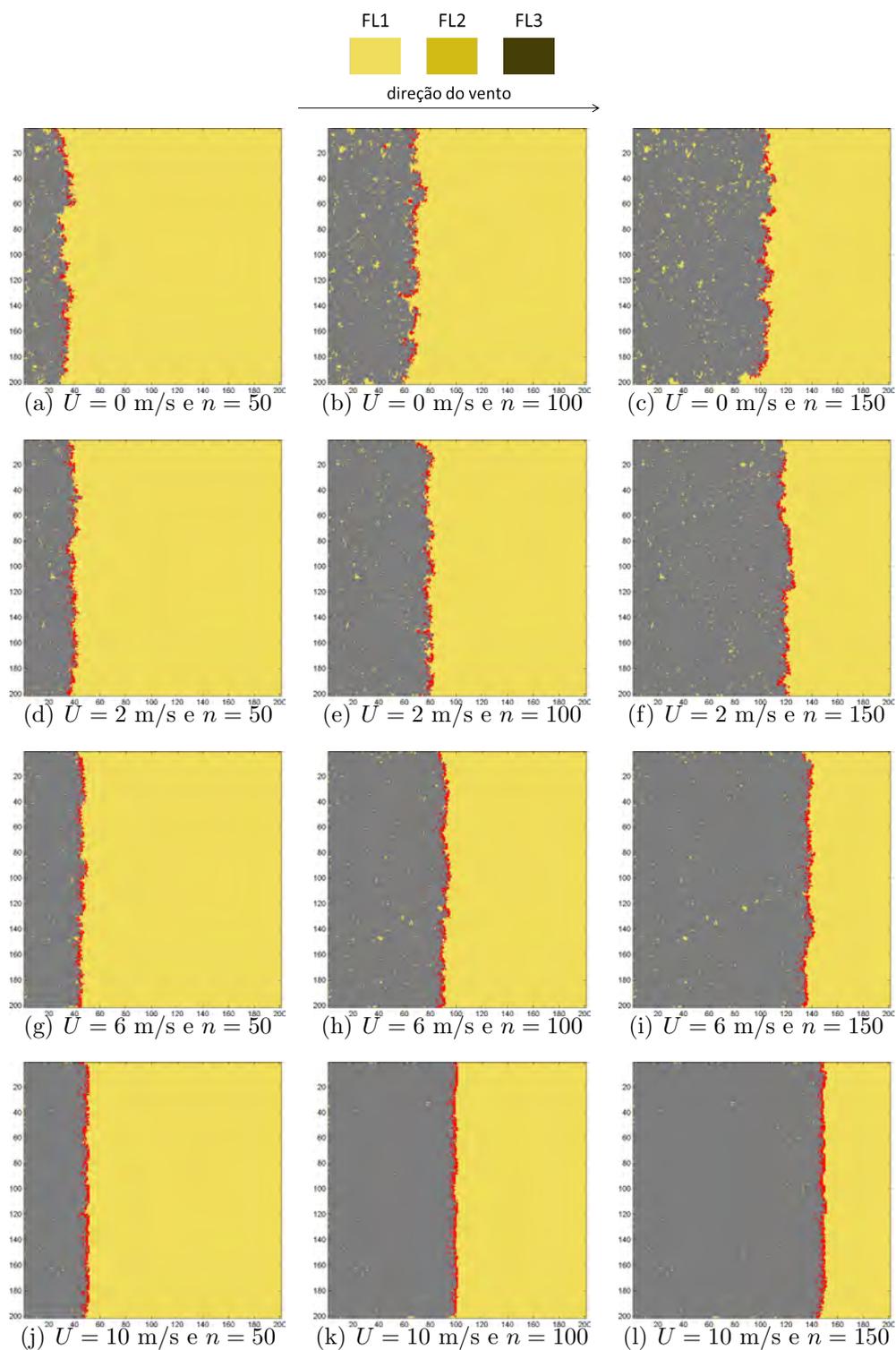


Figura 3.19 - Estados das células para a simulação de um cenário de incêndio com ignição em linha na borda esquerda do espaço celular, utilizando a classe de acúmulo FL1 e diferentes valores de velocidade do vento:  $U = 0 \text{ m/s}$  (primeira linha),  $U = 2 \text{ m/s}$  (segunda linha),  $U = 6 \text{ m/s}$  (terceira linha) e  $U = 10 \text{ m/s}$  (última linha). A direção do vento é horizontal, soprando no sentido da esquerda para a direita.

à medida que a velocidade do vento aumenta, a velocidade de propagação da frente de fogo na sua direção também aumenta. Pyne et al. (1996) afirma que, quando a frente de fogo se propaga à favor do vento, as chamas sofrem uma inclinação, ficando mais próximas ao combustível vegetal que ainda não queimou, levando-o a ignição mais rapidamente. Ou seja, a frente de fogo se propaga mais rapidamente à favor do vento. No modelo, o fator  $f(\omega)$  pondera este efeito ao longo das oito possíveis direções de propagação do fogo. A Figura 3.10(e) mostra o valor de  $f(\omega)$  ao longo das oito possíveis direções de propagação do fogo, para os mesmos valores de constantes empíricas e velocidade do vento utilizados no cenário simulado. Pela Figura, percebe-se que  $f(\omega)$  varia ao longo das direções de propagação, sendo maior quando estas estão a favor do vento e menor quando estão na direção contrária ao vento, e que esta anisotropia espacial torna-se mais intensa, à medida que a velocidade do vento aumenta.

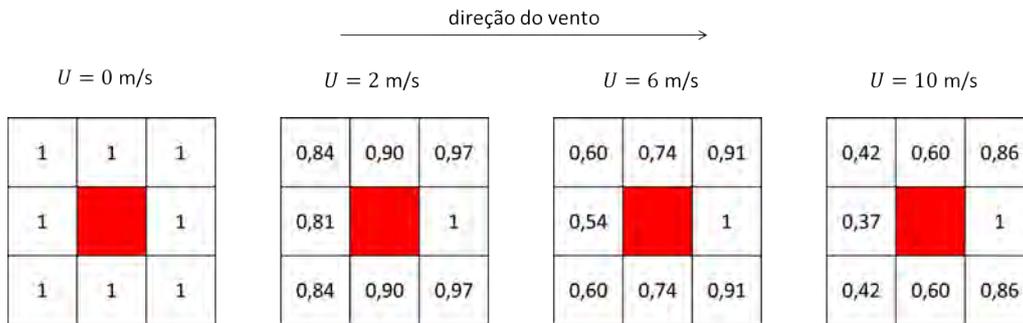


Figura 3.20 - Valores de  $f(\omega)$  ( $c_3 = 0,05$ ) calculados para as oito direções vizinhas de uma célula queimando diferentes valores de velocidade do vento.

Conforme observado na Figura 3.15, a umidade do combustível vegetal é um fator que atenua a propagação do fogo. Porém, o vento é um fator que a intensifica. De acordo com Cheney e Sullivan (2008), para incêndios em vegetação aberta, tais como campos onde predominam gramíneas, o vento e o acúmulo de combustível podem condicionar a propagação em vegetação úmida. Neste caso, para classes de acúmulo de combustível com determinado teor de umidade no qual o fogo não se propagaria, sob a ação do vento, o fogo pode se propagar.

A Figura 3.21 mostra as simulações do cenário que combina as condições de umidade do cenário apresentado nas Figuras 3.15(g), 3.15(h) e 3.15(i), que são,  $M = 15\%$  ( $b_1 = 0,1$  e  $b_2 = 0,05$ ), com a ação do vento de velocidade  $U = 15 \text{ m/s}$  ( $c_1 = 0,10$ ,  $c_2 = 0,9$ , e  $c_3 = 0,05$ ). Conforme observado nas Figuras 3.15(g), 3.15(h) e 3.15(i),

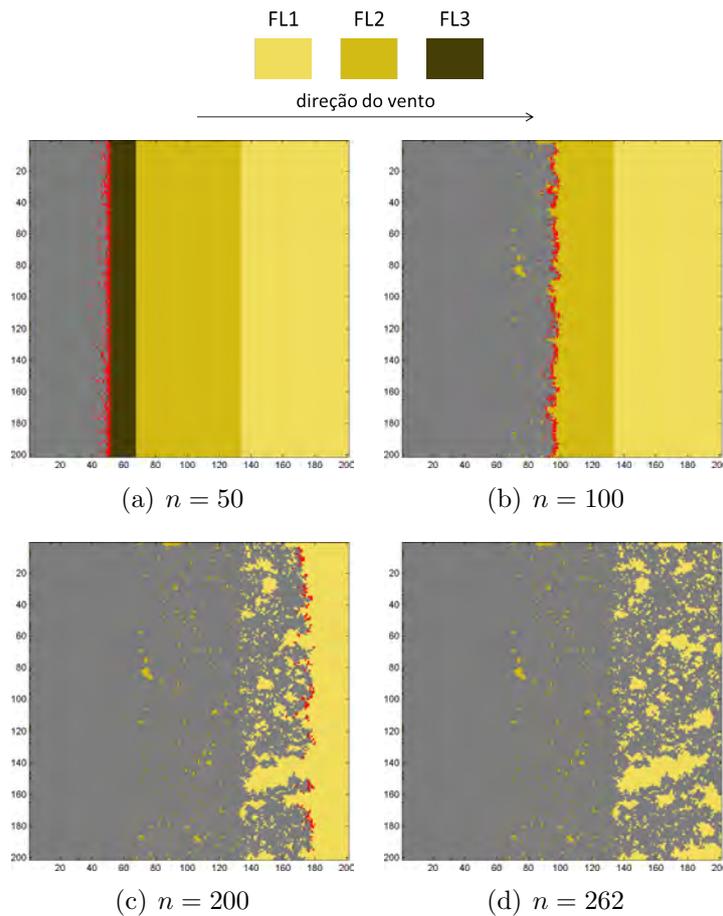


Figura 3.21 - Estados das células para a simulação de um cenário de incêndio com ignição em linha na borda esquerda do espaço celular, propagando sobre as classes FL1, FL2 e FL3, com umidade do combustível vegetal de  $M = 15\%$  ( $b_1 = 0,1$  e  $b_2 = 0,05$ ) e velocidade do vento  $U = 15$  m/s ( $c_1 = 0,10$ ,  $c_2 = 0,9$ , e  $c_3 = 0,05$ ). A direção do vento é horizontal, soprando no sentido da esquerda para a direita.

sem a ação do vento, o fogo se extingue ao atingir a classe de acúmulo FL2. Porém, conforme mostra a Figura 3.21, considerando o efeito do vento, o fogo encontra condições para se propagar por todas as classes de acúmulo, atingindo a extremidade direita do espaço celular.



## 4 AJUSTE E APLICAÇÃO DO MODELO

Este capítulo aborda as etapas de ajuste e aplicação do modelo de propagação do fogo. Na etapa de ajuste, também chamada de etapa de calibração, o modelo é ajustado para simular um incêndio real. Este procedimento é realizado via métodos de otimização. O Parque Nacional das Emas é utilizado como região-alvo de ajuste e aplicação do modelo.

### 4.1 Especialização do modelo para a região-alvo de estudo

#### 4.1.1 Dados geográficos utilizados

Os dados geográficos utilizados neste trabalho são oriundos de um banco de dados geográficos desenvolvido pela Profa. Dra. Helena França, do Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas da Universidade Federal do ABC, que é fruto de quase 20 anos de suas pesquisas na área de ecologia do fogo no Parque das Emas (FRANÇA, 1994; FRANÇA; SETZER, 1997b; FRANÇA; SETZER, 1997a; FRANÇA, 2007). Grande parte dos dados encontram-se publicados na referência (FRANÇA et al., 2007), publicação conjunta com o Dr. Mário Barroso Ramos Neto, outro importante pesquisador na área de ecologia de fogo no Cerrado, e que também colaborou fornecendo dados da vegetação do Parque publicados na referência (RAMOS NETO, 2000).

O banco de dados foi produzido, manipulado e gerenciado dentro do ambiente do Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING) (CAMARA et al., 1996), um sistema de informações geográficas no estado-da-arte, com funções de processamento de imagens de sensoriamento remoto, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais, que é desenvolvido e disponibilizado gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Em sua versão original, o banco de dados constitui-se pelos seguintes dados espaciais: incêndios mapeados em intervalos anuais de junho a maio, imagens de satélite que serviram de base para o mapeamento dos incêndios, malha de aceiros, malha de drenagem, limites do Parque, modelo digital de elevação adquirido a partir do Banco de dados geomorfológicos do Brasil – TOPODATA (VALERIANO, 2005), e mapa de vegetação caracterizando as fisionomias presentes no Parque.

#### 4.1.2 Caracterização do combustível vegetal

Na definição das classes que definem os tipos de combustível vegetal, assume-se uma simplificação do mapa de vegetação do bioma Cerrado, que leva em conta a estrutura geral das fisionomias, e sua capacidade em suportar a propagação do fogo. Os incêndios nas fisionomias do Cerrado são do tipo de superfície, alimentados pelos combustíveis finos, que estão situados imediatamente acima da superfície, compondo o estrato herbáceo/subarbustivo (MISTRY, 1998; MIRANDA et al., 2002; MIRANDA et al., 2009). Combustíveis lenhosos como troncos e ramos, embora também possam ser consumidos pelo fogo, não contribuem para a propagação da frente de fogo, uma vez que podem continuar queimando por horas após a sua passagem (MIRANDA et al., 2009). O mapa simplificado adotado para a vegetação do Parque Nacional das Emas, mostrado na Figura 4.1, agrupa os tipos fitofisionômicos em quatro classes gerais, distintas pela predominância do estrato herbáceo/subarbustivo e por características de relevo. Estas classes são descritas a seguir:

- **Cerrado aberto (FC1):** abrange áreas ocupadas pelos tipos fitofisionômicos campo limpo, campo sujo e campo cerrado, onde o estrato herbáceo/subarbustivo é contínuo e dominante. Os valores de porcentagem de combustão deste componente, após a passagem da frente de fogo, chegam a mais de 90% (MIRANDA et al., 2009).
- **Cerrado fechado (FC2):** abrange as áreas ocupadas pelos tipos fitofisionômicos cerrado stricto sensu e vegetação arbustiva, onde há um maior adensamento do estrato herbáceo/arbustivo e o estrato herbáceo/subarbustivo é menos dominante. Aqui, o combustível vegetal é constituído predominantemente por folhas e gravetos e pouco predominantemente por gramíneas. Nesta classe, o consumo de combustíveis finos após a passagem da frente de fogo é mais reduzido do que em fisionomias abertas. Devido ao alto teor de umidade dos combustíveis vivos, à baixa intensidade da queima e à sutil passagem da frente de fogo, existe um pequeno consumo, na ordem de 13% a 60%, das folhas e galhos das árvores, e de pequenos arbustos (KAUFFMAN et al., 1994; CASTRO; KAUFFMAN, 1998; MIRANDA, 2002; MIRANDA et al., 2002; MIRANDA et al., 2009).
- **Campo úmido (FC3):** abrange as áreas ocupadas pelos tipos fitofisionômicos campo úmido e varjões, cerrado hipersazonal, e campo de murundum, que são fisionomias abertas predominantemente ou sazonalmente inundadas, e encontram-se geralmente em áreas adjacente às drenagens.

Durante a estação chuvosa, onde predominam a maioria dos incêndios do Parque, estas áreas encontram-se úmidas e, na maioria das vezes, o fogo não encontra condições de se propagar em seu interior;

- **Floresta (FC4):** abrange as áreas ocupadas pelos tipos fitofisionômicos floresta ripícola e floresta estacional semidecídua, que são concentradas principalmente nas áreas de drenagem. As espécies dominantes são sensíveis à queima e, de forma geral, somente as bordas destas áreas são atingidas pelo fogo, podendo atingir seu interior somente em casos excepcionais, como o caso do grande incêndio de 1994 (RAMOS NETO; PIVELLO, 2000).

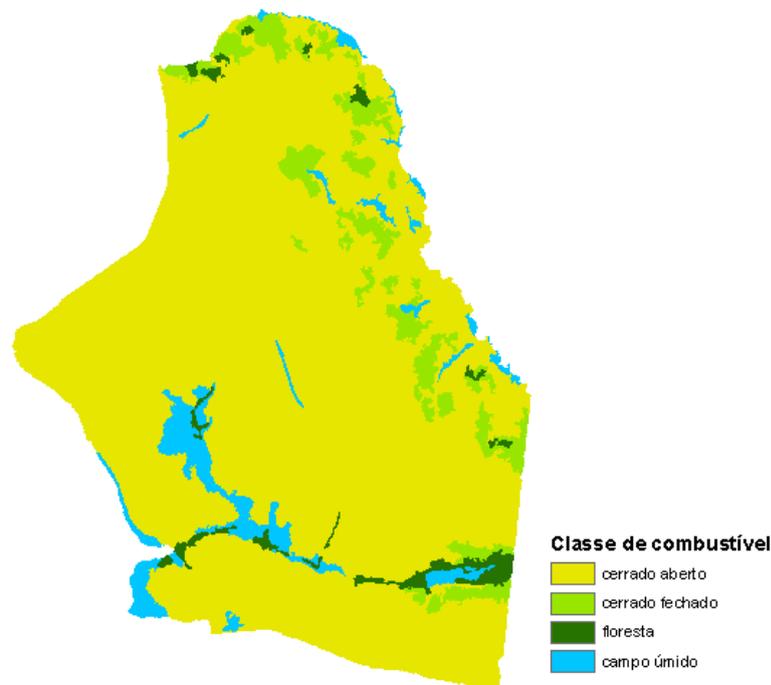


Figura 4.1 - Classes de tipo de combustível vegetal utilizadas no modelo.

