

Índices de perigo de incêndios em uma área de transição Cerrado-Amazônia

Fire danger indices in the transition area of Cerrado-Amazonia

Bruno Henrique Casavecchia^{1,*}, Adilson Pacheco de Souza², Diego Martins Stangerlin², Eduardo Morgan Uliana² e Rafael Rodolfo Melo³

¹ Instituto de Física/Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

² Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais/ Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil.

³ Departamento de Ciências Agrônômicas e Florestais/ Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Brasil.

(*E-mail: brunohcasavecchiaef@gmail.com)

<https://doi.org/10.19084/rca.17756>

Recebido/received: 2017.10.03

Aceite/accepted: 2019.04.30

RESUMO

Este trabalho avaliou o desempenho de sete índices de perigo de incêndios (Fórmula de Monte Alegre (FMA) e Monte Alegre Modificada (FMA⁺), Nesterov, Telitsyn, Ångstrom, P-EVAP e EVAP/P) em uma área de transição Cerrado-Amazônia, pelo método de Skill Score, baseado em dados climáticos obtidos na estação Gleba Celeste, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e dados de focos de calor do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). O uso do histograma de probabilidade apresentou potencial para definição das classes de risco de incêndios, para os índices de Ångstrom, P-EVAP e EVAP/P. O índice Ångstrom apresentou bons desempenhos em anos com elevado e baixo número de focos de calor (Skill Score de 0,698 e 0,301). A classificação dos índices na região de uso possibilita o melhorar planejamento das ações de prevenção e combate aos incêndios florestais.

Palavras-Chave: proteção florestal; focos de calor; Skill Score

ABSTRACT

This work evaluated the performance of the seven fire risk index (Formula Monte Alegre (FMA) and Monte Alegre Modified (FMA⁺), Nesterov, Telitsyn, Ångstrom, EVAP/P and EVAP-P) In a Cerrado-Amazonia transition area, by the Skill Score method, using data from the Gleba Celeste station of the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), and data fire foci from the Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). The use of the probability histogram showed potential for the definition of fire risk classes for the Ångstrom, P-EVAP and EVAP / P indices. The Ångstrom index showed good performances in years with high and low number of fire foci (Skill Score of 0.698 and 0.301). The classification of the indexes in the region of use makes it possible to improve the planning of actions to prevent and combat forest fires.

Keywords: forest protection; fire foci; Skill Score

INTRODUÇÃO

Incêndios florestais são processos de natureza complexa e estão associados a fatores como o tipo da vegetação, atividades humanas e condições climáticas (Bowman *et al.*, 2009), podendo causar perdas significativas nos âmbitos econômico, ambiental e social (Keeley *et al.*, 2011). Na região central do Brasil, o fogo tem sido utilizado constantemente na conversão da vegetação nativa em áreas para uso agrícola (Domingues e Bernann, 2012; Alves *et al.*, 2017). O Estado de Mato Grosso, inserido nessa região, apresentou entre os anos de 1998 a 2011 um total de 2.128.312 de número de focos de calor (Caúla *et al.*, 2015), podendo estar associadas a intensificação da conversão de área para fazendas produtoras de grãos, gado e extração de madeira (Silva de Souza *et al.*, 2012).

Nos últimos anos, tornou-se crescente a demanda pelo conhecimento do papel do fogo na interação ambiente e atmosfera (Bowman *et al.*, 2009; Alves *et al.*, 2017), pois os incêndios contribuem significativamente para a variabilidade interanual das concentrações de alguns gases e aerossóis em suspensão na atmosfera, dentre os quais destaca-se o dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) (Reddington *et al.*, 2015).

A ocorrência de incêndios depende de diversos fatores, como a tipologia florestal, quantidade e qualidade do material combustível, características topográficas e meteorológicas (umidade relativa, temperatura do ar, velocidade e direção dos ventos, evapotranspiração, precipitação e radiação solar) (Carreiras *et al.*, 2014). Dessa maneira, define-se como perigo de incêndio o resultado dos fatores constantes e variáveis que interferem na deflagração, propagação e dificuldade de combate dos incêndios, assim como os danos causados. Os fatores constantes (declive do terreno, combustível) dependem da localização e quase não variam no tempo, enquanto os fatores variáveis (condições meteorológicas) sofrem mudanças temporais rápidas, mas com poder de afetar áreas extensas de forma similar (Cheney e Gould, 1995).

Os índices de perigo de incêndios foram desenvolvidos correlacionando parâmetros de solo, vegetação, material combustível e variáveis meteorológicas com a ocorrência de incêndios florestais (Li *et al.* 2013), e

como nem todos essas variáveis são de fácil obtenção (Cheney e Gould, 1995), é preferível o uso de variáveis meteorológicas e do material combustível como dados de entrada dos índices.

O clima é o principal fator que influencia a dinâmica dos incêndios, pois determina o teor de umidade e o acúmulo do material combustível, além da umidade e temperatura local (Viney, 1991). Assim, alguns índices avaliam a umidade do material combustível com uso de algoritmos (Nesterov, 1949; Keetch e Byram, 1968; Käse, 1969), já outros utilizam somente da temperatura, umidade e precipitação (Angström, 1949; Bruscek, 1994; Soares, 1998; Sharples *et al.*, 2009a). O vento é um fator importante na atividade do fogo sendo também utilizado em determinados índices (Haines, 1988; Brotak, 1991; Nunes *et al.*, 2006).

