

MODELO PARA A PROPAGAÇÃO DO FOGO EM INCÊNDIOS DE SUPERFÍCIE BASEADO NO MÉTODO NODAL

Rodolfo M. Almeida^{1*}, Elbert E. N. Macau², Fernando M. Ramos², Issamu Muraoka³

¹Curso de Pós-graduação em Computação Aplicada
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

²Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

³Divisão de Mecânica Espacial e Controle
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

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 responsável pela propagação do fogo. As trocas de calor por condução, convecção e radiação que ocorrem no interior do leito de combustível são aproximadas por um termo de condução equivalente. A abordagem matemática utilizada é o método nodal. O leito de combustível é subdividido em um número finito de regiões, denominadas nós. Cada nó possui uma temperatura e propriedades térmicas constantes. A chama sobre cada nó é aproximada por um paralelepípedo, cujas superfícies emitem radiação aos nós situados na sua vizinhança. Condutâncias térmicas caracterizam as trocas de calor. O modelo resulta em uma rede térmica formada pelos nós e condutâncias, caracterizando uma malha que é análoga a um circuito elétrico. O equacionamento térmico surge do balanço das trocas de calor em cada nó. Efetuamos simulações variando a velocidade do vento e a quantidade de combustível acumulado na superfície. Observamos que a velocidade de propagação relacionada-se diretamente com as propriedades geométricas dos elementos de chama. Quanto mais inclinados, maior será a velocidade de propagação na direção de inclinação. Verificamos que o modelo mostra-se flexível para lidar com situações envolvendo propagação em superfícies com obstáculos. 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 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 que visam prever o comportamento do fogo que se alastra sobre uma vegetação possuem certamente grande importância ecológica, econômica e humana. *Modelos de propagação do*

fogo 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 [Pastor et al. 2003]. Modelos de propagação do fogo 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 em atividades relacionadas ao manejo do fogo em muitos países [Andre and Viegas 2001].

Dependendo da abordagem considerada, [Pastor et al. 2003] classifica os modelos de propagação do fogo como: (i) *modelos teóricos* [Morvan and Dupuy 2001, Morvan and Dupuy 2004], que são aqueles originados geralmente das leis que governam a mecânica dos fluidos, combustão e transferência de calor; (ii) *modelos semi-físicos* [Rothermel 1972, Andrews et al. 2003, Finney 2004], propostos por expressões teóricas simples e gerais que são complementadas através de experimentos; e (iii) *Modelos empíricos* [Duarte et al. 1998, Hargrove et al. 2000, Nahmias et al. 2000], 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* [Pastor et al. 2003], 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, ganhando-se assim desempenho computacional na simulação. Nessa categoria de modelos podemos citar os trabalhos de [Simeoni et al. 2001] e [Morandini et al. 2005].

O modelo proposto neste trabalho baseia-se a abordagem física simplificada. O *método nodal*, também chamado de *método dos parâmetros concentrados*, 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, relativa precisão e eficiência em tempo de processamento [Gilmore and Collins 1994]. Métodos numéricos aplicados para resolver o sistemas de equações nodais têm sido convenientemente implementados em ferramentas computacionais, facilitando a obtenção de distribuições e gradientes de temperatura de complexas redes térmicas. Essas ferramentas tem sido amplamente utilizadas na elaboração de projetos térmicos em aplicações espaciais. Um exemplo é o PCTER, conjunto de subrotinas de pré-processamento e execução escritas em linguagem FORTRAN, desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e utilizado na elaboração de projetos térmicos de satélites [Muraoka et al. 2001, Sorice et al. 2006].

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 os detalhes da abordagem utilizada para modelar a propagação do fogo. Na penúltima parte apresentamos resultados de experimentos de simulações visando avaliar o modelo proposto. E finalmente, apresentamos as conclusões e direcionamentos.

2. Propagação do fogo em um incêndio florestal de superfície

A Figura 1 ilustra a propagação de um incêndio florestal de superfície. O *leito combustível* é um manto de espessura variável formado pela matéria orgânica acumulada sobre o solo da floresta que 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*. A região do leito próxima à frente de fogo sofre *pirólise*¹ ocasionada pela ação do calor emitido pela frente de fogo. A decomposição pirolítica da biomassa 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) ocorre a chamada *pirólise lenta*, onde as partículas do leito, compostas predominantemente de celulose, perdem 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 entra em ignição dando origem a chama. Na queima da mistura, uma grande quantidade de calor é liberada e parte desse calor é transferido ao combustível, induzindo-o a um processo de pirólise mais intenso. As chamas são realimentadas por este processo de sucessivas pirólises que se mantêm à medida que o combustível vai sendo consumido.

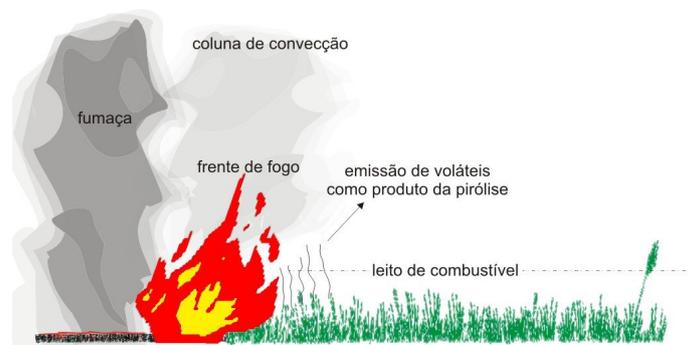


Figura 1. Diagrama esquemático da propagação de um incêndio florestal de superfície.

O calor produzido na frente de fogo é transmitido ao leito por meio de dois mecanismos principais: convecção e radiação. A transferência de calor por convecção ocorre quando os gases quentes produzidos na combustão fluem para o interior do leito de combustível e entram em contato com a superfície das partículas que ali se encontram (folhas, galhos, pequenos arbustos, gramíneas, etc). O efeito do vento é o de intensificar o fluxo de gases para a região do leito que se encontra no sentido do vento, aumentando assim a propagação do fogo nessa direção. O mesmo efeito se faz presente quando o fogo se propaga morro-acima, onde o fluxo de gases é mais intenso para a parte do leito acima. A Figura 2 ilustra esses efeitos. Nas trocas de

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

calor por convecção em incêndios florestais, as propriedades geométricas das partículas que constituem o leito combustível (tamanho e forma) são de fundamental importância [Morvan and Dupuy 2004, Morvan and Dupuy 2001].

