

Uso de rede de mapas acoplados para a modelagem da propagação do fogo

Rodolfo M. Almeida*

Programa de Pós-graduação em Computação Aplicada, INPE, São José dos Campos, SP

Elbert E. N. Macau, Fernando M. Ramos,

Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada, INPE, São José dos Campos, SP.

Resumo

A modelagem da propagação do fogo em paisagens heterogêneas é bastante significativa devido a dinâmica do fogo ser sensível à características espaciais locais. É proposto nesse trabalho uma metodologia para modelar a propagação do fogo em uma paisagem heterogênea através de um modelo de tempo e espaço discretos e variáveis de estado contínua. A vantagem dessa estratégia de modelagem é que possibilita a inclusão de características espaciais intrinsecamente locais possibilitando assim a descrição da propagação do fogo em um ambiente heterogêneo.

Palavras Chaves: rede de mapas acoplados, modelo de propagação do fogo, sistemas dinâmicos.

1. Introdução

O desenvolvimento de modelos de propagação do fogo é muito importante devido as perdas econômicas e sociais que o fogo pode causar e possibilitam aplicações tanto de caráter diagnósticas quanto prognósticas em relação ao combate a incêndios florestais. Através da simulação de um modelo de propagação pode-se determinar estratégias de combate a incêndios florestais e ao mesmo tempo possibilita a criação de possíveis cenários de propagação do fogo mais ou menos realísticos.

As habilidades para descrever a propagação do fogo através de um conjunto de regras quantitativas tem sido o objetivo de muitos programas de pesquisa ocorridos em diversas partes do mundo nos últimos anos. Dados os

números de fatores que contribuem para esse fenômeno e a complexidade do grau de interação dos mecanismos que determinam a propagação do fogo, até hoje não foi possível obter-se uma descrição confiável e capaz de se prever o comportamento do fogo sob qualquer condição. Uma característica predominante da propagação do fogo em paisagens naturais é que as interações dependem fortemente de características locais.

Modelos matemáticos com parâmetros concentrados merecem destaque devido à possibilidade de se incorporar tais fatores locais de interação. Redes de mapas acoplados são modelos matemáticos de sistemas dinâmicos na rede em que o tempo e o espaço são discretos e as variáveis de estado contínuas (fig. 1) [2]. Ao se modelar através de rede de mapas acoplados cada subsistema (nó) da figura 1(b) é descrito por equações algébricas (mapas) que caracterizam quantitativamente a dinâmica do subsistema e a sua interação com a vizinhança.

2. Descrição da propagação do fogo

O fogo é a manifestação de um tipo de reação de combustão na medida em que atuam: combustível, oxigênio, calor e continuidade da reação de combustão. No caso de um incêndio florestal, a floresta é o material combustível mas parte dela, denominada de *leito de combustível* - constituída pelos materiais mais secos e finos - participa ativamente no processo de combustão conduzindo o incêndio. O calor é fornecido pela região do leito de combustível com intensa combustão chamada de *frente de fogo*.

A propagação do fogo se dá pela seguinte descrição.

*e-mail para correspondência: rodolfo@lac.inpe.br

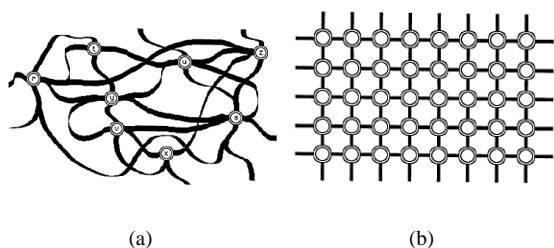


Figura 1: (a) Sistema dinâmico arbitrário e (b) sistema dinâmico em rede bidimensional. Uma representação esquemática onde cada nó circular denota as variáveis do sistema e as linhas pretas a conexão entre eles.

A frente de fogo emite calor para a região do leito de combustível situada na sua vizinhança fazendo com que a temperatura das partículas que compõem o leito de combustível, que inicialmente estavam à temperatura ambiente, se eleve. Durante essa fase de pré-ignição ocorre a pirólise das partículas e voláteis são emitidos. Quando a temperatura das partículas atinge um valor crítico T_{ig} , denominado de temperatura de ignição, os voláteis entram em combustão. As partículas de combustível que entraram em ignição passam a pertencer à frente de fogo e esse mecanismo é executado sucessivas vezes. Assim, a propagação do fogo é considerada como uma série de sucessivas ignições dos combustíveis nas proximidades da frente de fogo.

