

Simulação do comportamento do fogo em cultivo de *Eucalyptus urograndis* (Clone H13)

Fire behavior simulations in *Eucalyptus urograndis* (Clone H13) crop

Leandro Jorge de Souza Alves¹
Adilson Pacheco de Souza^{1,2}
Bruno Henrique Casavecchia²
Tháise Karla Ribeiro Dias¹
Daniela Roberta Borella²
Brena Geliane Ferneda³
Charles Campoe Martim²

Resumo

Avaliou-se simulações do comportamento do fogo por dois programas computacionais BehavePlus e Eucalyptus Fire Safety System (EMSS) comparadas com observações experimentais (queimas controladas), em uma área com *Eucalyptus urograndis* (Clone H13) com 4,5 anos de idade, no município de Sorriso-MT, ao longo da estação seca (maio a setembro) de 2015. As queimas experimentais ocorreram em parcelas de 3,0 x 20,0 m (largura e comprimento), com topografia plana e considerando as interfaces EF (interface eucalipto-floresta nativa), EL (interface eucalipto-lavoura) e EE (centro do talhão). Foram avaliadas a velocidade de propagação do fogo, intensidade do fogo e comprimento da chama. O BehavePlus superestimou todas as variáveis do comportamento do fogo, independentemente da época do ano e da interface. As melhores simulações foram obtidas com EMSS. Com base nas simulações do comportamento do fogo e em função da segurança da operação, recomenda-se a realização de queimas no mês de julho, considerando a sequência de interfaces EM-EE-EL.

Palavras-chave: BehavePlus. Eucalyptus Fire Safety System. Queimas controladas. Cultivos florestais.

Abstract

Fire behavior simulations were carried out by two computer programs “BehavePlus” and “Eucalyptus Fire Safety System” (EMSS) and compared to experimental observations (prescribed burning) in an *Eucalyptus urograndis* (Clone H13) forest, with 4.5 years-old, in the Sorriso County, Mato Grosso State, during the dry season (May to September) of 2015.

¹ Universidade Federal de Mato Grosso, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Sinop, Mato Grosso, Brasil. leandrojsa193@gmail.com; pachecoufmt@gmail.com; thaiserdias@yahoo.com.br

² Universidade Federal de Mato Grosso, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. brunocasavecchiaef@gmail.com; drborella@gmail.com; charleschp2013@hotmail.com

³ Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Piracicaba, São Paulo, Brasil. Brenaferneda95@gmail.com

Artigo recebido em: 20/12/2016. Aceito para publicação em: 28/09/2018.

Experimental burnings occurred in plots of 3.0 x 20.0 m (width and length), with flat topography and considering the interfaces EF (eucalyptus- native forest), EL (eucalyptus-crops) and EE (center of the field). The fire propagation velocity, fire intensity and flame length were evaluated. BehavePlus overestimated all fire behavior variables, regardless of time of year and environmental interface. The best simulations were obtained with EMSS. Based on the simulations of the fire behavior and the safety of the operation, it is recommended to perform firing in July, considering the sequence of EM-EE-EL interfaces.

Keywords: BehavePlus. Eucalyptus Fire Safety System. Prescribed burning. Forest crops.

Introdução

Nas condições climáticas do centro-oeste brasileiro, os incêndios florestais ocorrem normalmente na estação seca, causando vários problemas econômicos e ambientais em florestas ou cultivos. Esse cenário demanda a utilização de sistemas operacionais de gestão, que integrem o comportamento do fogo aos módulos de planejamento de apoio à decisão na gestão florestal (KALABOKIDIS et al., 2014).

Com o avanço da tecnologia da informação, foram desenvolvidos meios para a utilização de soluções mais rápidas e seguras em gestão do fogo. Os *softwares* usados em simulação da propagação dos incêndios têm se tornado ferramentas de apoio e suporte para a tomada de decisão dos gestores florestais (ANDREWS, 2008), pois apresentam o comportamento da propagação do fogo semelhante à sua realidade de ocorrência (GOULD et al., 2007).

Em geral, simulações do comportamento do fogo vem sendo consideradas como ferramentas eficientes na obtenção da probabilidade e da severidade do incêndio, em diferentes condições ambientais e classes de combustíveis (AGER et al., 2007; FINNEY, 2007; NOONAN-WRIGHT et al., 2011; WHITE et al., 2013a,b). Essas aplicações podem ser direcionadas na definição de estratégias e táticas de prevenção e combate, no planejamento da paisagem, na estimativa dos efeitos ecológicos dos incêndios, na concepção do tratamento de material combustível (AGER et

al., 2007; NOONAN-WRIGHT et al., 2011; KALABOKIDIS et al., 2015), na previsão, identificação e definição espacial de áreas de risco (FINNEY, 2004).

A utilização de *softwares* em sistemas de apoio à decisão em operações com incêndio florestal tem sido realizada em diferentes países, com destaques na literatura para o FARSITE (FINNEY, 2004), o FlamMap (FINNEY, 2007) e o BehavePlus Fire Modeling System - BehavePlus (ANDREWS, 2008), que apresentam como resultados valores da velocidade de propagação do fogo, comprimento das chamas, intensidade da linha do fogo, energia calorífica, dentre outros (WHITE et al., 2013a).

O BehavePlus é um *software* muito utilizado por gestores do fogo em países como Estados Unidos, Canadá e Austrália (ANDREWS, 2008). No Brasil, esse *software* foi utilizado por Mistry & Berardi (2005) para avaliar o potencial do dano pelo fogo em vegetação de cerrado; por White et al. (2013a) para simular o comportamento do fogo no Parque Nacional Serra de Itabaiana; e por White et al. (2014) na simulação do comportamento do fogo em plantios de *Eucalyptus urograndis* em diferentes cenários de umidade do combustível. No entanto, estes autores não realizaram queimas experimentais para validarem seus resultados.

Apesar da obtenção de resultados positivos nas validações das simulações realizadas com o BehavePlus, destaca-se que em alguns casos não são encontrados resultados satisfatórios que indicam a utilização plena do BehavePlus para prever o comportamento do fogo (STEPHENS et al., 2008; FERNANDES, 2009). White (2014) realizou simulações do comportamento do fogo com o BehavePlus e comparou com resultados de queimas experimentais em laboratório utilizando materiais da serrapilheira de *Eucalyptus* spp. O autor não encontrou resultados satisfatórios nas validações, em virtude disso, desenvolveu o *software* Eucalyptus Fire Safty System (EMSS) para emprego em áreas de eucalipto no Brasil.