Como estratégia de prevenção e combate de incêndios florestais, diferentes índices são utilizados em todo mundo, dependendo das características climáticas de cada local. No Canadá o Fire Weather Index (FWI) (Van Wagner, 1987) foi construído baseado na precipitação, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura diária, sendo muito utilizado em países da Europa (Venäläinen *et al.*, 2014), como França, Itália e Portugal (Viegas *et al.*, 1999). Na Austrália dois índices se destacam, o Forest Fire Danger Index (FFDI) (McArthur, 1967) que utiliza a precipitação, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura diária, e o Forest Fire Behaviour Table (FFBT) (Beck, 1995) que considera a umidade e quantidade do material combustível, além da velocidade do vento dentro da floresta próxima ao solo. O National Fire Danger Ratings System (NDFRS) (Bradshaw *et al.*, 2016) é o índice oficial dos Estados Unidos, e utiliza como parâmetros de entrada características do material combustível, clima, topografia e riscos. Na Europa, pela adversidade climática diferentes índices foram desenvolvidos. Na França o índice Numerical Risk (Drouet e Sol, 1993) requer a velocidade do vento, umidade relativa e temperatura do ar, cobertura de nuvens e as condições iniciais do solo. No noroeste da Itália, Bovio *et al.* (1984) desenvolveu o índice IREPI que através das estimativas da evapotranspiração é aplicado para estimar o espalhamento do fogo, utilizando da umidade relativa e temperatura do ar, a chuva acumulada nas últimas 24 horas, velocidade do vento e radiação direta. Na Espanha

é utilizado para estimar o risco de ignição o índice ICONA (ICONA, 1993) que se baseia na umidade do material combustível fino e serrapilheira, os quais são bastante sensível as variações meteorológicas e estimados através da umidade relativa e temperatura do ar. Em Portugal é utilizado o índice Canadian Wildland Fire Information System (FWI) (Van Wagner, 1987), calculado através dos parâmetros meteorológicos observados às 12 UTC - temperatura, umidade relativa, intensidade do vento e precipitação acumulada nas últimas 24 horas (12 às 12 UTC). No Brasil o índice Fórmula de Monte Alegre (FMA) (Soares *et al.*, 1998) tem sido muito usado, e leva em conta a precipitação e umidade relativa do ar como variáveis de entrada. Em Moçambique, África, Mbanze *et al.* (2017) analisaram o desempenho dos índices de Nesterov (N) e Fórmula de Monte Alegre (FMA) e concluíram que o índice de Nesterov apresentou o melhor desempenho, no entanto, sugeriram a necessidade de calibração de FMA devido a diferença climática entre Moçambique e a região de origem da FMA.

O Brasil possui dimensões continentais e clima diversificado, por esse motivo não é possível aplicar um único índice em todo território sem nenhuma adaptação, dessa maneira diversos autores vem testando diversos índices em varias regiões do Brasil. Torres e Ribeiro (2008) analisaram a eficiência dos índices de Angström (B), Telitsyn (I), Nesterov (N), taxa acumulativa da Precipitação menos Evapotranspiração (P-EVAP) e Evapotranspiração dividido pela Precipitação (EVAP/P), Formula de Monte Alegre (FMA) e Formula de Monte Alegre Alterada (FMA⁺) para o município de Juiz de Fora-MG. Eles encontraram maior eficiência do índice EVAP/P para o ano completo e o período fora da estação normal do fogo, e dentro da estação do fogo o índice de Telitsyn, com dados medidos as 15 horas, foi o mais eficiente.

Em plantios de Eucalipto, no norte do estado do Espírito Santo – Brasil, Borges *et al.* (2011) avaliaram a eficiência dos índices de Nesterov (N), Fórmula de Monte Alegre (FMA) e Fórmula de Monte Alegre Modificada (FMA⁺), encontrando maior eficiência para a Fórmula de Monte Alegre Modificada.

Nas regiões norte e nordeste da Amazônia matogrossense, Souza *et al.* (2012) utilizaram os dados

do sistema NOAA/AVHRR “National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer”, juntamente com os índices da Fórmula de Monte Alegre (FMA) e Fórmula de Monte Alegre modificada (FMA⁺), concluíram que FMA⁺ apresentou melhor desempenho para avaliação dos riscos de incêndios nessas regiões, pois o acréscimo da velocidade do vento ao modelo, o tornou mais sensível após dias com ocorrências de chuvas.

No Bioma Pantanal, Soriano *et al.* (2015) testaram a eficiência dos índices de Angström (B), Índice Logarítmico de Telitsyn (I), Índice de Nesterov (G), Fórmula de Monte Alegre (FMA) e Fórmula de Monte Alegre Modificada (FMA⁺) com dados de focos de incêndios dos satélites NOAA12-noturno e o NOAA15-noturno, concluindo a maior eficiência da Fórmula de Monte Alegre no Bioma Pantanal.

Torres *et al.* (2017) testou a eficiência de sete índices de risco de incêndio (Fire Weather Index (FWI), Índice de Telitsyn (I), Índice de Nesterov (N), taxa acumulativa da Precipitação menos Evapotranspiração (P-EVAP) e Evapotranspiração dividido pela Precipitação (EVAP/P), Formula de Monte Alegre (FMA) e Formula de Monte Alegre Alterada (FMA⁺) para o município de Viçosa-MG, localizado no Bioma Mata Atlântica. Eles concluíram que o índice FWI tem alta correlação com o somatório de focos de incêndios registrados no mês, porém o índice de Telitsyn é mais eficiente nos acertos diários de ocorrência de focos de incêndios.

Apesar do Brasil ser considerado um país continental, a sua rede de monitoramento meteorológica é falha, apresentando baixa densidade de estações principalmente nas regiões do centro e norte do país. Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar sete índices de perigo de incêndio (Fórmula de Monte Alegre (FMA) (Soares, 1984), Formula de Monte Alegre Modificada (FMA⁺) (Nunes *et al.* 2006), Ångstrom (B) (Ångstrom, 1949), Telitsyn (I) (Soares, 1984), Nesterov (G) (Nesterov, 1949) e as relações da precipitação com evapotranspiração (P-EVAP e EVAP/P) (Torres e Ribeiro, 2008)) que possuem como variável de entrada somente dados meteorológicos de fácil obtenção, em uma área de transição Cerrado-Amazônia do Estado de Mato Grosso, Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

O estudo foi realizado em uma área de transição Cerrado-Amazônia (Figura 1) do Estado de Mato Grosso, considerando como base a região dos municípios de Sinop (11,98°S; 55,56° W e altitude média de 371m) e Vera (12,20°S; 56,50°W e altitude média de 415m). Os dois municípios se distanciam em aproximadamente 80 km e possuem caracterização climática similar, definida por duas estações: seca (maio a setembro) e chuvosa (outubro a abril). Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo tropical de savana, com chuvas médias em torno de 1974 mm (Souza *et al.*, 2013).