Os combustíveis finos do Cerrado são no geral constituídos por gramíneas, folhas, gravetos e pequenos arbustos. Devido ao seu alto grau de inflamabilidade, as gramíneas e outros tipos vegetações rasteiras de pequeno porte, são considerados a maior fonte de material combustível nas fisionomias do Cerrado (KAUFFMAN et al., 1994). Nos cerrados abertos do Parque Nacional das Emas, predomina a gramínea conhecida por capim-flecha (*Tristachya leiostachya*) (RAMOS NETO; PIVELLO, 2000). Coutinho (1990) destaca a importância do comportamento fenológico desta

espécie, que se faz presente nas fisionomias abertas do Parque, e é responsável por um grande incremento de fitomassa combustível, que tem como consequência um ciclo de queima predominante em intervalo de três a quatro anos, conforme observado predominantemente no histórico de incêndios do Parque até 1994.

Classes de acúmulo de combustível vegetal são definidas somente para as fisionomias abertas do Parque. A análise da inflamabilidade das fisionomias abertas em função dos anos sem queima, obtida a partir do histórico de incêndios mapeados para o período de 1984 a 2010, conforme mostrado na Seção 2.6, corrobora a ideia de que a inflamabilidade das fisionomias abertas aumenta à medida que o tempo desde o último incêndio.

São definidas um total de 3 classes de acúmulo, agrupadas em função de estágios significantes de acúmulo de combustível vegetal observados em regiões de cerrado aberto (FC1) com predominância do capim-flecha (IBAMA, 2004; FRANÇA et al., 2007; RAMOS NETO, 2000). Estas classes são definidas como:

- **Cerrado aberto com acúmulo baixo (FC1-FL1):** que corresponde a áreas com menos de um ano sem queima, com quantidade de combustível vegetal acumulado de até um pouco mais de 1 tonelada/hectare;
- **Cerrado aberto com acúmulo médio (FC1-FL2):** que corresponde a áreas com entre um e três anos sem queima, onde a quantidade de combustível vegetal é superior a 2 toneladas/hectare e inferior a 5 toneladas/hectares;
- **Cerrado aberto com acúmulo alto (FC1-FL3):** que corresponde a áreas que com mais de 3 anos sem queima, e a quantidade de combustível vegetal é superior a 5 toneladas/hectare, quantidade de acúmulo favorável para grandes e incontroláveis incêndios.

O mapa das classes de acúmulo de combustível vegetal é produzido a partir da sobreposição dos mapeamentos anuais dos incêndios. Desta forma, por exemplo, o mapa de acúmulo para o mês de junho de 2007, é produzido a partir da sobreposição dos períodos de mapeamentos anuais de incêndios anteriores a junho de 2007, que são os períodos de junho de 2006 a maio de 2007 (menos de 1 ano sem queima), de junho de 2004 a maio de 2005 e de junho de 2005 a maio de 2006 (entre 1 e 3 anos sem queima), e qualquer outro anterior à junho de 2005 (mais de 3 anos sem queima). A Figura 4.2 ilustra a obtenção das classes de acúmulo para junho de 2007.

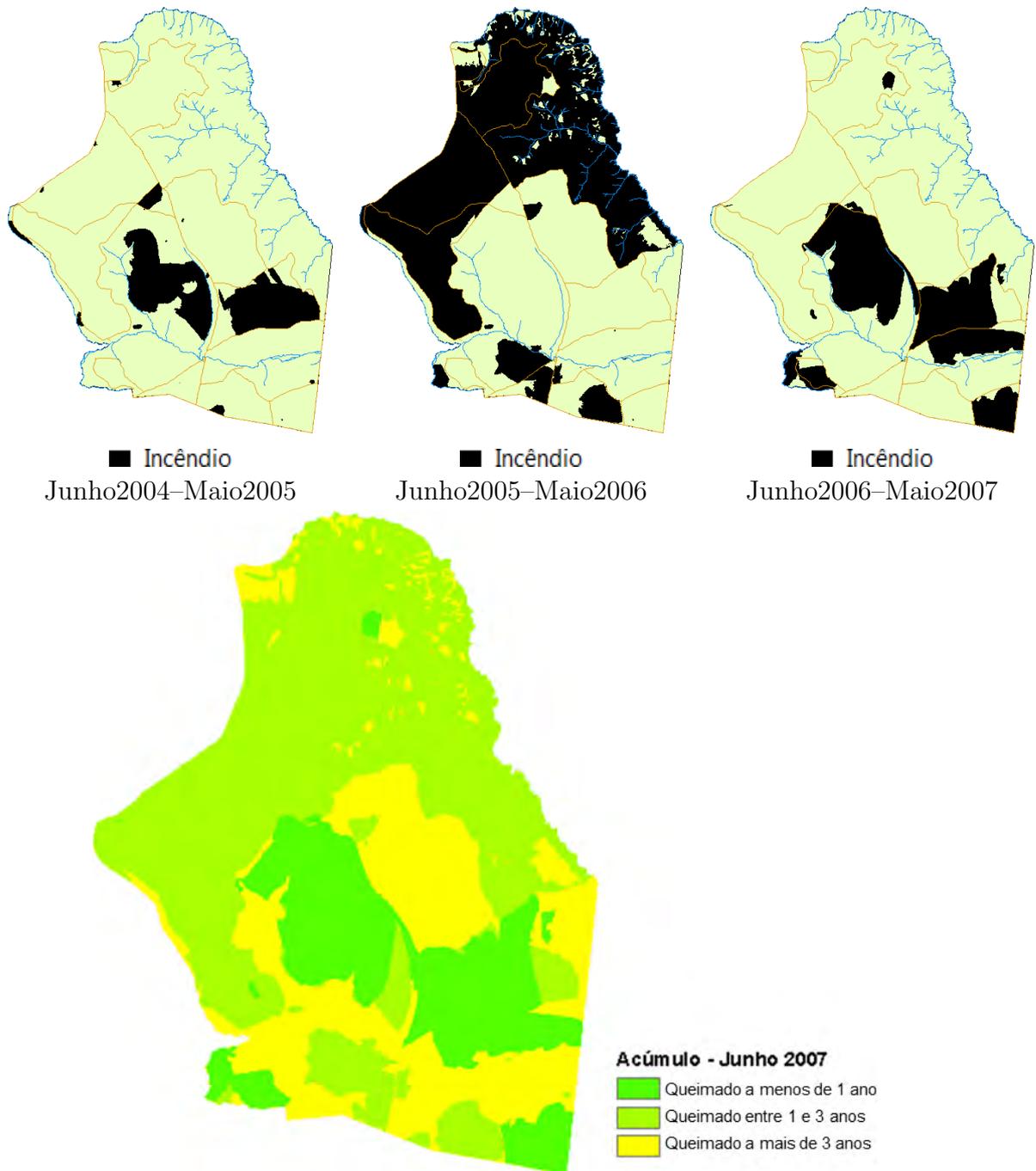


Figura 4.2 - Ilustração do processo de obtenção do mapa de classes de acúmulo.

A umidade do combustível vegetal, pode ser obtida a partir de medidas em campo, ou podem ser estimados via modelos empíricos que utilizam como dados de entrada informações das condições atmosféricas, dentre elas, a umidade relativa do ar (VIEGAS et al., 2001; SALINERO; CHUVIECO, 2003; DEGROOT; WARDATI, 2005; AGUADO et al., 2007). Devido à indisponibilidade de dados de umidade de combustível vegetal,

considera-se, a nível de simplificação, a umidade relativa do ar como dado de entrada. Esta simplificação se fundamenta na estreita relação de equilíbrio que existe entre a umidade relativa do ar e a umidade dos combustíveis finos. Os combustíveis finos, com diâmetro inferior a 6 mm, em condições de baixa umidade relativa do ar, num período superior a uma hora, passa de úmido, umidade maior que 50%, para seco, com valores inferiores a 12% (PYNE et al., 1996).

#### 4.1.3 Dados de entrada, estados das células e regras locais

A Tabela 4.1 apresenta os dados de entrada do modelo e respectivas unidades. Os dados são agrupados em duas principais categorias, que são, dados espaciais, que representam as informações geográficas, e dados meteorológicos, que descrevem o estado da atmosfera. Pelo formalismo de modelagem utilizado, todas as representações do espaço geográfico utilizadas são discretas no espaço, na forma de grade regular (*raster*). O mapa de tipo de combustível identifica um total de 4 classes, que são FC1 (cerrado aberto), FC2 (cerrado fechado), FC3 (campo úmido) e FC4 (floresta). O mapa de acúmulo de combustível vegetal só se aplica ao tipo de combustível cerrado aberto, e identifica três tipos de classes de acúmulo, que são, FC1-FL1 (queimado entre 0 e 1 ano), FC1-FL2 (queimado entre 1 e 3 anos) e FC1-FL3 (queimado a mais de 3 anos). O modelo digital de elevação descreve a altitude, em metros, de cada célula do espaço celular. O mapa de obstáculos naturais identifica a presença, representada por valor 1, ou ausência, representada por valor 0, de obstáculos naturais (rios) ou artificiais (aceiros ou estradas) no interior do Parque. Os dados meteorológicos são dados tabulados que indicam o instante de tempo, e respectivos valores de velocidade do vento (m/s), direção do vento (graus) e umidade relativa do ar (porcentagem).

Todos os dados espaciais necessitam estar na mesma resolução espacial. O tamanho das células adotado é de 30 metros  $\times$  30 metros, por esta ser a resolução espacial da maioria das imagens de sensoriamento remoto utilizadas no mapeamento, o sensor TM do satélite LANDSAT 5. Para a resolução temporal, adota-se o valor de  $\Delta t = 50$  segundos. Segundo Miranda et al. (2009), incêndios documentados em Cerrado podem atingir a velocidade máxima de 0,6 m/s, sendo frequentemente na ordem de 0,2 m/s a 0,5 m/s. Como o valor da resolução espacial é fixo, e igual a 30 metros, a resolução temporal escolhida permite modelar incêndios dentro do limite frequente de velocidade de propagação, pois, a velocidade máxima de propagação que pode representar é de  $R = \Delta l / \Delta t = 30 / 50 = 0,6$  m/s.

O software MATLAB (MATLAB, 2010) é o ambiente computacional utilizado para

Tabela 4.1 - Descrição dos dados de entrada do modelo.

<b>Dados espaciais</b>	
<b>Dado de entrada</b>	<b>Descrição/Unidade</b>
Tipo de combustível vegetal	FC1, FC2, FC3 e FC4
Classe de acúmulo de combustível vegetal	FC1-FL1, FC1-FL2 e FC1-FL3
Modelo digital de elevação	altitude em metros
Obstáculos naturais e artificiais	aceiro ou rio
Posição de início do incêndio	células $(i, j)$ tal que $S_{(i,j)}^0 = F$
<b>Dados meteorológicos</b>	
<b>Dado de entrada</b>	<b>Descrição/Unidade</b>
Velocidade do vento	m/s
Direção do vento	graus
Umidade do combustível vegetal	%

modelagem computacional, simulação, ajuste e visualização dos resultados do modelo. Todos os dados geográficos utilizados como dados de entrada do modelo são exportados para arquivos de texto codificados no formato ASCII Raster da ESRI (ORMSBY et al., 2004). Estes arquivos são lidos e armazenados em uma estrutura de dados que define o espaço celular do modelo. A Figura 4.3 resume o processo de construção do espaço celular.

O espaço de atributos das células são definidos em função dos dados geográficos, que são, classe de combustível vegetal, classe de acúmulo de combustível vegetal, elevação, e obstáculo natural ou artificial. O conjunto de possíveis estados que as células podem apresentar são: cerrado aberto com acúmulo baixo (FC1-FL1), cerrado aberto com acúmulo médio (FC1-FL2), cerrado aberto com acúmulo alto (FC1-FL3), cerrado fechado (FC2), campo úmido (FC3), floresta (FC4), célula queimando (F), célula queimada (O), aceiro (FB) e rio (R). A Figura 4.3 também mostra os estados das células e respectivas cores utilizadas na visualização do espaço celular.

Somente células com combustível vegetal podem propagar o fogo. Conforme mostrado no diagrama de transição de estados da Figura 4.4, somente os estados FC1-FL1, FC1-FL2, FC1-FL3, FC2, FC3 e FC4 podem mudar para o estado célula queimando (F). A transição é condicionada pela probabilidade  $I$ , calculada pela Equação 3.8, e depende do tipo de combustível vegetal, do acúmulo de combustível vegetal, da umidade do combustível vegetal, da topografia, e da velocidade e direção do vento. A mudança de estado de célula queimando (F) para célula queimada (O) é condicionado pela probabilidade  $B$ , que é calculada pela Equação 3.4, e depende do tipo de combustível vegetal e do teor de umidade do combustível vegetal. Uma vez

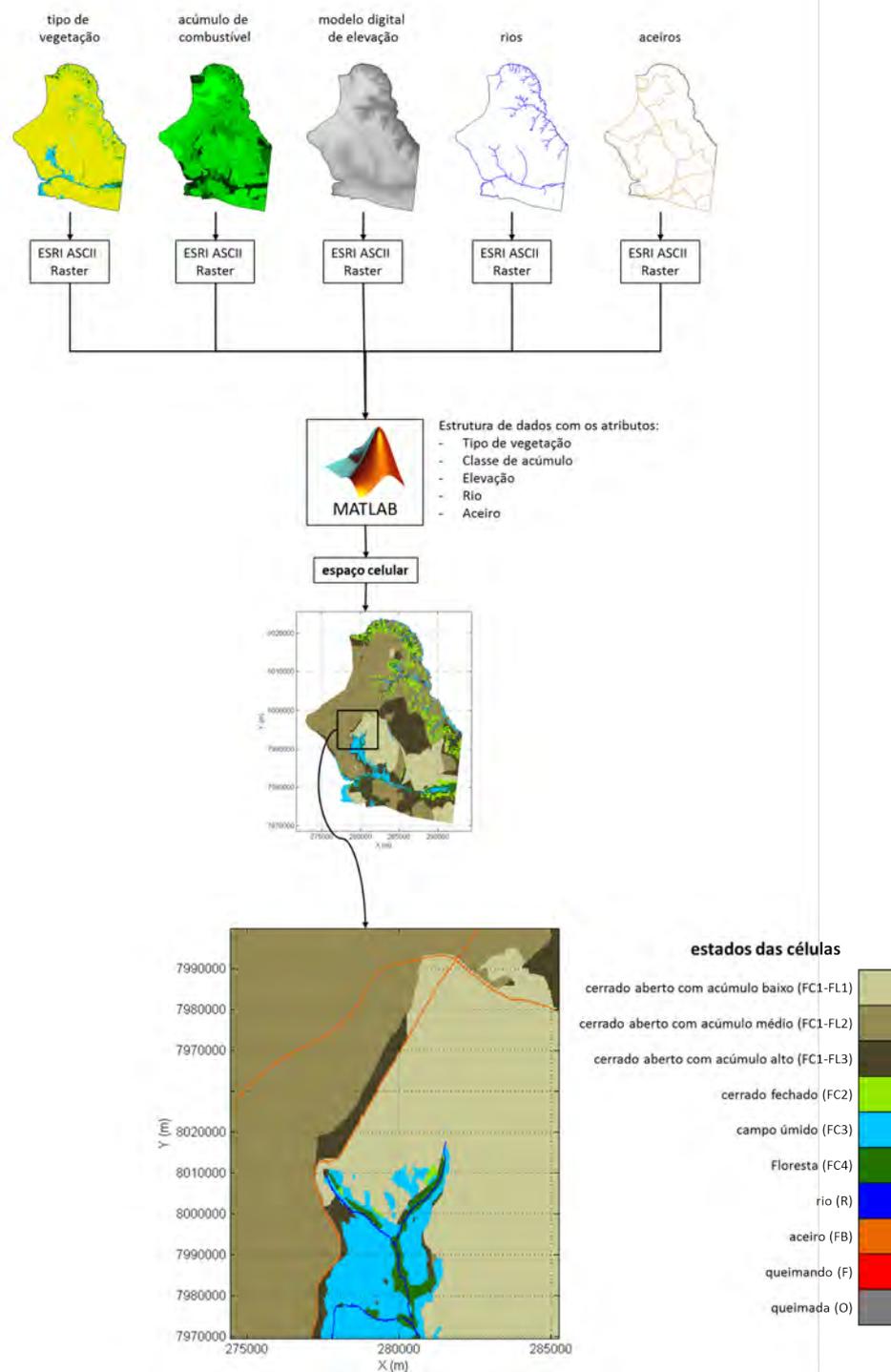


Figura 4.3 - Dados de entrada e construção do espaço celular.

alcançado o estado célula queimada (O), este não muda. Células não combustíveis, que caracterizam os obstáculos naturais (rios) ou artificiais (aceiros ou estradas), não propagam o fogo, logo não mudam.