Portanto, o uso de *softwares* para prever o comportamento do fogo desempenha um papel importante no suporte à tomada de decisão na gestão das operações envolvendo o fogo em área florestal, porém, essas informações precisam ser validadas, uma vez que podem ficar restritas ao campo teórico (WHITE et al., 2013b). Essa validação pode ocorrer tanto pela correlação com os dados históricos dos incêndios como por meio da comparação dos resultados obtidos nas queimas experimentais com as informações previstas nos programas computacionais existentes.

O objetivo deste estudo foi comparar os resultados de queimas experimentais realizadas em um plantio de *Eucalyptus urograndis* (clone H13) com as simulações de dois programas computacionais, o BehavePlus e o EMSS, para identificar qual ferramenta computacional pode ser utilizada pelo gestor florestal para manejar a área.

Material e Métodos

Área experimental

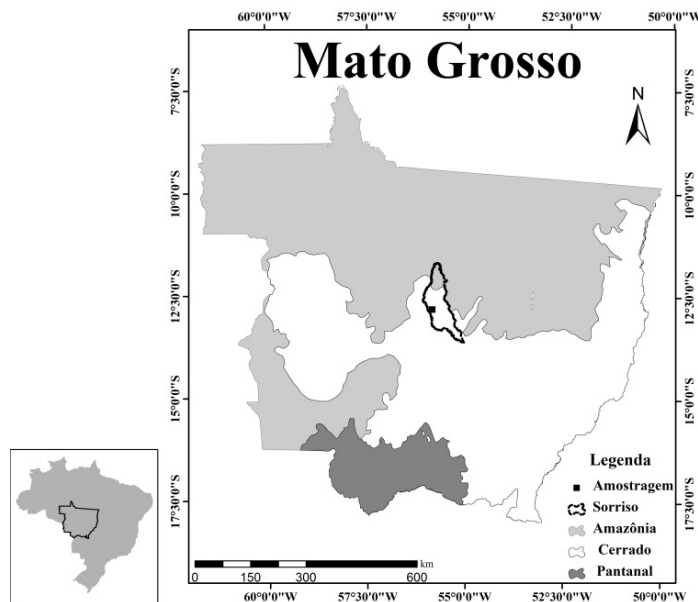
As queimas controladas foram realizadas na Fazenda Santo Antonio (pertencente a Empresa Brasil Foods – unidade de Lucas do Rio Verde), no município de Sorriso, região centro-oeste, mesorregião geográfica médio-norte do estado de Mato Grosso, considerada como transição Cerrado-Amazônia. As parcelas foram inseridas entre as latitudes 12° 32' 43" S e as longitudes 55° 42' 41" W, com altitude média de 365 metros e topografia plana (Figura 1).

A área experimental possui plantio de *Eucalyptus urograndis* (Clone H13) com 4,5 anos de idade, com árvores plantadas no espaçamento de 3,0 x 3,0 metros (linha x entrelinha). A área experimental é margeada na face oeste por uma área de lavoura (soja/milho e algodão) e na face leste por um remanescente de floresta com altura média de 15 m. O estabelecimento das

parcelas objetivou avaliar a influência dessas interfaces (bordaduras) sobre o comportamento do fogo.

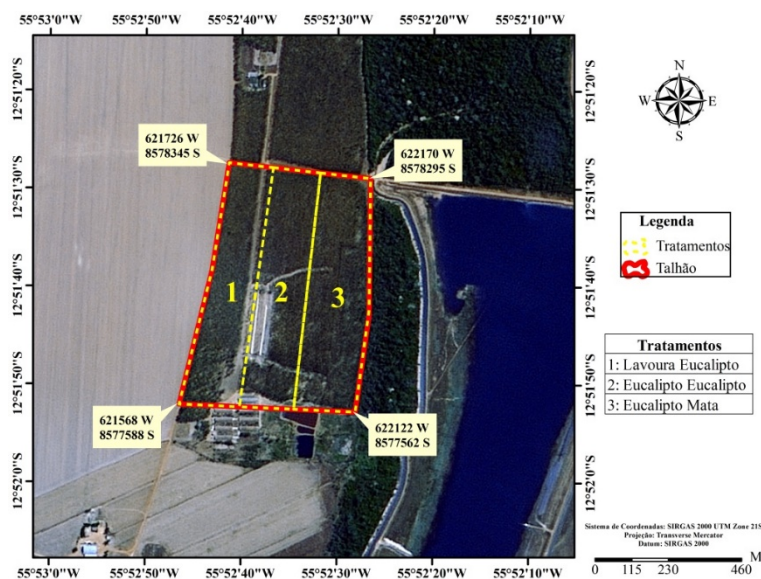
O delineamento experimental empregado foi o de blocos casualizados, com arranjo fatorial de 4 x 3 (meses x posições no talhão), com três repetições. As queimas controladas ocorreram de junho a setembro, enquanto que as posições no talhão foram definidas como EL (parcelas dispostas a 30 m de distância da bordadura com lavoura – soja/algodão), EE (parcelas no centro do talhão) e EM (parcelas dispostas a 30 m de distância da bordadura com a floresta nativa) (Figura 2). As parcelas foram delimitadas em nível, com dimensões de 3,0 x 20,0 m (largura x comprimento) e acompanharam o alinhamento de plantio, com aceiros de 1,0 m em todas as interfaces.

Figura 1 - Localização da área experimental e do município de Sorriso, no estado de Mato Grosso.



Org.: dos Autores, 2016.

Figura 2 - Arranjo experimental e distribuição das interfaces do talhão de *Eucalyptus urograndis* (Clone H13) com floresta nativa e com a lavoura.



Org.: dos Autores, 2016.

Caracterização do material combustível

O material combustível foi coletado ao lado de cada parcela (distância máxima de 6,0 m) e com mesmas condições de serapilheira. Foram demarcadas 04 (quatro) subparcelas aleatórias de 1,0 x 1,0 m para quantificação do material combustível total (totalizando 12 repetições por tratamento). O combustível consumido foi obtido pela diferença entre a biomassa anterior à queimada (serapilheira) e o combustível residual pós-queima (mensurado em áreas de 1,0 m² em cada posto de observação).

