

MÉTODO NODAL APLICADO À MODELAGEM DA PROPAGAÇÃO DO FOGO EM INCÊNDIOS DE SUPERFÍCIE

Rodolfo Maduro Almeida

Curso de pós-graduação em Computação Aplicada, INPE
Avenida dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, 12227-010, São José dos Campos, SP
E-mail: rodolfo@lac.inpe.br

Elbert Einstein Nehrer Macau, Fernando Manuel Ramos

Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada, INPE
Avenida dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, 12227-010, São José dos Campos, SP
E-mail: {elbert,fernando}@lac.inpe.br

Issamu Muraoka

Divisão de Mecânica Espacial e Controle, INPE
Avenida dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, 12227-010, São José dos Campos, SP
E-mail: issamu@dem.inpe.br

***Resumo:** Propomos um modelo de propagação do fogo aplicável à modelagem de incêndios florestais de superfície. Consideramos a radiação emitida pela frente de fogo como o principal mecanismo de transferência de calor relacionado com a propagação do fogo. As trocas de calor por condução, convecção e radiação que ocorrem no interior do leito combustível são aproximadas por um termo de difusão do calor. A abordagem matemática utilizada é o método nodal. O leito combustível é subdividido em um número finito de regiões, denominadas nós-leito. A chama sobre cada nó-leito, denominada nó-chama, é aproximada por um paralelepípedo, cujas superfícies emitem radiação aos nós-leito situados na sua vizinhança. Modelos de comportamento do fogo fornecem estimativas para o comprimento, o ângulo de inclinação, o tempo de permanência sob um nó-leito e o comportamento térmico de cada nó-chama. Um sistema de equações diferenciais de primeira ordem modela o comportamento térmico dos nós-leito. Efetuamos simulações variando a velocidade do vento e observamos que a velocidade de propagação do fogo se relaciona diretamente com as propriedades geométricas dos nós-chama. Quanto mais inclinados, maior será a velocidade de propagação na direção de inclinação. Os resultados obtidos são encorajadores para a utilização do método nodal na modelagem da propagação do fogo.*

1. Introdução

Um incêndio florestal é caracterizado pela presença indesejada do fogo, que se alastra descontroladamente sobre uma floresta. A região do incêndio com intensas chamas e onde há a liberação de uma grande quantidade de calor constitui a chamada frente de fogo. No incêndio de superfície, o fogo se alastra consumindo principalmente a matéria orgânica morta acumulada sobre a superfície da floresta. Modelos de propagação do fogo em incêndios florestais surgem com o intento de representar, através de simulação, o avanço perimetral da frente de fogo sobre a superfície utilizando um conjunto de regras ou equações que levam em conta variáveis relacionadas com a vegetação, topografia e condições atmosféricas [14]. Estes modelos, aliados ao uso de recursos computacionais e sistemas de informações geográficas tem provocado um salto qualitativo no desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na tomada de decisões que visam amenizar os impactos ecológicos e econômicos causados pelo fogo [5].

Dependendo da abordagem considerada [5], os modelos de propagação do fogo podem ser classificados como: (i) modelos teóricos [11], que são aqueles originados das leis que governam a mecânica dos fluidos, combustão e transferência de calor; (ii) modelos semi-físicos/semi-empíricos [16], propostos por expressões teóricas simples e gerais que são complementadas através de experimentos; e (iii) modelos empíricos [8], obtidos por análises estatísticas aplicadas sobre dados de experimentos ou de históricos de incêndios. Na abordagem de modelagem física,

atualmente existe uma forte tendência no uso dos chamados modelos físicos simplificados, cujas equações modelam os principais mecanismos de transferência de calor presentes na propagação do fogo e utilizam algumas correlações empíricas visando simplificar a modelagem de uma série de questões químicas e termodinâmicas relacionadas ao fogo [10].