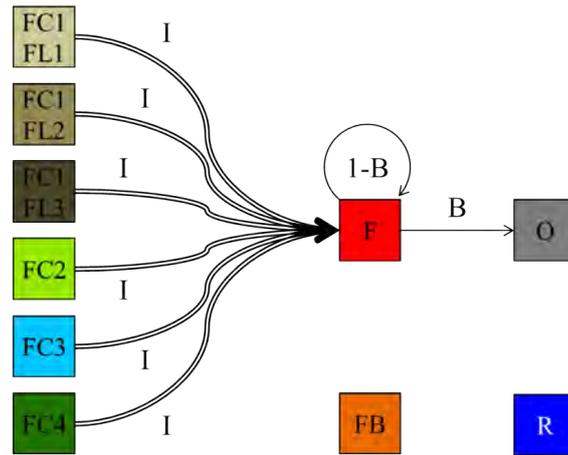


Figura 4.4 - Diagrama transições de estados das células do modelo.

## 4.2 Metodologia de ajuste do modelo

### 4.2.1 Definição dos valores das probabilidades elementares

Nesta etapa de ajuste são efetuadas a escolha dos valores das probabilidades elementares  $I_0$  e  $B_0$ , para as classes de combustível vegetal, e respectivas classes de acúmulo de combustível vegetal. A escolha dos valores define-se a partir de uma escala que compara as classes de combustível vegetal quanto à capacidade de suportar a propagação de incêndios de superfície, mais especificamente, quanto às características do estrato herbáceo/subarbustivo, como dominância e deficiência hídrica. A Figura 4.5 mostra esta escala comparativa. São consideradas os seguintes critérios para a definição desta escala:

- a) **Cerrado aberto e respectivas classes de acúmulo:** Assume-se que o tipo fisionômico influencia na abundância de combustível vegetal superficial, sendo maior nas fisionomias abertas, uma vez que o estrato herbáceo/subarbustivo é mais denso e dominante (OTTMAR et al., 2001). Considera-se que o mosaico de anos sem queima influencia na dinâmica de propagação do fogo. Uma classe de menor acúmulo de combustível vegetal tem menor chance de o fogo se sustentar e se propagar, quando comparadas a uma classe de maior acúmulo. A análise de histórico de incêndio para a classe cerrado aberto, apresentada na Seção 2.6, fundamenta esta dependência temporal. Por ter o estrato herbáceo/subarbustivo contínuo e dominante, esta classe de combustível vegetal é colocada como a primeira na escala de capacidade de suporta a propagação de incêndios. As respec-

tivas classes de acúmulo são dispostas nesta escala em ordem crescente de quantidade de combustível acumulado. Por não possuir combustível vegetal acumulado suficiente para suportar a propagação do fogo, os valores de  $B_0$  e  $I_0$  para a classe de acúmulo FL1-FC1 são posicionados no regime de extinção. Para as demais classes de acúmulo, FC1-FL2 e FC1-FL3, os valores de  $B_0$  e  $I_0$  são posicionados dentro do regime de propagação. A diferença nos valores reflete o maior acúmulo, sendo que para a classe FC1-FL3, o valor de  $I_0$  é o maior e  $B_0$  é o menor;

- b) **Cerrado fechado:** Como nesta classe predominam as espécies do estrato herbáceo/arbustivo em densidade intermediária (RIBEIRO; WALTER, 1998). Já o estrato herbáceo/subarbustivo é menos desenvolvido, quando comparado às fisionomias abertas, e mais desenvolvido, quando comparado à floresta. Logo, em relação à capacidade de suportar a propagação do fogo, esta classe é posicionada na escala intermediária entre floresta e campo úmido. Assume-se que o comportamento do fogo é definido pelo regime de propagação;
- c) **Campo úmido:** Embora seja uma fisionomia aberta, a intensidade da queima deste tipo de combustível vegetal é muito menor, em geral menos de 50%, do que as descritas em fisionomias secas de savanas (SCHMIDT et al., 2011). Esta diferença ocorre pela maior disponibilidade de água na superfície dos solos de campos úmidos de Cerrado, e conseqüentemente menor restrição hídrica para as espécies do estrato herbáceo/subarbustivo (CIANCIARUSO; BATALHA, 2008). Deste modo, assume-se que a classe campo úmido tem capacidade de suportar a propagação imediatamente inferior que a classe cerrado aberto. Devido ao elevado teor de umidade, considera-se que os parâmetros  $B_0$  e  $I_0$  desta classe encontram-se dentro do regime de extinção;
- d) **Floresta:** Por possuírem alta resistência ao fogo, de uma forma geral, durante os incêndios, apenas as bordas das fisionomias florestais são atingidas<sup>1</sup> (RAMOS NETO, 2000). Desse modo, assume-se que tanto a capacidade de ignição quanto a persistência são baixos. Na escala, esta classe é posicionada abaixo de todas as demais, por ser aquela onde o estrato herbáceo/subarbustivo é menos dominante. Os valores de  $B_0$  e  $I_0$  escolhidos incluem os padrões de propagação de propagação no regime de extinção.

---

<sup>1</sup>O fogo atingiu o interior das florestas em poucas oportunidades, sendo a incêndio de 1994 uma das mais graves neste aspecto (RAMOS NETO, 2000).



Figura 4.5 - Escala comparativa entre as classes de combustível vegetal definida a partir da capacidade de suportar a propagação do fogo.

Os valores de  $B_0$  e  $I_0$  são escolhidos com base na escala definida, e no padrão de propagação do fogo assumido para a classe. A escolha dos valores é definida sobre o gráfico mostrado na Figura 3.7. Uma informação essencial para se definir o valor de  $B_0$  e  $I_0$  é utilizar um valor de velocidade média de propagação do fogo característico para a classe de combustível e respectiva classe de acúmulo. Para as classes de acúmulo de cerrado aberto FC1-FL2 e FC1-FL3, adota-se como referência o valor de velocidade de propagação do fogo medidos em incêndios experimentais executados durante a estação seca, em campo sujo, na reserva ecológica do IBGE em Brasília, estado do Distrito Federal (PIVELLO et al., 2010). Para a classe de acúmulo FC1-FL2 adotou-se o valor de velocidade de propagação de 0,3 m/s (medida mais frequente obtida nas queimadas áreas com dois anos sem queima), e para a classe FC1-FL3 adotou-se o valor de 0,4 m/s (medida mais frequente obtida em queimadas nas áreas com mais de 3 anos sem queima). Para a classe cerrado fechado, adota-se o valor de 0,2 m/s, que é o limite inferior da faixa de velocidades de propagação do fogo normalmente documentadas em Cerrado (MIRANDA et al., 2009). Para a classe campo úmido, por não se dispor de medidas experimentais de velocidade de propagação do fogo, adota-se como referência o definido para a classe cerrado aberto com acúmulo médio (FC1-FL2), porém, com menor persistência. Para a classe floresta, adota-se como referência a velocidade média de propagação do fogo obtida em queimadas experimentais realizadas em um trecho de floresta estacional semidecidual de um sítio experimental da Universidade Federal de Viçosa, estado de Minas Gerais (CAMARGOS, 2001). Os experimentos foram realizados em 10 parcelas de 5 metros  $\times$  5 metros sob condições controladas, registraram valor de velocidade média de 0,017 m/s. Adota-se este valor como referência da velocidade média de propagação do fogo na classe e os valores de probabilidades elementares são inseridos dentro do regime de extinção. A Tabela 4.2 mostra os valores de  $I_0$  e  $B_0$  escolhidos cada classe de tipo de combustível vegetal e respectiva classe de acúmulo. A Figura 4.6 posiciona

os valores escolhidos sobre as curvas de nível da velocidade de propagação do fogo do modelo ( $R = R_0 \cdot (\Delta l / \Delta t)$ ).

Tabela 4.2 - Valores para as probabilidades elementares  $I_0$  e  $B_0$  escolhidos para as classes de combustível vegetal e respectivas classes de acúmulo.

	cerrado aberto FC1			cerrado fechado FC2	campo úmido FC3	floresta FC4
	FL1	FL2	FL3			
$B_0$	0,350	0,250	0,220	0,450	0,700	0,800
$I_0$	0,075	0,115	0,152	0,100	0,115	0,075

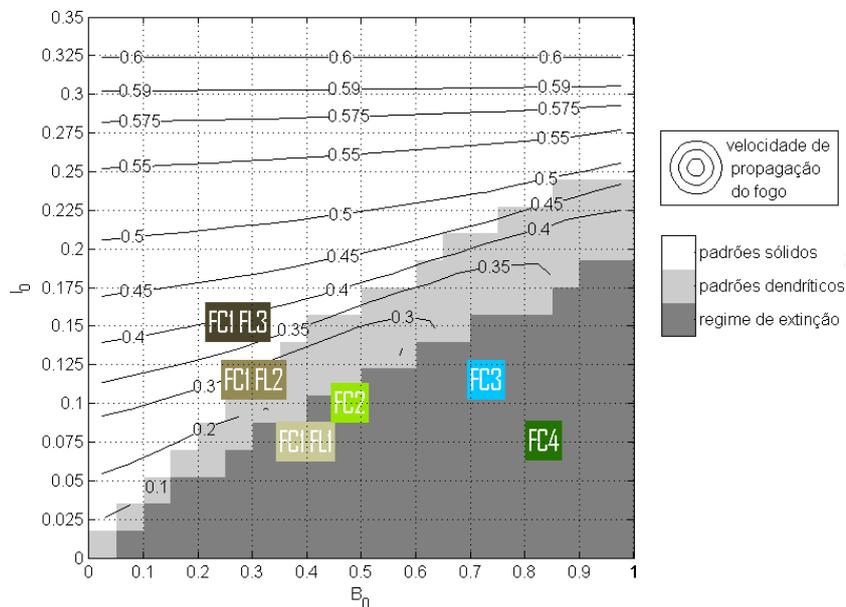


Figura 4.6 - Valores de  $B_0$  e  $I_0$  posicionado sobre as curvas de nível da velocidade de propagação do fogo no espaço de parâmetros do modelo.

#### 4.2.2 Definição dos valores das constantes empíricas

Uma vez definidos os valores das probabilidades elementares, o próximo passo é buscar os valores das constantes empíricas, para os quais o modelo seja capaz de reproduzir um incêndio, o mais parecido possível, dadas as condições ambientais em que ele ocorreu. Este problema consiste em buscar uma solução ótima  $\mathbf{x}^*$ , dentro de um espaço de busca  $\mathfrak{S}$  de soluções candidatas, definido pelo conjunto de todos os valores possíveis de constantes empíricas  $\mathbf{x} = (a, b_1, b_2, c_1, c_2, c_3)^T \in \mathfrak{S}$ , onde  $\mathfrak{S} \subset \mathbb{R}^6$ .

O critério de escolha da solução ótima baseia-se numa métrica que nos diz o quão adequada é uma solução candidata. Esta métrica pode ser obtida a partir da comparação entre a extensão, em termos de área atingida, dos incêndios real e simulados. Esta comparação pode ser mensurada pela seguinte função:

$$f_A(\mathbf{x}) = 1 - \frac{A(A_R \cap A_S)}{A(A_R \cup A_S)}, \quad (4.1)$$

onde  $A(A_R \cap A_S)$  e  $A(A_R \cup A_S)$  são, respectivamente, as áreas da intersecção e da união entre as áreas dos incêndios real  $A_R$  e simulado  $A_S$  (AVOLIO; DI GREGORIO, 2004). O incêndio é simulado para um dado conjunto de constantes empíricas. A função  $f_A(\mathbf{x}) \in [0, 1]$  (Equação 4.1) quantifica, em proporção, o quanto a área do incêndio simulado reproduz a área do incêndio real. Se as áreas se sobrepõem perfeitamente, temos que  $A(A_R \cap A_S) = A(A_R \cup A_S)$ , logo  $f(\mathbf{x}) = 0$ . Se as áreas não se sobrepõem perfeitamente, temos que  $0 < f(\mathbf{x}) \leq 1$ .

Visando avaliar as soluções candidatas em termos de extensão e de tempo de duração do incêndio, um fator multiplicativo é adicionado à Equação 4.1, penalizando as soluções candidatas cujo tempo de simulação se antecipa ao tempo real do incêndio. Desta forma, a função de custo do problema de ajuste assume a forma:

$$f(\mathbf{x}) = f_A(\mathbf{x}) \cdot [2 - \exp(|t_r - t_s|)], \quad (4.2)$$

onde  $t_r$  e  $t_s$  são, respectivamente, o tempo real e o tempo de simulação do incêndio. O fator multiplicativo  $2 - \exp(|t_r - t_s|)$  penaliza as soluções cujo tempo de simulação é menor que o tempo real. Quando  $t_r = t_s$  seu valor é 1, e a avaliação da função candidata fica definida em termos da comparação das áreas dos incêndios real e simulado.

Deste modo, o problema de ajuste consiste em minimizar a função de custo  $f(\mathbf{x}) : \mathbb{R}^6 \rightarrow \mathbb{R}$  para  $\mathbf{x} \in \mathfrak{S} \subset \mathbf{R}^6$ , ou seja, encontrar o  $\mathbf{x}^*$ , tal que:

$$f(\mathbf{x}^*) = \min_{\mathbf{x} \in \mathfrak{S}} f(\mathbf{x}). \quad (4.3)$$

Este procedimento de busca da solução ótima é realizado via meta-heurística, onde utiliza-se o algoritmo de vaga-lumes (YANG, 2008). De forma resumida, esta meta-heurística baseia-se no comportamento de vaga-lumes (soluções candidatas) imersos em um espaço de busca  $\mathfrak{S}$ , onde cada vaga-lume  $j$  ocupa uma posição  $\mathbf{x}_j \in \mathfrak{S}$ . Três regras delineiam o funcionamento do algoritmo: os vaga-lumes se movem no

interior do espaço de busca guiados por um mecanismo de atração; a atratividade é proporcional ao brilho emitido pelos vaga-lumes e decai em função da distância entre os vaga-lumes; a intensidade de luz emitida por um vaga-lume é quantificada pela avaliação da sua posição frente à função de custo  $f(\mathbf{x}_j)$  (quanto melhor avaliado, mais brilhante). A movimentação dos vaga-lumes no interior do espaço de busca é governada por estas três regras. De uma forma geral, os vaga-lumes que emitem menos luz se movem em direção aos vaga-lumes que emitem maior quantidade de luz (melhores soluções candidatas), formando nuvens de vaga-lumes em torno de ótimos locais ou globais (YANG, 2009; YANG, 2010). O Apêndice A descreve o algoritmo de vaga-lumes em maiores detalhes.

### 4.3 Estudos de caso

O relatório de ocorrência de incêndio (ROI), emitido pela direção do Parque, é a principal fonte oficial de informação de um incêndio. Quando dispõe de todas as informações, o ROI informa os instantes (data e hora) de início e de término do incêndio, as causas (e respectivos agentes causadores) de início e de término do incêndio, a localização do incêndio, as informações meteorológicas no dia do incêndio, e as técnicas de combate utilizadas e número de profissionais envolvidos, caso o incêndio tenha sido combatido. Estes relatórios são disponibilizados para consulta pública na página do Sistema Nacional de Informações Sobre Fogo, do Centro Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais<sup>2</sup>.

Dentre os incêndios que dispõem de relatório de ocorrência de incêndio com todas as informações disponíveis, optou-se pela escolha de apenas um para ser tratado como estudo de caso para ajuste do modelo. Esta escolha fundamenta-se na confiabilidade e na completude das informações necessárias. Trata-se de um incêndio documentado pelo relatório de ocorrência n.º 002/2007, adquirido junto à direção do Parque. A Figura 4.7 exibe a imagem composição colorida das bandas 2, 4 e 3 do sensor CCD do satélite CBERS 2, registrada no dia 21/08/2007, indica a área atingida pelo incêndio, delimitada pelo retângulo vermelho, que ocorreu na porção noroeste do Parque Nacional das Emas.

Segundo o ROI, este incêndio começou no dia 28/07/2007 às 15:00 H, por causa antropogênica e acidental, durante o procedimento de manutenção dos aceiros<sup>3</sup>, e se

---

<sup>2</sup>Disponível em: <http://siscom.ibama.gov.br/sisfogo/publico.php>

<sup>3</sup>Conforme o Plano de Manejo do Parque (IBAMA, 2004), a manutenção dos aceiros é realizada anualmente durante o período de seca, e queimadas controladas são utilizadas para demarcar a área delimitada pelos aceiros.

extinguiu por volta das 5:00 H do dia 29/07/2007, após atingir o limite do Parque à oeste. As informações de ocorrência são mostradas na Tabela 4.3. Os dados das condições atmosféricas durante a ocorrência do incêndio foram registrados pela estação meteorológica situada na cidade de Chapadão do Céu/GO (situada à cerca de 30 km do Parque). A Figura 4.8 mostra a localização da cidade. A Tabela 4.4 exibe estas informações.