Na frente de fogo existem duas zonas de combustão: uma na fase sólida, caracterizada pelas partículas do leito de combustível queimando em brasas e outra, na fase gasosa, onde predominam as chamas que queimam acima do leito combustível [Viegas 1998]. A radiação emitida pela fase sólida tem um alcance relativamente pequeno, enquanto que a radiação emitida pelas chamas contribui para o pré-aquecimento de combustíveis mais adiante à frente de fogo, causando uma grande contribuição na propagação. A intensidade da radiação térmica emitida pelas chamas depende da geometria das mesmas, onde se ressalta a importância da inclinação em relação ao leito combustível. Uma vez inclinadas em relação ao leito - ou sob ação do vento ou morro-acima (ver Figura 2)- o encurtamento da distância entre as chamas e o leito provocam uma intensificação no fluxo de calor por radiação [Viegas 1998].

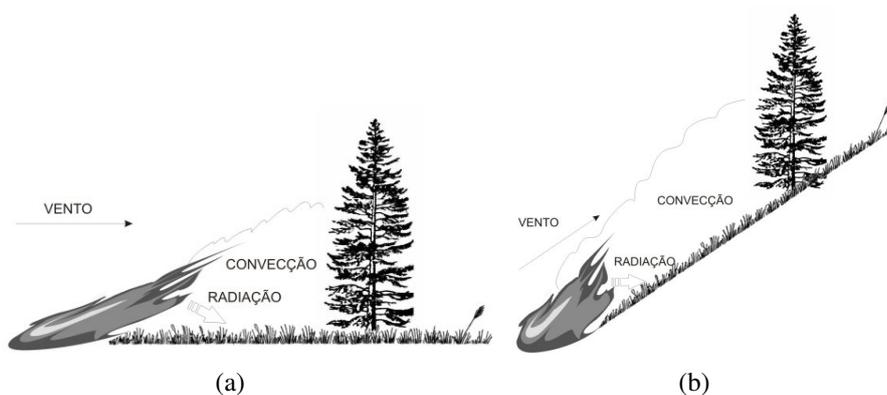


Figura 2. Diagrama esquemático da propagação da frente de fogo sob ação do (a) vento e (b) morro-acima.

3. Modelagem da propagação do fogo com o método nodal

Consideramos a propagação do fogo como uma série de sucessivas ignições do leito de combustível. 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 de combustível são aproximadas por um mecanismo de difusão.

3.1. Divisão nodal

Supõe-se que o leito de combustível seja composto por um conjunto de partículas idênticas, termicamente finas e aleatoriamente distribuídas. As partículas são caracterizadas pela sua relação superfície/volume σ , densidade ρ_p , calor específico c_p e teor de umidade M_p . O leito de combustível é caracterizado por uma espessura δ , carga combustível w_0 , densidade volumétrica $\rho_b = w_0/\delta$ e quociente de compactação $\beta = \rho_b/\rho_p$.

O domínio térmico a ser modelado é o leito combustível e este é decomposto em um conjunto de nós, chamados *nós-leito*, cuja geometria é ilustrada na Figura 3(a). Cada nó fica sujeito a (i) um fluxo de calor por radiação emitido pela frente de fogo que

incide na sua superfície superior, e (ii) fluxo de calor com os nós vizinhos equivalente às transferências de calor por radiação e convecção que ocorrem no interior do leito. A Figura 3(b) ilustra as trocas de calor para cada nó-leito.

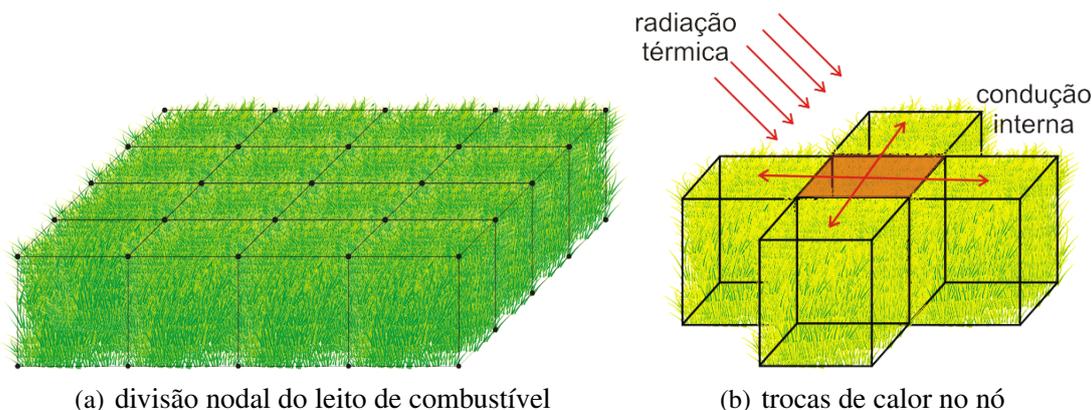


Figura 3. Ilustrações da divisão nodal do leito de combustível e das trocas de calor para cada nó.

Assume-se que a combustão em chamas inicia quando o nó atinge a temperatura de ignição. A chama sobre cada nó-leito é aproximado por um paralelepípedo cujas superfícies emitem radiação como corpos negros. Consideramos que estes sejam transparentes em relação à radiação emitida por outros e despreza-se a absorção de radiação pelo meio. Assim, a radiação emitida pela frente de fogo é aproximada por uma série de emissões individuais de pequenos paralelepípedos que aqui serão chamados de *nós-chama*. Cada nó-chama possui um comprimento L e um ângulo de inclinação θ . Tais propriedades geométricas 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 [Andrews et al. 2003]. O ângulo de inclinação θ é calculado através da relação proposta por [Albini 1981]. O tempo de permanência de um nó-chama sobre um nó-leito que está em combustão, τ_r (s), é aqui estimado pelo modelo de tempo de residência desenvolvido em [Nelson 2003].