Série de Dados

Os dados meteorológicos foram obtidos da rede de estações convencionais do Instituto Nacional

de Meteorologia (INMET), estação Gleba Celeste (coordenada central 12,29°S; 55,29°W e altitude média de 415m à 80km de Sinop e 1km de Vera; (Código OMM: 83264)). Foram utilizados dados na escala diária da temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), chuva (mm) e velocidade do vento ($m s^{-1}$), coletados no período de 1972 a 2010. Os dados estão disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP -www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/inicio.php).

Para análise de consistência dos dados aplicou-se boxplots e regressão linear, excluindo os valores discrepantes, com base em estações meteorológicas próximas do local de estudo. Para correção de falhas pontuais na base de dados foram ajustados modelos de regressão linear (Vicente-Serrano *et al.*, 2010) com dados coletados no mesmo dia na estação Gleba Celeste e as estações próximas a ela. Entre os anos de 1990 e 1997, os sensores da estação Gleba Celeste ficaram desativados gerando um grande

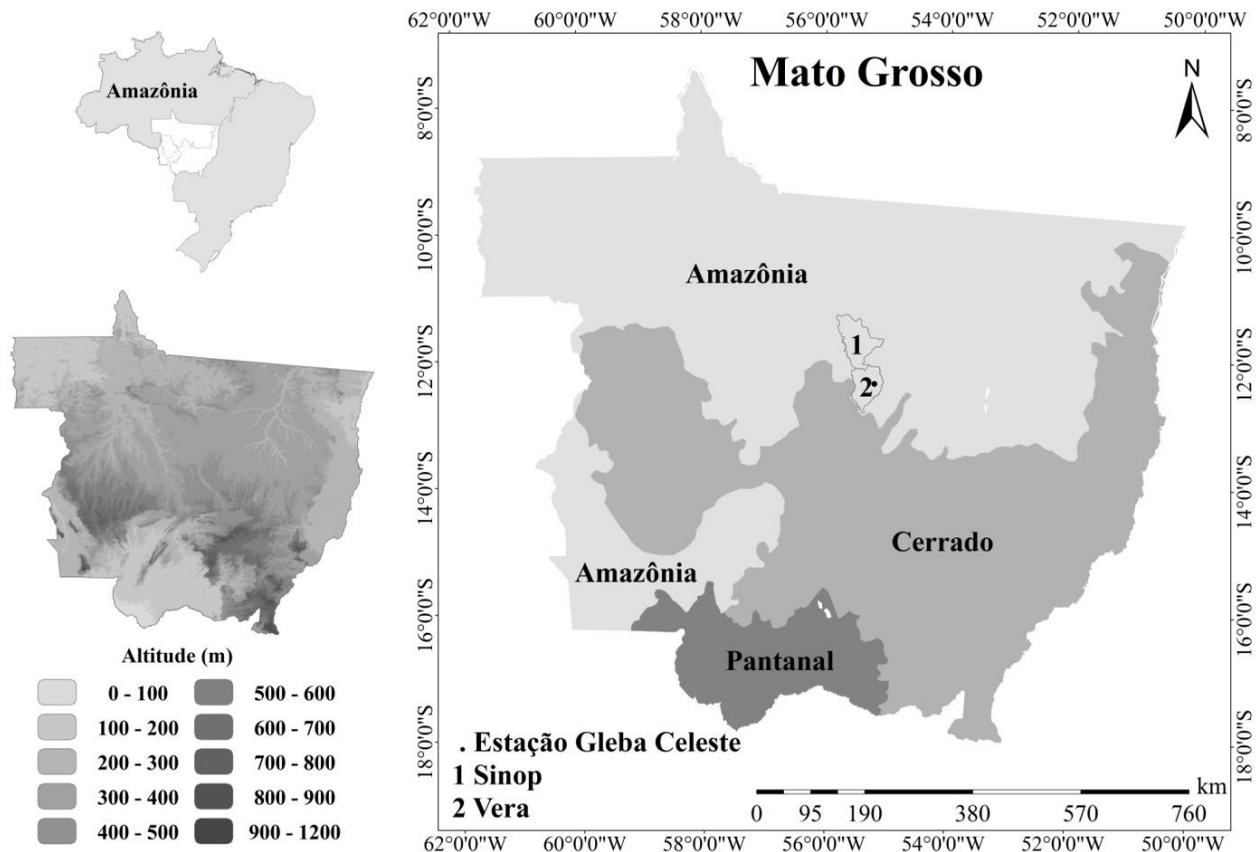


Figura 1 - Mapa do estado de Mato Grosso com a localização dos municípios de Sinop e Vera-MT.

intervalo de falha, por esse motivo optou-se por excluir esses anos da análise dos índices, inviabilizando o uso de dados de estações vizinhas para correção desta falha, principalmente pelas precipitações locais serem do tipo convectivas (Souza *et al.*, 2013) e influenciarem diretamente nos índices.

Índices de perigo de incêndios

Fórmula de Monte Alegre – índice acumulativo, tem como variáveis a umidade relativa do ar e a precipitação diária (Soares, 1984). O índice está sujeito a restrições de precipitação (Quadro 1).

$$FMA = \sum_{i=1}^n (100 / Hi) \quad (\text{Equação 1})$$

em que: FMA = Fórmula de Monte Alegre; Hi = umidade relativa do ar (%), medida às 13h; n = número de dias sem chuva maior ou igual a 13 mm.