O modelo proposto neste trabalho baseia-se em uma abordagem física simplificada. O método nodal, também chamado de método dos parâmetros concentrados (do inglês *lumped parameter approach*), é utilizado na modelagem. O método nodal baseia-se na analogia térmica-elétrica para a modelagem dos processos de transferência de calor. O domínio térmico do problema em estudo é subdividido em um número finito de regiões denominadas *nós*. Cada nó interage com os demais nós do modelo através de condutâncias térmicas que representam os mecanismos de transferência de calor envolvido entre eles. O modelo resulta em uma *rede térmica* formada pelos nós e condutâncias, caracterizando uma malha análoga a um circuito elétrico. O equacionamento térmico surge do balanço das trocas de calor para cada nó. Como resultado, temos um sistema de equações diferenciais de primeira ordem que modelam o balanço das trocas de calor em cada nó. As vantagens na utilização do método nodal são sua simplicidade na formulação do problema junto com relativa precisão numérica e eficiência em tempo de processamento [7].

Nosso artigo está dividido em quatro partes. Na primeira discutimos um pouco sobre a modelagem do comportamento do fogo em incêndios de superfície. Na segunda parte apresentamos o modelo matemático para a propagação do fogo. Na penúltima parte apresentamos resultados de experimentos de simulações visando avaliar o modelo proposto. E finalmente, apresentamos as conclusões.

2. Propagação do fogo em um incêndio florestal de superfície

Durante um incêndio florestal de superfície, o leito combustível, constituído por um manto de espessura variável formado pela matéria orgânica acumulada sobre o solo e a vegetação próxima a ele, fornece o combustível consumido durante a propagação do fogo. A região do leito combustível com intensas chamas e onde há a liberação de uma grande quantidade de calor constitui a chamada frente de fogo. Parte do calor produzido é transmitida ao leito combustível situado adiante da frente de fogo, que é composto predominantemente por celulose, induzindo a um processo de pirólise¹ [19]. Nesse processo, o leito perde umidade emitindo vapor de água junto com CO₂, CO e outros subprodutos. Um dos subprodutos da pirólise da celulose é a *levoglucosan*, um volátil que suporta a combustão em chamas. Ao interagir com o oxigênio contido no ar, a *levoglucosan* forma uma mistura gasosa inflamável que a uma temperatura maior ou igual a aproximadamente 327 °C (600 K) entra em ignição dando origem a chama. Uma grande quantidade de calor é liberada e parte desse calor é transferida ao combustível, induzindo-o a um processo de pirólise mais intenso. As chamas são realimentadas por este processo de sucessivas pirólises que se mantém à medida que o combustível vai sendo consumido.

O processo de transferência de calor das chamas ao leito combustível que ainda não queimou ocorre por dois mecanismos: convecção e radiação. No interior da frente de fogo existem duas zonas de combustão: uma na fase sólida, caracterizada pelas partículas do leito combustível queimando em brasas e outra, na fase gasosa, onde predominam as chamas que queimam acima do leito combustível [18]. A radiação emitida pela fase sólida tem um alcance relativamente pequeno, enquanto que a radiação emitida pelas chamas contribui efetivamente para a propagação. A transferência de calor por convecção ocorre quando os gases quentes produzidos na combustão fluem para o interior do leito combustível e entram em contato com a superfície das partículas que ali se encontram (folhas, galhos, pequenos arbustos, gramíneas, etc.). Nas trocas de calor por convecção em incêndios florestais, as propriedades geométricas das partículas que constituem o leito combustível (tamanho e forma) são de fundamental importância [11]. O calor transmitido da frente de fogo ao combustível que ainda não queimou é intensificado pelo vento ou quando o fogo se propaga morro-acima. Sob ação do vento, ou

¹ Pirólise é a decomposição química do combustível sólido sob a influência do calor.

morro-acima, ocorre o encurtamento da distância entre as chamas e o leito combustível. Com isso, os mecanismos de transferência de calor por convecção e radiação são intensificados. Nesse sentido, o fogo se alastra mais rapidamente na direção do vento ou na direção de elevações na superfície [15,18].