Utilizamos o modelo proposto por [Cruz 2004] para representar o perfil temperatura-tempo dos nós-chama. A forma final do modelo de perfil temperatura-tempo é dada pela função:

$$T_F(t) = \begin{cases} T_a + (T_{Fmax} - T_a)\Delta T_F(t) \uparrow, & T \uparrow \\ T_a + (T_{Fmax} - T_a)\Delta T_F(t) \downarrow, & T \downarrow, \end{cases} \quad (1)$$

onde as variações entre a temperatura da atmosfera - T_a (K) - e a máxima temperatura alcançada no nó-chama - T_{Fmax} (K) -, no decorrer da combustão em chamas no nó são aproximadas através de curvas adimensionais de elevação - $\Delta T_F(t) \uparrow$ - e decréscimo gradual - $\Delta T_F(t) \downarrow$ - da temperatura. A equação 1 considera apenas temperaturas acima da temperatura de ignição - T_{ig} (K). Partindo desse valor, a temperatura se eleva até atingir T_{Fmax} . A forma da curva adimensional de elevação da temperatura é dada por uma função gaussiana. Após alcançar a máxima temperatura, a temperatura decresce gradualmente assumindo uma curva de decréscimo exponencial. O tempo de permanência do nó-chama é utilizado para ajuste da curva. A máxima temperatura alcançada é obtida por uma

correlação empírica depende da carga combustível (w_a), da velocidade do vento (U) e do teor de umidade do combustível M_p [Cruz 2004].

3.2. Sistema de equações nodais

O seguinte sistema de equações modela o comportamento térmico do leito de combustível no decorrer da propagação do fogo:

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

onde

i é o índice que representa o nó-leito;

j é o índice que representa o nó-leito vizinho;

m_i é a massa de combustível no nó i ;

c_p é o calor específico do combustível;

T_i é a temperatura do nó i ;

T_{j+N} é a temperatura do nó-chama posicionado sobre o nó-leito j , quando este estiver queimando;

B_{ji} é a condutância condutiva entre os nós j e i ;

$R_{j+N,i}$ é a condutância radiativa entre o nó-chama posicionado sobre o nó-leito j , quando este estiver queimando, e o nó-leito i ;

Q_i é o calor produzido internamente no nó-leito i ;

t é o tempo;

N é o número total de nós-leito.

Cada equação do sistema acima determina o balanço das trocas de calor em um dado nó. O termo antes da igualdade, representa a variação de energia interna. Depois da igualdade, a primeira parcela representa o balanço das trocas de calor por difusão com os nós vizinhos; a segunda parcela o balanço das trocas de calor por radiação com os nós-chama vizinhos $j + N$ e com o ambiente; e Q_i o calor produzido internamente.

3.3. Capacitâncias térmicas

A capacitância térmica de um nó determina a sua inércia térmica do nó e equivale ao produto da massa das partículas contidas no nó pelo calor específico, $C_i = m_i c_p$. Assim, quanto maior o valor de C_i , mais lentamente o nó será aquecido. A variação de energia armazenada em cada nó por unidade de tempo é representada pelo termo $m_i c_p dT_i/dt$ na equação 2.

3.4. Acoplamentos condutivos

As trocas de calor por convecção e radiação que ocorrem no interior do leito são aproximadas por um termo de difusão do calor. No sistema de equações 2, este termo é representado pela parcela $\sum_j B_{ji}(T_j - T_i)$, onde a condutância condutiva B_{ji} aproxima em um único termo as trocas de calor por condução, convecção e radiação entre o nó i e seu adjacente j . Pela geometria adotada na divisão nodal, conforme mostrado na Figura 3(b), cada nó troca calor com os quatro vizinhos mais próximos.

A condutância condutiva é dada pelas expressões:

$$B_{ji} = \begin{cases} 0, & \text{se } j \text{ não é adjacente a } i, \\ k_b \frac{A_{ji}}{L_{ji}}, & \text{se } j \text{ é adjacente a } i, \end{cases} \quad (3)$$

onde

k_b é a condutividade térmica efetiva do leito e representa as trocas de calor por condução, convecção e radiação no interior do leito;

A_{ji} é a área transversal ao fluxo de calor entre os nós i e j ;

L_{ji} é a distância entre os centros dos nós.

Supõe-se que o fluxo de calor no interior do leito seja determinado primariamente pelo efeito combinado da difusão do calor através partículas que constituem o leito e do ar. Ou seja, a condutividade efetiva do leito será produto de um arranjo paralelo das condutividades térmicas das partículas e do ar [Sullins and Daryabeigi 2001], dado por:

$$k_b = \epsilon k_{ar} + \beta k_p. \quad (4)$$

A equação 4 quando aplicado no termo 3 assume que o fluxo de calor na área da seção transversal, A_{ji} , se dá em duas frações: ϵ , que corresponde à fração de A_{ji} em que o calor é conduzido pelo gás, e β , que corresponde à fração em que o calor é conduzido pelas partículas.

3.5. Acoplamentos radiativos

O modelo considera que o principal mecanismo de transferência de calor é a radiação térmica. A parcela $\sum_{j=1}^N R_{j+N,i}(T_{j+N}^4 - T_i^4)$ inclui o balanço das trocas de calor por radiação entre o nó-leito i e os nós-chama mais próximos $j + N$ e entre o nó-leito i e os gases imediatamente acima.

Nas trocas de calor por radiação, supõe-se que as superfícies envolvidas sejam corpos negros. Assim, emitem radiação ao máximo poder poder emissivo e absorvem, ambos difusivamente, toda a radiação incidente [Incropera and DeWitt 2003]. A condutância radiativa entre o nó-chama $j + N$ e o nó-leito i , $R_{j+N,i}$, é calculada por:

$$R_{j+N,i} = \begin{cases} 0 & \text{se } j \text{ não está queimando,} \\ \sigma_{SB} A_i F_{i,j+N} & \text{se } j \text{ está queimando,} \end{cases} \quad (5)$$

onde $\sigma_{SB} = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann, A_i é a área da superfície superior do nó i (ver Figura 3(b)) e $F_{i,j+N}$ é o fator de forma entre a superfície A_i e a superfície do nó-chama.

O fator de forma entre duas superfícies radiantes, uma emissora e outra receptora, é um parâmetro puramente geométrico e indica a porcentagem de radiação que deixa a superfície emissora e incide sobre a superfície receptora. Matematicamente é representado por:

$$F_{ji} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi r^2} dA_j dA_i, \quad (6)$$

onde, conforme esquematizado na Figura 4, A_i e A_j são, respectivamente, as áreas das superfícies i e j ; ϕ_i é o ângulo entre o versor normal ao elemento de área dA_i e a reta

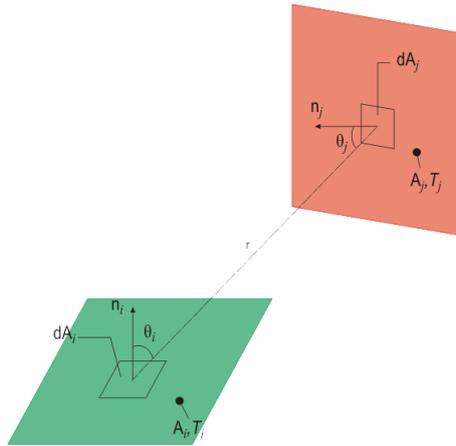


Figura 4. Troca de radiação entre duas superfícies.

que une dA_i e dA_j ; ϕ_j é o similar para o elemento área dA_j , e r é a distância entre os elementos de área dA_i e dA_j .