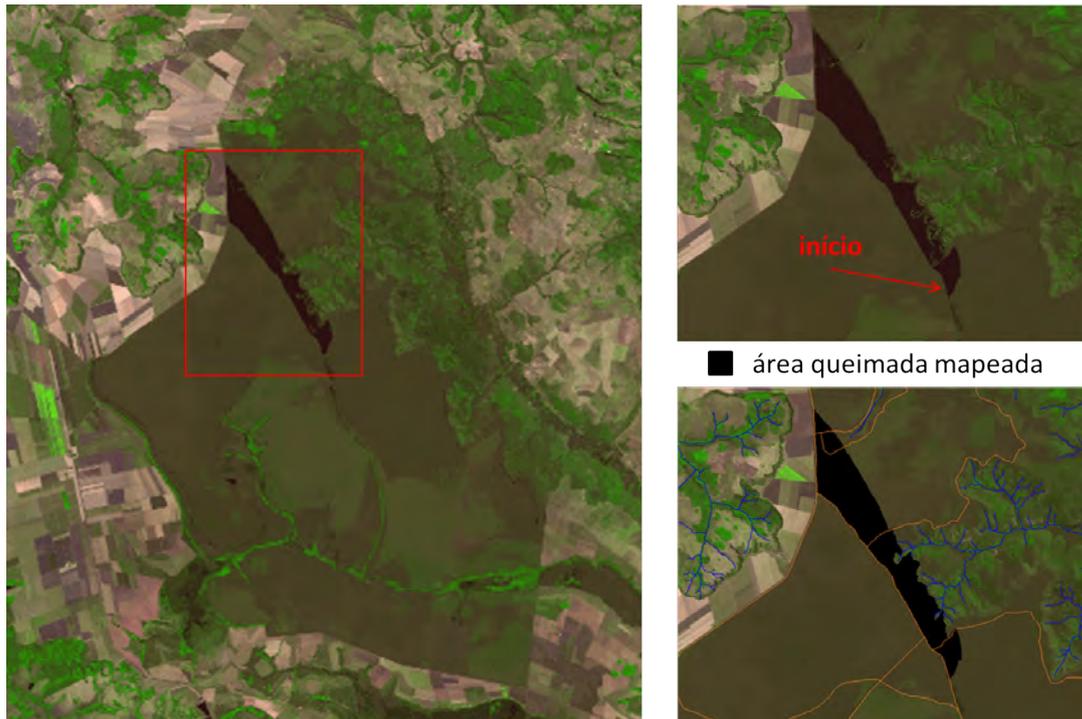


Figura 4.7 - Imagem composição colorida das bandas 2, 4 e 3 do sensor CCD do satélite CBERS 2 registrada em 21/08/2007 ilustrando um incêndio de causa antropogênica que atingiu a porção noroeste do Parque Nacional das Emas.

Tabela 4.3 - Informações de ocorrência do incêndio do estudo de caso 2.

---

<b>Data e hora de início:</b> 28/07/2007 às 15:00 H
<b>Data e hora de extinção:</b> 29/07/2007 às 5:00 H (duração de 15 horas)
<b>Causa e agente causador de início:</b> antropogênica (brigadista)
<b>Causa e agente causador de extinção:</b> natural (aceiros nos limites do Parque)

---

Uma vez definidas as informações ambientais do incêndio, o próximo passo é realização do procedimento de ajuste do modelo para reproduzir o incêndio. O ajuste é definido a partir de 50 execuções independentes do algoritmo de vaga-lumes, cada

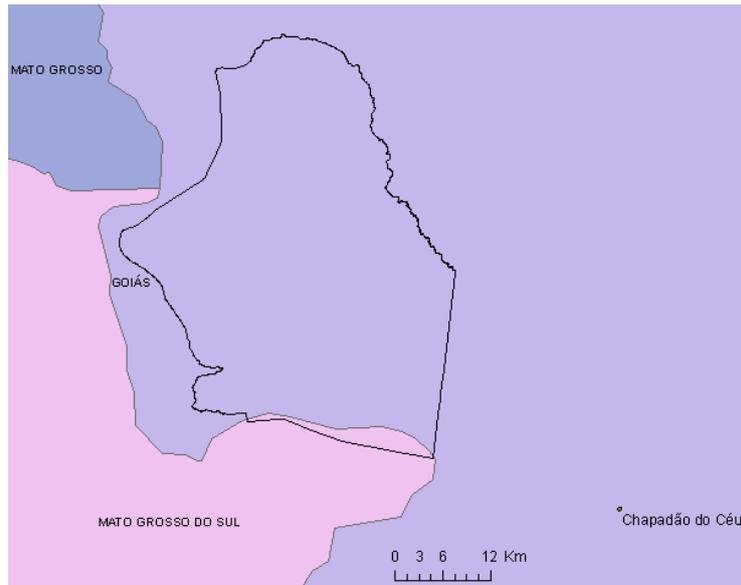


Figura 4.8 - Localização das estações meteorológicas utilizadas como fonte de informações das condições atmosféricas.

Tabela 4.4 - Dados meteorológicos durante ocorrência do incêndio do estudo de caso 2.

Data e hora	Umidade relativa (%)	Velocidade do vento (m/s)	Direção do vento (°)
28/07/2007 12:00	58	2,9	350
28/07/2007 18:00			
28/07/2007 18:00	55	4,0	340
29/07/2007 00:00			
29/07/2007 00:00	71	2,9	320
29/07/2007 06:00			

uma utilizando de diferentes sementes do gerador de números aleatórios. Cada execução utilizou 32 vaga-lumes, que se movimentam no espaço de busca ao longo de 30 iterações. A função de avaliação de cada solução candidata é obtida a partir de uma média de 50 simulações independentes do modelo. Esta função de avaliação média se justifica pelo fato que, conforme observado na Figura 3.4, diferentes simulações para um mesmo conjunto de constantes empíricas podem gerar áreas queimadas ligeiramente diferentes. Os valores definidos para os parâmetros do algoritmo são  $\beta_0 = 1$  e  $\gamma = 100$  (definido para uma distância característica de  $\Gamma = 0, 1$ ). O parâmetro de aleatoriedade  $\alpha$  tem valor inicial  $\alpha_{inicial} = 0, 05$ , que decresce ao longo das iterações, até o valor final  $\alpha_{final} = 0, 01$ , conforme a Equação A.3. Os valores que definem os limites do espaço de busca foram definidos a partir dos valores presentes nos modelos

empíricos de comportamento do fogo, conforme mostrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores que definem os limites do espaço de busca das soluções candidatas.

Constante empírica	Limite superior	Limite inferior	Referência
$a$	0,040	0,080	(MCARTHUR, 1966; NOBLE et al., 1980)
$b_1$	0,000	1,000	definido hipoteticamente
$b_2$	0,001	0,200	(CHENEY et al., 1998)
$c_1$	0,000	1,000	definido hipoteticamente
$c_2$	0,800	1,200	(SULLIVAN, 2009a)
$c_3$	0,100	0,300	(ALEXANDRIDIS et al., 2008)

O procedimento de ajuste utiliza um incêndio que inclui: condições heterogêneas da vegetação, envolvendo diferentes classes de tipo de combustível e classes de acúmulo de combustível; uma topografia acidentada ao longo do percurso, principalmente nas regiões próximas às drenagens; e condições atmosféricas que variam pouco durante a sua ocorrência. A Figura 4.9 exibe a avaliação da melhor solução candidata por iteração para todas as 50 execuções independentes do algoritmo de vaga-lumes (linhas em cinza) e o valor médio (gráfico em linha cor preta). O valor médio e desvio padrão para as soluções candidatas obtidas ao término de cada execução independente são mostrados na Tabela 4.6.

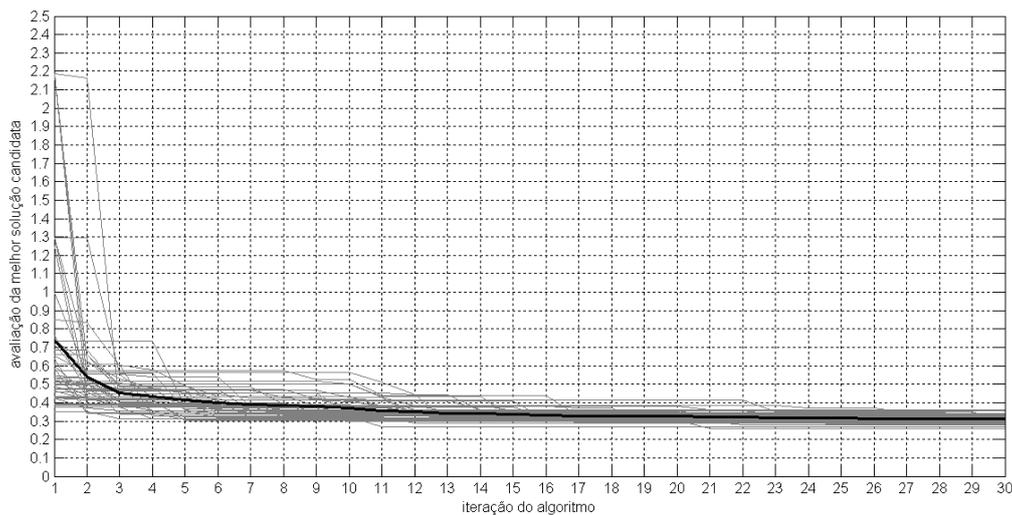


Figura 4.9 - Avaliação da melhor solução candidata por iteração para todas as execuções independentes algoritmo de vaga-lumes. As linhas em cor cinza mostram a evolução em cada execução independente e a linha em cor preta mostra o valor médio.

Tabela 4.6 - Valores estimados das constantes empíricas do modelo durante o ajuste.

Constante empírica	Valor estimado
$a$	$0,0645 \pm 0,0103$
$b_1$	$0,3140 \pm 0,0094$
$b_2$	$0,0061 \pm 0,0015$
$c_1$	$0,1852 \pm 0,0191$
$c_2$	$1,0159 \pm 0,0881$
$c_3$	$0,2102 \pm 0,0271$

Utilizando os dados obtidos no ajuste, a comparação do incêndio simulado com o incêndio real é mostrada na Figura 4.10. O nível de discordância entre as áreas dos incêndios real e simulado, calculada conforme a Equação 4.1, é de 0,30. A Figura 4.11 mostra a progressão do incêndio simulado. Analisando a progressão pode-se observar que o modelo ajustado consegue captar as tendências na propagação do fogo, tanto em função da direção de vento, quanto em função das feições topográficas. O vento induz uma tendência na propagação, que fica visível ao visualizarmos a progressão do incêndio. Os efeitos das feições topográficas também são captados no ajuste, onde a forma da progressão da frente de fogo também se altera, em função de mudanças na elevação da superfície, principalmente nas regiões em torno das drenagens.

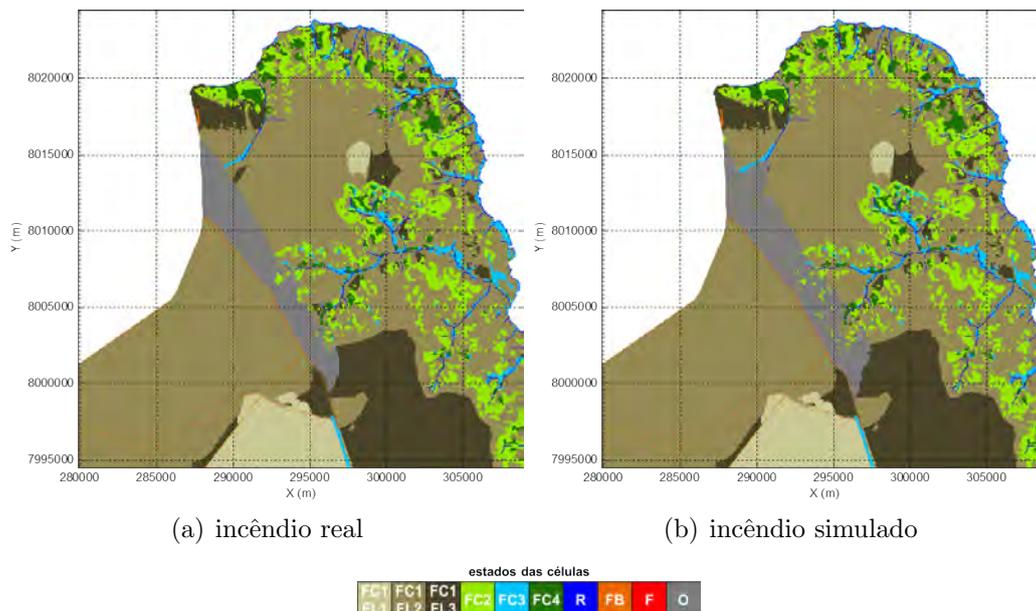


Figura 4.10 - Comparação entre as áreas dos incêndios real e simulado.

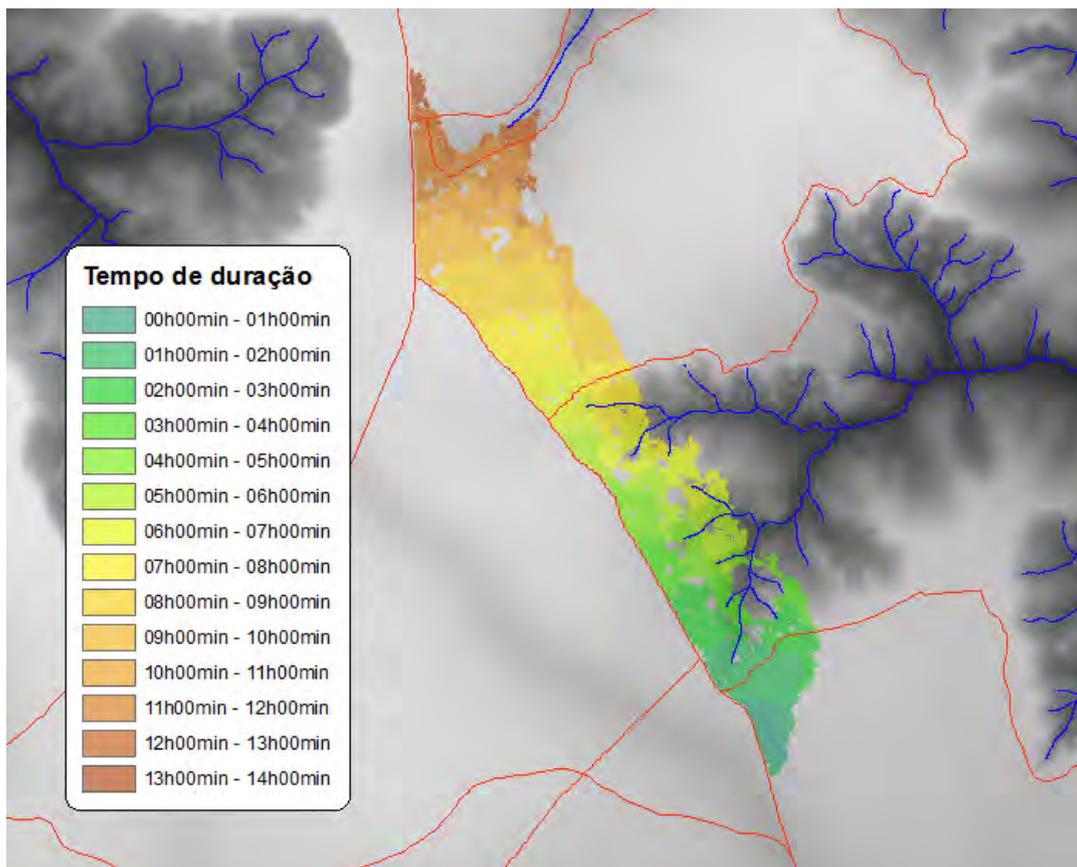


Figura 4.11 - Progressão do incêndio simulado.

Apesar de conseguir simular um incidente particular de incêndio com considerável nível de confiança, torna-se necessário investigar a sensibilidade do modelo ajustado. Esta análise de sensibilidade é realizada em duas etapas. Na primeira, os valores das constantes empíricas permanecem constantes e os valores das probabilidades elementares  $I_0$  e  $B_0$ , para todas as classes de combustível vegetal e respectivas classes de acúmulo, são modificados em  $\pm 1\%$ . Simulações são realizadas, com as mesmas condições ambientais, e utilizando estes valores de probabilidades elementares. Os resultados são mostrados na Figura 4.12. A Tabela 4.7 resume os resultados das simulações em termos de tempo de duração, e de discordância entre área simulada e área real do incêndio. Dentre as simulações realizadas, somente para  $I_0 - 1\%$  e  $B_0 - 1\%$ , e  $I_0 - 1\%$  e  $B_0 + 1\%$ , o incêndio se extinguiu antes do tempo de simulação de 15 horas, durando, respectivamente, 13h48min e 12h18min. Observando as Figuras 4.12(a) e 4.12(c), o aumento no valor de  $I_0$  resultou em incêndios de maiores proporções, haja visto que aumentaram as chances do fogo avançar de uma célula para outra. De maneira contrária, a diminuição do valor de  $I_0$  resultou em incêndios de menores proporções, como podemos ver nas Figuras 4.12(b) e 4.12(d).