As metodologias utilizadas para coletar, categorizar e determinar a massa foram baseadas em trabalhos de Rothermel (1972) e Brown et al. (1982): A) material combustível vivo: i) material herbáceo (MVH) - plantas espontâneas que possuem a consistência e porte de vegetação rasteira (gramíneas, leguminosas, musgos e samambaias, dentre outras); ii) material lenhoso (MVL): inclui folhagem, casca e pequenos ramos dos arbustos vivos (materiais vegetais cujo diâmetro é menor ou igual a 0,70 cm); B) material

combustível morto (seco): i) folhas; ii) MS1: material seco com diâmetro menor ou igual a 0,70 cm; iii) MS2: material seco com diâmetro maior que 0,70 e menor ou igual a 2,50 cm; iv) MS3: material seco com diâmetro maior que 2,50 e menor ou igual a 7,60 cm.

Após a coleta, classificação e determinação da massa úmida, foram retiradas subamostras representativas de cada classe de material combustível (100 g) para determinação da massa seca e do teor de umidade, que por sua vez, foram obtidos pela secagem em estufa de circulação forçada de ar, na temperatura de ± 65 °C até atingir massa seca constante. A seguir são apresentados os valores de massa seca, umidade (%), altura da serrapilheira (cm) e densidade do material combustível ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), para diferentes classes de material combustível, obtidas nas parcelas de queimas controladas e empregadas nas simulações:

i) Massa seca ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) e umidade do material combustível (em %; entre parênteses):

– Classe MS1: – EL: 8,28; 8,01; 10,34 e 14,35 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$; e 9,3; 8,1; 7,7 e 5,3%; – EE: 9,18; 8,03; 10,79 e 12,70 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$; e 7,6; 9,7; 8,3 e 5,5%; – EF: 11,42; 9,34; 11,61 e 11,54 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$; e 9,3; 11,7; 8,7 e 7,7 %, entre junho e setembro, respectivamente.

– Classe MS2: - EL: 4,01; 3,83; 2,77 e 3,56 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$; e 9,9; 9,3; 8,2 e 5,9%; – EE: 3,87; 3,87; 3,57 e 3,89 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$; e 9,6; 11,1; 8,7 e 6,2%; – EF: 5,30; 4,45; 4,55 e 5,49 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$; e 11,7; 12,4; 8,7 e 8,6%, entre junho e setembro, respectivamente.

– Material herbáceo: – EL: 0,003; 0,005; 0,002 e 0,021 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$; e 46,2; 77,1; 11,2 e 8,6%; – EE: 0,0099; 0,008; 0,005 e 0,044 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$; e 47,9; 40,6; 9,9 e 8,9%; – EF: 0,283; 0,230; 0,200 e 0,550 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$; e 95,13; 78,47; 69,3 e 20,95%, entre junho e setembro, respectivamente.

– Folhas: EL: 4,89; 4,36; 6,27 e 8,68 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ e 9,53; 7,48; 7,36 e 5,05%; – EE: 5,42; 4,74; 6,27 e 7,83 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ e 6,50; 9,33; 8,38 e 5,30%; – EF: 7,02;

5,12; 6,71 e 7,05 t.ha⁻¹ e 8,51; 11,34; 8,77 e 7,56%, entre junho e setembro, respectivamente.

– Massa seca total: – EL: 12,29; 11,84; 13,11 e 17,93 t.ha⁻¹; – EE: 13,05; 11,92; 14,36 e 16,63 t.ha⁻¹; – EF: 16,99; 14,02; 16,36 e 17,57 t.ha⁻¹, entre junho e setembro, respectivamente.

ii) altura da serrapilheira (cm) e densidade do material combustível (kg.m⁻³):

– Posição EL: 13,58; 12,25; 13,42 e 13,08 cm; e 9,25; 9,82; 10,03 e 13,84 kg.m⁻³; – Posição EE: 11,33; 11,50; 10,50 e 12,33 cm; e 11,81; 10,49; 13,96 e 13,73 kg.m⁻³; – Posição EF: 10,50; 10,18; 10,08 e 11,00 cm; e 16,66; 14,17; 16,80 e 16,30 kg.m⁻³.

Caracterização das variáveis meteorológicas

Os valores médios de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento obtidos durante as queimas controladas e empregados nas simulações são descritos abaixo:

– Para velocidade do vento (km.h⁻¹): – EL: 1,79; 1,73; 2,74 e 4,54 m.s⁻¹; – EE: 1,60; 1,75; 2,38 e 3,62 m.s⁻¹; – EF: 0,88; 0,59; 2,02 e 1,67 m.s⁻¹, entre junho e setembro, respectivamente.

– Para temperatura do ar (°C): – EL: 29,62; 32,99; 36,13 e 40,01 °C; – EE: 32,29; 32,97; 36,77 e 39,69 °C; – EF: 30,69; 27,94; 32,67 e 37,68 °C, entre junho e setembro, respectivamente.

– Para umidade relativa do ar (%): – EL: 48,6; 21,70; 17,5 e 10,1%; – EE: 38,1; 25,2; 17,9 e 10,7%; – EF: 44,0; 53,6; 30,8 e 15,4%, entre junho e setembro, respectivamente.

Simulando o comportamento do fogo

Foram avaliados dois programas computacionais que descrevem o comportamento do fogo: i) BehavePlus *Fire Modeling System* (5.0.5), que é um *software* livre e pode ser obtido através do *download* no link <https://www.frames.gov/partner-sites/BehavePlus/software-manuals/>; ii) *Eucalyptus Fire Safety System* – EMSS (1.0), não é um *software* livre, todavia, o acesso foi autorizado pela equipe de desenvolvimento.

Para a realização das simulações em cada parcela de queima foi utilizado o valor médio da velocidade do vento, pois em cada parcela foram obtidos 10 valores de velocidade de propagação do fogo e comprimento de chama, porém a velocidade do vento foi medida a cada 5 minutos, gerando um valor correspondente ao tempo de duração da queima por subparcela, dessa forma, optou-se em utilizar valores médios. Para a topografia foi utilizado 0°. As variáveis de entrada (*inputs*) necessárias para simular o comportamento do fogo ao se optar por modelos customizados no BehavePlus são apresentadas a seguir:

- Material combustível superficial: modelo do material combustível; tipo do modelo do material combustível; carga do material combustível de 1-h de *timelag* ($t.ha^{-1}$) – MS1; carga do material combustível de 10-h de *timelag* ($t.ha^{-1}$) – MS2; carga do material combustível de 100-h de *timelag* ($t.ha^{-1}$) – MS3; carga do material vivo herbáceo ($t.ha^{-1}$) – MH; carga do material vivo lenhoso ($t.ha^{-1}$) – ML; área superficial pelo volume do material de 1-h de *timelag* ($m^2.m^{-3}$); área superficial pelo volume do material vivo herbáceo ($m^2.m^{-3}$); área superficial pelo volume do material vivo lenhoso ($m^2.m^{-3}$); altura da liteira (cm); umidade de extinção do material combustível morto (%); energia calorífica do material combustível morto ($kJ.kg^{-1}$); energia calorífica do material combustível vivo ($kJ.kg^{-1}$);

- Umidade: umidade do material combustível de 1-h de *timelag* (%) – MS1; umidade do material combustível de 10-h de *timelag* (%) – MS2; umidade do material combustível de 100-h de *timelag* (%) – MS3; umidade do material vivo herbáceo (%) – MH; umidade do material vivo lenhoso (%) – ML
- Clima: velocidade do vento a 1,8 m de altura (km.h⁻¹)
- Relevo: declividade do terreno (%)

Nesse caso, para aplicação no BehavePlus alguns valores foram considerados como estáticos e foram obtidos na literatura, como segue: i) área superficial pelo volume do material de 1 h (m².m⁻³) = 4200 (FERNANDES et al., 2011); ii) área superficial pelo volume do material vivo herbáceo (m² m⁻³) = 4921 (SCOTT; BURGAN, 2005); iii) área superficial pelo volume do material vivo lenhoso (m² m⁻³) = 4921 (SCOTT; BURGAN, 2005); iv) umidade de extinção do material combustível morto (%) = 30 (SCOTT; BURGAN, 2005); (SOARES; BATISTA, 2007); v) energia calorífica do material combustível morto (kJ.kg⁻¹) = 21000 (FERNANDES et al., 2011); vi) energia calorífica do material combustível vivo (kJ.kg⁻¹) = 21000 (FERNANDES et al., 2011).

De acordo com White (2014), para o programa Eucalyptus Fire Safety System (EMSS), as variáveis de entrada necessárias para a realização das simulações foram: i) material combustível superficial distribuído em carga do material combustível de 1-h de *timelag* (t/ha) – MS1, carga total do material combustível morto (t.ha⁻¹), espessura do leito (m), altura da serapilheira (cm); ii) umidade do material combustível de 1-h de *timelag* (%) – MS1; iii) clima: velocidade do vento a 1,8 m de altura (km.h⁻¹); iv) declividade do terreno (%).

As variáveis de saída comparadas aos resultados das queimas experimentais foram a velocidade de propagação do fogo, intensidade da linha do fogo e comprimento da chama, que foram obtidas através dos

modelos propostos por Rothermel (1972) para o programa BehavePlus. Quanto ao programa EMSS foram obtidas as mesmas variáveis supracitadas (com exceção da intensidade da linha do fogo), além da porcentagem de material consumido.

Análise estatística

Para a validação de simulações foram considerados conjuntos de valores estimados e observados para a velocidade de propagação, comprimento de chama, intensidade e material consumido, sendo empregados os seguintes indicativos estatísticos de desempenho: coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo - MBE (*Mean Bias Error*), raiz quadrada do erro quadrático médio - RMSE (*Root Mean Square Error*) e índice de ajustamento “d” de Willmott, conforme recomendações de Souza et al. (2011).

Resultados

Quanto aos percentuais de material consumido nas queimas controladas, foram obtidos por época e posição no talhão os seguintes valores: i) posição EL: 97,89; 97,83; 98,15 e 98,18%; ii) posição EE: 94,69; 94,60; 95,62 e 95,44%; iii) posição EF: 93,21; 92,01; 93,21 e 92,30%, para junho, julho, agosto e setembro, respectivamente. Os percentuais de material combustível residual apresentaram influência do material herbáceo e, em função de ser inferior a 7,99%, provavelmente não contribuiria para um novo incêndio.

As velocidades simuladas apresentaram um comportamento similar ao do experimento, visto que os maiores valores ocorreram na posição EL em setembro e agosto, enquanto que os menores foram obtidos na posição EF em junho e julho (Tabela 1). Em geral, as correlações entre a velocidade de

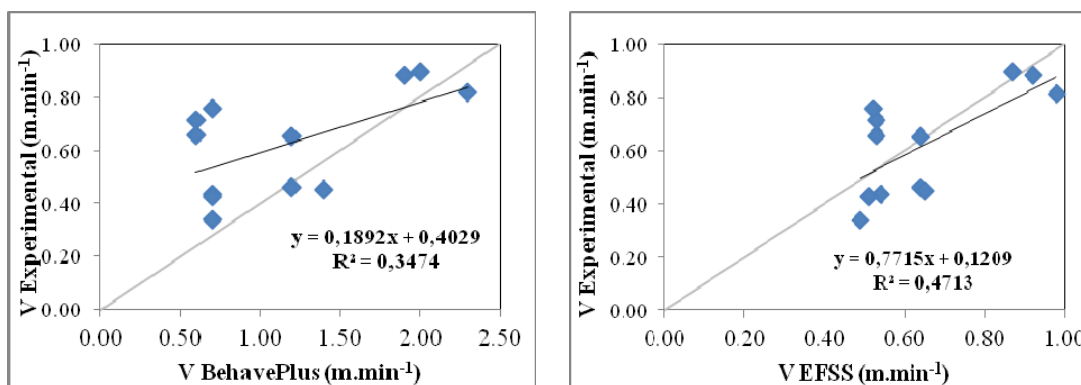
propagação estimada (variável independente) e a experimental (variável dependente) apresentaram baixos coeficientes de correlação (Figura 3).

Tabela 1. Velocidade de propagação do fogo (m.min⁻¹) em queimas experimentais e simuladas pelo BehavePlus e EMSS, em áreas de *E. urograndis* (Clone H13) com 4,5 anos de idade, em diferentes meses e posição no talhão.

Posição	Junho	Julho	Agosto	Setembro
Experimental				
EL	0,40 Bd	0,71 Ab	0,52 Bc	0,87 Aa
EE	0,47 Ac	0,61 Bb	0,74 Aa	0,77 Ba
EF	0,41 ABb	0,26 Cd	0,36 Cbc	0,52 Ca
BehavePlus				
EL	0,70 Ac	0,63 Ac	1,27 Ab	2,07 Aa
EE	0,60 Ab	0,57 Ab	0,70 Bb	1,43 Ba
EF	0,30 Bc	0,27 Bc	0,53 Ba	0,47 Cb
EMSS				
EL	0,51 Ac	0,53 Ac	0,64 Ab	0,92 Aa
EE	0,52 Ab	0,49 Ab	0,55 Bb	0,78 Ba
EF	0,38 Bb	0,34 Bb	0,49 Ba	0,49 Ca

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. EL (parcelas na interface eucalipto/lavoura), EE (parcelas no centro do talhão de eucalipto) e EF (parcelas na interface eucalipto/floresta nativa). Org.: dos Autores, 2016.