A interpretação do grau de perigo estimado pela Fórmula de Monte Alegre (FMA) é realizada por meio de algumas restrições (Quadro 1), interpretado pelas classes de perigo do Quadro 2.

Formula de Monte Alegre Modificada – A FMA⁺ (Nunes *et al.*, 2006) é acumulativo, tem como variáveis a umidade relativa do ar, e a velocidade vento medidas às 13h.

$$FMA^+ = \sum_{i=1}^n (100/Hi) e^{0,04v} \quad (\text{Equação 2})$$

em que: FMA⁺ = Fórmula de Monte Alegre modificada; Hi = umidade relativa do ar (%) mediada as 13h; v = velocidade do vento em m/s, medida às 13h; n = número de dias sem chuva maior ou igual a 13 mm; e = base dos logaritmos naturais (2,718282).

As restrições e interpretações da FMA⁺ estão contidas nas Quadros 1 e 2.

Quadro 2 - Classes de perigo de incêndios

Grau de Perigo	FMA	FMA ⁺	Telitsyn	Nesterov
Nulo	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 2	≤ 300
Pequeno	1,1 a 3,0	3,1 a 8,0	2,1 a 3,5	301 a 500
Médio	3,1 a 8,0	8,1 a 14,0	3,6 a 5,0	501 a 1000
Alto	8,1 a 20,0	14,1 a 24,0	> 5,0	1001 a 4000
Muito Alto	> 20,0	> 24,0	-	> 4000

Índice de Ångstrom – Utiliza a temperatura e na umidade relativa do ar, ambos medidos diariamente às 13h, não sendo acumulativo (Ångström, 1949).

$$B = 0,05H - 0,1(T - 27) \quad (\text{Equação 3})$$

em que: B = índice de Ångstrom; H = umidade relativa do ar (%). T = temperatura do ar (°C).

Quadro 1 - Restrições das metodologias

Chuva do dia (mm)	FMA
≤ 2,4	Nenhuma
2,5 a 4,9	Abater 30% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
5,0 a 9,9	Abater 60% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
10,0 a 12,9	Abater 80% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
> 12,9	Interromper o cálculo (FMA = 0) e recomeçar a somatória no dia seguinte.
Nesterov e P - EVAP	
≤ 2,0	Nenhuma
2,1 a 5,0	Abater 25 % no valor de G calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
5,1 a 8,0	Abater 50 % no valor de G calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
8,1 a 10,0	Abandonar a somatória anterior e recomeçar novo cálculo, isto é, G = (d.t) do dia.
> 10,0	Interromper o cálculo (G=0), recomeçando a somatória no dia seguinte ou quando a chuva cessar.
P/EVAP	
< 1,0	Não entra no cálculo
1,0-15,0	Dividir a EVAP/P da véspera pela chuva do dia
>15	Interromper o cálculo, e recomeçar no dia seguinte ou quando a chuva cessar. No dia da chuva EVAP/P=0,00

Quando valor de “B” for menor do que 2,5 há perigo de incêndio.

Índice de Telitsyn – utiliza a temperatura do ar e do ponto de orvalho, ambas medidas às 13h. O índice é acumulativo e sempre que ocorrer precipitação igual ou superior a 2,5 mm finaliza-se o somatório e recomeça o cálculo no dia seguinte, ou quando a chuva cessar (Soares, 1984).

$$I = \sum_{i=1}^n \log(ti - ri) \quad (\text{Equação 4})$$

em que: I = índice de Telitsyn; ti = temperatura do ar (°C); ri = temperatura do ponto de orvalho (°C); log = logaritmo na base 10; n = número de dias sem chuva.

A interpretação do grau de perigo do índice de Telitsyn segue na Quadro 2.

Índice de Nesterov – utiliza a temperatura e o déficit de saturação do ar, ambos medidos diariamente às 13h (Nesterov, 1949).

$$G = \sum_{i=1}^n di ti \quad (\text{Equação 5})$$

em que: G = Índice de Nesterov; di = déficit de saturação do ar em milibares; n = número de dias sem chuva menor que 10,0 mm.

O déficit de saturação do ar é calculado pela Equação 6.

$$di = E(1 - H / 100) \quad (\text{Equação 6})$$

em que: E = pressão máxima de vapor d’água em milibares; H = umidade relativa do ar em porcentagem.

As restrições e interpretação do índice de Nesterov seguem nos Quadros 1 e 2.

Precipitação – evaporação – índice acumulativo (Torres e Ribeiro, 2008), sendo ambas variáveis medidas diariamente em mm. O índice utiliza as restrições do índice de Nesterov (Quadro 1).

$$P - EVAP = \sum_{i=1}^n P - EVAP \quad (\text{Equação 7})$$

em que: P = precipitação total diária (mm); Evap = evaporação potencial diária (mm); n = número de dias com chuva <15 mm.

Evaporação / precipitação – o índice sendo ambas variáveis medidas diariamente em mm (Torres e Ribeiro, 2008). As restrições do índice se encontram no Quadro 1.

$$EVAP / P = \sum_{i=1}^n \frac{EVAP}{P} \quad (\text{Equação 8})$$

Para calcular a evaporação potencial, considerou-se como referência a evapotranspiração potencial obtida pelo modelo de Camargo et al. (1999) (Equação 9), por depender de poucos dados de entrada e apresentar bons resultados na região de estudo (Tanaka et al., 2016).

$$ET_o = F \times H_o \times T_{med} \quad (\text{Equação 9})$$

em que: F = fator de correção do modelo; H_o = radiação extraterrestre; T_{med} = temperatura média diária.