Além de trocar radiação com as chamas, a superfície do nó troca calor com o ambiente. A temperatura ambiente é caracterizada pela temperatura dos gases imediatamente acima do nó. Caso o nó esteja em fase de pré-aquecimento, supõe-se que sua temperatura seja a temperatura da atmosfera. Caso o nó entre em ignição, a partir daí a temperatura dos gases será determinada pelo modelo de perfil temperatura-tempo. Após a passagem da frente de fogo sobre o nó, a temperatura dos gases volta ser a temperatura da atmosfera, suposta constante.

O calor trocado por radiação entre a superfície superior do nó e o ambiente segue a lei de Stefan-Boltzmann [Incropera and DeWitt 2003]. A condutância radiativa entre o nó i e o ambiente, R_{ia} , é calculada por:

$$R_{ia} = \sigma_{SB} A_i. \quad (7)$$

Assume-se na equação 7 que somente a área superior do nó participa dessa troca e que o fator de forma entre a superfície e o ambiente é igual a unidade.

3.6. Termo-fonte de calor

Quando a temperatura do nó atinge o limiar T_{ig} , o nó entra em reação de combustão. Supõe-se que nesta temperatura o piloto de ignição ocorra e os voláteis emitidos na pirólise começam a queimar. Um dos produtos da reação de combustão é o calor. O *poder calorífico* ou *calor de combustão* das partículas é o calor de reação resultante da combustão completa dos voláteis, medido em joules por quilograma (J/kg).

A partir do momento em que o nó entra em combustão, um termo-fonte de calor se faz presente à medida em que o combustível é consumido. Assume-se que a energia produzida seja diretamente proporcional à taxa de consumo de combustível, dada por:

$$Q_i = -\mathcal{H} \frac{dm_i(t)}{dt} \quad (8)$$

Todo o processo de degradação do combustível durante a combustão é aproximado por uma simples curva, que expressa a taxa de redução de massa do combustível em

função do instante em que houve a ignição no nó. Conforme [Clark et al. 2004], a taxa de consumo é descrita usando uma função de parametrização de perda de massa. Utiliza-se uma curva que aproxima a massa de combustível remanescente no nó como uma função da massa inicial e do tempo, dada pela relação:

$$m_i(t) = m_i(0)f(t), \quad (9)$$

onde $f(t)$ é uma função assintoticamente decrescente e $m_i(0)$ é a massa inicial de combustível. Com isso, a taxa de consumo de massa é dada por:

$$\frac{dm_i}{dt} = m_i(0)g(t), \quad (10)$$

onde $g(t) = df(t)/d(t)$. Utiliza-se a função $f(t) = \exp(-(t - t_{ig})/W)$, onde W é uma constante relacionada com o tempo de combustão e t_{ig} é o instante em que houve a ignição do nó. O valor de W é calculado em função do tempo de residência, assumindo-se que após a passagem da frente de fogo, quando $t^* = t_{ig} + \tau_r$, as chamas se extinguem e o combustível remanescente seja apenas massa carbonizada, $m(t^*) = (1 - \gamma)m_i(0)$. O parâmetro γ é a fração carbonizada, do inglês *char fraction*, e é uma propriedade do combustível.

O termo-fonte Q_i é então:

$$Q_i = \begin{cases} 0, & T_i < T_{ig} \\ -\mathcal{H} \frac{dm_i}{dt}, & T_i \geq T_{ig} \end{cases} \quad (11)$$

onde $m_i(t) = m_i(0) \exp(-(t - t_{ig})/W)$.

4. Simulações e resultados

De acordo com [Gilmore and Collins 1994], a modelagem pelo método nodal consiste em realizar as seguintes tarefas : (a) definir uma divisão nodal sobre o objeto a ser analisado; (b) determinar os coeficientes do sistema de equações 2; (c) calcular as temperaturas, solucionando o sistema de equações 2. A implementação do modelo computacional foi baseada no PCTER, um pacote de programas de computador desenvolvidos no INPE para a elaboração de projetos térmicos de satélites. Consiste de um conjunto de subrotinas desenvolvidas para o cálculo das condutâncias e resolução do sistema de equações 2 escritas em linguagem FORTRAN [Bastos et al. 1990].

Como combustível utilizamos dados de experimentos executados em *aparas de madeira* (em inglês *wood excelsior*). Este combustível constitui-se por partículas cilíndricas longas e finas de madeira. As propriedades físicas e termo-químicas desse tipo de combustível encontram-se publicadas em [Catchpole et al. 1998], [Nelson 2003] e [FOREST PRODUCTS LABORATORY 1999]. Na tabela 1 encontram-se os valores das variáveis de entrada utilizadas nas simulações. Utilizamos nas simulações do modelo de propagação uma malha retangular quadrada de 101 x 101 nós regularmente espaçados a uma distância de $\Delta s = 0,20$ metros, totalizando um domínio de comprimento 20,2 metros por 20,2 metros.

Tabela 1. Variáveis de entrada do modelo.

Propriedades das partículas do leito combustível:	
Calor específico	$c_p = 1400 \text{ J/kgK}$
Densidade das partículas	$\rho_p = 398 \text{ kg/m}^3$
Relação superfície-volume	$\sigma = 3092 \text{ m}^2/\text{m}^3$
Poder calorífico	$c_p = 19600 \text{ kJ/kg}$
Teor de umidade	$M_p = 0,05$
Fração carbonizável	$\gamma_c = 0,15$
Condutividade térmica	$k_p = 0,11 \text{ W/mK}$
Temperatura de ignição	$T_{ig} = 327 \text{ }^\circ\text{C}$
Propriedades do leito combustível:	
Carga combustível	$w_0 = 0,5 \text{ e } 1,0 \text{ kg/m}^2$
Espessura	$\delta = 0,10 \text{ m}$
Malha que define a superfície	
Condições atmosféricas:	
Temperatura da atmosfera	$T_{amb} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$
Velocidade do vento	$U = 0,5; 1,0 \text{ e } 1,5 \text{ m/s}$
Direção do vento	

Os resultados utilizando os modelos empíricos para o comportamento do fogo são mostrados na Tabela 2. Analisa-se a influência de duas variáveis de entrada no comportamento da frente de fogo, sendo elas a velocidade do vento U e a carga combustível w_0 . Para a carga combustível utiliza-se os valores $w_0 = 0,5 \text{ kg/m}^2$ (carga baixa) e $w_0 = 1,0 \text{ kg/m}^2$ (carga elevada) e para as velocidades do vento, $U = 0,5 \text{ m/s}$ (vento fraco), $U = 1,0 \text{ m/s}$ (vento moderado) e $U = 1,5 \text{ m/s}$ (vento forte). A combinação entre os valores utilizados para a carga combustível e velocidade do vento definem um conjunto de cenários de propagação. As influências destas variáveis sobre o comportamento da frente de fogo são analisados a seguir.

