

MODELOS MATEMÁTICOS DE PREVISÃO DO TEOR DE UMIDADE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS FLORESTAIS FINOS E MORTOS

MATHEMATICAL MODELS FOR ESTIMATE THE FINE AND DEAD FUEL MOISTURE CONTENT

Benjamin Leonardo Alves White¹

RESUMO

O presente artigo busca descrever, por meio de uma revisão da literatura, os principais modelos matemáticos existentes para estimar o teor de umidade dos materiais combustíveis florestais finos e mortos, ou seja, os materiais da classe de 1-h de *timelag*, com base em variáveis meteorológicas. A determinação desses valores compreende uma importante informação para o delineamento de ações de prevenção e combate a incêndios florestais, e de realização de queimadas controladas, já que respondem pela probabilidade de ignição e comportamento do fogo. Com base na análise realizada, percebe-se que o *Fine Fuel Moisture Code* (FFMC), um dos componentes do *Fire Weather Index* (FWI) canadense, constitui o modelo de previsão do teor de umidade mais utilizado no mundo. Porém, considerando-se que trabalhos na literatura relatam limitações e imprecisão tanto no FFMC quanto nos demais modelos analisados nesse artigo, é essencial a validação dos mesmos antes de serem utilizados de forma operacional. Em função da pequena quantidade de estudos envolvendo essa temática no Brasil, recomenda-se a validação ou desenvolvimento de novos modelos, a fim de se aprimorar os programas de prevenção e de delineamento de risco de incêndios florestais em nível nacional.

Palavras-chave: incêndios florestais; risco de incêndio; troca de vapor.

ABSTRACT

This article aims to describe, through a literature review, the main existing mathematical models to estimate the fine dead fuel moisture content (1-hr time lag class) based on meteorological parameters. The determination of these values is extremely important for forest fire prevention and suppression efforts, and for conducting prescribed burns, since they account for the ignition probability and fire behavior. Based on the analysis, it can be concluded that the Fine Fuel Moisture Code (FFMC) of the Canadian Fire Weather Index (FWI), is the most widely used model in the world. However, since some experimental works report limitations and imprecision for FFMC and for all the others models examined in this paper, it is essential to test their precision before using them in an operational way. In Brazil, due to the lack of studies in this area, it is recommended to validate or build new models in order to improve prevention programs and assist in the development of an efficient nationwide forest fire risk model.

Keywords: forest fire; fire risk; vapor exchange.

INTRODUÇÃO

O teor de umidade do material combustível florestal compreende a quantidade de água presente, representada em percentagem com relação ao peso do material seco, na biomassa vegetal passível a entrar em processo de ignição. Quanto maior a umidade do material combustível (UMC), maior a dificuldade do material queimar e originar um incêndio, considerando que será necessário um elevado gasto de energia para, inicialmente, evaporar a água e, a partir de então, dar origem ao processo de combustão.

De acordo com a classificação padronizada por Rothermel (1972) e Brown, Oberheu e Johnston (1982), mundialmente utilizada em trabalhos que envolvem o estudo do fogo na vegetação, o material combustível presente em uma floresta ou vegetação qualquer pode ser classificado em:

1 Biólogo, Dr., Pesquisador DCR da Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe, Rua Porto da Folha, 2150, CEP 49050-610, Aracaju (SE), Brasil. benjmk@hotmail.com

A. Material combustível vivo:

- Material vivo herbáceo: Plantas que possuem a consistência e porte de erva. Ex: gramíneas e samambaias.
- Material verde lenhoso: Incluem a folhagem e os pequenos ramos dos arbustos vivos. São materiais cujo diâmetro é menor ou igual a 0,7 cm.

B. Material combustível morto (seco):

- 1-h de *timelag*: Material seco com diâmetro menor ou igual a 0,7 cm.
- 10-h de *timelag*: Material seco com diâmetro entre 0,71 e 2,5 cm.
- 100-h de *timelag*: Material seco com diâmetro entre 2,51 e 7,6 cm.
- 1000-h de *timelag*: Material seco com diâmetro superior a 7,6 cm.

O valor da umidade do material combustível morto é afetado em função do seu tamanho, das condições atmosféricas locais e da precipitação pluviométrica. Na ausência de precipitação, seu valor irá depender das transferências de umidade, através da troca de vapor, entre o material e o ambiente (adsorção ou dessorção), sendo que a UMC tende a entrar em equilíbrio com a umidade atmosférica (MATTHEWS, 2014). Materiais mortos e finos (1-h de *timelag*) entram em equilíbrio rapidamente, enquanto que materiais com maior diâmetro (10-h e 100-h de *timelag*) demoram mais tempo (SCHROEDER; BUCK, 1970; MATTHEWS, 2014).

O teor de umidade do material combustível morto e fino, ou seja, de 1-h de *timelag*, é particularmente reconhecido como um parâmetro-chave que influencia basicamente todos os processos envolvidos nos incêndios florestais: perigo, ignição e comportamento (ROTHERMEL, 1972; PYNE; ANDREWS; LAVEN, 1996; TROLLOPE; TROLLOPE; HARTNETT, 2002; SOARES; BATISTA, 2007; WHITE et al., 2014). A sua determinação é essencial para descrever como o fogo irá comportar-se: velocidade de propagação; comprimento das chamas; intensidade da linha do fogo; dentre demais características, uma vez que os incêndios florestais, normalmente, se iniciam e se propagam nos materiais mortos e finos que compõem a liteira florestal (ROTHERMEL, 1972; SCOTT, 2012).

Portanto, o conhecimento da UMC de 1-h de *timelag* é imprescindível para um eficiente planejamento das operações de combate ao fogo durante um incêndio florestal e para a realização de queimadas controladas. Além disso, como o seu valor é um dos fatores mais importantes no delineamento do risco de ocorrência de incêndios florestais (FOSBERG; LANCASTER; SCHROEDER, 1970; YEBRA; CHUVIECO; RIAÑO, 2006), o mesmo pode ser utilizado como base para a realização de atividades preventivas.

O procedimento padrão e normalmente utilizado para a determinação da UMC consiste em pesar o material combustível no próprio campo (determinando assim o peso úmido); levar para estufa e deixar secar até peso constante; e, por fim, determinar o teor de umidade através da divisão do peso original (úmido) menos o peso seco pelo peso original (Equação 1) (BEUTLING, 2005; WHITE et al., 2014). O problema da referida metodologia é a necessidade de ir a campo realizar coleta; necessidade de equipamentos como balança de precisão e estufa de secagem; além de um tempo mínimo de 24h de secagem (MATTHEWS, 2010; SCHUNK; LEUCHNER; MENZEL, 2014), o que desqualifica a mesma para trabalhos de queima controlada, de estimativa do comportamento do fogo e de previsão do risco de ocorrência de incêndios em tempo real, já que o material combustível florestal pode alterar seu teor de umidade em questão de horas ou minutos, a depender das condições meteorológicas vigentes (ROTHERMEL, 1972; SOARES; BATISTA, 2007; SCOTT, 2012). Sendo assim, nas últimas décadas, o desenvolvimento de novas metodologias para determinar a UMC tornou-se objeto de estudo de vários pesquisadores.

$$UMC = \frac{P_o - P_s}{P_o} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: UMC - Teor de umidade do material combustível (%); P_o - Peso original (úmido); P_s - Peso seco após secagem até peso constante.