Os mecanismos de transferência de calor que conduzem a propagação do fogo em paisagens naturais são convecção, radiação e transporte de massa [6, 3, 4, 7]. Os principais fatores que influenciam na propagação do fogo são combustível, topografia e condições de tempo. A heterogeneidade do leito de combustível, as características da superfície em que o leito de combustível se situa e as condições do tempo (o vento principalmente) são os fatores que mais influenciam na dinâmica da propagação do fogo [5]. A representação esquemática na figura 2 mostra uma simplificação desses mecanismos atuando na propagação em condições simples e sem fatores exógenos (figura 2(a)), sob a presença de vento (figura 2(b)) e sob a presença de inclinações na superfície do terreno (figura 2(c)).

A quantidade de calor transmitida ao combustível é

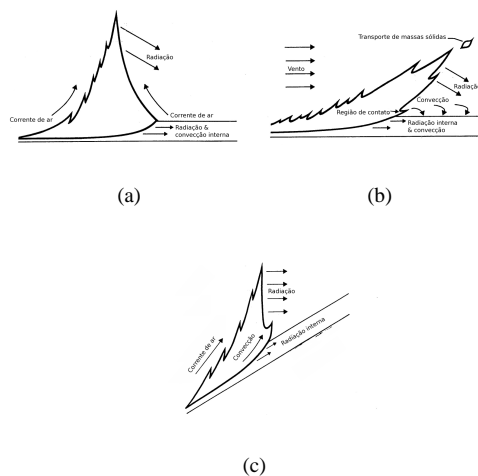


Figura 2: Representação esquemática da propagação do fogo sob condições (a) condições normais, (b) com vento e (c) com elevações do terreno.

maior quanto mais próximo se estiver da frente de fogo. Em condições simples o fogo se propaga de maneira semelhante a mostrada na figura 2(a). A forma da chama é definida através da combinação de correntes convectivas e advectivas de ar. Há a perda de calor por convecção com a atmosfera e existe um mecanismo de convecção interna e de transmissão de calor por radiação na região do leito de combustível bem próximas ao fogo.

Sob ação do vento uma maior quantidade de oxigênio é fornecida para alimentar a combustão levando oxigênio para regiões onde em condições normais seria excessivo. As correntes advectivas de ar tornam-se mais intensas e a chama sofre uma inclinação. Como consequência dessa inclinação, a distância da chama ao leito é reduzida e uma maior quantidade de calor radiativo é transmitida para o leito de combustível (figura 2(b)), e a convecção interna aumenta devido as correntes convectivas de calor serem perturbadas pelo vento e transportarem mais ar quente da chama ao leito.

Quando o fogo se propaga sob uma superfície inclinada (figura 2(c)), as chamas ficam mais próximas ao leito e com isso uma maior quantidade de calor radiativo é transmitido ao combustível situado mais acima. As correntes advectivas acompanham a direção da superfície e com

isso aumentam a intensidade da transmissão de calor por convecção para combustíveis nas proximidades da chama. Sob algumas condições de vento podem ocorrer transportes de massa por ejeções de partículas em chama, figura 2(b), tal fenômeno é conhecido na literatura por *spotting* e contribui para a ignição de combustíveis situados além das vizinhanças da frente de fogo.

3. Modelo de propagação do fogo

O modelo de rede de mapas acoplados baseia-se no método de modelagem térmica baseado em analogia sistemas térmicos denominado de método nodal (*lumped parameter method*)[1]. O leito de combustível é discretizado em um número finito de regiões denominadas nós que se interligam através de “condutâncias térmicas” (fig 3) cujas expressões variam segundo o tipo de transferência de calor envolvendo estes elementos. Cada nó define-se por um elemento de volume de dimensões $d \times d \times h$ suposto isotérmico e possui uma densidade de combustível. Cada elemento de volume se posiciona sobre uma grade bidimensional e o fenômeno é descrito pelas equações:

$$T_{i,j}^{t+1} = T_{i,j}^t + \frac{1}{\rho_{i,j}^t C p_{i,j}} \times \left[\sum_{i',j'} k(T_{i',j'}^t - T_{i,j}^t) + k_{ar}(T_{i,j}^t - T_{ar}) + \sum_{i',j'} F_{i',j'}^{i,j} \sigma (T_{i',j'}^{t,4} - T_{i,j}^{t,4}) - Q_H \Delta \rho_{i,j}^t \right], \quad (1a)$$