3. Método nodal aplicado à modelagem da propagação do fogo

Consideramos a propagação do fogo como uma série de sucessivas ignições do leito combustível e assumimos que a radiação emitida pelas chamas seja o principal mecanismo responsável pela ignição dos combustíveis situados adiante da frente de fogo. As trocas de calor por radiação e convecção que ocorrem no interior do leito combustível são aproximadas por um mecanismo de difusão do calor. Supomos que o leito combustível seja composto por um conjunto de partículas cilíndricas, idênticas, termicamente finas e homoganeamente distribuídas sobre a superfície. As partículas são caracterizadas pela sua razão da área de superfície pelo volume σ (m²/m³), densidade ρ_p (kg/m³), calor específico c_p (J/kg/K) e teor de umidade M_p (-). O leito combustível é caracterizado por uma espessura δ (m), carga combustível w_0 (kg/m²), densidade volumétrica $\rho_b = w_0/\delta$ (kg/m³) e quociente de compactação $\beta = \rho_b/\rho_p$ (-). O leito combustível é decomposto em um conjunto de nós com dimensões $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ com $\Delta z = \delta$, aqui chamados de nós - leito. Cada nó-leito fica sujeito a: (i) um fluxo de calor por radiação trocado com a frente de fogo que incide na sua superfície superior; (ii) um fluxo de calor por radiação trocado com os gases imediatamente acima da sua superfície superior; e (iii) um fluxo de calor por difusão com os nós vizinhos que representa a transferências de calor por radiação e convecção que ocorrem no interior do leito.

Assumimos que a combustão em chamas inicia quando o nó-leito atinge a temperatura de ignição. A chama sobre cada nó-leito é aproximada por um paralelepípedo cujas superfícies emitem radiação como corpos negros. Assim, a radiação emitida pela frente de fogo é aproximada por uma série de emissões individuais de pequenos paralelepípedos situados sobre os nós-leito em combustão, que aqui serão chamados de nós-chama. Cada nó-chama possui: (i) um comprimento L (m) e um ângulo de inclinação em relação à vertical θ (°); (ii) um tempo de permanência sobre o nó-leito que se encontra em combustão τ_r (s); e (iii) um perfil temperatura-tempo que representa seu comportamento térmico durante a combustão do nó-leito. Tais propriedades podem ser estimadas por modelos empíricos do comportamento do fogo. O comprimento L é calculado por um algoritmo extraído do sistema BEHAVE de previsão do comportamento do fogo [2]. O ângulo de inclinação θ é calculado através da relação proposta por [1]. O tempo de permanência de um nó-chama sobre um nó-leito é aqui estimado pelo modelo de tempo de residência desenvolvido em [13]. O modelo de perfil temperatura tempo utilizado é conforme proposto por [4].

O seguinte sistema de equações modela o comportamento térmico dos nós-leito durante a propagação do fogo:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^N B_{j,i}(T_j - T_i) + \sum_{k=1}^N R_{k+N,i}(T_{k+N}^4 - T_i^4) + Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

onde N é o número total de nós-leito e, para um dado nó-leito i , temos que: $C_i = m_i c_p$ é a sua capacitância térmica; m_i é massa de combustível; c_p é o calor específico das partículas que constituem o leito; T_i é a temperatura do nó i ; T_{k+N} é a temperatura do nó-chama posicionado sobre os nós-leito que estão queimando; B_{ji} são as condutâncias difusivas entre os nós j e i que representa as trocas de calor por condução e convecção que ocorrem no interior do leito; $R_{k+N,i}$ são as condutâncias radiativas entre o nó i e os nós-chama $k + N$; Q_i é o calor produzido internamente no nó-leito durante sua combustão; e t é o tempo.

As condutâncias difusivas são dadas pela expressão:

$$B_{ji} = \begin{cases} 0, & \text{se } j \text{ não for adjacente a } i \\ \frac{k_b A_{ji}}{L_{ji}}, & \text{se } j \text{ for adjacente a } i \end{cases} \quad (2)$$

onde k_b (W/m/k) é a condutividade térmica efetiva do leito combustível; A_{ji} é a área da seção transversal entre os nós-leito j e i ($A_{ji} = \delta \cdot \Delta x$ ou $A_{ji} = \delta \cdot \Delta y$); e L_{ji} é a distância entre os centros dos nós-leito j e i . Supomos que a difusão do calor no interior do leito seja um efeito agregado de um arranjo paralelo de difusão do calor pelas fases: sólida (partículas do leito) e gasosa (ar entre as partículas). Assim, podemos calcular a condutividade térmica efetiva do leito como $k_b = (1 - \beta)k_{ar} + \beta k_p$, onde k_{ar} e k_p são, respectivamente, a condutividade térmica do ar e a condutividade térmica das partículas [17].