Desempenho dos índices

Apesar da existência e validação de diferentes métodos para comparação dos índices de perigo de incêndio como a Distância de Mahalanobis (Der Mégréditchian, 1981), Método do Percentil (Andrews et al., 2003), Método de Ranqueamento do Percentil (Eastaugh et al., 2012) e o método das Características Operacionais Relativas (ROC) (Karouni et al., 2013), neste estudo optou-se pelo método de Skill Score (SS) (Torres e Ribeiro, 2008). Este método consegue distinguir e ponderar os acertos dos índices para dias com e sem incêndios, por esse motivo vem sendo muito utilizado em estudos de comparação de índices no Brasil.

O Skill Score (SS) tem como referência uma tabela (Quadro 3) de contingência, contendo valores observados e valores previstos para um evento em uma população.

Quadro 3 - Tabela de contingência do Skill Score

Previsto	Observado		Total Previsto
	Incêndio	Não Incêndio	
Incêndio	a	b	N2 = a + b
Não Incêndio	c	d	N4 = c + d
Total Previsto	N1 = a + c	N3 = b + d	N = a + b + c + d

*As variáveis necessárias para a realização dos cálculos são:

N - número total de observações. $N = a + b + c + d$;

G - número de acertos na previsão. $G = a + d$;

p - probabilidade de ter pelo menos um evento por dia. $p = N1 / N$

q - probabilidade de exceder o valor limite do índice. $q = N2 / N$

H - número esperado de acertos. $H = N * (1 - p) * (1 - q) + N * p * q$;

SS - Skill Score. $SS = (G - H) / (N - H)$;

PS - porcentagem de sucesso. $PS = G / N$;

Acerto nas previsões de ocorrências de incêndios = $a / N2$;

Acerto nas previsões de não ocorrências = $d / N4$.

Para calcular o Skill Score considerou-se os valores dos índices nas classes de risco IV e V (alto e muito alto), como dias previstos para ocorrência de incêndio, e as demais classes de risco (I a III) para previsão de não ocorrência de incêndios. Os valores dos dias observados com ocorrência ou não de incêndios foram extraídos da base de observações de focos de calor do Banco de Dados de Queimadas (BDQueimadas) do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC; <http://pirandira.cptec.inpe.br/queimadas/>) – (CPTEC, 2012).

Neste trabalho foram utilizadas as séries de dados dos satélites meteorológicos do NOAA. Por utilizarem o sensor AVHRR, os satélites da série NOAA, realizam medições nas bandas do espectro do visível e infravermelho, com resolução espacial de 1

km, resultando em milhares de medições diárias (Caúla *et al.*, 2016). O sensor AVHRR tem capacidade de gravar temperaturas acima de 47 °C, detectando áreas queimadas com mínimo de 900 m² (Caúla *et al.* 2015).

Dias em que os satélites registraram focos de calor foram considerados como dado observado de ocorrência de incêndios, e quando não observado focos de calor foi considerada como dado observado de não ocorrência de incêndios. Para aplicação do teste de Skill Score, foram escolhidos os anos de 2004 e 2009, pois apresentaram o maior e menor número de focos de calor acumulados, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comportamento dos índices FMA e FMA+

Os índices padrões utilizados no Brasil são o FMA e FMA+, por esse motivo no Quadro 4 estão apresentadas as distribuições em percentual de dias nas diferentes classes de perigo de incêndio desses índices.

Optou-se por apresentar a distribuição somente desses dois índices para demonstrar o padrão da periculosidade de incêndios nesta região, e também por esses índices serão utilizados como parâmetro de calibração de índices que não foram desenvolvidos para as condições climáticas brasileiras.

Quadro 4 - Percentuais de ocorrência das classes de risco de incêndios nas quatro últimas décadas, indicadas pelos índices FMA e FMA+, obtido com dados de umidade relativa média diária registrados na estação Gleba Celeste, Vera-MT

Meses	Classes de Perigo de Incêndio									
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
	FMA					FMA+				
Janeiro	26,25	42,75	26,00	5,25	0,00	66,75	27,25	5,50	0,75	0,00
Fevereiro	31,75	43,75	20,75	4,00	0,00	73,50	22,25	4,00	0,25	0,00
Março	24,00	38,25	31,00	6,25	0,00	62,25	30,50	6,25	1,00	0,00
Abril	10,00	24,00	35,50	26,25	4,50	33,00	34,75	18,25	12,00	1,75
Mai	2,00	5,00	15,50	35,00	42,25	7,00	14,25	18,00	24,50	36,00
Junho	0,50	1,25	3,00	8,75	86,25	1,75	3,00	3,50	8,75	82,75
Julho	0,50	0,75	1,75	3,00	94,00	1,25	1,75	1,50	2,25	93,50
Agosto	1,00	1,50	2,25	4,25	90,75	2,25	2,25	2,50	2,50	90,00
Setembro	5,75	7,50	10,25	14,50	62,50	12,25	9,75	7,00	11,25	59,75
Outubro	18,25	29,75	27,00	16,75	8,00	47,00	26,25	12,75	7,75	6,00
Novembro	24,50	42,75	27,50	5,25	0,50	65,00	28,50	5,50	1,00	0,25
Dezembro	28,75	42,75	26,50	1,50	0,00	70,75	26,50	2,75	0,00	0,00

Classes de perigo: I – nulo; II – pequeno; III – médio; IV – alto; e V – muito alto.

Nos meses de novembro a abril o percentual de dias classificados com perigo alto e muito alto, para ambos os índices, foram relativamente baixos, pois segundo Souza *et al.* (2013) nesse período concentra-se as chuvas nesta região, e consequentemente os dias possuem alta umidade relativa (UR) do ar. O mesmo padrão de distribuição das classes de perigo de incêndio dos índices FMA e FMA+ também foram encontrados por Souza *et al.* (2012), para as regiões Norte e Noroeste do estado de Mato Grosso, Brasil. Já os meses de maio a setembro apresentaram maior percentual de dias nas classes de perigo alto e muito alto, pois nesse período as precipitações são raras, diminuindo a umidade do material combustível e aumentando o perigo de incêndios (Li *et al.*, 2014).