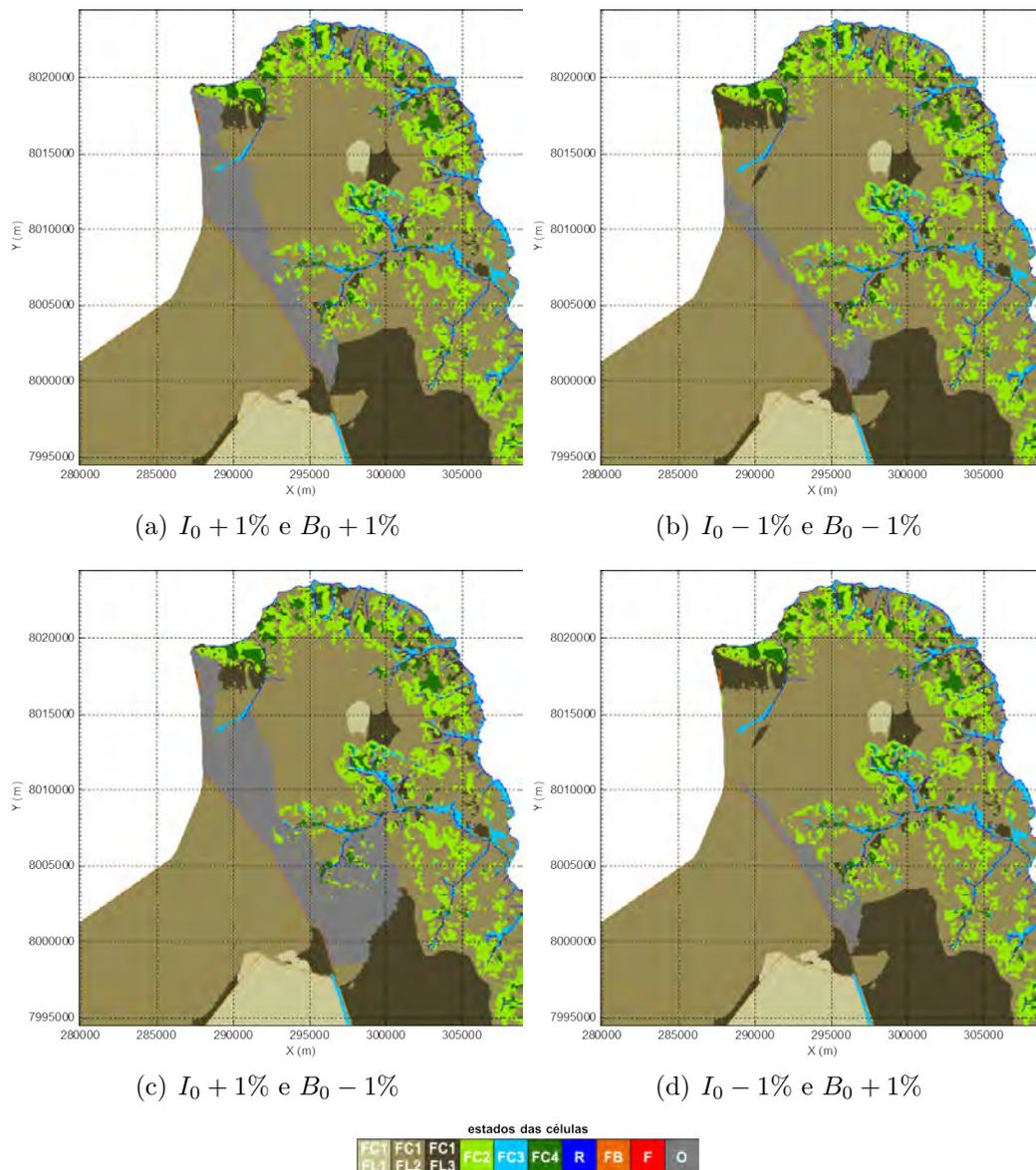


Figura 4.12 - Análise de sensibilidade variando os valores das probabilidades elementares  $I_0$  e  $B_0$ .

Na segunda etapa da análise de sensibilidade do ajuste, os valores das probabilidades elementares são fixos, conforme os valores definidos na Tabela 4.2, e os valores das constantes empíricas  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ , e  $c_3$  são modificados. Um total de 1000 simulações são realizadas, com as mesmas condições ambientais, e utilizando diferentes valores aleatoriamente escolhidos, dentro dos intervalos definidos pela média e desvio padrão, conforme especificados na Tabela 4.6. A frequência relativa de queima, calculada pela razão entre o número de vezes que a célula queimou e o número total de simulações, é mostrada na Figura 4.13. Observando os valores da frequência rela-

Tabela 4.7 - Análise de sensibilidade variando os valores das probabilidades elementares  $B_0$  e  $I_0$ .

Valores utilizados	tempo de duração	$1 - \frac{A(A_R \cap A_S)}{A(A_R \cup A_S)}$	Resultado
$I_0$ e $B_0$	14h	0,30	Figura 4.10(b)
$I_0 + 1\%$ e $B_0 + 1\%$	15h	0,32	Figura 4.12(a)
$I_0 - 1\%$ e $B_0 - 1\%$	13h48min	0,53	Figura 4.12(b)
$I_0 + 1\%$ e $B_0 - 1\%$	15h	0,61	Figura 4.12(c)
$I_0 - 1\%$ e $B_0 + 1\%$	12h18min	0,64	Figura 4.12(d)

tiva, podemos notar que, para os valores de constantes empíricas dentro do intervalo definido no ajuste, a forma básica da área queimada simulada é preservada e que esta compreende as regiões com os altos valores de frequência relativa de queima.

Com intuito de testar o ajuste do modelo, utiliza-se os valores de constantes empíricas da Tabela 4.6 para simular um outro incêndio. A Figura 4.14 exibe a imagem composição colorida das bandas 5, 4 e 3, do sensor TM do satélite LANDSAT 5, registrada no dia 24/10/1999. A imagem mostra as cicatrizes de três incêndios na região indicada pelo retângulo vermelho. Os relatórios de ocorrência indicam que estes incêndios ocorreram nos dias 07/10/1999 (incêndio A), 08/10/1999 (incêndio B) e 16/10/1999 (incêndio C).

Dentre os três incêndios, optou-se por utilizar o incêndio B como estudo de caso de aplicação do modelo ajustado, pelo fato deste ter sido extinto sem intervenção humana, chuva, e o horário de início e fim encontram-se disponíveis. As informações de ocorrência e as condições meteorológicas do incêndio do estudo de caso 1 são mostradas, respectivamente, nas Tabelas 4.8 e 4.9. Os dados meteorológicos foram obtidos a partir dos registros da estação meteorológica de Chapadão do Céu/GO. A posição de início do incêndio, indicada na Figura 4.14 foi escolhida hipoteticamente.

Tabela 4.8 - Informações de ocorrência do incêndio.

---

<b>Data e hora de início:</b> 08/10/1999 às 18:00 H.
<b>Data e hora de extinção:</b> 08/10/1999 às 21:30 H (duração de 3,5 horas).
<b>Causa e agente causador de início:</b> natural (raios)
<b>Causa e agente causador de extinção:</b> natural (chuva)

---

A comparação entre os incêndios real e simulado é mostrada na Figura 4.15. A

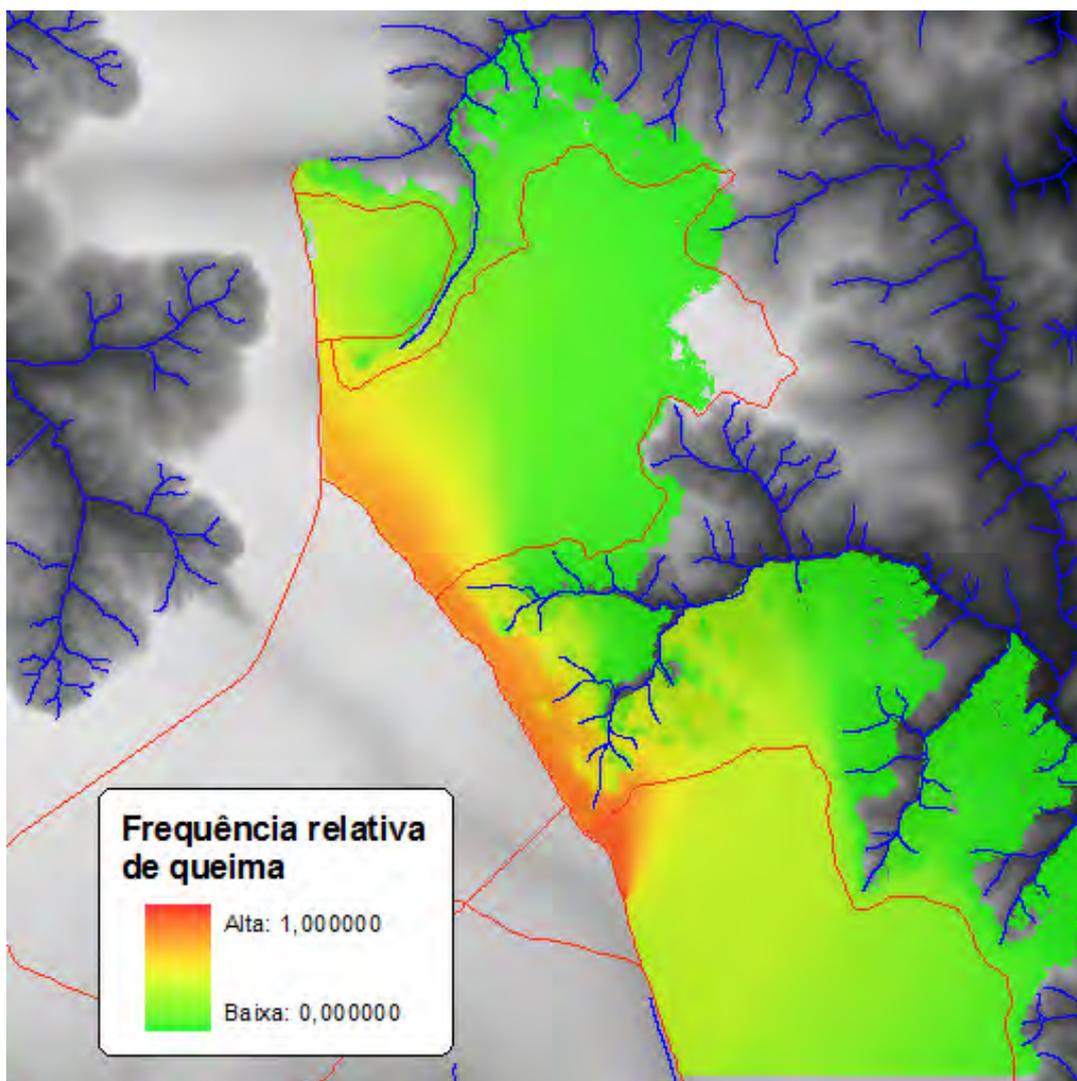


Figura 4.13 - Análise de sensibilidade variando os valores das constantes empíricas do modelo. Um total de 1000 simulações foram executadas utilizando diferentes valores das constantes empíricas e a frequência relativa de queima foi calculada.

Tabela 4.9 - Dados meteorológicos durante ocorrência do incêndio.

Data e hora	Umidade relativa (%)	Velocidade do vento (m/s)	Direção do vento (°)
08/10/1999 18:00	71	7	33
09/10/1999 00:00			

progressão do incêndio simulado é mostrada na Figura 4.16. O nível de discordância entre as áreas dos incêndios real e simulado, calculada conforme a Equação 4.1, é de 0,14271. Percebe-se uma boa concordância entre o incêndio real e simulado para o

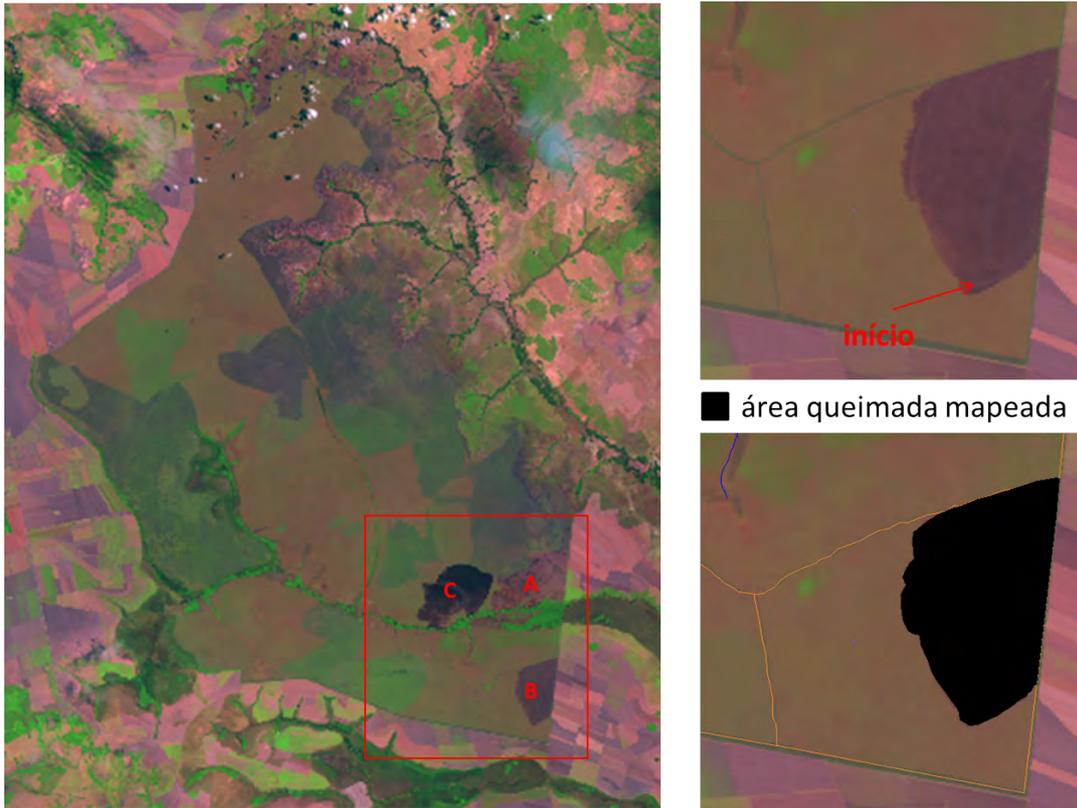


Figura 4.14 - Imagem composição colorida das bandas 5, 4 e 3 do satélite LANDSAT 5 registrada em 16/10/1999 ilustrando recentes incêndios ocorridos no extremo sudeste do Parque Nacional das Emas.

estudo de caso de aplicação do modelo, tanto em termos de área, quanto em termos de tempo de duração do incêndio.

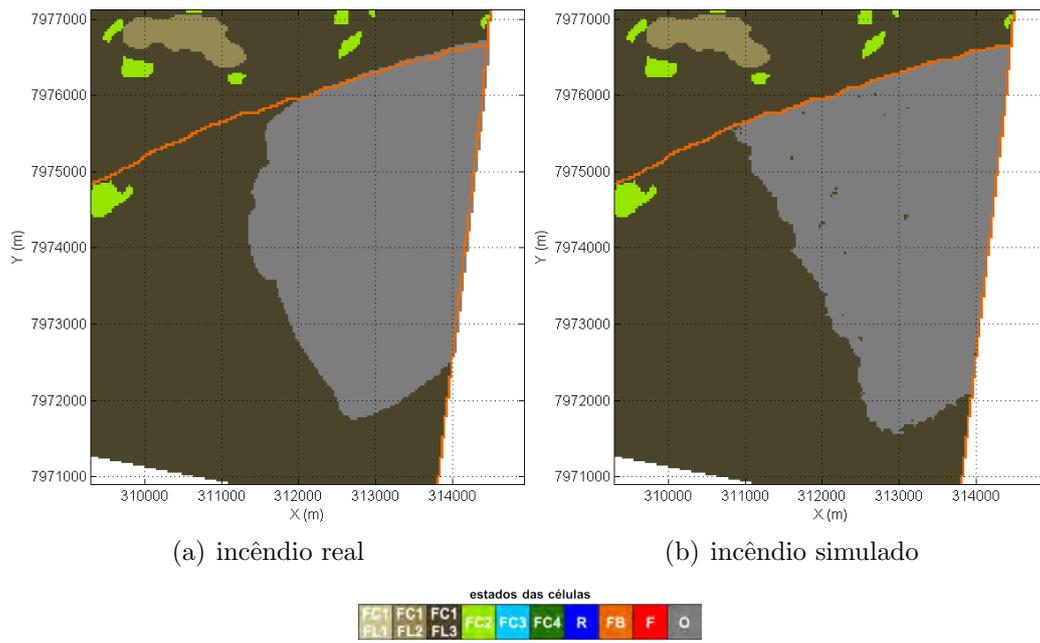


Figura 4.15 - Comparação entre as áreas dos incêndios real e simulado.