Tabela 2. Valores calculados para as variáveis que caracterizam o comportamento dos nós-chama do modelo proposto.

Cenário	Carga Combustível w_0 (kg/m ²)	Velocidade do vento U (m/s)	Comprimento L (m)	Ângulo de inclinação θ (°)	Tempo de residência τ_r (s)	Temperatura máxima T_{Fmax} (°C)
1	0,5	0,5	0,99	11,95	26,43	743,90
2	0,5	1,0	1,27	19,40	26,12	784,36
3	0,5	1,5	1,50	25,12	25,77	815,52
4	1,0	0,5	1,20	10,40	56,72	871,69
5	1,0	1,0	1,52	17,24	56,24	912,15
6	1,0	1,5	1,77	22,58	55,67	943,31

Aumentando a carga combustível tem-se uma maior quantidade de combustível será consumido e maior será a quantidade de calor produzida, logo, maiores serão o comprimento e temperatura máxima da chama. Podemos observar este efeito comparando os valores obtidos para os cenários 1 e 4, por exemplo, na tabela 2. Observando os resultados para os cenários 1 e 4 da tabela 2, percebe-se que o ângulo de inclinação da chama diminui quando a carga combustível dobra de valor. O ângulo de inclinação resulta do

efeito combinado entre a velocidade vertical e a velocidade horizontal (assumida igual a velocidade do vento) dos gases no interior da chama. Quanto mais calor emitido pelas chamas, maior será o efeito de empuxo dos gases no interior da frente de fogo e, logo, maior será o fluxo vertical, ocasionando assim uma diminuição no ângulo de inclinação θ . No entanto, à medida que a velocidade do vento aumenta, a inclinação da chama também aumenta. Conforme observa-se nos cenários 1, 2 e 3 da tabela 2.

As figuras 5(a), 5(b) e 5(c) mostram as curvas de nível para o fator de forma entre um nó-chama e sua vizinhança para os cenários 1, 2 e 3 mostradas na tabela 2. Quanto maior a velocidade do vento, mais inclinados ficam os nós-chama. Os efeitos dessa inclinação são quantificados pelo deslocamento das curvas de nível na direção da região da superfície mais próxima a ele. Uma vez mais próximo da superfície do leito, maior será o fator de forma entre o nó-chama e os nós situados nesta região. Percebe-se nas figuras 5(a), 5(b) e 5(c) que as curvas de nível deformam-se e deslocam-se em direção a essa região à medida que a inclinação aumenta.

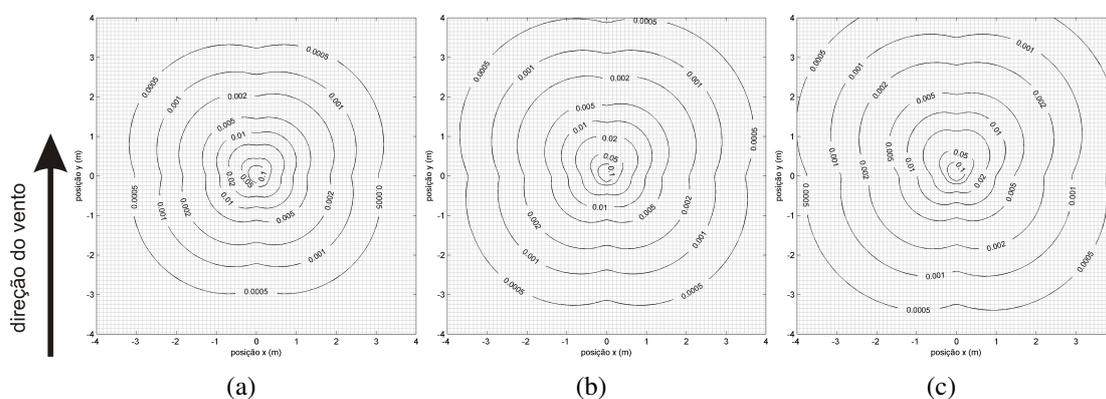


Figura 5. Curvas de níveis do fator de forma entre um nó-chama, posicionado em $x = 0$ e $y = 0$, e os nós-leito situados na sua vizinhança para o cenário 1 (a), 2 (b) e 3 (c). As linhas correspondem a um valor constante do fator de forma. Quadrados pintados de branco definem a superfície dos nós-leito. No gráfico, o vento sopra na direção de y crescente.

Na figura 6 são mostradas as distribuições de temperatura para os instantes de tempo $t = 10$ s e $t = 80$ s, contados a partir do momento em que houve a ignição ($t = 0$). As variáveis de entrada utilizadas correspondem às do cenário 2 na tabela 2. A partir do momento que o nó entre em ignição, surge um elemento de chama sobre ele e um termo-fonte de calor faz-se presente. O calor é produzido proporcionalmente ao consumo de combustível. O combustível remanescente no nó, antes, durante e após a propagação do fogo é mostrado na figura 7(a). A quantidade de combustível remanescente no nó começa a diminuir a partir do instante em que ocorre sua ignição até decorrido o tempo de permanência do nó-chama sobre ele.