Segundo Nunes *et al.* (2013), para a FMA, existe uma condição não desejável para o comportamento do número de dias previstos, visto que a mesma não segue uma tendência decrescente da classe nulo para muito alto (condição esperada para esse índice). Esse comportamento pode indicar que FMA encontra-se desajustada para a região. Todavia, a distribuição decrescente observada para FMA+ é mais realista e interessante para descrever o comportamento do número de dias previstos nas diferentes classes de perigo, corroborando com Souza *et al.* (2012).

Proposta de classificações de risco para índices

Os índices de Ångstrom, P-EVAP e EVAP/P não possuem classificação de perigo de incêndio, deste modo foi aplicado o método dos histogramas de probabilidade (Figura 2), os quais representam a frequência de ocorrência dos valores em relação a sua probabilidade de incêndios.

Para P-EVAP e EVAP/P as distribuições apresentaram comportamento exponencial crescente e decrescente, respectivamente. Segundo Tucci (2009) esses tipos de comportamentos de funções de distribuição de determinado evento acontecem pela dependência dos valores anteriores, ou seja, os valores desses índices se acumulam principalmente pela sequência de dias sem chuvas na região.

Baseada nos estudos de Souza *et al.* (2012) realizados na região Norte e Noroeste do estado de

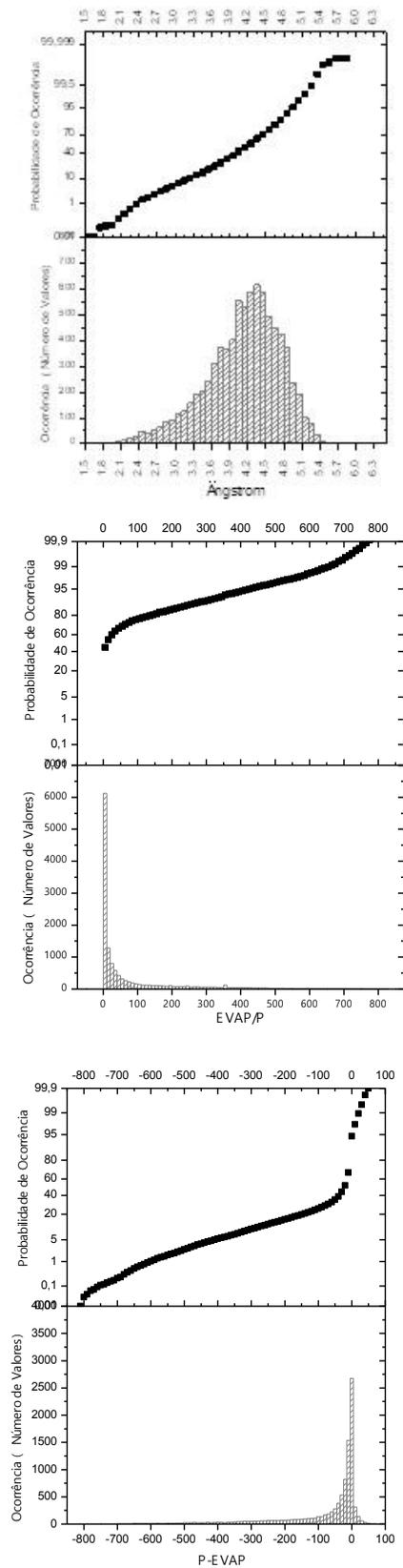


Figura 2 - Histogramas de probabilidade de ocorrência dos índices gerados por Ångstrom, P-EVAP e EVAP/P.

Mato Grosso, foi utilizado a distribuição dos dias nas classes de perigo de incêndio de FMA⁺ para a construção e ajustes das classes dos índices de Ångstrom, P-EVAP e EVAP/P (Quadro 5).

Quadro 5 - Percentuais dos dias nas classes de risco de incêndios

Classes de Perigo	Percentual de Dias nas Classes				
	FMA	FMA ⁺	Ångstrom	P-EVAP	EVAP/P
Nulo	14,51	36,69	29,18	32,35	33,31
Pequena	23,20	19,66	19,4	15,38	17,73
Média	19,54	7,53	15,65	13,52	11,16
Alta	11,12	5,98	20,62	10,61	7,95
Muito Alta	31,63	30,13	15,15	28,15	29,85

Com a nova classificação, foram distribuídos os percentuais de dias nas diferentes classes (Quadro 5), mantendo em torno de 36% o total de dias das classes de perigo IV e V (alta e muita alta), gerando o condicional de cada classe dos índices (Quadro 6).

Quadro 6 - Classes dos índice de risco de incêndio

Classes de Perigo	Ångstrom	P-EVAP	EVAP/P
Nulo	>4,5	> -5	< 11
Pequena	4,5 - 4,2	-5 - -15	11 - 30
Média	4,2 - 4,0	-15 - -35	30 - 56
Alta	4,0 - 3,5	-35 - -75	56 - 93
Muito Alta	<3,5	< -75	> 93

Desempenho dos índices

Para avaliar o desempenho dos índices utilizou-se os dados de focos de calor registrado no município de Sinop-MT, pois não existe série de dados de incêndios urbanos, rurais ou florestais registrados na área desse município, então usou-se os dados da estação Gleba Celeste (Vera-MT). No município de Sinop-MT, o BDQueimadas registrou 18.018 focos de calor entre 1998 a 2012 (Quadro 7). Os anos de 2004 e 2009 apresentaram o maior e menor número de registros de focos de calor (32,6 e 1,1% do total, respectivamente), possivelmente pela abertura de novas áreas para pecuária e lavouras de soja e milho (Souza *et al.*, 2013; Caúla *et al.*, 2016), e a distribuição de lotes da reforma agrária (IBGE, 2012). Com isso os anos de 2004 e 2009 foram escolhidos para o cálculo de Skill Score.