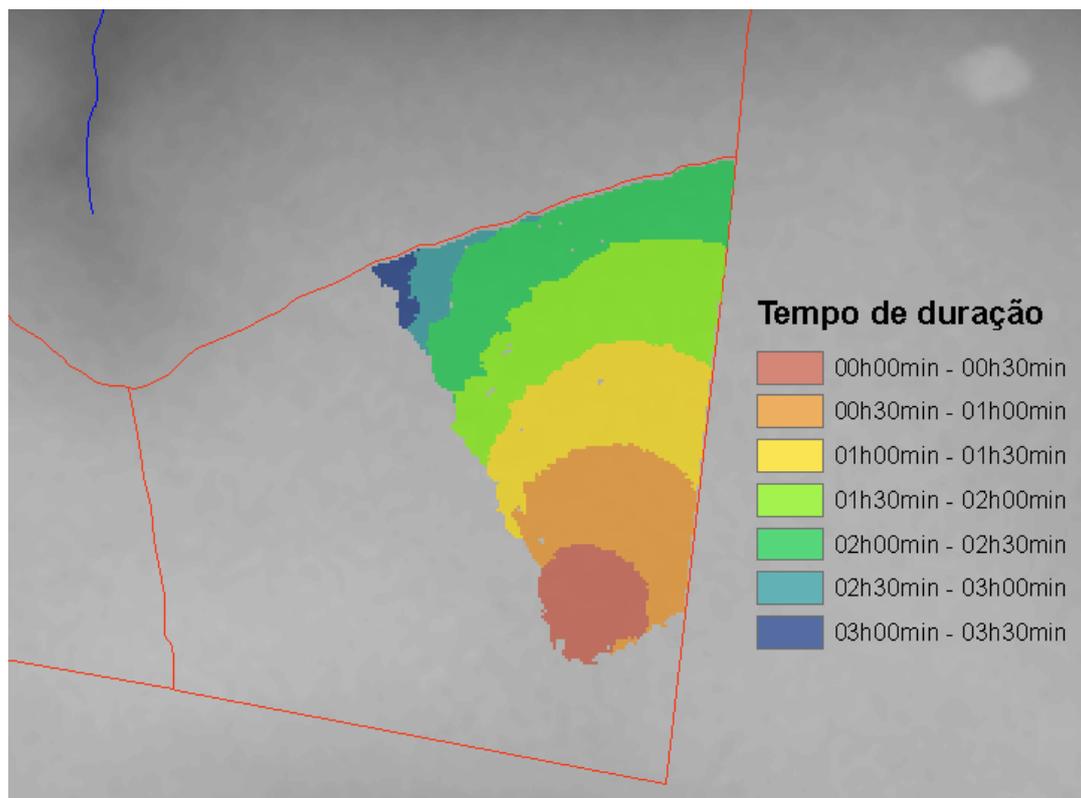


Figura 4.16 - Progressão do incêndio simulado.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, um modelo baseado em autômatos celulares probabilísticos é idealizado e aplicado para modelar a propagação de incêndios de vegetação no contexto do bioma Cerrado. O modelo representa a dinâmica de propagação a partir de duas componentes que conjuntamente sustentam a ocorrência do incêndio, que são a conectividade e o momento. Enquanto que a componente conectividade relaciona-se com as características da vegetação, e representa a sua abundância e distribuição espacial, a componente momento relaciona-se com as características da combustão da vegetação, e representa os mecanismos de transferência de calor que se fazem presentes durante a propagação do fogo. A dinâmica de propagação do fogo no modelo depende de três parâmetros: a probabilidade  $D$ , que caracteriza a proporção de células com vegetação ao longo do espaço celular; a probabilidade  $B$  que caracteriza as chances do fogo se extinguir em uma célula que está queimando; e a probabilidade  $I$  que caracteriza a probabilidade do fogo avançar de uma célula queimando para uma célula vizinha com vegetação.

Enquanto que a conectividade é representada em termos da probabilidade  $D$ , o momento é representado em termos das probabilidades  $B$  e  $I$ . A componente momento é representada em termos de duas sub-componentes independentes que descrevem a dinâmica de propagação do fogo: a probabilidade  $B$ , que representa a dinâmica de queima e produção de calor em termos de sustentabilidade e combustibilidade; e a probabilidade  $I$ , que representa a dinâmica de transferência de calor da frente de fogo para a vegetação que ainda não foi levada à ignição.

Deste modo, a dinâmica de propagação do fogo no modelo é representada por uma probabilidade efetiva  $S$ , que é função das três probabilidades,  $D$ ,  $B$  e  $I$ . Por meio de simulações Monte-Carlo, foi realizada uma estimativa da probabilidade  $S$ , em função destas três probabilidades. A análise dos valores permitiu a identificação de uma fronteira crítica no espaço de parâmetros  $B \times I$ , que separa o regime de propagação ( $S = 1$ ), cujos valores de  $B$  e  $I$  produzem incêndios que propagam sem cessar, do regime de extinção ( $S = 0$ ), cujos valores de  $B$  e  $I$  produzem incêndios que não encontram condições de se manter e se extingue. Entre estas duas regiões, existe uma região de transição, cujos valores da probabilidade efetiva são intermediários entre 0 e 1 ( $0 < S < 1$ ), cujos valores de  $B$  e  $I$  produzem incêndios que apresentam padrão de propagação dendrítico, e que ocasionalmente se extinguem.

Embora a dinâmica de propagação do fogo seja descrita em termos de probabilidades, estas podem ser relacionadas com a velocidade de propagação do fogo, uma variável

fundamental para quantificar o comportamento do fogo. Simulações Monte-Carlo permitiram estimar o valor de uma velocidade adimensional de propagação do fogo,  $R_a$ , ao longo do espaço de parâmetros  $D \times B$ . As análises mostraram que uma ampla gama de valores podem ser caracterizados por estes dois parâmetros. A velocidade adimensional de propagação do fogo relaciona-se diretamente com a probabilidade  $I$ . A persistência do fogo, quantificada pela probabilidade  $B$ , condiciona a propagação do fogo, quantificada pela probabilidade  $I$ .

Com base em relações empíricas extraídas da literatura, parametrizações foram propostas visando relacionar explicitamente as probabilidades  $D$ ,  $B$  e  $I$  em função dos fatores que definem as condições ambientais do incêndio, que são, as características do combustível vegetal (tipo, acúmulo e umidade), as condições atmosféricas (velocidade e direção do vento) e a topografia (aclives e declives na superfície). As parametrizações propostas foram avaliadas independentemente, e os cenários de incêndios simulados corroboram a eficácia das parametrizações em representar corretamente o efeito destes fatores sobre o comportamento do fogo. As avaliações também mostraram que as parametrizações atuam mutuamente condicionando a propagação do fogo, definindo limiares que dependem das condições ambientais, tal que, uma vez excedidos, o fogo encontra condições de se propagar incessantemente.

Uma característica particular do modelo proposto, quando comparado a outros modelos probabilísticos de propagação de incêndios de vegetação (HARGROVE et al., 2000; ALEXANDRIDIS et al., 2008), é representar a componente momento por duas subcomponentes independentes, definidas por dois parâmetros, que são as probabilidades  $B$  e  $I$ . Em ambos modelos citados, a componente momento é representada por um único parâmetro, definido em termos de uma probabilidade de propagação do fogo. Já no modelo proposto, a representação da componente momento por duas subcomponentes permite melhor detalhar a dinâmica de propagação do fogo. A probabilidade  $B$ , que representa a dinâmica de combustão em termos de sustentabilidade e combustibilidade, pode ser parametrizada em função das características do combustível vegetal. A probabilidade  $I$ , que representa os mecanismos de transferência de calor relacionados com a propagação do fogo, pode ser parametrizada em função das características do combustível vegetal, das condições atmosféricas e da topografia.

Estudos experimentais (NAHMIAS et al., 2000; FENDELL; WOLFF, 2001; WEISE et al., 2004; CHENEY; SULLIVAN, 2008; FINNEY et al., 2010) corroboram a afirmação que a propagação do fogo em incêndios de vegetação é um fenômeno crítico, cuja ocorrência

está condicionada a limiaries. Estes limiaries dependem principalmente das características do combustível vegetal, tais como tamanho, forma, abundância e distribuição espacial, mas também dependem das condições atmosféricas e da topografia. Sob determinadas condições ambientais, um dado combustível vegetal pode entrar em ignição, porém o fogo pode não encontrar condições para se propagar. No entanto, se as condições ambientais mudarem, este mesmo combustível vegetal pode entrar em ignição, queimar intensamente, e o fogo pode se alastrar rapidamente, sem cessar. As análises mostram que o modelo consegue representar estes limiaries. As relações explícitas propostas nas parametrizações permitem que a fronteira crítica, que separa o regime de propagação do regime de extinção, se desloque ao longo do espaço de parâmetros  $B \times I$  em função dos fatores que definem as condições ambientais.

Afim de se aplicar o modelo para simular incêndios reais, uma metodologia de ajuste foi proposta. Esta é baseada em duas etapas: determinar valores das probabilidades elementares  $I_0$  e  $B_0$ , para cada tipo de combustível vegetal e respectiva classe de acúmulo de combustível vegetal, com base em medidas experimentais; e encontrar os valores das constantes empíricas das parametrizações, para os quais, o modelo reproduza um incêndio real. Na primeira etapa, características particulares da vegetação da região de estudo são identificadas e especificadas no modelo. Na segunda etapa, as relações explícitas que modelam as complexas interações entre as variáveis que influenciam o comportamento do fogo são ajustadas. Os valores ideais para as constantes empíricas são encontrados via método de otimização.

Quando lidamos com a modelagem da propagação de incêndios de vegetação, temos que ter em mente que este é um fenômeno altamente complexo onde, vegetação, topografia e condições atmosféricas, definem uma vasta gama de fatores que se interagem entre si e variam em diferentes escalas de espaço e de tempo. O teste de acurácia e validade de um modelo de propagação do fogo em incêndios de vegetação é uma tarefa bastante subjetiva. Mesmo que o modelo reproduza perfeitamente o cenário de um incêndio documentado, é impossível afirmar quantitativamente que este consegue representar bem o fenômeno. Ou seja, a simples comparação entre incêndios preditos e observados são inúteis para inferir a validade ou acurácia de um modelo, quando desprezamos a acurácia do conjunto de dados utilizados no ajuste e simulações (FINNEY, 2000). Além de uma série de simplificações adotadas nas parametrizações do modelo, os dados cartográficos e os dados que descrevem as condições atmosféricas são medidas de parâmetros físicos ou aproximações, que também contém problemas de acurácia. Deste modo, para avaliar a capacidade do modelo em prever um evento de incêndio, o mais adequado é partir de uma análise

visual qualitativa, que busque concordância geral entre as tendências preditas e o incêndio observado.

O Parque Nacional das Emas foi utilizado como região-alvo de ajuste e aplicação do modelo. Com base no histórico de fogo e nas características da vegetação foram definidas classes de combustível vegetal e classes de acúmulo de combustível vegetal. Os valores das probabilidades elementares de ignição e extinção do fogo para estas classes foram escolhidas, com base em medidas de velocidade de propagação do fogo de incêndios experimentais. Esta escolha permite distinguir quantitativamente o comportamento do fogo nas classes de vegetação definidas. Um estudo de caso foi utilizado para mostrar a capacidade do modelo em representar o comportamento do fogo. Os valores das constantes empíricas obtidos a partir de um ajuste objetivo, utilizaram como critério a máxima concordância entre o incêndio real e o incêndio simulado. A concordância foi medida em termos de área de incêndio e tempo de duração. O ajuste foi definido mediante o uso de método de otimização baseado em meta-heurística, onde o algoritmo de vaga-lumes foi utilizado. Os resultados obtidos mostraram uma boa capacidade do modelo em projetar o cenário de propagação do fogo, captando a dinâmica de propagação em função da variação espacial e temporal das condições ambientais. A sensibilidade do ajuste foi analisada e os resultados obtidos mostraram considerável robustez da metodologia de ajuste utilizada.

Os ajustes obtidos neste trabalho são válidos somente para os estudos de caso utilizados. A super-especialização dos parâmetros do modelo, que possibilite a aplicação do modelo para simular incêndios em outras regiões e a uma diversificada variedade de condições ambientais, depende de um amplo acervo de incêndios documentados. A principal dificuldade encontrada durante o desenvolvimento desta pesquisa foi a escassez de incêndios documentados. Como não tínhamos disponíveis dados de incêndios conduzidos experimentalmente, partimos de dados de incêndios mapeados, e procuramos documentá-los. As informações imprescindíveis, e muito difícil de serem obtidas nos incêndios mapeados, são a posição de partida, e os instantes de início e término do incêndio. Acreditamos que o modelo possa ser estendido para outras unidades de conservação de Cerrado, e até mesmo a outros biomas.

Uma importante contribuição científica deste trabalho está na aplicação do modelo visando simular o comportamento de incêndios de vegetação no contexto do bioma Cerrado. A pesquisa sobre modelagem do comportamento do fogo neste bioma ainda é incipiente. As principais publicações que envolvem o estudo do comportamento do fogo no bioma Cerrado (MIRANDA et al., 1993; MISTRY, 1998; MIRANDA et al., 2002;

MIRANDA et al., 2009), embora tenham publicado medidas quantitativas, focaram-se somente no contexto ecológico, buscando apenas caracterizar os impactos do fogo sobre a vegetação, omitindo qualquer estudo sobre a modelagem do comportamento do fogo. Algumas publicações como (FERNANDES, 2003; MISTRY; BERARDI, 2005; CARAPIA, 2006), buscaram avaliar o uso do *FARSITE* (FINNEY, 2004) para simular propagação de incêndios em áreas de Cerrado, e concluíram que a modelagem do comportamento do fogo no Cerrado ainda precisa ser aprimorada, e que necessita-se principalmente de uma caracterização detalhada dos materiais combustíveis (FERNANDES, 2003; MISTRY; BERARDI, 2005; CARAPIA, 2006). No contexto do bioma Amazônico, Silvestrini (2008) utilizou os recursos do DINAMICA EGO, um ambiente de modelagem dinâmica espacial desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais, para modelar e simular a dinâmica de propagação do fogo em sub-bosque, utilizando a abordagem discreta e empírica. Até o presente momento, o modelo empírico proposto por Silvestrini (2008) ainda não foi aplicado no bioma Cerrado. O desenvolvimento e avaliação de alguns modelos teóricos também merece destaque, como o modelo de propagação baseado em equações diferenciais estocásticas (CAMPOS, 2009), e o modelo de propagação baseado no método nodal de modelagem térmica (ALMEIDA, 2007). Outros trabalhos buscaram explorar os conceitos de autômatos celulares (SILVA JUNIOR, 2007) e teoria de percolação (ALMEIDA et al., 2008), visando modelar a propagação do fogo.

Cada unidade de conservação de Cerrado possui em seu plano de manejo, orientações de medidas e estratégias necessárias para lidar com a presença do fogo (IBAMA, 1998; ICMBIO, 2004, IBAMA, 2005; ICMBIO, 2007; ICMBIO, 2009). Em geral, nas medidas de combate, os planos de manejo costumam definir como indesejável e combatível todo o incêndio de causa antropogênica. A supressão do fogo deve ocorrer sobre as seguintes circunstâncias: (i) quando a propagação ocorrer de forma incontrolada e os obstáculos naturais (rios) ou artificiais (estradas ou aceiros) não forem eficientes para conter a propagação; e (ii) quando a sua origem for antropogênica, quando for externa a unidade de conservação, ou apresentar risco à infraestrutura e atividade de visitação da unidade de conservação.

A modelagem e simulação da propagação do fogo em incêndios de vegetação é uma ferramenta importante para o auxílio a ações que envolvem a tomada de decisão no combate e prevenção do fogo em Unidades de Conservação. Reproduzindo a propagação de um incêndio em termos espaço-temporais médios, um modelo de propagação de incêndios pode ser aplicado tanto em caráter prognóstico, quanto em caráter diagnóstico. Em caráter prognóstico, simulações do modelo utilizando uma

gama variedade de condições ambientais estabelecidas, permitem a investigação de possíveis de propagação, possibilitando a adoção de medidas que visem combater e prevenir o fogo, reduzindo ao máximo os seus impactos. Em caráter diagnóstico, o modelo pode ser utilizado em situações práticas, visando projetar o cenário de propagação de um incêndio em desenvolvimento. Além disto, a simulação da propagação de incêndios pode ser combinada com a simulação de técnicas de combate ao fogo, possibilitando a avaliação de cenários de possíveis estratégias de combate ao fogo, como alocação de recursos e posicionamento de brigadas (FINNEY, 2004; ALEXANDRIDIS et al., 2011).