As condutâncias radiativas são dadas por:

$$R_{k+N,i} = \begin{cases} 0, & \text{se } k \text{ não está queimando} \\ \sigma_{SB} A_i F_{i,k+N}, & \text{se } k \text{ está queimando} \\ \sigma_{SB} A_i, & \text{se } k = i \text{ (trocas de calor por radiação com os gases acima)} \end{cases} \quad (3)$$

onde os índices i representa o nó leito; k o nó-leito que está queimando e $k + N$ o nó-chama posicionado sobre este; $\sigma_{SB} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann; $A_i = \Delta x \cdot \Delta y$ é a área da superfície superior do nó-leito; e $F_{i,k+N}$ é o fator de forma² entre a superfície superior do nó-leito e as superfícies do nó chama. Assume-se que ocorrem dois tipos de trocas de calor por radiação. Uma entre a superfície superior do nó-leito e os nós-chama, e outra entre a superfície superior do nó-leito e os gases imediatamente acima. Quando o nó-leito não está queimando, a temperatura dos gases é a temperatura da atmosfera. Quando o nó-leito está queimando, a temperatura dos gases imediatamente acima é dada pelo modelo de perfil temperatura-tempo do nó-chama.

Quando a temperatura do nó atinge o limiar T_{ig} , o nó entra em combustão. A partir deste instante, um termo-fonte de calor, Q_i (J/s) se faz presente à medida que o combustível é consumido. Assumimos que a energia produzida seja diretamente proporcional à taxa de consumo de combustível, dada por:

$$Q_i = \begin{cases} 0, & \text{se } i \text{ não está queimando} \\ -H \frac{dm_i(t)}{dt}, & \text{se } i \text{ está queimando} \end{cases} \quad (4)$$

onde H (J/kg) é o calor de combustão e equivale a energia produzida na queima de uma unidade de massa de combustível. A taxa de consumo de combustível é aproximada pela uma curva assintoticamente decrescente $m_i(t) = m_i(0)e^{-(t-t_{ig})/W}$, que varia em função da massa inicial do nó-leito $m_i(0)$, e do tempo contado a partir do instante em que houve a ignição do nó-leito, denotado por t_{ig} (s). A constante W relaciona-se com a velocidade da queima e, para obtê-la, assumimos que para $t^* - t_{ig} = \tau_r$ a massa remanescente no leito de combustível seja somente carbono residual sólido. A fração carbonizável γ_c (-) é utilizada para calcular essa proporção residual [13].

4. Simulações e resultados

O modelo computacional foi desenvolvido sobre o pacote PCTER, um conjunto de programas de computador escritos em linguagem FORTRAN desenvolvidos pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) para serem aplicadas na elaboração de projetos térmicos de satélites utilizando o método nodal [12].

Nas simulações utilizamos dados de experimentos de propagação do fogo sobre aparas de madeira (em inglês *wood excelsior*). Dados dos experimentos e propriedades físicas/termoquímicas desse tipo de combustível estão publicados em [3, 13, 6]. A Tabela 1 resume os valores das variáveis de entrada utilizadas nas simulações. Utilizamos uma malha retangular quadrada de 101 x 101 nós-leito regularmente espaçados a uma distância de $\Delta x = \Delta y = 0,20$ metro, totalizando um leito combustível de dimensões 20,2 metros por 20,2 metros. A condição inicial do modelo é de ignição em linha onde, para $t = 0$ todos os nós-leito de uma borda do leito combustível tem suas temperaturas iniciais iguais a temperatura de ignição.

² O fator de forma F_{ij} indica a proporção de toda a radiação que deixa uma superfície i a atinge uma superfície j . Veja [9] para mais informações.