Em países como Estados Unidos, Canadá, Austrália e Portugal, trabalhos laboratoriais e de campo realizados, por vezes, durante décadas, resultaram na criação de modelos matemáticos para prever a UMC

com base em dados climáticos obtidos através de satélites ou estações meteorológicas. Os respectivos modelos são particularmente úteis, principalmente, por estimarem os valores em tempo real, além de poderem ser utilizados para previsões futuras (WASTL et al., 2012). Todavia, costumam ter sua aplicação restrita, respondendo por um tipo específico de vegetação localizada dentro de um determinado padrão climático, já que, em função de suas peculiaridades, não costumam prever com eficiência em situações que o clima e as características do material combustível são distintos dos ambientes para os quais foram desenvolvidos (VIEGAS et al., 2004; WHITE; RIBEIRO; SOUZA, 2013).

O presente artigo tem por objetivo realizar uma revisão da literatura acerca dos principais modelos matemáticos existentes na literatura para previsão, em tempo real, do teor de umidade do material combustível florestal, além de descrever trabalhos que verificaram a eficiência dos mesmos e discutir suas principais vantagens e limitações.

DESENVOLVIMENTO

Fine Fuel Moisture Code (FFMC) do Fire Weather Index (FWI)

O FWI é um modelo de perigo de ocorrência de incêndios florestais que foi criado pelo Serviço Florestal Canadense com base em dezenas de trabalhos experimentais de campo realizados entre 1928 e 1970 em florestas naturais de pinheiros (VAN WAGNER, 1970). De acordo com Bianchi e Defosse (2014), é o modelo mais testado e utilizado no planeta para se determinar o perigo de ocorrência de incêndios florestais.

Este índice de perigo é formado por seis componentes: três primários, dois intermediários e um final que representa a intensidade do fogo em um determinado tipo de material combustível (VAN WAGNER, 1974). Um dos seus componentes primários é baseado no teor de umidade do material combustível morto e fino, o *fine fuel moisture code*, ou simplesmente, FFMC. O mesmo é calculado com base em dados climáticos medidos ao meio-dia da temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação pluviométrica (caso tenha chovido nas últimas 24 horas) (VAN WAGNER, 1974).

A estimativa da UMC e, conseqüentemente, do FFMC, é realizada através de 13 diferentes equações, conforme esquematizado abaixo (Equações de 2 a 14):

$$F = 101 - m \quad (\text{Equação 2})$$

$$k = 0,424 * \left[1 - \left(\frac{h}{100} \right)^{1,7} \right] + 0,088 W^{0,5} * \left[1 - \left(\frac{h}{100} \right)^8 \right] \quad (\text{Equação 3})$$

$$E_d = 0,942 * H^{0,679 + 11 * e^{(h-100)/10}} \quad (\text{Equação 4})$$

$$E_w = 0,597 * H^{0,768 + 14 * e^{(h-100)/8}} \quad (\text{Equação 5})$$

$$\ln^*(m - E_d) = \ln^*(m_0 - E_d) - 2,303 * k \quad (\text{Equação 6})$$

$$\ln^*(E_w - m) = \ln^*(E_w - m_0) - 0,69 \quad (\text{Equação 7})$$

$$\Delta F = (T - 70) * (0,63 - 0,0065 F_0) \quad (\text{Equação 8})$$

$$F = F_1 + \Delta F \quad (\text{Equação 9})$$

$$F_r = \left(\frac{F_0}{100} \right) * f(r_0) = 1 - C \quad (\text{Equação 10})$$

$$f(r_0) = -56 - 55,6 * \ln(r_0 + 0,04) \rightarrow 0,02 < r_0 < 0,055 \quad (\text{Equação 11})$$

$$f(r_0) = -1 - 18,2 * \ln(r_0 - 0,04) \rightarrow 0,055 < r_0 < 0,225 \quad (\text{Equação 12})$$

$$f(r_0) = 14 - 8,25 * \ln(r_0 - 0,075) \rightarrow r_0 > 0,225 \quad (\text{Equação 13})$$

$$C = 8,73 * e^{-0,1117 * F_0} \quad (\text{Equação 14})$$

Em que: m_0 - Teor de umidade do dia anterior (%); m - Teor de umidade do material combustível fino e morto (%); E_d - EMC para dessorção; E_w - EMC para adsorção; k - Log da velocidade de secagem; H - Umidade relativa do ar ao meio-dia (%); W - Velocidade do vento ao meio-dia (mph); T - Temperatura ao meio-dia (°F); r_0 - Total de chuva medida ao meio-dia (polegadas); $f(r_0)$ - Fator da chuva; C - Temo de correção no efeito da chuva; F_0 - FFMC do dia anterior; F_1 - FFMC pós-chova; F_1 - FFMC antes do ajuste da temperatura; F - Fator de ajuste da temperatura; F - Valor final do FFMC (do dia atual).

O uso das equações listadas acima irá depender das condições meteorológicas no momento da estimativa. Por exemplo, caso o material esteja secando deverá utilizar-se a equação 4, já se estiver ganhando umidade, a equação 5 é a adequada. No caso da ocorrência de precipitação nas últimas 24h, deverá ser utilizada uma das equações 11, 12 ou 13, dependendo da quantidade total de água precipitada. Mais informações sobre como calcular o FPMC, ou o FWI como um todo, podem ser consultadas em Van Wagner (1974).

Dentre os estudos encontrados na literatura que avaliaram a eficiência do FPMC, Snyder et al. (2006) chegaram à conclusão de que os valores estimados pelo modelo foram distantes dos valores observados experimentalmente para vegetações de gramíneas no estado da Califórnia (E.U.A.). Em estudo semelhante, Slijepcevic e Anderson (2006), ao avaliarem a UMC em folhada de *Eucalyptus* sp., observaram que o FPMC não foi eficiente, já que superestimou continuamente os valores de umidade. O mesmo resultado foi descrito por Ruiz, Vega e Álvarez (2009) para folhada de *Eucalyptus globulus* na Espanha. Em estudo realizado na região dos Grandes Lagos (E.U.A.), Horel et al. (2014) não obtiveram bons resultados ao avaliarem a eficiência do FPMC para a área de estudo.

Resultados positivos são descritos por Page, Jenkins e Alexander (2015) ao avaliarem a eficiência de diferentes modelos de previsão da UMC em acículas de pinus em Wyoming (E.U.A.). De acordo com os autores, o FPMC apresentou uma razoável eficiência, podendo ser utilizado para auxiliar atividades de prevenção e combate aos incêndios florestais e a realização de queimas controladas. Em estudo semelhante, porém, em folhada de eucalipto na Tasmânia, Slijepcevic et al. (2015) também afirmaram que o modelo canadense apresentou resultados satisfatórios, contudo, apenas em áreas secas, não sendo tão eficiente em áreas úmidas.