Figura 3 - Correlações da velocidade de propagação do fogo simuladas com BehavePlus e EMSS e com as observações experimentais para EL (eucalipto/lavoura).



Org.: dos Autores, 2016.

Em julho foram observadas menores das velocidades médias do vento e maiores valores dos percentuais de umidades do material combustível, que em conjunto podem ter propiciado as menores estimativas da velocidade de propagação pelos dois programas avaliados. As diferenças obtidas para a

intensidade do fogo para os *softwares* avaliados são decorrentes da forma de estimativa, visto que são usados os modelos de Rothermel (1972) e Byram (1959) para BehavePlus e EMSS, respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2. Intensidade do fogo (kW.m^{-1}) em queimas experimentais e simuladas pelo BehavePlus e EMSS, em áreas de *E. urograndis* (Clone H13) com 4,5 anos de idade, em diferentes meses e posição no talhão.

Posição	Junho	Julho	Agosto	Setembro
Experimental				
EL	161,58 Ac	313,24 Ab	257,41 Bbc	578,19 Aa
EE	198,84 Ab	272,64 Ab	410,63 Aa	444,04 Ba
EF	238,74 Aab	114,54 Bb	200,73 Bab	304,32 Ca
BehavePlus				
EL	184,33 Ac	164,01 Ac	407,33 Ab	842,67 Aa
EE	157,67 Ab	130,33 Ac	184,67 Bb	511,02 Ba
EF	68,33 Bc	53,01 Bc	127,67 Bb	134,67 Ca
EMSS				
EL	220,19 Ac	218,30 Ac	295,17 Ab	579,27 Aa
EE	236,56 Abc	204,15 ABc	274,68 Ab	456,28 Ba
EF	224,50 Ab	168,84 Bc	278,10 Aa	298,07 Ca

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. EL (parcelas na interface eucalipto/lavoura), EE (parcelas no centro do talhão de eucalipto) e EF (parcelas na interface eucalipto/floresta nativa). Org.: dos Autores, 2016.

Os comprimentos de chamas simulados apresentaram comportamentos similares as observações experimentais, visto que, maiores valores ocorreram na posição EL e em agosto-setembro, enquanto que, os menores valores na posição EF em junho e julho (Tabela 3).

Tabela 3. Comprimento de chama (m) em queimas experimentais e simuladas pelo BehavePlus e EMSS, em áreas de *E. urograndis* (Clone H13) com 4,5 anos de idade, em diferentes épocas do ano e posição no talhão.

Posição	Junho	Julho	Agosto	Setembro
Experimental				
EL	0,69 Bc	0,99 Ab	1,12 Ab	1,33 Aa
EE	0,93 Ab	1,03 Ab	1,02 Ab	1,28 Aa
EF	0,74 Ba	0,62 Bab	0,70 Bab	0,72 Bab
BehavePlus				
EL	0,83 Ac	0,80 Ac	1,23 Ab	1,70 Aa
EE	0,77 Ab	0,73 Ab	0,83 Bb	1,33 Ba
EF	0,53 Bb	0,47 Bb	0,72 Ba	0,73 Ca
EMSS				
EL	1,29 Abc	1,21 Ac	1,34 Aab	1,42 Aa

EE	1,14 Bb	1,13 Ab	1,10 Bb	1,31 Ba
EF	1,01 Cbc	0,96 Bc	1,06 Bab	1,14 Ca

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. EL (parcelas na interface eucalipto/lavoura), EE (parcelas no centro do talhão de eucalipto) e EF (parcelas na interface eucalipto/floresta nativa). Org.: dos Autores, 2016.

Na Tabela 4 estão apresentados os indicativos estatísticos da análise entre valores simulados e experimentais, para as três variáveis avaliadas. Em geral, as melhores correlações (maiores coeficientes de determinação) foram obtidas com EMSS. Para a velocidade de propagação, notou-se que os dois programas geraram subestimativas em julho (até $-0,07 \text{ m.min}^{-1}$) e superestimativas inferiores a $0,61 \text{ m.min}^{-1}$.

Tabela 4. Coeficientes de regressão linear ($Y = a + b X$) e indicativos estatísticos para variáveis de comportamento do fogo em queimas controladas em áreas de *Eucalyptus urograndis* (Clone H13), com 4,5 anos, em diferentes épocas e posições no talhão.

Posição/Época	Programa	Regressão linear		R ²	MBE	RMSE	d
		a	b				
Velocidade de propagação do fogo (m.min^{-1})							
EL	BehavePlus	0,4029	0,1892	0,35	0,543	0,7359	0,9128
	EMSS	0,1209	0,7715	0,47	0,028	0,1442	0,9957
EE	BehavePlus	0,463	0,2232	0,31	0,1778	0,3562	0,9278
	EMSS	0,2894	0,6124	0,25	-0,063	0,1486	0,9957
EF	BehavePlus	0,2575	0,3291	0,19	0,0052	0,1204	0,9674
	EMSS	0,0476	0,8005	0,36	0,0369	0,0861	0,9956
Junho	BehavePlus	0,3987	0,0533	0,03	0,1062	0,2105	0,9054
	EMSS	0,3166	0,2352	0,08	0,0429	0,0875	0,9961
Julho	BehavePlus	-0,0244	1,1262	0,93	-0,037	0,0683	0,9953
	EMSS	-0,5218	2,3175	0,94	-0,074	0,1387	0,9847
Agosto	BehavePlus	0,4831	0,0676	0,01	0,2939	0,4609	0,9212
	EMSS	0,1914	0,6228	0,05	0,0194	0,1872	0,9775
Setembro	BehavePlus	0,4398	0,2095	0,88	0,6054	0,8058	0,9212
	EMSS	0,1684	0,7502	0,88	0,0143	0,0714	0,9988
Intensidade do fogo (kW.m^{-1})							
EL	BehavePlus	142,2	0,464	0,61	71,9803	194,9545	0,9764
	EMSS	17,814	0,9432	0,73	0,8261	86,9536	0,9939
EE	BehavePlus	216,72	0,4638	0,32	-84,8696	160,2659	0,9737
	EMSS	127,65	0,6935	0,29	-37,8687	119,2275	0,9885
EF	BehavePlus	108,54	1,1055	0,33	-118,6652	133,0006	0,9541
	EMSS	-30,903	1,0149	0,54	27,2948	56,5673	0,9937
Junho	BehavePlus	275,71	-0,5556	0,58	-62,4915	107,1163	0,8507
	EMSS	187,04	0,0542	0,10	27,6308	57,7426	0,9922
Julho	BehavePlus	27,607	1,7781	0,77	-117,6896	131,38	0,9535
	EMSS	-464,3	3,5523	0,76	-37,0396	84,4737	0,9724
Agosto	BehavePlus	293,49	-0,0162	0,20	-49,701	192,7167	0,914
	EMSS	1273,8	-3,4821	0,16	-6,9388	143,9843	0,9437
Setembro	BehavePlus	266,01	0,3531	0,78	54,9261	206,4811	0,9682