Simulamos três cenários de propagação utilizando três valores diferentes de velocidade do vento com o intuito de avaliar a capacidade do modelo em representar o comportamento do fogo para este parâmetro. A Tabela 2 mostra as variáveis que descrevem o comportamento dos nós-chama, obtidos pelos modelos empíricos de comportamento do fogo.

Calor específico	$c_p = 1400 \text{ J/Kg/K}$
Densidade	$\rho_p = 398 \text{ kg/m}^3$
Razão entre área de superfície e volume	$\sigma_p = 3092 \text{ m}^2/\text{m}^3$
Calor de combustão	$H = 19600 \text{ kJ/kg}$
Teor de umidade	$M_p = 0,05$
Fração carbonizável	$\gamma_c = 0,15$
Condutividade térmica	$k_p = 0,11 \text{ W/m/k}$
Temperatura de ignição	$T_{ig} = 600 \text{ K}$
Carga combustível	$w_0 = 0,5 \text{ kg/m}^2$
Espessura	$\delta = 0,1 \text{ m}$
Discretização do leito	$\Delta x = \Delta y = 0,20 \text{ cm}$ e $\Delta z = \delta$
Temperatura da atmosfera	$T_{amb} = 300 \text{ K}$
Velocidade do vento	$U = 0,5; 1,0 \text{ e } 1,5 \text{ m/s}$
Direção do vento	Leste

Tabela 1. Parâmetros de entrada do modelo.

Cenário	U (m/s)	L (m)	θ (°)	τ_r (s)	T_{Fmax} (K)
1	0,5	0,99	11,95	26,43	1016,90
2	1,0	1,27	19,40	26,12	1057,36
3	1,5	1,50	25,12	25,77	1088,52

Tabela 2. Comportamento estimado para os nós-chama para os três cenários simulados.

A Figura 1 mostra a distribuição de temperatura da superfície do leito combustível em um mesmo instante de tempo, $t = 60$ segundos, para os cenários de propagação 1, 2 e 3. Percebemos as diferentes posições da frente de fogo para as simulações dos cenários. Isso se dá como consequência do fluxo de calor por radiação emitido pela frente de fogo ser intensificado pela ação do vento. A frente de fogo avança mais rapidamente para cenários com maior velocidade do vento. Se formos analisar como esse efeito é incluído no modelo, podemos visualizar as curvas de nível para a distribuição do fator de forma entre um nó-chama e os nós-leito vizinhos. Podemos perceber na Figura 2, que as curvas de nível sofrem deformação na direção do vento e com o aumento da velocidade do vento essa deformação é intensificada.

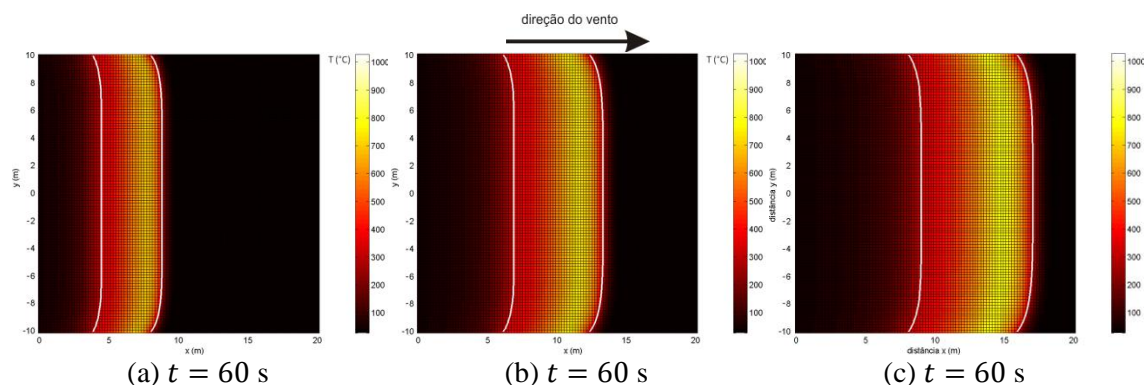


Figura 1: Distribuição de temperatura na superfície do leito combustível. As linhas brancas caracterizam os limites da frente de fogo e o vento sopra da esquerda para a direita.