Levando-se em consideração que o FPMC é um dos principais componentes do FWI, há de se esperar que imprecisões em sua estimativa acabem refletindo diretamente na eficiência do FWI. Em função disso, abaixo são citados trabalhos que verificaram a precisão do índice de perigo canadense como um todo.

O FWI já foi testado e apresentou bons resultados na Argentina (BIANCHI; DEFOSSE, 2014), China (LI et al., 2014; ZHANG; JIN; DI, 2014), Portugal (RAINHA; FERNANDES; VIEGAS, 2002), Rússia (MCRAE et al., 2009), Espanha (GABBAN; AYANZ; VIEGAS, 2008), região norte da Europa (TANSKANEN et al., 2005), Europa Mediterrânea (VIEGAS et al., 1999), Alemanha (HOLSTEN et al., 2013), México (GOLDAMMER et al., 2003), Estados Unidos (ROADS; CHEN; FUJIOKA, 2001), Indonésia e Malásia (DE GROOT et al., 2007). No entanto, também são comuns publicações que relatam a imprecisão do respectivo índice. Em um estudo realizado na Eslovênia, por exemplo, Sturm, Fernandes e Sumrada (2012) concluíram que os resultados obtidos com o uso do FWI original não foram satisfatórios; Viegas et al. (2004) e Alexander (2008) julgaram ser necessária uma calibração das classes de perigo do FWI para todos os 18 distritos de Portugal e para a Nova Zelândia, respectivamente, para o efetivo uso do modelo; Camia e Amatulli (2010) sugeriram a implementação de dados dos incêndios locais no FWI para uma melhor funcionalidade do sistema em nível Europeu. Em um único trabalho realizado no Brasil, Cerapiá (2006), ao analisar a eficiência de índices de perigo no Parque Nacional da Floresta da Tijuca - RJ, afirmou que o FWI apresentou baixa correlação com os eventos de focos de fogo registrados.

1-h Dead Fuel Moisture Content (1-h DFMC) do National Fire Danger Rating System (NFDRS)

O NFDRS começou a ser desenvolvido em 1968 nos Estados Unidos com o estabelecimento de uma equipe de pesquisadores, que, após 4 anos de pesquisas e testes, lançaram o modelo operacionalmente (DEEMING et al., 1972). O modelo original passou por diversos ajustes (DEEMING; BURGAN; COHEN, 1977; COHEN; DEEMING, 1985; BURGAN, 1988) e hoje é um dos principais e mais citados na literatura, sendo utilizado na maior parte dos Estados Unidos (MOLDERS, 2010).

Assim como o FWI, o NFDRS consiste em um avançado sistema de determinação do perigo de incêndios florestais baseado em dados meteorológicos e dados da vegetação. Diversos componentes (subíndices) compõem este sistema, incluindo o teor de umidade do material combustível morto de acordo com as classes de *timelag* (1-h, 10-h, 100-h e 1000-h *Dead Fuel Moisture Content*, ou DFMC); o teor de umidade do material combustível vivo (*Herbaceous Fuel Moisture*, ou HFM; e *Woody Fuel Moisture*, ou WFM); o fator ignição (*Ignition Component*, ou IC); o fator propagação (*Spread Component*, ou SC); o

índice de queima (*Burning index*, ou BI); e, o componente energia liberada (*Energy Release Component*, ou ERC) (DEEMING; BURGAN; COHEN, 1977).

Para se determinar o teor de umidade do material combustível morto e fino (1-h DFMC) com base no NFDRS, é necessário informar a temperatura e a umidade relativa do ar em contato direto com o material combustível. Os valores desses dois últimos parâmetros podem ser estimados com base na temperatura e na umidade relativa do ar obtidas através de uma estação meteorológica a 1,5 metros de altura, corrigidas com base na presença ou ausência de nuvens recobrando o céu (Tabela 1).

TABELA 1: Correções para a temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar com base nas condições de nebulosidade do ambiente, de acordo com Cohem e Deeming (1985).

TABLE 1: Cohem and Deeming (1985) correction factors for the dry bulb temperature and relative humidity according to the intensity of the insolation (amount of sunshine).

Código do aspecto meteorológico	Correções	
	Temperatura do ar ao nível do solo (°C)	Umidade relativa do ar ao nível do solo (%)
0 - Céu limpo	+14	*0,75
1 - Nuvens dispersas	+11	*0,83
2 - Muitas nuvens	+7	*0,92
3 - Escuro	+3	*1,00

Após a determinação da temperatura e umidade relativa do ar em contato direto com o material combustível, deve-se utilizar uma das três equações descritas por Simard (1968), dependendo do valor da umidade relativa do ar ajustada (Equações 15 a 17):

$$M_{1h}=0,003+0,2626 \cdot RH_{<10}-0,001040 \cdot Temp$$

(Equação 15)

$$M_{1h}=1,76+0,1601 \cdot RH_{\leq 10 < 50}-0,02660 \cdot Temp$$

(Equação 16)

$$M_{1h}=21,06-0,4944 \cdot RH_{\geq 50}+0,005565 \cdot RH_{\geq 50}^2-0,00063 \cdot HR_{\geq 50} \cdot T$$

(Equação 17)

Em que: M_{1h} - Umidade do material combustível fino de 1-h de *timelag* (%); RH - Umidade Relativa do Ar em contato com o material combustível (%); Temp - Temperatura do ar em contato com o material combustível (°C).

Considerando que pessoas responsáveis pelo manejo do fogo possam, eventualmente, ter dificuldades em estimar o teor de umidade do material combustível morto e fino com base nas equações acima descritas, ou em calcular os demais componentes do NFDRS, Bradshaw e Brittain (1999) desenvolveram um programa computacional chamado de *Fire Family Plus*, no qual os subíndices do NFDRS podem ser calculados de forma automatizada e simplificada, auxiliando assim a aplicação do respectivo índice de perigo em operações de prevenção e combate a incêndios florestais.

Apenas três trabalhos foram encontrados na literatura que avaliaram, exclusivamente, a eficiência do modelo de previsão do teor de umidade do material combustível morto e fino do NFDRS. Loomis e Willian (1980), em povoamentos de *Pinus banksiana* no estado de Minnesota (E.U.A.), encontraram resultados significativos, porém, com baixa correlação, entre a UMC experimental e prevista com o modelo NFDRS. De acordo com os autores, os valores experimentais, em sua maioria, foram maiores do que os simulados pelo modelo. Para folhada de *Eucalyptus globulus* na Espanha, Ruiz, Vega e Álvarez (2009) reconheceram que o modelo norte-americano apresentou baixa eficiência, principalmente para combustíveis sombreados. Em um trabalho mais recente realizado no estado da Carolina do Norte (E.U.A.), Nelson (2014) destaca que a 1-h DFMC estimada não apresentou uma alta eficiência na detecção de incêndios na respectiva área de estudo.