A figura 7(b) mostra o perfil de temperatura de um nó e de seu elemento de chama antes, durante e após a passagem da frente de fogo. À medida que a frente de fogo se aproxima, a temperatura do nó se eleva. Na fase de pré-aquecimento, a temperatura do elemento de chama é igual à temperatura da atmosfera. Ao atingir a temperatura de ignição, utiliza-se o modelo de perfil temperatura-tempo do elemento de chama durante o tempo de permanência. A curva de temperatura do nó após a ignição acompanha a curva de elevação

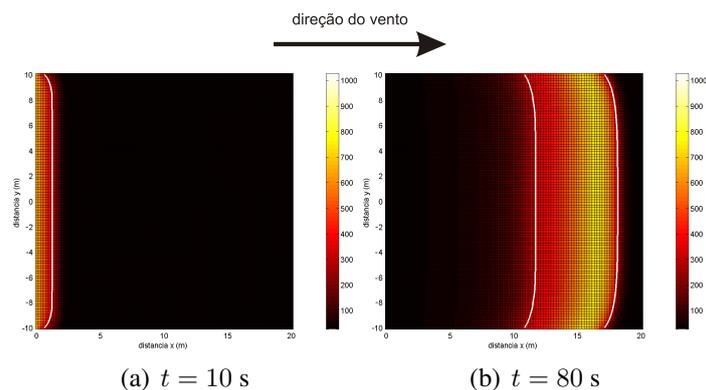


Figura 6. Distribuição de temperatura na superfície do leito de combustível para a condição inicial de fogo em linha. A temperatura é em graus Celsius e as linhas brancas caracterizam os limites da frente de fogo.

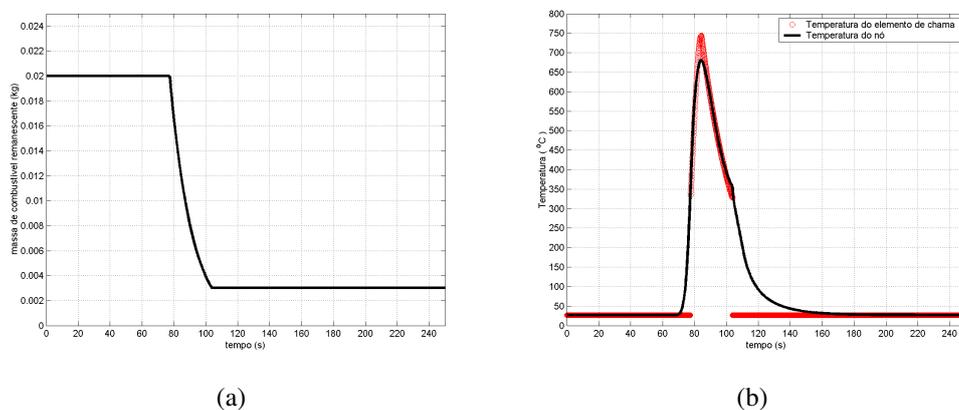


Figura 7. (a) Massa de combustível remanescente em um nó durante a propagação do fogo para a simulação do cenário 1. (b) Temperatura do nó e de seu elemento de chama durante a propagação do fogo para a simulação do cenário 1.

e decréscimo da temperatura do elemento de chama. Após o tempo de permanência, a temperatura do elemento de chama volta ao valor da temperatura atmosférica e a temperatura do nó decresce lentamente até retornar ao seu valor inicial. Percebe-se a capacidade do modelo em caracterizar as distintas fases da propagação do fogo identificadas como pré-aquecimento, ignição, combustão em chamas e extinção [Pyne et al. 1996].

A figura 8 mostra a distribuição de temperatura da superfície para os cenários de propagação 1, 2 e 3. Para um mesmo instante de tempo $t = 60$ segundos, percebe-se as diferentes posições da frente de fogo para as simulações dos cenários.

Comparando a posição da frente de fogo ao longo da direção na simulação dos três cenários mostrados na Figura 8 pode-se notar a diferença nas posições da frente de fogo. Isso se dá como consequência do fluxo de calor por radiação emitido pela frente de fogo ser intensificado pela ação do vento.

A capacitância térmica do nó depende da carga combustível do leito de combustível. Cada nó caracteriza uma área da superfície do leito e a carga combustível define

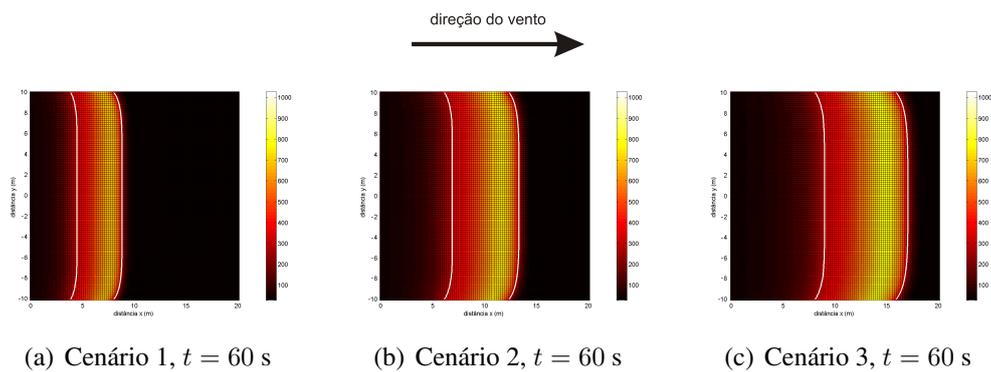


Figura 8. Distribuição de temperatura na superfície do leito de combustível para os cenários de propagação do fogo 1, 2 e 3. A temperatura está em graus Celsius e as linhas brancas caracterizam os limites da frente de fogo.

a quantidade de combustível por unidade de área da superfície. Assim, quanto maior for a carga combustível, maior será a inércia térmica do nó, logo, maior será o tempo para este alcançar a ignição. A carga combustível também influencia comprimento, ângulo de inclinação, tempo de residência e temperatura máxima das chamas.

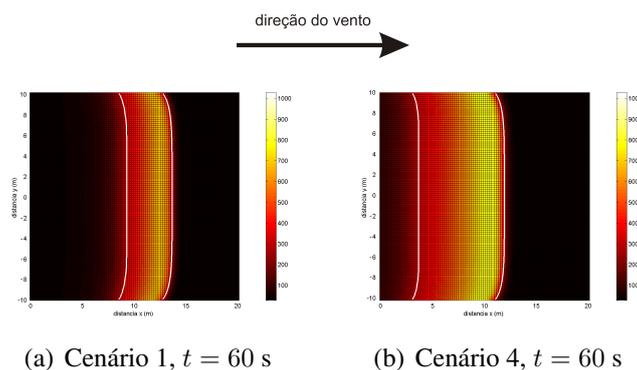


Figura 9. Distribuição de temperatura na superfície do leito de combustível para os cenários de propagação do fogo 1 e 4. A temperatura está em graus Celsius e as linhas brancas caracterizam os limites da frente de fogo.