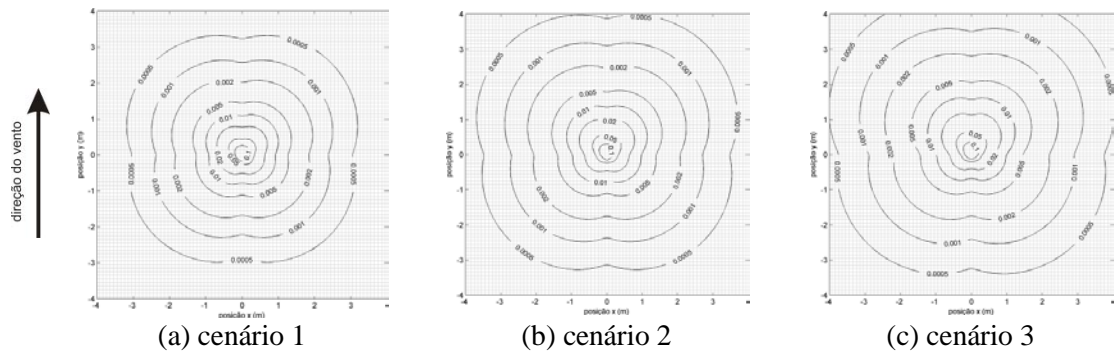


Figura 2: Curvas de nível do fator de forma entre um nó-chama, posicionado em $x = 0$ e $y = 0$, e os nós-leito situados na sua vizinhança para o cenário (a) 1, (b) 2 (b) e (c) 3. As linhas correspondem a um valor constante do fator de forma. Quadrados pintados de branco definem a superfície superior dos nós-leito. No gráfico, o vento sopra na direção de y crescente.

A partir do momento que o nó-leito entre em ignição, um termo-fonte de calor se faz presente à medida que o combustível é consumido. O calor é produzido proporcionalmente ao consumo de combustível. A quantidade remanescente de combustível no nó-leito, antes, durante e após a combustão, para o cenário 1, é mostrada na Figura 3(a). Percebemos que a massa de combustível permanece constante até o momento em que ocorre a ignição do nó-leito. Decresce exponencialmente durante a combustão e termina com a proporção referente à fração carbonizável do combustível. A Figura 3(b) mostra, para o mesmo nó-leito da Figura 3 (a), o seu comportamento térmico e dos gases imediatamente acima de sua superfície. Percebemos que a temperatura do nó se eleva gradualmente à medida que a frente de fogo se aproxima. Após entrar em ignição, sua temperatura se eleva até um máximo valor e depois decresce gradualmente até assumir a temperatura da atmosfera. A partir do instante da ignição, a temperatura dos gases, que inicialmente era a temperatura da atmosfera, passa a ser representada pelo modelo de perfil temperatura-tempo do nó-chama. Este perfil segue curvas de elevação e decréscimo de temperatura ajustada ao tempo de residência e à máxima temperatura da chama [4]. A temperatura do nó-chama eleva-se gradualmente até atingir o valor máximo e depois decresce. Após a combustão do nó, a temperatura dos gases volta a ser a temperatura ambiente. Observando as curvas mostradas na Figura 3(b), percebemos a capacidade do modelo em caracterizar as distintas fases da propagação do fogo, identificadas como pré-aquecimento, ignição, combustão em chamas e extinção [15].

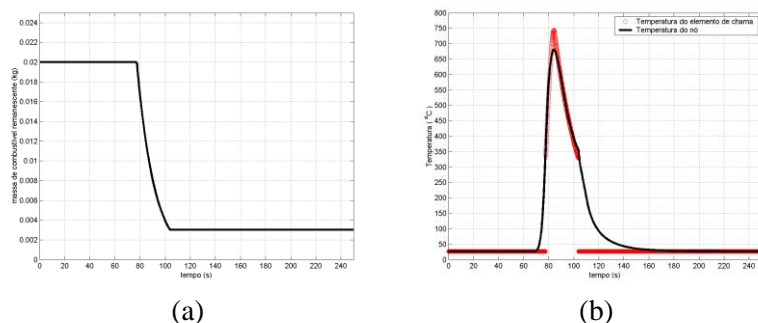


Figura 3: (a) Massa de combustível remanescente em um nó-leito durante a propagação do fogo para a simulação do cenário 1. (b) Temperatura do nó e dos gases acima de sua superfície durante a propagação do fogo para a simulação do cenário 1.