Levando-se em consideração que, assim como no FWI, a predição da UMC consiste em um dos principais componentes do NFDRS, há de se esperar que imprecisões na estimativa da UMC acabem refletindo diretamente na eficiência do modelo. Sendo assim, abaixo são descritos os trabalhos encontrados na literatura que verificaram a precisão do índice de perigo norte-americano como um todo.

De acordo com Chen et al. (2008), o NFDRS foi preciso ao indicar incêndios de grande porte no leste dos Estados Unidos entre 1998 e 2003. Em um estudo de caso no Alaska, Molders (2010) afirmou que o NFDRS foi eficiente em prever a ocorrência de incêndios florestais na região, no entanto, sua precisão foi inferior ao FWI canadense. Já Schwarz (2014), ao comparar a estrutura matemática dos modelos canadense e norte-americano, reconheceu que o NFDRS é superior ao FWI em função do mesmo poder ser utilizado em distintas áreas e por levar em consideração o teor de umidade do material combustível vivo. No Brasil, mais especificamente no Parque Nacional da Floresta da Tijuca - RJ, Cerapiá (2006) concluiu que o NFDRS apresentou uma boa correlação, melhor que o FWI, com a ocorrência de eventos de fogo na região.

Tabelas de McArthur (1962) do *Control Burn in Eucalyptus Forests* (CBEF)

O modelo CBEF de McArthur (1962) foi desenvolvido com a finalidade de descrever as condições ideais para a realização de queimas controladas em florestas naturais de eucalipto na Austrália. Assim como no FWI e NFDRS, a estimativa do teor de umidade do material combustível morto e fino constitui apenas um subíndice do modelo como um todo.

A relação entre o teor de umidade do material combustível morto e fino foi originalmente apresentado na forma de duas tabelas, uma para condições de adsorção, ou seja, ganhando água do ambiente, e outra para dessorção, perdendo água para o meio (MCARTHUR, 1962), que, posteriormente, foram convertidas em equações matemáticas por Viney e Hatton (1989) (Equações 18 e 19).

$$\text{FFMd} = 0,113 * H - 0,281 * T + 12,5 \quad (\text{Equação 18})$$

$$\text{FFMa} = 0,132 * H - 0,168 * T + 6,8 \quad (\text{Equação 19})$$

Em que: FFMd - Umidade do material combustível em dessorção (entre 6 e 12h) (%); FFMa - Umidade do material combustível em adsorção (das 12h em diante) (%); H - Umidade relativa do ar (%); T - Temperatura do ar (°C).

As equações foram definidas com base em dados experimentais e têm como principal vantagem a simplicidade, necessitando apenas de dados de duas variáveis meteorológicas facilmente obtidas: temperatura e umidade relativa do ar, ambas medidas a 1,5 m de altura. Entretanto, algumas limitações como o fato de poder ser utilizado apenas para material combustível morto e fino de liteira de eucalipto recebendo apenas 25% da luminosidade total (MCARTHUR, 1962), reduzem a aplicabilidade do modelo.

De acordo com Vega e Casal (1986) e Ruiz, Vega e Álvarez (2009), os valores de umidade estimados pelo CBEF em folhada de *Eucalyptus globulus* não apresentaram diferença dos valores observados experimentalmente. Ambos os estudos foram realizados na região de Galícia, Espanha. Para as florestas naturais de eucalipto, na Austrália, Viney e Hatton (1989) observaram que o modelo previu corretamente a UMC. Em um trabalho mais recente, Slijepcevic, Anderson e Matthews (2013) concluíram que o mesmo foi eficiente ao determinar a UMC em áreas secas de eucalipto na Tasmânia, porém, de acordo com os mesmos autores, resultados ruins foram obtidos ao utilizar o modelo em áreas úmidas.

Tabelas de McArthur (1967) do *Forest Fire Danger Meter* (FFDM)

O FFDM, assim como o FWI, NFDRS e CBEF, constitui um índice de perigo de ocorrência de incêndios florestais no qual, um de seus principais componentes, é a estimativa do teor de umidade do material combustível morto e fino. O FFDM foi desenvolvido por McArthur (1967) com base em observações e registros de dados em mais de 800 queimas experimentais e incêndios naturais em florestas de eucalipto na Austrália.

O respectivo índice foi, durante décadas, amplamente utilizado em programas de prevenção e combate a incêndios florestais e programas de queima controlada em todo o continente australiano (NOBLE; GILL; BARY, 1980; VINEY, 1991; WHITE et al., 2016). Suas equações foram, inclusive, inseridas em um *software*, o *CSIRO Fire Danger and Fire Spread Calculator* (CSIRO, 1999), a fim de se facilitar a aplicação do FFDM para simulações acerca do comportamento do fogo e na definição de áreas de maior risco e perigo para ocorrência de incêndios florestais. Apenas atualmente, alguns novos índices mais complexos, como o de Gould et al. (2007) e Cheney et al. (2012) passaram a ser utilizados por profissionais responsáveis pelo manejo e controle do fogo na Austrália, substituindo assim o FFDM.

O componente teor de umidade do combustível morto e fino do FFDM é obtido com base na temperatura e umidade relativa do ar a 1,5 metros de altura e descreve uma típica liteira de eucalipto durante o período seco. A equação derivada a partir das tabelas de McArthur (1967) é descrita em Viney (1991) na respectiva forma (Equação 20):

$$m = \frac{5,658 + 0,0465 * H_a + 3,151 * 10^{-4} * H_a^3}{T_a - 0,1854 * T_a^{0,77}} \quad (\text{Equação 20})$$

Em que: m - Teor de umidade do material combustível morto e fino (%); H_a - Umidade relativa do ar (Entre 5 e 70%); T_a - Temperatura do ar (Entre 10 e 41°C).

De acordo com Marsden-Smedley e Catchpole (2001), estimativas da UMC com base no modelo FFDM foram eficientes para vegetações de gramíneas na Tasmânia. Bons resultados também foram descritos por Ruiz, Vega e Álvarez (2009) em vegetação de *Eucalyptus globulus* em condições ensolaradas na cidade de Santiago de Compostela, Espanha. De acordo com os mesmos autores, todavia, o valor da UMC foi superestimado para materiais combustíveis sombreados. Resultados similares são descritos por Hatton et al. (1988), que afirmaram que o FFDM foi superior ao FFMC e ao modelo de Rothermel (1986) em diversas espécies de eucalipto na Austrália em condições secas, no entanto, não foram obtidos bons resultados para solos úmidos após precipitação pluviométrica. Na Tasmânia, também em florestas naturais de eucalipto, Slijepcevic, Anderson e Matthews (2013) relataram que FFDM subavaliou o conteúdo do teor de umidade em aproximadamente 4,5% em áreas úmidas e 3,5% em ambientes secos.