$$\rho_{i,j}^t = \begin{cases} \rho_{i,j}^0 & \text{se } T_{i,j}^t < T_{ig} \\ \rho_{i,j}^0 e^{-\lambda(t-t_{ig})} & \text{se } T_{i,j}^t \geq T_{ig}, \end{cases} \quad (1b)$$

que modelam o campo de temperatura $T_{i,j}^t$ e a densidade de combustível $\rho_{i,j}^t$ para cada nó i, j em cada passo de tempo t , onde $i, j = 1, 2, \dots, N$ é a posição do nó, $n(i, j)$ representa os vizinhos i', j' mais próximos de (i, j) (veja fig. 3).

A equação 1 determina o balanço térmico do nó i, j a cada tempo t e seus termos são:

◊ **Energia interna:** Cada nó possui uma energia interna definida pelo termo $\rho_{i,j}^n C p_{i,j} \Delta T_{i,j}^t = \rho_{i,j}^n C p_{i,j} (T_{i,j}^{t+1} - T_{i,j}^t)$, onde $\rho_{i,j}^t$ é a razão entre a massa

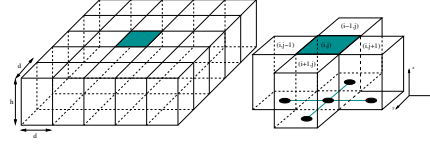


Figura 3: Representação esquemática da divisão nodal. Devido a geometria quadrada cada nó interage com os quatro vizinhos mais próximos.

de combustível e o volume do nó (densidade de combustível) no instante t e $C p_{i,j}$ é o calor específico médio das partículas que do leito de combustível. O produto $\rho_{i,j}^n C p_{i,j}$ define a capacitância térmica ou inércia térmica, que é a variação de energia de cada nó sofre quando sujeito a uma variação de temperatura ΔT .

◊ **Acoplamentos radiativos:** A transferência de calor por radiação entre dois nós segue a lei de Stefan-Boltzmann e assume a forma $R_{i',j'}^{i,j} \sigma (T_{i',j'}^n, 4 - T_{i,j}^n, 4)$ onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann e o termo de acoplamento radiativo $R_{i',j'}^{i,j} = \alpha_{i,j} \epsilon_{i',j'} F_{i',j'}^{i,j}$ é função da emissividade da fonte de calor (chama que ocupa o vizinho i', j'), da absorvidade do receptor de calor (nó i, j) e de um fator de forma $F_{i',j'}^{i,j}$ que depende da posição geométrica da fonte de calor em relação ao receptor com $\sum_{i',j'} F_{i',j'}^{i,j} = 1$ onde $i', j' \in n(i, j)$. O fator de forma define a fração da energia emitida pelo nó i', j' que incide diretamente sobre o nó i, j . Na equação 1a adotou-se as emissibilidades e absorvidades iguais a 1.

◊ **Acoplamentos convectivos:** Assume-se que a transferência convectiva de calor entre dois nós é proporcional à diferença entre as suas temperaturas. Tal proporcionalidade depende de um coeficiente de acoplamento convectivo que é função de uma constante convectiva k , da área $S = dh$ da seção vertical por onde o calor irá fluir e que separa os dois nós e, da distância d entre os nós. Assim o acoplamento convectivo de um nó i', j' ao seu vizinho i, j é $B_{i',j'}^{i,j} (T_{i',j'}^n - T_{i,j}^n)$ com $B_{i',j'}^{i,j} = kS/d = kh$ ($A = d \cdot h$) onde $k \in [0, 1]$ é a constante de convecção entre os nós e h é a altura do elemento de volume i, j . Na equação 1a adotou-se $d = h = 1$.