Perspectivas de trabalhos futuros, visando a continuidade no desenvolvimento e aperfeiçoamento do modelo, incluem:

- Verificar a possibilidade de utilizar parametrizações definidas em função de índices espectrais baseados em dados de sensoriamento remoto, que caracterizem parâmetros biofísicos da vegetação como: o grau vigor ou amadurecimento por meio do NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada) (VERBESSELT et al., 2006); o teor de umidade da vegetação por meio do NDWI (índice por diferença normalizada da água) (VERBESSELT et al., 2006); e a distribuição espacial por meio do Modelo Linear de Mistura Espectral (FERREIRA et al., 2007), ou outros modelos lineares de mistura como o *Tasseled Cap* (MBOW et al., 2004);
- Implementar o modelo em linguagem C ou Fortran, e trabalhar com a metodologia de ajuste objetivo em ambiente de alto desempenho;
- Estender o ajuste e a aplicação do modelo a outras unidades de conservação de Cerrado, visando ampliar o acervo de incêndios documentados e a super-especialização dos parâmetros do modelo;
- Utilizar técnicas de ensemble para introduzir componentes estocásticas nas condições atmosféricas, visando representar flutuações significantes que ocorrem em pequena escala, e gerando previsões de padrões de incêndios que consideram incertezas nas condições atmosféricas (FINNEY et al., 2011);
- Desenvolver um ambiente de simulação e avaliação de estratégias de combate ao fogo que seja capaz de definir, com base em um cenário de incêndio simulado, indicar qual a melhor estratégia para combater o fogo, dados as condições pré-estabelecidas, e os recursos físicos e humanos disponíveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADOU, J.; BILLAUD, Y.; BROU, D.; CLERC, J.-P.; CONSALVI, J.-L.; FUENTES, A.; KAISS, A.; NMIRA, F.; PORTERIE, B.; ZEKRI, L.; ZEKRI, N. Simulating wildfire patterns using a small-world network model. **Ecological Modelling**, v. 221, n. 11, p. 1463 – 1471, 2010. 9
- AGUADO, I.; CHUVIECO, E.; BOREN, R.; NIETO, H. Estimation of dead fuel moisture content from meteorological data in mediterranean areas. applications in fire danger assessment. **International Journal of Wildland Fire**, v. 16, n. 4, p. 390–397, 2007. 79
- ALBINI, F. A.; REINHARDT, E. D. Modeling ignition and burning rate of large woody natural fuels. **International Journal of Wildland Fire**, v. 5, n. 2, p. 81–91, 1995. 52
- ALEXANDRIDIS, A.; RUSSO, L.; VAKALIS, D.; BAFAS, G. V.; SIETTOS, C. I. Wildland fire spread modelling using cellular automata: evolution in large-scale spatially heterogeneous environments under fire suppression tactics. **International Journal of Wildland Fire**, v. 20, n. 5, p. 633–647, 2011. 104
- ALEXANDRIDIS, A.; VAKALIS, D.; SIETTOS, C.; BAFAS, G. 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. ISSN 0096-3003. 9, 10, 57, 91, 100
- ALMEIDA, R. M. **Modelo de propagação de fogo em incêndios de superfície baseado no método nodal**. Dissertação (Mestrado) — Programa de pós-graduação em Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2007. 103
- ALMEIDA, R. M.; FRANÇA, H.; MACAU, E. E. N.; RAMOS, F. M. Simulando padrões de incêndios no Parque Nacional das Emas, estado de Goiás, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEO-INFORMÁTICA. **Anais do X Simpósio Brasileiro de Geo-Informática**. Rio de Janeiro, RJ: Sociedade Brasileira de Computação, 2008. 31, 103
- ALMEIDA, R. M.; MACAU, E. E. N. Stochastic cellular automata model for wildland fire spread dynamics. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 285, n. 1, 2011. 9

ANDERSON, D.; CATCHPOLE, E.; MESTRE, N. de; PARKERS, T. Modelling the spread of grassfires. **Journal of Austrian Mathematics Society, Series B, Applied Mathematics**, v. 23, n. 4, p. 451–466, 1982. 6

ANDERSON, H. Forest fuel ignitibility. **Fire Technology**, v. 6, n. 4, p. 312–319, 1970. 50

\_\_\_\_\_. **Predicting wind-driven wildland fire size and shape**. Ogden, UT: United States Department of Agriculture, Forest Service, 1983. (Research Paper INT-305). 54

AVOLIO, M. V.; DI GREGORIO, S. A cellular blocks model for large surface flows and applications to lava flows. In: SLOOT, P. M. A.; CHOPARD, B.; HOEKSTRA, A. G. (Ed.). **Cellular Automata**. Berlin: Springer, 2004. (Lecture Notes in Computer Science, v. 3305), p. 415–424. 87

BERJAK, S. G.; HEARNE, J. W. An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous savanna system. **Ecological Modelling**, v. 148, n. 2, p. 133–151, 2002. 8

BOYCHUK, D.; BRAUN, W. J.; KULPERGER, R.; KROUGLY, Z.; STANFORD, D. A stochastic forest fire growth model. **Environmental and Ecological Statistics**, v. 16, p. 133–151, 2009. 9, 10

BYRAM, G. M. Combustion of forest fuels. In: DAVIS, K. P. (Ed.). **Forest fire – control and use**. New York, NY: McGraw Hill, 1959. 54

CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS U. M. END GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and gis by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395–403, 1996. 75

CAMARGOS, V. L. de. **Impactos do fogo no estrate de regeneração e no banco de sementes do solo em um trecho de floresta estacional semidecidual, Viçosa, MG**. Tese (Doutorado) — Programa da Pós-graduação em Botânica da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001. 85

CAMPOS, A. T. **Modelagem da propagação superficial de frentes de fogo com a equação KPZ**. Dissertação (Mestrado) — Programa de mestrado em Física, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009. 103

CARAPIA, V. R. **Predição do índice de risco de incêndio e modelagem computacional do comportamento do avanço da frente de fogo no**

**Parque Nacional da Floresta da Tijuca.** Tese (Doutorado) — Programa de pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2006. 103

CARVALHO, F. M.; JÚNIOR, P. D. M.; FERREIRA, L. G. The cerrado into-pieces: Habitat fragmentation as a function of landscape use in the savannas of central brazil. **Biological Conservation**, v. 142, n. 7, p. 1392 – 1403, 2009. 2, 14

CASTRO, E. A. D.; KAUFFMAN, J. B. Ecosystem structure in the brazilian cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. **Journal of Tropical Ecology**, v. 14, n. 3, p. 263–283, 1998. 76

CHENEY, N. P.; GOULD, J. S.; CATCHPOLE, W. R. Prediction of fire spread in grasslands. **International Journal of Wildland Fire**, v. 8, n. 1, p. 1 – 13, 1998. 53, 91

CHENEY, P.; SULLIVAN, A. **Grassfires: Fuel, weather and fire behaviour.** 2. ed. Melbourne, VIC: CSIRO, 2008. (CSIRO Forestry and Forest Products Series). 51, 72, 100

CIANCIARUSO, M. V.; BATALHA, M. A. A year in a cerrado wet grassland: a non-seasonal island in a seasonal savanna environment. **Brazilian Journal of Biology**, v. 68, n. 3, p. 495–501, 2008. 84

COCHRANE, M. A. Fire in the tropics. In: COCHRANE, M. A. (Ed.). **Tropical fire ecology: Climate change, land use, and ecosystem dynamics.** Chichester, UK: Praxis Publishing, Ltd., 2009, (Springer-Praxis Books in Environmental Sciences). p. 25–62. 1

COCHRANE, M. A.; RYAN, K. C. Fire and fire ecology: Concepts and principles. In: COCHRANE, M. A. (Ed.). **Tropical fire ecology: Climate change, land use, and ecosystem dynamics.** Chichester, UK: Praxis Publishing, Ltd., 2009, (Springer-Praxis Books in Environmental Sciences). p. 25–62. 20

COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of Brazilian Cerrado. In: GOLDAMMER, J. G. (Ed.). **Fire in tropical biota, ecosystem process and global challenges.** Berlin: Springer-Verlag, 1990, (Ecological Studies, v. 84). p. 81–105. 34, 77

CRUZ, M. G. Monte Carlo-based ensemble method for prediction of grassland fire spread. **International Journal of Wildland Fire**, v. 19, n. 4, p. 521 – 530, 2010. 10

- DÍAZ-DELGADO, R.; LLORET, F.; PONS, X. Statistical analysis of fire frequency models for Catalonia (NE Spain, 1975–1998) based on fire scar maps from Landsat MSS data. **International Journal of Wildland Fire**, v. 13, n. 1, p. 89–99, April 2004. 29
- DEGROOT, W. J.; WARDATI, Y. W. Calibrating the fine fuel moisture code for grass ignition potential in sumatra, indonesia. **International Journal of Wildland Fire**, v. 14, n. 2, p. 161–168, 2005. 79
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA Solos, 1999. 412 p. 16
- ENCINAS, A. H.; ENCINAS, L. H.; WHITE, S. H.; REY, A. M. del; SANCHEZ, G. R. Simulation of forest fire fronts using cellular automata. **Advances in Engineering Software**, v. 38, n. 6, p. 372 – 378, 2007. 8
- FALK, D.; MILLER, C.; MCKENZIE, D.; BLACK, A. Cross-scale analysis of fire regimes. **Ecosystems**, Springer-Verlag, v. 10, p. 809–823, 2007. 29
- FAVIER, C. Percolation model of fire dynamics. **Physics Letters A**, v. 330, p. 396–401, 2004. 9
- FENDELL, F. E.; WOLFF, M. F. Wind-aided fire spread. In: JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. (Ed.). **Forest fires: behavior and ecological effects**. San Diego, CA: Academic Press, 2001. 55, 100
- FERNANDES, G. D. A. **Simulação de incêndio no Parque Estadual de Rola Moça, Minas Gerais, utilizando o FARSITE**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, 2003. 103
- FERNANDES, P. M.; LOUREIRO, C.; MAGALHÃES, M.; FERREIRA, P.; FERNANDES, M. Fuel age, weather and burn probability in portugal. **International Journal of Wildland Fire**, 2012. In press (accepted to publication). 29
- FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G.; SANO, E. E.; SHIMABUKURO, Y. E. Spectral linear mixture modelling approaches for land cover mapping of tropical savanna areas in brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 2, p. 413–429, jan. 2007. 104

- FINNEY, M.; GRENFELL, I.; MCHUGH, C.; SELI, R.; TRETHERWEY, D.; STRATTON, R.; BRITTAIN, S. A method for ensemble wildland fire simulation. **Environmental Modeling and Assessment**, v. 16, p. 153–167, 2011. 10, 104
- FINNEY, M. A. **Efforts at comparing simulated and observed fire growth patterns**. Missoula, MT: Systems for Environmental Management, 2000. (Final Report INT-95066-RJVA). 101
- \_\_\_\_\_. **FARSITE: Fire Area Simulator: model development and evaluation**. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2004. (Research Paper RMRS-RP-4 Revised). 7, 103, 104
- FINNEY, M. A.; COHEN, J. D.; GRENFELL, I. C.; YEDINAK, K. M. An examination of fire spread thresholds in discontinuous fuel beds. **International Journal of Wildland Fire**, v. 19, n. 2, p. 163–170, 2010. 100
- FINNEY, M. A.; COHEN, J. D.; MCALLISTER, S. S.; JOLLY, W. M. On the need for a theory of wildland fire spread. **International Journal of Wildland Fire**, 2012. 10
- FORESTRY CANADA FIRE DANGER GROUP. **Development and structure of the Canadian forest fire prediction system**. Ottawa: Forestry Canada Science and Sustainable Development Directorate, 1992. (Information Report ST-X-3). 56
- FRANÇA, H. **Um estudo fenológico com imagens AVHRR/NOAA nos cerrados do Parque Nacional das Emas, GO**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1994. 75
- FRANÇA, H. **Estudo de queimadas naturais no cerrado**. São Paulo, SP: FAPESP, 2007. (Projeto de Pesquisa FAPESP número 07/55843-1). 75
- FRANÇA, H.; RAMOS NETO, M. B.; SETZER, A. **O fogo no Parque Nacional das Emas**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2007. (Série Biodiversidade, v. 27). 3, 13, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 75, 78
- FRANÇA, H.; SETZER, A. **Estudo do regime de queimadas nos Cerrados brasileiros com imagens AVHRR/NOAA: 1985-1988**. São Paulo, SP: FAPESP, 1997. (Relatório do Projeto de Pesquisa FAPESP processo n. 97/07695-0). 75

\_\_\_\_\_. **Regime de queimadas no Parque Nacional das Emas: 1973-1995.** São Paulo, SP: FAPESP, 1997. (Relatório de Pesquisa FAPESP. Processo n. 95/2674-9). 75

GARDNER, M. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". **Scientific American**, v. 223, p. 120–123, october 1970. 8

HARGROVE, W. W.; GARDNER, R. H.; TURNER, M. G.; ROMME, W. H.; DESPAIN, D. G. Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. **Ecological Modelling**, v. 135, p. 243–263, 2000. 9, 10, 49, 100

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Plano de manejo do Parque Nacional de Brasília.** Brasília, DF: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Ministério do Meio Ambiente, 1998. 103

\_\_\_\_\_. **Plano de Manejo do Parque Nacional das Emas.** Brasília, DF: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Ministério do Meio Ambiente, 2004. 78, 88

\_\_\_\_\_. **Plano de manejo do Parque Nacional Serra da Canastra.** Brasília, DF: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Ministério do Meio Ambiente, 2005. 103

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Plano de manejo do Parque Nacional das Emas.** Brasília, DF: Instituto Chico Mendes de Biodiversidade, Ministério do Meio Ambiente, 2004. 103

\_\_\_\_\_. **Plano de manejo do Parque Nacional da Chapada Diamantina ? Versão Preliminar Documento de Trabalho Parte I.** Brasília, DF: Instituto Chico Mendes de Biodiversidade, Ministério do Meio Ambiente, 2007. 103

\_\_\_\_\_. **Plano de manejo do Parque Nacional da Chapada dos Guimarães.** Brasília, DF: Instituto Chico Mendes de Biodiversidade, Ministério do Meio Ambiente, 2009. 103

JOHNSON, E. A. **Fire and Vegetation Dynamics: Studies from The North American Boreal Forest.** Nova York, NY: Cambridge University Press, 1996. (Cambridge Studies in Ecology). 31

JOHNSON, E. A.; GUTSELL, S. L. Fire frequency models, methods and interpretations. **Advances in ecological research**, v. 25, p. 239–287, 1994. 31, 34

KARAFYLLIDIS, I.; THANAILAKIS, A. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. **Ecological Modelling**, v. 99, n. 1, p. 87 – 97, 1997. 8, 9

KAUFFMAN, J. B.; CUMMINGS, D. L.; WARD, D. E. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the brazilian cerrado. **Journal of Ecology**, v. 82, n. 3, p. 519–531, 1994. 76, 77

LAWSON, B. D.; STOCKS, B. J.; ALEXANDER, M. E.; WAGNER, C. E. V. A system for predicting fire behavior in canadian forests. In: DONOHUE, L. R.; MARIN, R. E. (Ed.). **Proceedings of the 8th Conference on Fire and Forest Meteorology**. Bethesda, Maryland, USA: Society of American Foresters, 1985. (Lecture Notes in Computer Science, v. 5792), p. 6–16. 5

MASSEY JR, F. J. The kolmogorov-smirnov test for goodness of fit. **Journal of the American Statistical Association**, v. 46, n. 253, p. 68 – 78, 1951. 32

MATLAB. **version 7.10.0 (R2010a)**. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2010. 32, 80

MATSUMOTO, M.; NISHIMURA, T. Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator. **ACM Trans. Model. Comput. Simul.**, v. 8, n. 1, p. 3–30, jan. 1998. 43

MBOW, C.; GOITA, K.; BENIE, G. B. Spectral indices and fire behavior simulation for fire risk assessment in savanna ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 1, p. 1–13, maio 2004. 104

MCARTHUR, A. **Weather and Grassland Fire Behaviour**. Canberra, AU: Forest Research Institute, Forestry and Timber Bureau, 1966. (Leaflet, v. 100). 5, 53, 54, 56, 91

MCKENZIE, D.; KENNEDY, M. C. Scaling laws and complexity in fire regimes. In: MCKENZIE, D.; MILLER, C.; FALK, D. A. (Ed.). **The Landscape Ecology of Fire**. New York, NY: Springer, 2011, (Ecological Studies, v. 213). cap. 2, p. 27–49. 37

MIRANDA, A. C.; MIRANDA, H. S.; DIAS, I. de F. O.; DIAS, B. F. de S. Soil and air temperatures during prescribed cerrado fires in central brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v. 9, n. 3, p. 313–320, 1993. 102, 103

- MIRANDA, H. S.; BUSTAMANTE, M. C.; MIRANDA, A. C. The fire factor. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (Ed.). **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. New York, NY: Columbia University Press, 2002. p. 51–68. 2, 3, 20, 76, 102, 103
- MIRANDA, H. S.; SATO, M. N.; NASCIMENTO NETO, W.; AIRES, F. S. Fires in the Cerrado, the brazilian savanna. In: COCHRANE, M. A. (Ed.). **Tropical fire ecology: climate change, land use, and ecosystem dynamics**. New York, NY: Springer published in association with Praxis Publishing, Heidelberg, 2009, (Springer Praxis Books / Environmental Sciences). 76, 80, 85, 102, 103
- MIRANDA, M. I. **Efeitos de diferentes regimes de queima sobre a comunidade de gramíneas do cerrado**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2002. 76
- MISTRY, J. Fire in the cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. **Progress in Physical Geography**, v. 22, n. 4, p. 425–448, dez. 1998. 76, 102, 103
- MISTRY, J.; BERARDI, A. Assessing fire potential in a brazilian savanna nature reserve. **Biotropica**, v. 37, n. 3, p. 439–451, 2005. 103
- MORTIZ, M. A. Spatiotemporal analysis of controls on shrubland fire regimes: age dependence and fire hazard. **Ecology**, v. 84, n. 2, p. 351–361, February 2003. 29
- 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, n. 8, p. 1318–1328, 2000. 38, 100
- NELSON JR, R. M. Water relations of forest fuels. In: JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. (Ed.). **Forest fires: behavior and ecological effects**. San Diego, CA: Academic Press, 2001. 52
- NELSON JR, R. M.; ADKINS, C. W. A dimensionless correlation for the spread of wind-driven fires. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 18, n. 4, p. 391–397, 1988. 55
- NOBLE, I. R.; GILL, A. M.; BARY, G. A. V. McArthur's fire-danger meters expressed as equations. **Australian Journal of Ecology**, v. 5, n. 2, p. 201–203, 1980. 53, 56, 91
- OLIVEIRA, P.; MARQUIS, R. **The cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. New York, NY: Columbia University Press, 2002. 29