Embora o FFDM tenha sido utilizado com eficiência, durante décadas em florestas naturais de eucalipto na Austrália (TIAN et al., 2005; SLIJEPCEVIC; ANDERSON; MATTHEWS, 2013), alguns estudos recentes expõem imprecisões relativas a este índice, principalmente, para a modelagem do comportamento do fogo em incêndios de grande porte. Gould et al. (2007) e McCaw, Gould e Cheney (2008), por exemplo, concluíram que o FFDM subestima em ordem de 2 ou 3 vezes a velocidade de propagação do fogo em florestas naturais de eucalipto na Austrália durante o verão seco. Em estudo realizado no Brasil, White et al. (2016) descreveram que o FFDM foi incapaz de prever o comportamento do fogo em queimas laboratoriais de folhada de eucalipto, apresentando uma baixa correlação com os valores experimentais.

O modelo de Rothermel et al. (1986) do BEHAVE

O modelo de estimativa do teor de umidade do material fino e morto de Rothermel et al. (1986) se tornou mundialmente conhecido em função de ser utilizado pelo “*BEHAVE: fire behavior prediction system*” (ANDREWS, 1986), posteriormente substituído pelo “*BehavePlus fire modeling system*” (ANDREWS; BEVINS; SELI, 2003), o *software* de avaliação do comportamento do fogo mais utilizado em todo o mundo (ANDREWS, 2010).

As equações para o cálculo da UMC de acordo com o modelo de Rothermel et al. (1986) são as mesmas das utilizadas pelo FFMC canadense (Equações de 2 a 14), no entanto, as variáveis ambientais de entrada do modelo (*inputs*) são ajustadas para as menores latitudes dos Estados Unidos, onde os materiais combustíveis estão sujeitos a um maior aquecimento solar. Os ajustes são baseados na estação, hora do dia, aspecto, declividade, elevação, condições atmosféricas e sombreamento. Ao todo, 54 equações matemáticas são descritas por Rothermel et al. (1986) que, eventualmente, podem ser utilizadas para ajustar as variáveis

ambientais. De acordo com Rothermel et al. (1986), o modelo foi testado através de medições de campo em materiais combustíveis do Texas, Arizona, Idaho e Alasca e apresentou uma boa eficiência, superior ao *Fire Behavior Officer's model* (FBO), desenvolvido anteriormente por Rothermel (1983).

Assim como nos modelos discutidos anteriormente, os resultados encontrados na literatura acerca da eficiência das equações de Rothermel et al. (1986) para estimar a umidade do material combustível morto e fino são bastante diversos. De acordo com Easterling (1986), por exemplo, o respectivo modelo foi mais eficiente que o FFM do FWI em gramíneas e agulhas de pinus em Missula, Montana (E.U.A.). Entretanto, a autora alega que o mesmo apresenta restrições, principalmente, para condições de alta umidade. Já o estudo publicado por Hatton et al. (1988) concluiu que, ao avaliar a umidade da folhada de eucalipto em Camberra, Austrália, o modelo de Rothermel et al. (1986) foi o mais preciso em situações de alta umidade, quando os solos estavam molhados após uma chuva, contudo, resultados ruins foram obtidos para solos secos.

Resultados satisfatórios são descritos por Page, Jenkins e Alexander (2015) ao avaliarem a eficiência do modelo de Rothermel et al. (1986) em acículas de pinus em Wyoming (E.U.A.). Já Viegas, Viegas e Ferreira (1992) verificaram que os valores obtidos pelo respectivo modelo foram sempre inferiores aos valores obtidos experimentalmente em materiais combustíveis na região central de Portugal.

Embora existam diversos trabalhos publicados que validam o *BEHAVE* e *BehavePlus* em várias regiões do planeta (WHITE; RIBEIRO; SOUZA, 2013), a eficiência dos mesmos não pode ser associada à eficiência do modelo de Rothermel et al. (1986), já que, a depender do critério do utilizador, os valores do teor de umidade do material morto e fino a serem utilizados pelos *softwares* podem ser medidos diretamente em campo (WHITE et al., 2014) ou estimados por diferentes modelos, não necessariamente utilizando-se o modelo de Rothermel et al. (1986).

Estudos desenvolvidos no Brasil

Foram encontrados na literatura dois modelos de estimativa do teor de umidade do material combustível morto e fino desenvolvidos no Brasil. Um deles para a liteira na Floresta Tropical Amazônica (RAY; NEPSTAD; BRANDO, 2010) e outro para acículas de *Pinus elliotti* na Estação Experimental de Rio Negro, localizada na Universidade Federal do Paraná (UFPR) (ALVES et al., 2009).

O modelo de Ray, Nepstad e Brando (2010) utilizou a serrapilheira de quatro distintos pontos da Floresta Amazônica, que foram cobertos com plástico e expostos a eventos de chuva artificial. O material combustível foi, então, pesado repetitivamente por 9 dias. A equação mais eficiente para se estimar a umidade do material combustível morto e fino foi construída utilizando-se regressão linear multivariada (Equação 21).

$$\text{Log}_e(\text{LMC}) = 977 + 0.371 * \text{LAI} + (-0.682) * \text{VPD}_M + 1.359 * d^{-1} \quad (\text{Equação 21})$$

Em que: Log_e - Logaritmo na base e; LMC - Umidade do material combustível morto e fino (%); LAI - Índice de área foliar da floresta; VPD_M - *deficit* de pressão de vapor ambiente (kPa); d^{-1} - O inverso do tempo decorrido desde a última precipitação (dias).

O respectivo modelo foi testado apenas na publicação em que o mesmo é descrito (RAY; NEPSTAD; BRANDO, 2010), utilizando-se de amostras destrutivas coletadas em campo entre agosto a dezembro de 2003. De acordo com os autores, as predições do modelo foram imparciais e dispersas quando a UMC foi inferior a 50% e subestimadas quando a UMC foi superior a 50%, sendo que o erro médio foi de -5% quando a UMC foi inferior a 50% e de +61% quando maior.

O modelo desenvolvido por Alves et al. (2009) foi construído com base em apenas 2 dias de coleta de dados. A equação que apresentou melhor coeficiente de determinação teve a temperatura do ar e velocidade do vento como variáveis independentes (Equação 22).

$$UMC=1,5883+0,0902*T+(-20,046*V)$$

(Equação 22)

Em que: UMC = Umidade do material combustível (%); T = Temperatura do ar (°C); V = Velocidade do vento (m.s⁻¹).

Não existe na literatura nenhum estudo publicado que avalie a eficiência do modelo de Alves et al. (2009). Entretanto, há de se esperar que o mesmo apresente amplas limitações em função, principalmente, da não utilização da variável umidade relativa do ar, considerada pela comunidade científica em geral, como o principal fator de influência no teor de umidade dos materiais combustíveis mortos. Além disso, o modelo foge dos princípios gerais e físicos sobre a influência da temperatura no UMC, já que, em sua formulação, a UMC aumenta com o aumento da temperatura do ar.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os principais aspectos dos modelos descritos neste trabalho, o FFMC do FWI leva vantagem em função de ter sido construído com base em valores experimentais mensurados ao longo de aproximadamente 50 anos (VINEY, 1991). Por isso, sistemas de prevenção e combate a incêndios florestais de diversos países vêm passando a utilizar o FWI para prever as ocorrências de incêndios florestais em seus territórios e, em diversas ocasiões, obtendo resultados satisfatórios.