5. Conclusões

A aplicação do método nodal para simular a propagação do fogo em incêndios de superfície foi desenvolvida e avaliada neste trabalho. Os resultados das simulações para valores distintos da velocidade do vento foram discutidos e indicam a coerência na descrição qualitativa dos efeitos relacionados a mudanças no valor deste parâmetro. O modelo assume que a propagação do fogo é conduzida principalmente pela radiação térmica emitida pela frente de fogo, as

propriedades geométricas das chamas estão intimamente ligadas com a velocidade da propagação. Os resultados encorajam o uso desta abordagem na modelagem da propagação do fogo.

Referências

- [1] F. A. Albini, A model for the wind-blown flame geometry from a line fire. *Combustion and Flame*, vol. 43, n. 1, pp. 155-174, 1981.
- [2] P. L. Andrews, C. D. Bevens, and R. C. Seli, BehavePlus fire modeling system, Version 2.0 - User's Guide, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-106WWW. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, UT, 2003
- [3] W. R. Catchpole, E. A. Catchpole, B. W. Butler, R. C. Rothermel, G. A. Morris, D. J. Latham, Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel, *Combustion Science and Technology*, vol. 131, n. 1, pp. 1-37, 1998.
- [4] M. G. Cruz, Ignition of crown fuels above a spreading surface fire, PhD thesis, University of Montana, Missoula, MT, USA, 2004.
- [5] M. A. Finney, FARSITE (Fire Area Simulator) - model development and evaluation, Res. Pap. RMRS-RP-4, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Missoula, MT, 2004.
- [6] Forest Products Laboratory, Wood Handbook, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison , WI, 1999.
- [7] D. G. Gilmore, R. L. Collins, Thermal design analysis, In D. G. Gilmore, editor, *Satellite thermal control handbook*, El Segundo, CA. The Aerospace Corporation Press, 1994.
- [8] W. W. Hargrove, R. H. Gardner, M. G. Turner, W. H. Romme, Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes, *Ecological Modelling*, vol. 135, n. 2, pp. 243—263, 2000.
- [9] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, *Fundamentos de transferência de calor e de massa*, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 5ª. edição, 2003.
- [10] F. Morandini, A. Simeoni, P. A. Santoni, 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*, vol. 177, pp. 1381—1418, 2005.
- [11] D. Morvan, J. L. Dupuy, Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation, *Combustion and Flame*, vol. 127, n. 1, pp. 1981-1994, 2001.
- [12] I. Muraoka, F. L. Sousa, F. M. Ramos, Numerical and experimental investigation of thermal louvers for space applications, *J. Braz. Soc. Mech. Sci.*, vol. 23, n. 2, pp. 147—153, 2001.
- [13] R. M. Nelson Jr, Reaction times and burning rates for wind tunnel headfires, *International Journal of Wildland Fire*, vol. 12, n. 2, pp. 195-211, 2003.
- [14] E. Pastor, L. Zárate, J. Arnaldos, Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 29, n. 2, 2003.
- [15] J. S. Pyne, P. L. Andrews, R. D. Laven, *Introduction to wildland fire*, John Wiley & Sons, New York, NY, 2nd. edition, 1996.
- [16] R. C. Rothermel, A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, Gen. Tech. Rep. INT-115, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, 1972.
- [17] A. D. Sullins, K. Daryabeigi, Effective thermal conductivity of high porosity open cell nickel foam, *Proceedings of the 35th AIAA Thermophysics Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, The Combustion Institute, Pittsburg, PA, pp. 1039-1046, 2001.
- [18] D. X. Viegas, Forest fire propagation. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, vol. 356, n. 1748, pp. 2907-2928, 1998.
- [19] D. Ward, Combustion chemistry and smoke. In: E. A. Johnson, K. Miyanishi, editors, *Forest fires: Behaviour and Ecological Effects*, Academic Press: San Diego, CA, pp. 55-77, 2001.