Na avaliação do desempenho da predição de focos de calor para o ano de 2004, o índice de Telitsyn apresentou o melhor desempenho nos acertos das ocorrências de incêndios (94,89%) (Quadro 7). O índice de Ångstrom apresentou melhor desempenho para não ocorrência de incêndios (74,72%) e acertos em geral (84,97%). Pelo Skill Score, o melhor desempenho geral foi dado pelo índice de Ångstrom. Para 2009, o índice de Telitsyn obteve melhor desempenho nos acertos das ocorrências de incêndios (52,44%), enquanto para não ocorrência Ångstrom apresentou 89,19% de sucesso, e na percentagem de sucesso geral o índice de Telitsyn

Quadro 7 - Número de focos de calor registrados no município de Sinop entre os anos de 1998 a 2012

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
1998	0	0	0	0	0	225	65	87	58	15	0	5	455
1999	1	2	0	2	46	301	168	253	71	50	8	0	902
2000	0	0	7	3	108	266	7	80	15	122	8	18	634
2001	5	7	7	71	240	386	107	87	198	242	18	7	1375
2002	21	13	34	123	328	394	152	168	328	325	125	33	2044
2003	11	8	12	25	157	526	546	208	421	72	67	22	2075
2004	5	1	7	22	719	2141	1025	436	955	494	55	7	5867
2005	11	10	4	20	274	191	140	161	303	429	21	2	1566
2006	18	7	8	4	34	45	142	99	256	127	37	0	777
2007	6	2	24	7	100	125	72	69	224	64	20	1	714
2008	3	8	4	6	0	32	99	76	57	126	19	1	431
2009	2	10	20	2	26	25	27	11	12	35	30	3	203
2010	20	26	47	37	32	5	81	60	69	69	14	2	462
2011	2	4	13	25	27	14	3	39	98	32	15	7	279
2012	1	6	15	14	25	30	18	52	31	26	8	8	234

Quadro 8 - Porcentagem (%) de sucesso e valores de Skill Score dos índices de perigo de ocorrência de incêndio para o ano de 2004 e 2009

Índices	Porcentagem de sucesso em 2004			Skill Score	Porcentagem de sucesso em 2009			Skill Score
	Acerto Ocorrência	Acerto Não Ocorrência	Geral		Acerto Ocorrência	Acerto Não Ocorrência	Geral	
FMA	91,56	61,32	74,04	0,498	47,47	82,13	67,12	0,307
FMA ⁺	94,57	57,38	70,49	0,446	51,26	79,27	70,14	0,310
Ångstrom	94,68	74,72	84,97	0,698	44,24	89,19	62,47	0,301
P-EVAP	93,28	57,76	70,77	0,448	47,48	79,65	67,40	0,282
EVAP/P	92,03	57,89	70,77	0,445	42,00	77,21	62,74	0,199
Nesterov	85,96	62,77	74,04	0,484	44,19	81,35	63,84	0,260
Telitsyn	94,89	59,39	72,68	0,482	52,44	75,62	70,41	0,248

foi melhor. Todavia, pelo Skill Score, os melhores desempenhos foram dados pelos índices FMA, FMA⁺ e Ångstrom.

No geral o índice de Ångstrom apresentou o melhor desempenho, mostrando que a distribuição de classes de risco proposta neste trabalho foi adequada.

Nunes *et al.* (2013) encontraram desempenho superior para FMA⁺ quando comparada com FMA, sendo que nesse caso, obtiveram valores de Skill Score de 0,1165 e 0,0517 para FMA⁺ e FMA. Os autores, atribuíram o pior desempenho da FMA ao desajuste das classes para a região, confirmando os relatos de Borges *et al.* (2011).

Os fatores que interferem no desempenho dos índices estão ligados provavelmente pela mudança nos regimes de chuva e conseqüentemente da UR ao longo do ano (Nunes *et al.*, 2013). As chuvas, mesmo quando em pequenas quantidades, podem elevar a umidade do material combustível rapidamente, impedindo o início da combustão (Soriano *et al.*, 2015). O fato do índice de Ångstrom não ser acumulativo, propicia maior sensibilidade aos baixos valores de chuva, isso resulta em maiores acertos para dias com ausência de registro de focos de calor. No entanto Schunk *et al.* (2017) ao comparar o desempenho de diferentes índices na Alemanha, encontrou baixa correlação da umidade do material combustível fino com o índice de Ångstrom, mostrando que para aquela região o índice de Ångstrom pode ter erros para predição de dias com alta probabilidade de ocorrência de incêndios. Torres & Ribeiro (2008) encontrou melhor desempenho para o índice EVAP/P baseado nos valores de Skill Score ao longo de todo o ano e período

fora da estação normal de fogo, enquanto o índice Telitsyn foi o mais eficiente dentro da estação normal, para região de Juíz de Fora-MG.

É importante destacar a necessidade de ajustes regionais dos índices com base nas condições climáticas (Borges *et al.*, 2011), para evitar a tomada de decisões equivocadas em relação aos procedimentos de prevenção e combate aos incêndios florestais (Nunes *et al.*, 2013). Além disso, nos estudos dos índices deve aplica-los diariamente e registrar a ocorrência ou não de incêndios, permitindo controle instantâneo da área preparando adequadamente as pessoas para diferentes cenários de fogo esperados (Hamadeh *et al.*, 2017).