Todavia, há de se considerar que o FFMC foi desenvolvido para florestas naturais de pinheiros-canadenses, mais especificamente para as espécies *Pinus banksiana* e *Pinus ponderosa*. Em virtude da constituição química e física da vegetação afetar a forma com a qual o material combustível morto ganha ou perde água do ambiente (SOARES; BATISTA, 2007), há de se esperar que o modelo canadense responda com mais eficiência em regiões com predomínio das respectivas espécies.

O teor de umidade do material combustível morto e fino medido pelo modelo do NFDRS foi desenvolvido através de dados registrados na região central dos Estados Unidos e, em função disso, Fosberg e Deeming (1971) sugerem que os mesmos sejam representativos apenas para condições típicas continentais, não sendo recomendado para aplicação em locais com climas de influência marinha. Além disso, Viney (1991) e Viney e Catchpole (1991), demonstraram que o modelo tende a subestimar o teor de umidade em função de sua formulação matemática. Apesar destas restrições, o modelo continua a ser utilizado como um dos parâmetros-chave que delineiam as atividades de prevenção e combate a incêndios florestas nos Estados Unidos. A sua aplicação em outros países do mundo se restringe a alguns raros estudos experimentais.

As tabelas de McArthur (1962) e McArthur (1967) foram desenvolvidas para florestas naturais de eucalipto que são endêmicas do continente australiano. Embora seus modelos tenham gerado resultados positivos por décadas na Austrália, os mesmos foram pouco utilizados e testados em outras regiões do mundo. Os demais modelos discutidos neste trabalho, quando aplicados para se determinar a UMC em eucaliptais, na maioria dos estudos já publicados, não apresentaram resultados satisfatórios (HATTON et al., 1988; SLIJEPCEVIC; ANDERSON, 2006; RUIZ; VEGA; ÁLVAREZ, 2009).

No Brasil, apenas dois artigos, em que foram desenvolvidos modelos para estimativa do teor de umidade do material combustível morto e fino, foram publicados. O modelo de Alves et al. (2009) para acículas de pinus não foi validado experimentalmente e sua formulação é dúbia, já que não inclui a umidade relativa do ar e a UMC aumenta com o aumento da temperatura. O modelo de Ray, Nepstad e Brando (2010) é exclusivo para Florestas Tropicais e é também deficiente em validação experimental, sendo que, na única vez em que o mesmo foi testado, não apresentou resultados satisfatórios (RAY; NEPSTAD; BRANDO, 2010). Apesar de os respectivos modelos não fazerem parte de nenhum índice de perigo de incêndio florestal, diferentemente dos modelos internacionais discutidos no artigo, Setzer e Sismanoglu (2007) desenvolveram um índice que é utilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) no delineamento de áreas com maior perigo de ocorrência de incêndios florestais em todo o Brasil. Embora não utilize diretamente o teor de umidade do material combustível fino e morto para avaliar o perigo, esse índice procura estimar a “secura” da vegetação, como um todo, com base em parâmetros meteorológicos (temperatura, umidade e precipitação) para, consequentemente, determinar o quão propícia a vegetação se

encontra para entrar em processo de ignição.

Comparando-se os modelos brasileiros de estimativa da umidade do material combustível morto e fino com os modelos internacionais descritos neste trabalho, percebe-se que esta é uma área de estudo nova e que em muito ainda necessita avançar para que um dia seja possível desenvolver ou adaptar algum modelo que estime com eficiência a UMC nas principais fitofisionomias presentes no Brasil.

A precisa estimativa da UMC é um passo essencial para o delineamento espaço/temporal de perigo de ocorrência de incêndios florestais. O índice de perigo desenvolvido por Setzer e Sismanoglu (2007) utilizado pelo INPE para todo o território brasileiro possui carência de validação experimental, limitações e baixa resolução espacial o que dificulta a sua aplicação prática. O NFDRS, FFDM e principalmente o FWI, são exemplos de índices que, durante décadas, apresentaram bons resultados práticos na previsão do risco de fogo e, consequentemente, no delineamento de atividades preventivas que reduziram e continuam a reduzir a ocorrência de incêndios florestais de grande porte nos países que os utilizam. Além de estimarem a UMC, os respectivos índices são dotados de equações matemáticas que descrevem como o fogo irá se comportar, facilitando assim, definir quais os métodos de combate mais eficientes, capacidade esta não presente no índice de Setzer e Sismanoglu (2007).

O desenvolvimento de estudos que avaliem o teor de umidade do material combustível para as principais fitofisionomias encontradas no Brasil, torna-se, então, um procedimento essencial para que, posteriormente, seja possível adaptar ou construir um novo e eficiente sistema nacional de delineamento espaço/temporal de risco de ocorrência de incêndios florestais, facilitando assim, os trabalhos de prevenção e combate ao fogo em todo o país.

AGRADECIMENTOS

À FAPITEC e ao CNPq pela bolsa DCR concedida ao autor.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, M. E. **Proposed revision of fire danger class criteria for forest and rural areas in New Zealand**. 2. ed. Wellington: National Rural Fire Authority in association with the Scion Rural Fire Research Group, 2008. 62 p.
- ALVES, M. G. V. et al. Modelagem de umidade do material combustível, baseada em variáveis meteorológicas. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 1, p. 167-174, 2009.
- ANDREWS, P. L. **BEHAVE**: fire behavior prediction and fuel modeling system. Ogden: USDA Forest Service, 1986. 110 p. (General Technical Report, INT-194).
- ANDREWS, P. L. Do you Behave? - Application of the BehavePlus Fire Modeling System. In: FIRE BEHAVIOR AND FUELS CONFERENCE, 3., 2010, Spokane. **Proceedings...** Birmingham: International Association of Wildland Fire, 2010.
- ANDREWS, P. L.; BEVINS, C. D.; SELI, R. C. **BehavePlus Fire Modeling System Version 2.0 User's Guide**. Ogden: USDA Forest Service, 2003. 133 p. (General Technical Report, RMRS-GTR-106WWW).
- BIANCHI, L. O.; DEFOSSE, G. E. Ignition probability of fine dead surface fuels of native Patagonian forests or Argentina. **Forest Systems**, Madrid, v. 23, n. 1, p. 129-138, 2014.
- BRADSHAW, L.; BRITTAIN, S. **FireFamily Plus**. Software available from USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. [s. l.]: Missoula MT, 1999.
- BROWN, J. K.; OBERHEU, R. D.; JOHNSTON, C. M. **Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior west**. Ogden: USDA Forest Service, 1982. (General Technical Report, INT-129).
- BURGAN, R. E. **Revisions to the 1978 National Fire-danger Rating System**. Macon: USDA Forest Service; Southeast Forest Experiment Station, 1988. 39 p. (Research Paper, SE-273).
- CAMIA, A.; AMATULLI, G. Climatology of FWI over Europe: fire danger anomalies and index percentile rankings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FOREST FIRE RESEARCH, 6., 2010, Coimbra. **Proceedings...** Coimbra: ADAI; CEIF, 2010.
- CERAPIÁ, V. R. **Predição do Índice de Risco de Incêndio e modelagem computacional do comportamento do avanço da frente do fogo no Parque Nacional da Floresta da Tijuca**. 2006.