		EMSS	38,526	0,9058	0,82	3,3505	51,4998	0,9981
		Comprimento da chama (cm)						
EL	BehavePlus	0,4107	0,5428	0,68	0,1113	0,2446	0,9814	
	EMSS	-1,2643	1,7472	0,36	0,2829	0,3489	0,9933	
EE	BehavePlus	0,6661	0,4338	0,46	-0,1471	0,2367	0,9719	
	EMSS	-0,1925	1,0745	0,32	0,1054	0,1695	0,9978	
EF	BehavePlus	0,5866	0,1725	0,06	-0,0763	0,159	0,9471	
	EMSS	0,1031	0,5658	0,20	0,3496	0,3609	0,9882	
Junho	BehavePlus	0,7786	0,0082	0,08	-0,0733	0,2099	0,9084	
	EMSS	0,9592	-0,1522	0,02	0,3633	0,4108	0,9829	
Julho	BehavePlus	0,1517	1,0867	0,73	-0,2094	0,2315	0,9536	
	EMSS	-0,7914	1,5159	0,72	0,2239	0,2515	0,9916	
Agosto	BehavePlus	0,3764	0,6098	0,42	-0,0122	0,1812	0,9752	
	EMSS	-0,1678	0,9561	0,35	0,2189	0,2761	0,991	
Setembro	BehavePlus	0,3011	0,6442	0,81	0,1456	0,2403	0,9875	
	EMSS	-1,8076	2,2656	0,85	0,1778	0,2569	0,9926	

R²: coeficiente de determinação; MBE: erro médio relativo (*means bias error*); RMSE: raiz quadrada o erro quadrático médio - RMSE (*Root Mean Square Error*); d: índice de ajustamento (d de Willmott). Org.: dos Autores, 2016.

Discussão

Devido às dificuldades e problemas envolvendo a obtenção das variáveis de entrada do BehavePlus e do fato de ser um programa recente (primeira versão criada em 2002), e a versão 5.0.5 ter sido produzida em 2009, não é muito comum encontrar na literatura trabalhos utilizando esta ferramenta (WHITE et al., 2013a), principalmente no que concerne às comparações com resultados de queimas experimentais, pois a maioria realiza somente previsões do comportamento do fogo aplicada à redução do material combustível ou aos incêndios de copa (ALEXANDER; CRUZ, 2013; ALEXANDER et al., 2013).

Outro fator que dificulta o uso do BehavePlus é o uso de modelos customizados, pois as variáveis que caracterizam os combustíveis desempenham um papel fundamental no momento das simulações, sendo necessário ajustar as equações para diminuir esse erro (ANDREWS, 2008; FERNANDES, 2009; ALEXANDER; CRUZ, 2013).

As simulações e validações encontrados na literatura, baseados nos modelos de Byram (1959) e Rothermel (1972) integrados ao módulo “Superfície” no BehavePlus, apresentam resultados divergentes quanto a

capacidade de predição do comportamento do fogo. Hough & Albine (1978), Wagtendonk & Botti (1984) e Glitzenstein et al. (2006) obtiveram simulações satisfatórias, com destaque para pequenas diferenças apenas na velocidade de propagação. Em áreas com *Pinus pinaster* (FERNANDES, 2009), *Adenostoma fasciculatum* (STEPHENS et al., 2008) e *Eucalyptus* spp (WHITE, 2014), as simulações com BehavePlus propiciaram subestimativas do comprimento das chamas e da velocidade de propagação.

As velocidades simuladas pelo BehavePlus foram superestimadas e, somente na posição EF, foram obtidos valores semelhantes ao experimental. Diferentemente deste estudo, Fernandes (2009), em queimas superficiais controladas em plantios de *Pinus pinaster* Ait. encontrou predições imprecisas e pouco correlacionadas com as observações em campo, que, quase sempre, foram subavaliadas pelas simulações. Stephens et al. (2008) encontraram valores de velocidade de propagação simulada subestimadas em 50 a 75% dos valores reais. Fernandes (2009) também obteve simulações da velocidade de propagação do fogo menores do que as observadas através de queimadas experimentais em plantações de *Pinus pinaster* em Portugal, com valores 22% menor do que a observada. White (2014) também encontrou velocidade de propagação simulada subestimada, com velocidade experimental 2,89 vezes maior do que a simulada, porém o autor relata que houve correlação significativa entre os valores ($r = 0,72$), sendo possível desenvolver uma equação de ajuste do modelo de Rothermel (1972) com base nos dados experimentais com um razoável coeficiente de determinação ($R^2 = 0,52$; RMSE = 0,42; $p < 0,0001$).

Independentemente da posição no talhão, as baixas correlações entre velocidades de propagação estimadas e experimentais decorrem dos elevados espalhamentos observados para um mesmo valor da variável independente (RMSE), gerados pelas condições meteorológicas e da umidade do próprio material combustível, indicando que em meses secos (agosto e setembro) ocorreu aumento significativo da velocidade de propagação experimental.