◊ **Produção e perda de calor:** Quando está em combustão, cada nó possui um mecanismo de geração e perda de calor $Q_{i,j}^t$ associado a cada tempo t . O nó produz calor pela reação de combustão e perde calor por convecção

para a atmosfera. A perda convectiva de calor é proporcional à diferença de calor entre as temperaturas do nó e a do ar. A quantidade de calor Q_H produzida na queima de cada unidade de massa (entalpia de combustão) é considerada constante. Assume-se que no decorrer da combustão o consumo de massa é exponencial (equação 1b), e tem-se $\rho_{i,j}^0$ a biomassa inicial de nó i, j , t_{ig} o instante de tempo que ocorreu a ignição, λ é uma constante associada ao tempo de combustão cuja magnitude associa-se ao tempo de combustão e $H(\cdot)$ é a função de Heaviside. A energia liberada pela combustão do nó i, j a cada instante t de tempo é $-Q_H \Delta \rho_{i,j}^t = -Q_H (\rho_{i,j}^{t+1} - \rho_{i,j}^t)$. O nó em chamas perde calor por convecção com o ar através de um acoplamento convectivo $B_{i,j}^{ar} = k'S/h = k'dd/h$ onde k' é o coeficiente de convecção entre o nó e a atmosfera e, T_{ar} é a temperatura do ar.

4. Resultados esperados

Pretende-se obter uma descrição fenomenológica da propagação do fogo através de um modelo que englobe características importantes do leito de combustível e da interação do fogo com o ambiente. A principal diferença entre a abordagem que esse trabalho apresenta das demais utilizadas no estado-da-arte da modelagem da propagação do fogo é o fato do modelo ser definido através de uma equação que determina o balanço das trocas de calor de um elemento de volume que compõe o leito de combustível. As perdas e ganhos de calor se dão devido a interações entre os nós e entre o nó e a atmosfera.

Com o espaço discreto é possível simular a propagação do fogo em leitos de combustível tanto homogêneos quanto heterogêneos. Pode-se definir para os nós diferentes densidades de biomassa e pode-se ainda definir nós vazios ou ocupados por material não combustível. Uma outra observação importante na utilização de tal modelagem é da possibilidade de se adotar modificações nos parâmetros locais (coeficientes de acoplamentos convectivo e radiativo) com o intuito de serem inseridas a influência dos fatores exógenos vento e topografia.

O fogo se espalha muito rapidamente na direção do vento local e na direção de inclinações de terrenos irregulares [5]. Os fatores exógenos podem ser definidos através dos parâmetros velocidade e direção do vento e ângulo de inclinação da superfície. Por exemplo, o vento causa uma

inclinação na chama e com isso o fator de forma $F_{i',j'}^{i,j}$ é modificado e se torna mais intenso aos nós i', j' que estão na direção do vento, assim como uma maior quantidade de calor de convecção interna é transmitida aos mesmos nós. Sob a presença de inclinações na superfície que está o leito de combustível uma maior quantidade de calor é transmitida para os nós situados superfície acima através de modificações dos mesmos parâmetros.

Assim que obtido um certo nível de descrição da propagação do fogo em paisagens naturais, devido a flexibilidade na representação do espaço como uma entidade não-homogênea tanto nas suas propriedades quanto na sua estrutura, a possibilidade de se definir níveis de interações entre os nós e, o modelo tratar o sistema como um ambiente aberto a influências externas, é possível a simular cenários de incêndios florestais através da interação do modelo com um Sistema de Informações Geográficas (SIG) que possui armazenado os parâmetros de entrada.

Referências

- [1] D. G. Gilmore, editor. *Satellite Thermal Control Handbook*. The Aerospace Corporation Press, El Segundo, California, 1994.
- [2] K. Kaneko, editor. *Theory and Applications of Coupled Map Lattices*. Nonlinear Science: Theory and Applications. John Wiley & Sons Ltd, 1993.
- [3] F. Morandini, P. A. Santoni, and J. H. Balbi. The contribution of radiant heat transfer to laboratory-scale fire spread under the influences of wind and slope. *Fire Safety Journal*, 36:519–543, 2001.
- [4] F. Morandini, A. Simeoni, P. A. Santoni, and J. H. Balbi. A model for the spread of fire across a fuel bed incorporating the effects of wind and slope. *Combustion Science and Technology*, 177:1381–1418, 2005.
- [5] J. S. Pyne, P. L. Andrews, and R. D. Laven. *Introduction to Wildland Fire*. John Wiley & Sons, Inc., 2nd edition, 1996.
- [6] R.C Rothermel. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research paper int-115, USDA Forest Service, Intermountain Forest And Range Experiment Station, Ogden, UT, 1972.

- [7] D. X. Viegas. Forest fire propagation. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 356:2907–2928, 1998.