A figura 9 compara a distribuição de temperatura na superfície do leito de combustível no instante de tempo $t = 80$ segundos para os cenários 1 e 4. Nota-se que, para o mesmo instante de tempo, a frente de fogo para o cenário 1 está mais adiante que a frente de fogo do cenário 4. A largura da frente de fogo é maior para o cenário 4 devido o tempo de permanência das chamas ser maior.

Na ocorrência de um incêndio florestal, a frente de fogo pode encontrar obstáculos naturais ou artificiais durante sua propagação. Obstáculos naturais podem ser, por exemplo, um rio, uma estrada, ou uma superfície rochosa. Obstáculos artificiais podem ser aceiros construídos por brigadas de incêndio para combater o avanço da frente de fogo. Estes obstáculos provocam uma descontinuidade na distribuição de combustível pela superfície impedindo, a propagação do fogo. Utilizou-se as condições do cenário 1 e um obstáculo de forma circular de raio 5 metros centrado na superfície. Os nós contidos no interior do círculo possuem uma capacitância térmica muito elevada e com isso não

sofrem alteração na sua temperatura. A figura 10 mostra a distribuição de temperatura da superfície para a simulação.

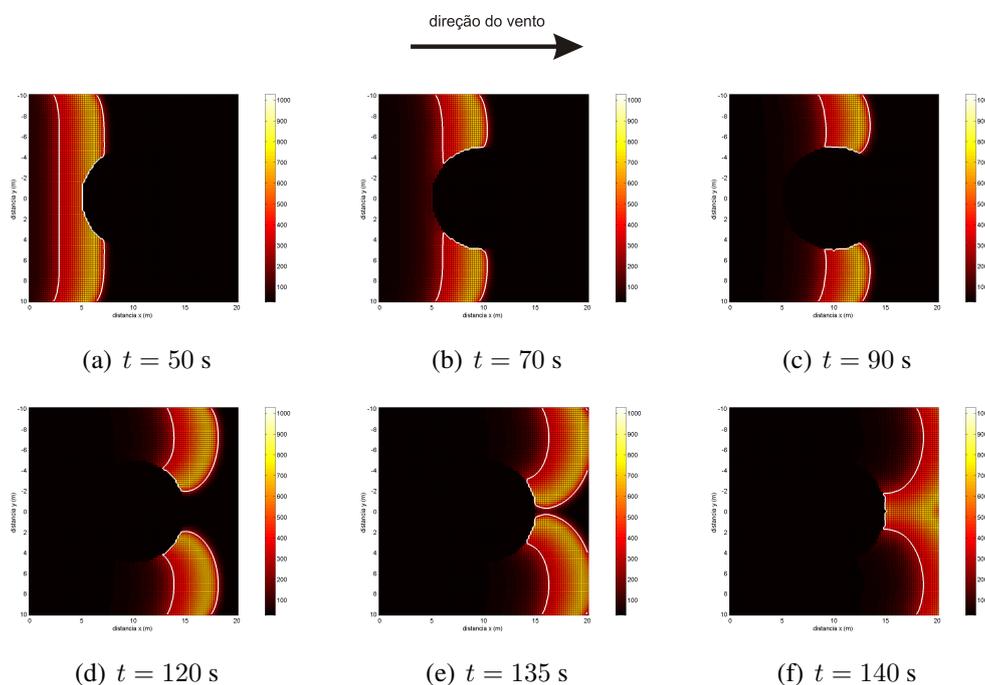


Figura 10. Distribuição de temperatura na superfície do leito de combustível para o cenário de propagação do fogo 1 com obstáculo. Um obstáculo circular de raio 5 metros é posicionado no centro da superfície. A temperatura está em graus Celsius e as linhas brancas caracterizam os limites da frente de fogo.

Os nós que constituem o obstáculo possui capacitância térmica elevada e por isso não entram em ignição. Percebe-se que a frente de fogo contorna o obstáculo dividindo-se em duas frentes de fogo que, após ultrapassá-lo, se juntam novamente. Embora a energia emitida pela frente de fogo seja mais intensa, os nós contidos no interior do obstáculos não entram em ignição. Nota-se a capacidade do modelo em lidar com casos de propagação com obstáculos naturais.

5. Considerações finais

A utilização do método nodal para simular a propagação do fogo em incêndios de superfície foi implementada e avaliada neste trabalho. As simulações realizadas mostram que o modelo consegue descrever corretamente cada fase da propagação identificadas como pré-aquecimento, ignição, combustão e extinção. Resultados de simulações para valores distintos na velocidade do vento e carga de combustível foram discutidos e indicam a consistência com os efeitos relacionados a mudança desses parâmetros. A simulação da propagação do fogo em superfície com obstáculo mostra a flexibilidade do modelo em lidar com situações mais realísticas.

O comportamento do modelo mostra que a propagação é conduzida pela energia emitida pela frente de fogo. As propriedades dos nós-chama, como comprimento, ângulo de inclinação, tempo de permanência e máxima temperatura alcançada, necessitam ser calculados por modelos empíricos. Como a propagação do fogo é conduzida primariamente pela radiação emitida pela frente de fogo, as propriedades geométricas das chamas

estão intimamente ligadas com a velocidade da propagação. A tabela 3 compara as velocidades de propagação calculadas pelo modelo proposto com as calculadas pelo modelo semi-empírico de Rothermel. Nota-se a disparidade entre as velocidades de propagação calculada pelos dois modelos. Isso confirma a necessidade de que estudos adicionais devem ser realizados para buscar a validação física dessa abordagem. A hipótese dos elementos de chama serem transparentes à radiação emitida por outros também precisa ser verificada através da simulação de nós-chama opacos.

Tabela 3. Comparação entre as velocidades de propagação calculadas pelo modelo proposto com as calculadas pelo modelo de Rothermel, para os cenários de propagação utilizados nas simulações.

Cenário	Modelo proposto	Modelo de Rothermel
1	$R = 0,16$ m/s	$R = 0,0178$ m/s
2	$R = 0,24$ m/s	$R = 0,0308$ m/s
3	$R = 0,31$ m/s	$R = 0,0441$ m/s
4	$R = 0,14$ m/s	$R = 0,0158$ m/s
5	$R = 0,20$ m/s	$R = 0,0262$ m/s
6	$R = 0,25$ m/s	$R = 0,0367$ m/s

O teor de umidade aumenta a energia requerida para elevar a temperatura do combustível, devido ao alto calor específico e ao calor latente de vaporização da água [Cruz et al. 2006]. Assim, quanto mais úmido o combustível estiver, mais lentamente ele é conduzido à ignição. Um calor específico médio que inclua os efeitos do calor latente da água presente no combustível e dos calores específicos da água e do combustível necessita ser utilizado para incorporar melhor os efeitos da umidade no calor de pré-ignição.