- ORMSBY, T.; NAPOLEON, E.; BURKE, R. **Getting to Know ArcGIS Desktop**: The basics of arcview, arclocator, and arcinfo updated for arcgis 9. Garland, TX, U.S.A: Esri Press, 2004. (Getting to Know Series). 81
- OTTMAR, R.; VIHMANEK, R. E.; MIRANDA, H. S.; SATO, M. N.; ANDRADE, S. M. **Stereo Photo Series for Quantifying Cerrado Fuels in Central Brazil - Volume I**. Portland, OR: Pacific Northwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 2001. (General technical report PNW-GTR-519). 83
- PASTOR, E.; ZARATE, L.; PLANAS, E.; ARNALDOS, J. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 29, n. 2, p. 139–153, 2003. 3, 4, 6
- PEET, G. The shape of mild fires in jarrah forest. **Australian Forestry**, v. 31, n. 2, p. 121–127, 1967. 54
- PIVELLO, V. M. Invasões biológicas no cerrado brasileiro: efeitos da introdução de espécies exóticas sobre a biodiversidade. **Ecologia.info**, v. 33, 2007. Disponível em: <<http://www.ecologia.info/>>. 14
- PIVELLO, V. R.; OLIVERAS, I.; MIRANDA, H. S.; HARIDASAN, M.; SATO, M. N.; MEIRELLES, S. T. Effect of fires on soil nutrient availability in an open savanna in central brazil. **PLANT AND SOIL**, v. 337, n. 1-2, p. 111–123, 2010. 85
- POLAKOW, D. A.; DUNNE, T. T. Modelling fire-return interval t: stochasticity and censoring in the two-parameter weibull model. **Ecological Modelling**, v. 121, n. 1, p. 79 – 102, 1999. 29
- PORTERIE, B.; ZEKRI, N.; CLERC, J.-P.; LORAUD, J.-C. Modeling forest fire spread and spotting process with small world networks. **Combustion and Flame**, v. 149, n. 1–2, p. 63 – 78, 2007. 9
- PYNE, J. S.; ANDREWS, P. L.; LAVEN, R. D. **Introduction to wildland fire**. 2. ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1996. 1, 3, 5, 26, 51, 52, 53, 54, 63, 64, 65, 66, 68, 72, 80
- RAMOS NETO, M. B. **O Parque Nacional das Emas (GO) e o fogo: Implicações para a conservação biológica**. Tese (Doutorado) — Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2000. 3, 15, 16, 34, 75, 78, 84

RAMOS NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. Lightning fires in a brazilian savanna national park: Rethinking management strategies. **Environmental Management**, v. 26, n. 6, p. 675–684, 2000. 3, 20, 77

República Federativa do Brasil. **Decreto 2661 de 8 de julho de 1998**. Brasília, DF: Casa Civil, Governo Federal, 1998. Brasília, DF. Online. Último acesso em 10/08/2012. Disponível em:  
<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/d2661.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2661.htm)>. 1

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (Ed.). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina, GO: EMBRAPA, 1998. p. 89–166. 84

RICHARDS, G.; BRYCE, R. A computer algorithm for simulationg the spread of wildland fire perimeters for heterogeneous fuel and meteorological condicions. **International Journal of Wildland Fire**, v. 5, n. 2, p. 73 – 79, 1996. 7

RICHARDS, G. D. An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 30, n. 6, p. 1163–1179, 1990. 7

ROTHERMEL, R. **A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels**. Ogden, UT: Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, United States Department of Agriculture, 1972. (Research Paper INT-115). 5, 9, 55, 56

SALINERO, E.; CHUVIECO, E. **Wildland Fire Danger: Estimation and Mapping : the Role of Remote Sensing Data**. River Edge, NJ: World Scientific, 2003. (Series in Remote Sensing). 79

SATIO, K. Flames. In: JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. (Ed.). **Forest fires: behavior and ecological effects**. San Diego, CA: Academic Press, 2001. p. 12–51. 4

SCHMIDT, I. B.; SAMPAIO, M. B.; FIGUEIREDO, I. B.; TICKTIN, T. Fogo e artesanato de capim-dourado no Jalapão: Usos tradicionais e consequências ecológicas. **Revista Biodiversidade**, v. 2, n. 2, p. 67–85, 2011. 84

SHARPLES, J. J. Review of formal methodologies for wind-slope correction of wildfire rate of spread. **International Journal of Wildland Fire**, v. 17, n. 2, p. 179–193, 2008. 54

- SILVA JUNIOR, D. B. **Modelagem computacional de incêndios e queimadas: um estudo de caso sobre a Reserva Biológica do Lago Piratuba - AP**. Dissertação (Mestrado) — Mestrado em desenvolvimento de processos ambientais, Universidade Católica de Pernambuco, 2007. 103
- SILVESTRINI, R. A. **Modelo probabilístico de ignição e propagação de fogo em áreas de floresta na Amazônia Brasileira**. Dissertação (Mestrado) — Programa de pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008. 103
- SIMON, M. F.; GREYER, R.; QUEIROZ, L. P. de; SKEMA, C.; PENNINGTON, R. T.; HUGHES, C. E. Recent assembly of the cerrado, a neotropical plant diversity hotspot, by in situ evolution of adaptations to fire. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 48, p. 20359–20364, 2009. 2, 20
- STAUFFER, D.; AHARONY, A. **Introduction To Percolation Theory**. 2nd. ed. London, UK: Taylor & Francis, 1994. 37, 43
- SULLIVAN, A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. **International Journal of Wildland Fire**, v. 18, n. 4, p. 387–403, June 2009. 5, 53, 55, 91
- \_\_\_\_\_. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. **International Journal of Wildland Fire**, v. 18, n. 4, p. 387–403, June 2009. 6
- TYMSTRA, C.; BRYCE, R. W.; WOTTON, B. M.; TAYLOR, S. W.; ARMITAGE, O. B. **Development and structure of Prometheus: the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model**. Edmonton, Alberta: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 2009. (Information Report NOR-X-417). 7
- VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Goiânia, GO: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005. p. 1–8. 75
- VERBESSELT, J.; JONSSON, P.; LHERMITTE, S.; AARDT, J. V. Evaluating satellite and climate data derived indices as fire risk indicators in savanna ecosystems. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., In**, v. 44, n. 6, p. 1622–1632, 2006. 104

- VIEGAS, D. X.; PINOL, J.; VIEGAS, M. T.; OGAYA, R. Estimating live fine fuels moisture content using meteorologically-based indices. **International Journal of Wildland Fire**, v. 10, n. 2, p. 223 – 240, 2001. 79
- VON NEUMANN, J. **Theory of Self-Reproducing Automata**. Champaign, IL, USA: University of Illinois Press, 1966. 8
- WALTER, H. **Ecology of tropical and subtropical vegetation**. Edinburg, TX: Oliver and Boyd, 1971. 15
- WARD, D. Combustion chemistry and smoke. In: JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. (Ed.). **Forest fires: behavior and ecological effects**. San Diego, CA: Academic Press, 2001. 4, 51
- WATTS, D. J.; STROGATZ, S. H. Collective dynamics of 'small-world' networks. **Nature**, v. 393, n. 6684, p. 409–10, 1998. 9
- WEBER, R. O. Wildland fire spread models. In: JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. (Ed.). **Forest fires: behavior and ecological effects**. San Diego, CA: Academic Press, 2001. 3, 6, 54
- WEISE, D. R.; ZHOU, X.; SUN, L.; MAHALINGAM, S. Fire spread in chaparral – 'go or no-go?'. **International Journal of Wildland Fire**, v. 14, n. 1, p. 99–106, 2004. 100
- WOLFRAM, S. Statistical mechanics of cellular automata. **Reviews of Modern Physics**, American Physical Society, v. 55, n. 3, p. 601–644, jul 1983. 8
- \_\_\_\_\_. Cellular automata as models of complexity. **Nature**, v. 311, n. 5985, p. 419 – 424, 1984. 8
- \_\_\_\_\_. **Stephen Wolfram: Articles on Cellular Automata**. 2012. Disponível em: <<http://www.stephenwolfram.com/publications/articles/ca/>>. 8
- YANG, X. S. **Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms**. Frome, UK: Luniver Press, 2008. 87, 119, 121
- \_\_\_\_\_. Firefly algorithms for multimodal optimization. In: WATANABE, O.; ZEUGMANN, T. (Ed.). **Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, 5th International Symposium, SAGA 2009 Proceedings**. Sapporo, JP: Springer, 2009. (Lecture Notes in Computer Science, v. 5792), p. 169–178. 88

\_\_\_\_\_. Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation. **Int. J. Bio-Inspired Comput.**, v. 2, n. 2, p. 78–84, 2010. 88, 120



## APÊNDICE A - ALGORITMO DE VAGA-LUMES

O algoritmo de vaga-lumes, é um algoritmo baseado em meta-heurística e inspirado no comportamento dos vaga-lumes, proposto por Xin-She Yang na Universidade de Cambridge em 2007 (YANG, 2008). A idéia central do algoritmo é que as emissões luminosas de um vaga-lume, atuam como um mecanismo de atração para os demais vaga-lumes de seu enxame.

Um vaga-lume  $i$  define uma solução candidata do problema,  $\mathbf{x}_i^t = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(d))$ , imersa em um espaço de busca  $S$  de dimensão  $d$ , onde  $S \subset \mathbb{R}^d$ , e percorre o seu interior em passos discretos de tempo  $t$ . Duas características definem a formulação do algoritmo: como se dá a variação da luz percebida pelos vaga-lumes menos brilhantes; e como se dá a atratividade entre os vaga-lumes.

A intensidade do brilho de um vaga-lume  $i$  é definida pela avaliação da função objetivo  $f(\mathbf{x}_i)$ . Quanto melhor avaliado o vaga-lume, mais brilhante. Ao longo do espaço de buscas, a intensidade da luz emitida por um vaga-lume  $j$  (mais brilhante) que é percebida por um vaga-lume  $i$  (vaga-lume a ser atraído), decresce em função da distância entre os vaga-lumes.

Um fator de atratividade  $\beta$  é formulado como:

$$\beta(r_{i,j}) = \beta_0 e^{-\gamma r_{i,j}^m}, \quad (\text{A.1})$$

onde  $r_{i,j}$  é a distância entre os vagalumes (usualmente representada pela distância euclidiana),  $\beta_0$  é um parâmetro que quantifica a atratividade para uma distância  $r_{i,j} = 0$ ,  $\gamma$  é o parâmetro de absorvidade, que quantifica a absorção da luz pelo meio, e  $m$  é um parâmetro que controla a influência da distância sobre a atratividade (podendo ser  $m = 2$  no caso da distância euclidiana).

O movimento do vaga-lume  $i$  em direção ao vaga-lume  $j$  mais brilhoso é definida por:

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \beta(r_{i,j}) \cdot (\mathbf{x}_j^t - \mathbf{x}_i^t) + \alpha \epsilon_i, \quad (\text{A.2})$$

onde a segunda parcela do lado direito da Equação A.2 representa a atratividade, controlada pelos parâmetros  $\beta_0$  e  $\gamma$ , e a terceira parcela representa a aleatoriedade, controlada pelo parâmetro de aleatoriedade  $\alpha$ , onde  $\epsilon_i$  é um vetor  $d$ -dimensional de números aleatórios. Em geral, assume-se  $\beta_0 = 1$ , que representa uma atratividade máxima à distância nula. Deste modo, o comportamento do algoritmo fica

condicionada à escolha dos parâmetros  $\gamma$  e  $\alpha$ .

A atratividade decresce em função da distância. Na sua essência, o parâmetro  $\gamma$  determina como a atratividade decresce ao longo do espaço de busca. Em outras palavras, ela representa a visibilidade dos vaga-lumes. Seu valor é crucialmente importante para determinar o comportamento do algoritmo, e conseqüente sua convergência (YANG, 2010). Na teoria, o parâmetro de absorvidade é definido entre os dois extremos,  $\gamma \in (0, \infty)$ . Quando  $\gamma \rightarrow 0$ , a atratividade  $\beta$  é constante  $\beta = \beta_0$ . Isto é equivalente a dizer que a intensidade da luz emitida pelo vaga-lume não decresce com a distância. Neste caso, todos vaga-lumes se atraem na mesma intensidade e  $\beta_0$  define a taxa com que ocorre o movimento de atração. Quando  $\gamma \rightarrow \infty$ , temos que  $\exp(-\gamma r_{ij}^2) \rightarrow 0$ , logo, os vaga-lumes têm atratividade nula, e o movimento é conduzido apenas pela componente estocástica (método de busca aleatória).

O parâmetro  $\alpha$  controla a componente de aleatoriedade do movimento do vaga-lume. Na versão original do algoritmo, o vetor  $d$ -dimensional da componente estocástica assume a forma  $\epsilon = \mathbf{rand} - 1/2$ , onde  $\mathbf{rand}$  é um vetor  $d$ -dimensional de números aleatórios de uma distribuição uniforme definida entre 0 e 1. A componente estocástica pode também ser representada por outras distribuições, como a gaussiana com média 0 e desvio padrão 1. Uma boa estratégia para acelerar a convergência do algoritmo é utilizar uma componente de aleatoriedade dinâmica, que decresce ao longo das  $t$  iterações do algoritmo. Neste caso, o parâmetro de aleatoriedade  $\alpha$  assume um valor inicial  $\alpha_i$ , e decresce monotonicamente ao longo das  $t$  iterações, até o valor final  $\alpha_f$ , conforme a Equação:

$$\alpha_{t+1} = \alpha_t \left( \frac{\alpha_f}{\alpha_i} \right)^{1/(N_{iter}-1)}, \quad (\text{A.3})$$

onde  $\alpha_{t=1} = \alpha_i$  e  $t = 2, 3, \dots, N_{iter}$ . A Figura A.1 mostra o gráfico que descreve a variação de  $\alpha$  ao longo de 100 iterações, partindo de  $\alpha_1 = 0,5$  até  $\alpha_{100} = 0,01$ .

A Figura A.2 mostra o pseudo-código do algoritmo. O algoritmo é aplicado em passos discretos ou gerações. Cada vaga-lume possui uma posição no espaço de busca, que representa uma solução candidata, e o seu brilho, que é proporcional à avaliação da solução candidata frente à função de custo. Inicialmente, a população de vaga-lumes é inicializada. Para cada iteração do algoritmo, uma nova posição dos vaga-lumes é obtida e o seu brilho é recalculado. No decorrer das iterações, os vaga-lumes migram em função das soluções ótimas encontradas. Uma das características do algoritmo é a formação de sub-enxames de vaga-lumes que sobrevoam em torno das soluções

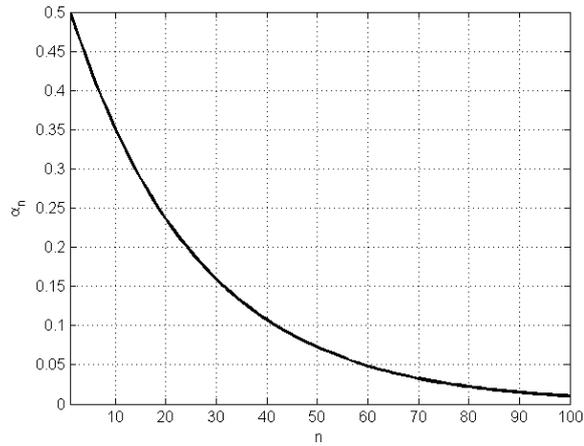


Figura A.1 - Curva que define o variação do parâmetro de aleatoriedade  $\alpha_n$  ao longo de  $n = 100$  iterações, partindo de  $\alpha_1 = 0,5$  até  $\alpha_{100} = 0,01$ .

ótimas. A estratégia em diminuir o parâmetro de aleatoriedade ao longo das iterações tem como efeito aglomerar, cada vez mais, os vagalumes dos sub-exames em torno das soluções ótimas encontradas.

```

Defina uma função de custo  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$ 
Inicialize a população de vagalumes  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 
Para iteração = 1 até o número total de iterações
  Para  $i = 1$  até o número total de vagalumes
    Calcule a intensidade de luz  $I_i$  do vagalume  $i$  definida por  $f(x_i)$ 
  Fim Para
  Para  $i = 1$  até o número total de vagalumes
    Para  $j = 1$  até o número total de vagalumes
      Se  $I_j > I_i$  Então
        Mova o vagalume  $i$  na direção de  $j$ 
      Fim Se
    Fim Para
  Fim Para
  Ordene os vagalumes e encontre o mais brilhante da geração
Fim Enquanto
  
```

Figura A.2 - Pseudo-código para o algoritmo de vaga-lumes.  
 Fonte: Adaptado de (YANG, 2008).



## PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.