Fernandes (2009) propôs que a umidade do combustível vivo influencia consideravelmente no modelo de Rothermel (1972), sendo que, em geral esse modelo subestima a contribuição da biomassa viva na velocidade de propagação do fogo a favor do vento. A posição EF apresentou menores velocidades de propagação do fogo e maiores percentuais de material vivo herbáceo quando comparada as demais posições, e aliado ao fato de que não foram encontrados materiais combustíveis vivos lenhosos (MVL), têm-se que MVH correspondia a única forma de material combustível vivo, e conseqüentemente a altos teores de umidade para as simulações. Em setembro, foram encontrados os menores valores de umidade do material combustível, fato que deve ter influenciado na melhoria da estimativa no BehavePlus para EF. No modelo EMSS, a umidade do material combustível utilizada é a da classe MS1, que influencia negativamente. Portanto, como em setembro ocorreram menores valores de umidade na classe MS1, também foram observadas melhores projeções estimativas de V, independentemente da posição.

A velocidade do vento e a umidade do material combustível são as variáveis mais utilizadas para medir a velocidade de propagação do fogo, sendo que ambas estão inseridas nos modelos de Rothermel (1972) e de White (2014). Fernandes (2009) utilizou essas duas variáveis na definição da velocidade de propagação do fogo e observou influências positivas (diretamente proporcionais) da velocidade do vento e negativas (inversamente proporcionais) para velocidade de propagação e umidade do material combustível.

Outro fator que pode estar relacionado com as respostas dos *softwares* é a quantidade e densidade de combustíveis. Em julho, foram observadas as menores quantidades e densidades de material combustível. No modelo de Rothermel (1972), adotado no BehavePlus, a velocidade de propagação do fogo é proporcional à razão entre a carga de combustível e o tempo de reação (duração da combustão com chama).

Alguns estudos indicam o efeito dos descritores estruturais do combustível como fator importante na variação das respostas do modelo. Como o avanço do fogo não abrange, simultaneamente, toda a extensão vertical do combustível, o tempo de reação deverá aumentar com a respectiva profundidade, o que resulta numa dependência linear da velocidade com a carga e espessura do combustível (FERNANDES, 2009). Gould et al. (2007) afirmam que o modelo de Rothermel (1972) é excessivamente sensível à espessura do material combustível e visto que essa variável pode ser obtida de forma rápida e visual, torna-se a variável de maior facilidade de acesso (FERNANDES, 2009), exigindo assim maior rigor na sua obtenção. A equação de Rothermel (1972) utiliza a variável densidade do material combustível como um fator negativo para a velocidade de propagação do fogo, ou seja, quanto maior a densidade, menor a velocidade de propagação do fogo. No EMSS, a quantidade de material combustível da classe MS1 e a densidade do leito são duas dentre as três variáveis preponderantes da equação de estimativa da velocidade de propagação (WHITE, 2014).

De acordo com White (2014), alguns modelos para a velocidade de propagação do fogo aplicados em vários países não utilizam a variável densidade do leito em suas projeções, porém a maioria emprega de forma indireta através da mensuração da altura e da carga do material combustível (GOULD et al., 2007).

O fato da intensidade do fogo ser uma variável calculada, não a desqualifica, pelo contrário, consiste em uma das mais importantes variáveis do comportamento do fogo (SOARES; BATISTA, 2007), pois pode ser considerada como a melhor variável para determinar as consequências de um incêndio, definir os efeitos de uma queima controlada e como indicador nas atividades de supressão ao fogo.

Na prática, o comprimento da chama é a variável com maior facilidade de obtenção visando a descrição da energia liberada, e, portanto, é

importante a sua previsão para indicar o comportamento do fogo durante uma queima controlada (FERNANDES, 2009). As simulações no BehavePlus foram subestimadas em junho e julho nas posições EF e EE. Fernandes (2002, 2009) e Stephens et al. (2008), utilizando o BehavePlus encontraram valores de comprimento da chama subestimados em comparação as observações experimentais. White (2014) encontrou valores de comprimento das chamas durante queimas controladas 2,47 vezes superior aos valores simulados. Esse comportamento pode ser decorrente das variações de material combustível nas posições no talhão, visto que o BehavePlus pode ser entendido como um sistema de previsão do comportamento do ponto de combustão, sendo mais indicado para ser usado na análise do crescimento e comportamento do fogo para vegetações homogêneas com dados meteorológicos estáticos, evitando erros nas simulações (ANDREWS, 2008).

Pelo EMSS, todos os valores do comprimento de chama foram maiores que as observações experimentais, com médias superiores a 1,0 m em todos os meses e posições no talhão. Pelo BehavePlus foram obtidas diferenças superiores a 1,0 m entre simulações e experimental apenas na posição EL em setembro. No EMSS, a altura da serrapilheira e a velocidade do vento são os fatores que influenciam positivamente no comprimento das chamas (WHITE, 2014), portanto, o incremento de serrapilheira na estação seca pode ter contribuído nas superestimativas.

Quanto aos desempenhos estatísticos, os espalhamentos observados (RMSE) na velocidade de propagação do fogo variaram de 0,08 a 0,81 m.min⁻¹, com menores valores de RMSE e maiores ajustamentos (d) obtidos com EMSS, independentemente da época do ano e posição no talhão. Para a intensidade do fogo (I), os espalhamentos variam de 56,6 a 206,5 kW.m⁻¹, com maiores ajustamentos obtidos com EMSS. Todavia, quanto ao comprimento de chama (L), os menores desvios médios (MBE) foram obtidos pelo BehavePlus, independentemente da época e da posição no talhão. Os

espalhamentos do comprimento de chama simulado oscilaram de -0,15 a 0,41 m, sendo os ajustamentos superiores a 91%. Os indicativos estatísticos obtidos em junho demonstram que os *softwares* não propiciam boas simulações para queimas controladas a serem realizadas no início da estação seca.

Considerações Finais

Com base nos valores simulados de velocidade de propagação do fogo, intensidade do fogo e comprimento de chama, o mês de julho seria o indicado para a realização de queimas controladas considerando limites de segurança para aplicação da técnica.

Os valores encontrados na interface eucalipto/lavoura (EL) foram os valores mais significativos para os dois *softwares*, sendo que o EMSS apresentou a melhor performance nesta posição.

O BehavePlus superestimou as variáveis do comportamento do fogo quando comparado com as medidas experimentais.

O EMSS apresentou melhor desempenho estatístico e pode ser indicado para simular o comportamento em áreas de *Eucalyptus urograndis*.

Agradecimentos

Aos membros do Grupo de Pesquisa “Interações Ambiente e Planta”. A Empresa Brasil Foods (unidade de Lucas do Rio Verde) pela liberação da área experimental e a todos os funcionários da UPL 03.