- 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- CHENEY, N. P. et al. Predicting fire behaviour in dry eucalypt forests in southern Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 280, p. 120-131, 2012.
- CHEN, S. et al. Seasonal Predictions for Wildland Fire Severity. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIRE ECONOMICS, PLANNING, AND POLICY: COMMON PROBLEMS AND APPROACHES, 3., 2008, Carolina, Puerto Rico. **Proceedings...** Albany: USDA Forest Service; Pacific Southwest Research Station, 2008. p. 67-69.
- COHEN, J. D.; DEEMING, J. E. **The National Fire-danger Rating System**: basic equations. Berkley: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1985. 17 p. (General Technical Report, PSW-82).
- CSIRO - Land and Water Flagship. **CSIRO Fire Danger and Fire Spread Calculator**. 1999. Disponível em: <<https://www.frames.gov/catalog/903>>. Acesso em 21 Jul. 2015.
- DE GROOT, W. J. et al. Development of the Indonesian and Malaysian fire danger rating systems. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 165-180, 2007.
- DEEMING, J. E.; BURGAN, R. E.; COHEN, J. D. **The National Fire-danger Rating System-1978**. Ogden: USDA Forest Service; Intermountain Forest and Range Experiment Station General, 1977. 63 p. (Technical Report, INT-39).
- DEEMING, J. E. et al. **The National Fire-Danger Rating System**. Fort Collins: USDA Forest Service; Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1972. 165 p. (Research Paper, RM-84).
- EASTERLING, E. F. **BEHAVE Wildland fine fuel moisture model**: field testing and sensitivity analysis. 1986. 127 f. Dissertation (Master of Science in Forestry) - University of Montana, Montana, 1986.
- FOSBERG, M. A.; DEEMING, J. E. **Derivation of the one-and ten-hour timelag fuel moisture calculations for fire-danger rating**. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, US Dept. of Agriculture, 1971.
- FOSBERG, M. A.; LANCASTER, J. W.; SCHROEDER, M. J. Fuel moisture response - drying relationships under standard and field conditions. **Forest Science**, Bethesda, v. 16, n. 1, p. 121-128, 1970.
- GABBAN, A.; AYANZ, J. S. M.; VIEGAS, D. X. A comparative analysis of the use of NOAA-AVHRR NDVI and FWI data for forest fire risk assessment. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 29, n. 19, p. 5677-5687, 2008.
- GOLDAMMER, J.G. et al. Early warning of wildland fire. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EARLY WARNING, 2., 2003, Bonn, Germany. **Proceedings...** Bonn: Global Fire Monitoring Center, 2003.
- GOULD, J. S. et al. **Project vesta-fire in dry eucalypt forest**: fuel structure, fuel dynamics and fire behaviour. Perth: Ensis-CSIRO; Canberra ACT; Department of Environment and Conservation, 2007. 218 p.
- HATTON, T. J. et al. The influence of soil moisture on Eucalyptus leaf litter moisture. **Forest Science**, Bethesda, v. 34, n. 2, p. 292-301, 1988.
- HOLSTEN, A. et al. Evaluation of the performance of meteorological forest fire indices for German federal states. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 287, p. 123-131, 2013.
- HOREL, J. D. et al. An evaluation of fire danger and behaviour indices in the Great Lakes Region calculated from station and gridded weather information. **International Journal of Wildland Fire**, Rosyn, v. 23, n. 2, p. 202-214, 2014.
- LI, X. et al. A comparison of forest fire indices for predicting fire risk in contrasting climates in China. **Natural Hazards**, Dordrecht, v. 70, n. 2, p. 1339-1356, 2014.
- LOOMIS, R. M.; WILLIAN, A. M. **Comparing jack pine slash and forest floor moisture contents and National Fire Danger Rating System predictions**. St. Paul: USDA Forest Service; North Central Forest Experimental Station, 1980.
- MARSDEN-SMEDLEY, J. B.; CATCHPOLE, W. R. Fire modelling in Tasmanian buttongrass moorlands. III. Dead fuel moisture. **International Journal of Wildland Fire**, Rosyn, v. 10, n. 1, p. 241-253, 2001.
- MATTHEWS, S. Effect of drying temperature on fuel moisture content measurements. **International Journal of Wildland Fire**, Rosyn, v. 19, p. 800-802, 2010.
- MATTHEWS, S. Dead fuel moisture research: 1991-2012. **International Journal of Wildland Fire**, Rosyn, v. 23, n. 1, p. 78-92, 2014.

- MCARTHUR, A. G. **Control burning in eucalypt forest**. Canberra: Commonwealth of Australia Forestry and Timber Bureau, 1962. (Leaflet No. 80).
- MCARTHUR, A. G. **Fire behaviour in eucalypt forests**. Canberra: Commonwealth of Australia Forestry and Timber Bureau, 1967. (Leaflet No. 107).
- MCCAW, W. L.; GOULD, J. S.; CHENEY, N. P. Existing fire behaviour models under-predict the rate of spread of summer fires in open jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest. **Australian Forestry**, Queen Victoria, v. 71, n. 1, p. 16-26, 2008.
- MCRAE, D. J. et al. Estimating carbon emissions in Russia using the Canadian Forest Fire Danger Rating System. In: AGU FALL MEETING, 2009, San Francisco, CA. **Proceedings...** Washington: American Geophysical Union, 2009.
- MOLDERS, N. Comparison of Canadian Forest Fire Danger Rating System and National Fire Danger Rating System fire indices derived from Weather Research and Forecasting (WRF) model data for the June 2005 Interior Alaska wildfires. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 95, n. 1, p. 290-306, 2010.
- NOBLE, I. R.; GILL, A. M.; BARY, G. A. V. McArthur's fire-danger meters expressed as equations. **Austral Ecology**, [S.l.], v. 5, n. 2, p. 201-203, 1980.
- PAGE, W. G.; JENKINS, M. J.; ALEXANDER, M. E. Models to Predict the Moisture Content of Lodgepole Pine Foliage during the Red Stage of Mountain Pine Beetle Attack. **Forest Science**, Bethesda, v. 61, n. 1, p. 128-134, 2015.
- PYNE, S. J.; ANDREWS, P. L.; LAVEN, R. D. **Introduction to wildland fire**. 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1996. 769 p.
- RAINHA, M.; FERNANDES, P. M.; VIEGAS, D. X. Using the Canadian Fire Weather Index (FWI) in the Natural Park of Montesinho, NE Portugal: calibration and application to fire management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FOREST FIRE RESEARCH, 4., 2002, Coimbra. **Proceedings...** Rotterdam: Millpress Science Publishers, 2002.
- RAY, D.; NEPSTAD, D.; BRANDO, P. Predicting moisture dynamics of fine understory fuels in a moist tropical rainforest system: results of a pilot study undertaken to identify proxy variables useful for rating fire danger. **New Phytologist**, Cambridge, v. 187, p. 720-732, 2010.
- ROADS, J. O.; CHEN, S. C.; FUJIOKA, F. ECPC's weekly to seasonal global forecasts. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 82, n. 4, p. 639-658, 2001.
- ROTHERMEL, R. C. **A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels**. Ogden: USDA Forest Service; Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972. 40 p. (Research Paper, INT-115).
- ROTHERMEL, R. C. **How to predict the spread and intensity of forest and range fires**. Ogden: USDA Forest Service; Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1983. 161 p. (General Technical Report, INT-143).
- ROTHERMEL, R. C. et al. **Modeling moisture content of fine dead wildland fuels: input to the BEHAVE fire prediction system**. Ogden: USDA Forest Service; Intermountain Research Station, 1986. 61 p. (Research Paper, INT-359).
- RUIZ, A.; VEGA, J. A.; ÁLVAREZ, J. G. Modelización de la variabilidad horaria de los contenidos de humedad en hojarasca de *Eucalyptus globulus*. **Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales**, Madrid, v. 18, n. 3, p. 247-263, 2009.
- SCHROEDER, M. J.; BUCK, C. C. **Fire weather: a guide for application of meteorological information to forest fire control operations**. Boise: USDA Forest Service, 1970. 229 p. (Agriculture Handbook, 360).
- SCHUNK, C.; LEUCHNER, M.; MENZEL, A. Evaluation of a system for automatic dead fine fuel moisture measurements. In: VIEGAS, D. X. (Ed.) **Advances in forest fire research**. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2014. p. 1115-1123.
- SCHWARZ, B. **Comparing the Fire Danger Rating Systems of Canada and the US: FWI versus NFDRS**. Munich: GRIN Publishing GmbH, 2014. 17 p.
- SCOTT, J. H. **Introduction to wildfire behavior modeling**. [S.l.]: USDA Forest Service, National Interagency Fuels, Fire & Vegetation Technology Transfer, 2012. 149 p.
- SETZER A. W.; SISMANOGLU R. A. **Risco de Fogo: Resumo do Método de Cálculo**. DSA / CPTEC / INPE. Versão 5, 2007.