O termo de condutividade térmica efetiva, utilizado para representar as trocas de calor que ocorrem no interior do leito de combustível, considera que elas ocorrem apenas por um efeito combinado de condução do calor nas fases sólida e gasosa. Essa aproximação não descreve corretamente o que ocorre no interior do leito de combustível, uma vez que os fluxos de calor por radiação e convecção são os dominantes. Logo, uma fórmula para a condutividade térmica efetiva, que inclua estes mecanismos, precisa ser adotada no modelo.

A influência do vento no modelo inclui apenas o acréscimo na radiação emitida pelas chamas. Este efeito pode ser bem aplicado para modelar a propagação do fogo para ventos suficientemente fracos, onde a *advecção* pode ser desprezível. Advecção é a transmissão de calor da frente de fogo para o combustível induzida pelo movimento horizontal de gases que são impulsionados pelo vento. [Simeoni et al. 2001] afirma que para uma certa velocidade do vento, a advecção não pode ser desconsiderada em frente a transferência por radiação na propagação do fogo. Assim, torna-se necessária a adição de um termo de advecção ao modelo.

AGRADECIMENTOS

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

Referências

- Albini, F. A. (1981). A model for the wind-blown flame geometry from a line fire. *Combustion and Flame*, 43(1):155–174.
- Andre, J. C. S. and Viegas, D. X. (2001). Modelos de propagação de fogos florestais: Estado da arte para utilizadores (parte I: Introdução e modelos locais). *Silva Lusitana*, 9(2):237–264.
- Andrews, P. L., Bevins, C. D., and Seli, R. C. (2003). *BehavePlus fire modeling system, version 2.0 – User’s Guide*. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT. (Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-106WWW).
- Bastos, J. L. F., Muraoka, I., and Cardoso, H. (1990). Pacote de análise térmica PCTER. In *Proceedings...*, pages 256 – 257, São José dos Campos, SP. Simpósio Brasileiro de Tecnologia Aeroespacial, INPE.
- Catchpole, W. R., Catchpole, E. A., Butler, B. W., Rothermel, R. C., Morris, G. A., and Latham, D. J. (1998). Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel. *Combustion Science and Technology*, 131(1):1–37.
- Clark, T. L., Coen, J., and Latham, D. (2004). Description of a coupled atmosphere-fire model. *International Journal of Wildland Fire*, 13(1):49–63.
- Cruz, M. G. (2004). *Ignition of crown fuels above a spreading surface fire*. PhD thesis, University of Montana, Missoula, MT, USA.
- Cruz, M. G., Butler, B. W., Alexander, M. E., Forthofer, J. M., and Wakimoto, R. H. (2006). Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Parte I – model idealization. *International Journal of Wildland Fire*, 15(1):47–60.
- Duarte, J., Tephany, H., and Nahmias, J. (1998). Percolation and fire spread. In *Proceedings...*, pages 361 – 362, Luso, Portugal. International Conference on Forest Fire Research, Universidade de Coimbra.
- Finney, M. A. (2004). *FARSITE (Fire Area Simulator) – model development and evaluation*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Missoula, MT. (Res. Pap. RMRS-RP-4).
- FOREST PRODUCTS LABORATORY (1999). *Wood Handbook*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI. (Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113).
- Gilmore, D. G. and Collins, R. L. (1994). Thermal design analysis. In Gilmore, D. G., editor, *Satellite thermal control handbook*, El Segundo, CA. The Aerospace Corporation Press.
- Hargrove, W. W., Gardner, R. H., Turner, M. G., and Romme, W. H. (2000). Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. *Ecological Modelling*, 135(2):243–263.
- Incropera, F. P. and DeWitt, D. P. (2003). *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 5 edition.
- Morandini, F., Simeoni, A., Santoni, P. A., and Balbi, J. H. (2005). 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.

- Morvan, D. and Dupuy, J. L. (2001). Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation. *Combustion and Flame*, 127(1):1981–1994.
- Morvan, D. and Dupuy, J. L. (2004). Modeling the propagation of wild fire through a mediterranean shrub using a multiphase formulation. *Combustion and Flame*, 138(3):199–210.
- Muraoka, I., Sousa, F. L., and Ramos, F. M. (2001). Numerical and experimental investigation of thermal louvers for space applications. *J. Braz. Soc. Mech. Sci.*, 23(2):147–153.
- Nahmias, J., Téphany, H., Duarte, J., and Letaconnoux, S. (2000). Fire spreading experiments on heterogeneous fuel beds. applications of percolation theory. *Canadian Journal of Forest Research*, 30:1318–1328.
- Nelson, R. M. J. (2003). Reaction times and burning rates for wind tunnel headfires. *International Journal of Wildland Fire*, 12(2):195–211.
- Pastor, E., Zárata, L., and Arnaldos, J. (2003). Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(2).
- Pyne, J. S., Andrews, P. L., and Laven, R. D. (1996). *Introduction to wildland fire*. John Wiley & Sons, New York, NY, 2 edition.
- Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT. (Gen. Tech. Rep. INT-115).
- Simeoni, A., Santoni, P. A., Larini, M., and Balbi, J. H. (2001). On the wind advection on fire spread across a fuel bed - modelling by a semi-physical approach and testing with experiments. *Fire Safety Journal*, 36(5):491–513.
- Sorice, A. F., Muraoka, I., and Garcia, E. C. (2006). Análise de evolução de longo prazo das temperaturas do satélite SCD-1. In *Proceedings...*, Curitiba. Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. (paper CIT06-0276).
- Sullins, A. D. and Daryabeigi, K. (2001). Effective thermal conductivity of high porosity open cell nickel foam. In *Proceedings of the 35th AIAA Thermophysics Conference*, pages 1039–1046, The Combustion Institute, Pittsburg, PA, 1965. American Institute of Aeronautics and Astronautics, The Combustion Institute.
- Viegas, D. X. (1998). Forest fire propagation. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 356(1748):2907–2928.
- Ward, D. (2001). Combustion chemistry and smoke. In Johnson, E. A. and Miyanishi, K., editors, *Forest fires*, pages 55–77, San Diego, CA. Academic Press.