Referências

AGER, A. A.; FINNEY, M. A.; KERNS, B. K.; MAFFEI H. Modeling wildfire risk to northern spotted owl (*Strix occidentalis caurina*) habitat in Central Oregon, USA. **Forest Ecology and Management**, v. 246, p. 45-56, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.070>

- ALEXANDER, M. E.; CRUZ, M. G. Limitations on the accuracy of model predictions of wildland fire behaviour: a state-of-the-knowledge overview. **Forestry Chronicle**, v. 89, p. 370-381, 2013. <https://doi.org/10.5558/tfc2013-067>
- ALEXANDER, M. E.; CRUZ M, G.; VAILLANT, N. M.; PETERSON, D. L. **Crown fire behavior characteristics and prediction in conifer forests: a state-of-knowledge synthesis**. Idaho: Joint Fire Science Program, Boise, JFSP 09-S-03-1 Final Report. 2013. 39 p.
- ANDREWS, P. L. **BehavePlus: fire modeling system (user's guide)**. 4 ed. Ogden: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2008. 123 p.
- 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. 48 p. <https://doi.org/10.2737/INT-GTR-129>
- BYRAM, G. M. Combustion of forest fuels. In: Davis KP. **Forest fire - control and use**. p.77-84, 1959.
- FERNANDES P. A. M.; LOUREIRO, C.; PALHEIRO, P.; VALE-GONÇALVES, H.; FERNANDES, M. M.; CRUZ, M. G. Fuels and fire hazard in blue gum (*Eucalyptus globulus*) stands in Portugal. **Boletim del CIDEU**, v. 10, p. 53-61, 2011.
- FERNANDES, P. A. M. Examining fuel treatment longevity through experimental and simulated surface fire behaviour: a maritime pine case study. **Canadian Journal Forest Research**, v. 39, p. 2529-2535, 2009. <https://doi.org/10.1139/X09-145>
- FINNEY, M. A. A computational method for optimising fuel treatment locations. **International Journal of Wildland Fire**, v. 16, p. 702-711, 2007. <https://doi.org/10.1071/WF06063>
- FINNEY, M. A. **FARSITE: Fire area simulator: model development and evaluation**. Ogden: United States Department of Agriculture, Forest Service, 2004. 47 p.
- GLITZENSTEIN, J. S.; STRENG D. R.; ACTEMEIER, G. L.; NAEHER, L. P.; WADE, D. D. Fuels and fire behaviour in chipped and unchipped plots: implications for landmanagement near the wildland/urban interface. **Forest Ecology and Management**, v. 236, p. 18-29, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.06.002>
- GOULD, J. S.; MCCAOW, W. L.; CHENEY, N. P.; ELLIS, P. F.; KNIGHT, I. K.; SULLIVAN, A. L. **Project Vesta-Fire in Dry Eucalypt Forest: fuel structure, fuel dynamics and fire behaviour**. Ensis-CSIRO, Canberra: Department of Environment and Conservation. Perth, WA, 2007. 218 p.
- HOUGH, W. A.; ALBINI, F. A. Predicting Fire Behavior in Palmetto-Gallberry Fuel Complexes. USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, North Caroline, 1978. 44 p.
- KALABOKIDIS, K.; ATHANASIS, N.; VASILAKOS, C.; PALAIOLOGOU, P. Porting of a wildfire risk and fire spread application into a cloud computing environment. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 28, n. 3, p. 541-552, 2014. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.858257>
- KALABOKIDIS, K.; PALAIOLOGOU, P.; GERASOPOULOS, E.; GIANNAKOPOULOS, C.; KOSTOPOULOU, E.; ZEREMOS, C. Effect of climate change projections on forest fire behavior and values-at-risk 15 in Southwestern Greece. **Forests**, v. 6, p. 2214-2240, 2015. <https://doi.org/10.3390/f6062214>
- MISTRY, J. BERARDI, A. Assessing fire potential in a Brazilian Savanna Nature Reserve1. **Biotropica**, v. 37, n. 3, p. 439-541, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.00058.x>
- NOONAN-WRIGHT, E. K.; OPPERMAN, T. S.; FINNEY, A. M.; ZIMMERMAN, T.; SELI, R. C.; ELENZ, L. M.; CALKIN, D. E.; FIEDLER, J. R. Developing the US Wildland Fire Decision Support System. **Journal of Combustion**, p. 1-14, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/168473>
- ROTHERMEL, R. C. **A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels**. Ogden: United States Department of Agriculture, Forest Service, 1972. 40p.

- SCOTT, J. H.; BURGAN, R. E. **Standard fire behavior fuel models**: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, 2005. 72 p. (General Technical Report RMRS-GTR-153).
- SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Incêndios Florestais**: controle, efeitos e uso do fogo. 1ª ed. Curitiba: UFPR, 2007. 264 p.
- SOUZA, A. P.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, A.; GOMES, E. Estimativas das componentes da radiação solar incidente em superfícies inclinadas baseadas na radiação global horizontal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 277-288, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300009>
- STEPHENS, S. L.; WEISE, D. R.; FRY, D. L.; KEIFFER, R. J.; DAWSON, J.; KOO, E.; POTTS, J.; PAGNI, P. J. Measuring the rate of spread of chaparral prescribed fires in Northern California. **Fire Ecology**, v. 4, n. 1, pp.74-86, 2008. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0401074>
- WAGTENDONK, J. W. V.; BOTTI, S. J. Modeling Behavior of Prescribed Fires in Yosemite National Park. *Journal of Forestry*, v. 82, n.6, p. 479-484, 1984.
- WHITE, B. L. A. **Modelagem matemática e avaliação do comportamento do fogo em litorais de eucalipto**. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Sergipe: Universidade Federal de Sergipe. 2014.
- WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, G. T.; SOUZA, R. M. Caracterização do material combustível e simulação do comportamento do fogo em eucaliptais no litoral norte da Bahia, Brasil. **Floresta**, v. 44, n. 1, p. 33-42, 2014. <https://doi.org/10.5380/ufv.v44i1.32977>
- WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, A. S.; RIBEIRO, G. T.; SOUZA, R. M. Building fuel models and simulating their surface fire behavior in the “Serra de Itabaiana” National Park, Sergipe, Brazil. **Floresta**, v. 43, n. 1, p. 27-38, 2013a. <https://doi.org/10.5380/ufv.v43i1.28034>
- 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**, v. 33, n. 73, p. 73-83, 2013b. <https://doi.org/10.4336/2013.pfb.33.73.409>