- SIMARD, A. J. **The moisture content of forest fuels-1. A review of the basic concepts**. Ottawa: Canadian Department of Forest and Rural Development; Forest Fire Research Institute, 1968. 47 p. (Information Report, FF-X-14).
- SLIJEPCEVIC, A.; ANDERSON, W. Hourly variation in fine fuel moisture in eucalypt forests in Tasmania. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON FOREST FIRE RESEARCH**, 5., 2006, Figueira da Foz. **Proceedings...** Amsterdam: Elsevier, 2006.
- SLIJEPCEVIC, A.; ANDERSON, W.; MATTHEWS, S. Testing existing models for predicting hourly variation in fine fuel moisture in eucalypt forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 306, p. 202-215, 2013.
- SLIJEPCEVIC, A. et al. Evaluating models to predict daily fine fuel moisture content in eucalypt forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 335, p. 261-269, 2015.
- SNYDER, R. L. et al. A fuel dryness index for grassland fire-danger assessment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 139, n. 1-2, p. 1-11, 2006.
- SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Incêndios Florestais: controle, efeitos e uso do fogo**. Curitiba: UFPR, 2007. 264 p.
- STURM, T.; FERNANDES, P. M.; SUMRADA, R. The Canadian fire weather index system and wildfire activity in the Karst forest management area, Slovenia. **European Journal of Forest Research**, [S.l.], v. 131, n. 3, p. 829-834, 2012.
- TANSKANEN, H. et al. Impact of stand structure on surface fire ignition potential in *Picea abies* and *Pinus sylvestris* forests in southern Finland. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 35, p. 410-420, 2005.
- TIAN, X. R. et al. Comparisons and assessment of forest fire danger systems. **Forestry Studies in China**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 53-61, 2005.
- TROLLOPE, W. S. W.; TROLLOPE, L. A.; HARTNETT, D. C. Fire behaviour a key factor in the fire ecology of African grasslands and savannas. In: **Forest fire research & wildland fire safety**. VIEGAS, D. X. (Ed.) Rotterdam: Millpress, 2002.
- VAN WAGNER, C. E. **New developments in forest fire danger rating**. Chalk River: Canadian Forest Service; Petawawa Forest Experimental Station, 1970. (Informative Report, PS-X-19).
- VAN WAGNER, C. E. **Structure of the Canadian forest fire weather index**. Ottawa: Canadian Forestry Service; Petawawa Forest Experiment Station; Department of the Environment, 1974. (Publication, 1333).
- VEGA, J. A.; CASAL, M. Contraste de estimadores de humedad del combustible forestal fino muerto en montes arbolados de Galicia (NW de España). In: **SEMINARIO SOBRE MÉTODOS Y EQUIPOS PARA LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES**, 1986, Valencia. **Proceedings...** Madrid: ICONA, 1986. p. 94-97.
- VIEGAS, D. X. et al. Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. **International Journal of Wildland Fire**, Rosyn, v. 9, p. 235-246, 1999.
- VIEGAS, D. X. et al. Calibração do sistema canadiano de perigo de incêndio para aplicação em Portugal. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 12, n. 1, p. 77-93, 2004.
- VIEGAS, D. X.; VIEGAS, M. T. S. P.; FERREIRA, A. D. Moisture content of fine forest fuels and fire occurrence in Central Portugal. **International Journal of Wildland Fire**, Rosyn, v. 2, p. 69-86, 1992.
- VINEY, N. R. A review of fine fuel moisture modelling. **International Journal of Wildland Fire**, Rosyn, v. 1, n. 4, p. 215-234, 1991.
- VINEY, N. R.; CATCHPOLE, E. A. Estimating fuel moisture response times from field observation. **International Journal of Wildland Fire**, Rosyn, v. 1, n. 4, p. 211-214, 1991.
- VINEY, N. R.; HATTON, T. J. Assessment of existing fine fuel moisture models applied to *Eucalyptus* litter. **Australian Forestry**, Queen Victoria, v. 52, n. 2, 1989.
- WASTL, C. et al. Recent climate change: long-term trends in meteorological forest fire danger in the Alps. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 162, p. 1-13, 2012.
- WHITE, B. L. A. et al. Caracterização do material combustível superficial no Parque Nacional Serra de Itabaiana – Sergipe, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 699-706, 2014.
- WHITE, B. L. A. et al. Fire behavior predicting models efficiency in Brazilian commercial eucalypt plantations. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 4, p. 389-396, 2016.

- WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, G. T.; SOUZA, R. M. O uso do BehavePlus como ferramenta para modelagem do comportamento e efeito do fogo. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 73, p. 73-84, 2013.
- YEBRA, M.; CHUVIECO, E.; RIAÑO, D. Investigation of a method to estimate live fuel moisture content from satellite measurements in fire risk assessment. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 234, n. S32, 2006.
- ZHANG, H.; JIN, S.; DI, X. Y. Prediction of litter moisture content in Tahe Forestry Bureau of Northeast China based on FWI moisture codes. **The Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 25, n. 7, p. 2049-2055, 2014.