CONCLUSÃO

Os índices de risco Fórmula de Monte Alegre (FMA) e Monte Alegre modificada (FMA⁺) apresentam dependência cumulativa do número de dias sem chuvas, om isso podem ocasionar erros de predição quando da ocorrência de menores acumulados de chuvas. A adoção de histogramas de frequência para elaboração das classes de risco de ocorrência de incêndios, é uma ferramenta com grande potencial para ser utilizada na elaboração de novas classes e/ou ajustes regionais. O índice de Ångstrom apresentou os melhores desempenhos para predição de dias com e sem ocorrência de focos de calor, sendo recomendado para a região de Sinop-MT. É importante destacar a necessidade de ajustes regionais dos índices de risco de incêndios, antes de aplicações em regiões diferentes as quais foram gerados e validados. Dessa forma, podem ser considerados como boas ferramentas para gestão e combate de incêndios florestais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, L.J.S.; Souza A.P.; Stangerlin, D.M.; Casavecchia, B.H.; Carmo, F.H.D.J.; Bouvié, L.; Borella, D.R.; Dias, T.K.R.; Silva, C.C.; Martim, C.C. & Ferneda, B.G. (2017) – Fire behavior in *Eucalyptus urograndis* (Clone H13) Forest in Cerrado-Amazon Transition, Brazil. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 11, n. 4, p. 60-71.
- Andrews, P.L.; Loftsgaarden, D.O. & Bradshaw, L.S. (2003) – Evaluation of fire danger rating indexes using logistic regression and percentile analysis. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 12, n. 2, p. 213-226. <https://doi.org/10.1071/WF02059>
- Angström, A. (1949) – *Swedish meteorological research*. Tellus A1, p. 1939-1948.
- Beck, J.A. (1995) – Equations for the forest fire behaviour tables for Western Australia. *CALM Science*, vol. 1, n. 3, p. 325-348.
- Borges, T.S.; Fielder, N.C.; dos Santos, A.R.; Loureiro, E.B. & Mafia, R.G. (2011) – Desempenho de alguns índices de incêndios em plantios de Eucalipto no norte do Espírito Santo. *Floresta e Ambiente*, vol. 18, n. 2, p. 153-159. <http://dx.doi.org/10.4322/loram.2011.033>
- Bovio, G.; Quaglino, A. & Nosenzo, A. (1984) – Individuazione di un indice di previsione per il pericolo di incendi boschivi. *Monti e Boschi*, vol. 35, n. 4, p. 39-44.
- Bowman, D.M.J.S.; Balch, J.K.; Artaxo, P.; Bond, W.J.; Carlson, J.M.; Cochrane, M.A.; D'Antonio, C.M.; DeFries, R.S.; Doyle, J.C.; Harrison, S.P.; Johnston, F.H.; Keeley, J.E.; Krawchuk, M.A.; Kull, C.A.; Marston, J.B.; Moritz, M.A.; Prentice, I.C.; Roos, C.I.; Scott, A.C.; Swetnam, T.W.; van der Werf, G.R. & Pyne, S.J. (2009) – Fire in the Earth System. *Science*, vol. 324, n. 5926, p. 481-484. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1163886>
- Bradshaw, L.S.; Deeming, J.E.; Burgan, R.E. & Cohen, J.D. (2016) – *The 1978 National Fire-danger Rating System: Technical Documentation*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station Available on line. [cit. 2018-01-08]. http://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr169.pdf
- Brotak, E.A. (1991) – Low-level temperature, moisture, and wind profiles preceding major wildland fires. In: *Proceedings of the 11th Conference on Fire and Forest Meteorology*. Society of American Foresters. Bethesda, MD, USA, p. 503-510.
- Camargo, A.P.; Marin, F.R.; Sentelhas, P.C. & Picini, A.G. (1999) – Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, vol. 7, n. 2, p. 251-257.
- Carreiras, M.; Ferreira, A.J.D.; Valente, S.; Fleskens, L.; Gonzales-Pelayo, O.; Rubio, J.L.; Stoof, C.R.; Coelho, C.O.A.; Ferreira, C.S.S. & Ritsema, C.J. (2014) – Comparative analysis of policies to deal with wildfire risk. *Land Degradation & Development*, vol. 25, n. 1, p. 92-103. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2271>
- Caúla, R.H.; Oliveira-Júnior, J.F.; Gois, G.; Delgado, R.C.; Pimentel, L.C.G. & Teodoro, P.E. (2016) – Nonparametric statistics applied to fire foci obtained by meteorological satellites and their relationship to the MCD12Q1 product in the state of Rio De Janeiro, southeast Brazil. *Land Degradation & Development*, vol. 28, n. 3, p. 1056-1067. <https://doi.org/10.1002/ldr.2574>
- Caúla, R.H.; Oliveira-Júnior, J.F.; Lyra, G.B.; Delgado, R.C. & Heilbron Filho, P.F.L. (2015) – Overview of fire foci causes and locations in Brazil based on meteorological satellite data from 1998 to 2011. *Environmental Earth Sciences*, vol. 74, n. 2, p. 1497-1508. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-015-4142-z>
- Cheney, N.P. & Gould, J.S. (1995) – Separating fire spread prediction and fire danger rating. *CALM Science Supplement*, vol. 4, p. 3-8.
- CPTEC (2012) – *BDQUEIMADAS*. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. [cit. 2012-01-05] <http://pirandira.cptec.inpe.br/queimadas/>
- Der Mégréditchian, G. (1981) – *La prévision statistique des phénomènes météorologiques*. Météorologie nationale. Note technique de l'EERM n° 100, Boulogne, France.
- Domingues, M.S. & Bermann, C. (2012) – O arco de desflorestamento na Amazônia: da pecuária à soja. *Ambiente e Sociedade*, vol. 15, n. 2, p. 1-22. <http://dx.doi.org/10.1590/S1414-753X2012000200002>
- Drouet, J.C. & Sol, B. (1993) – Mise au point d'un indice numérique de risque météorologique d'incendies de forêts. *Forêt Méditerranéenne*, vol. 14, n. 2, p. 155-162.
- Eastaugh, C.S.; Arpacı, A. & Vacik, H. (2012) – A cautionary note regarding comparisons of fire danger indices. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 12, n. 4, p. 927-934. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-927-2012>

- Torres, F.T.P.; Lima, G.S.; Martins, S.V. & Valverde, S.R. (2017) – Analysis of efficiency of fire danger índices in forest fire prediction. *Revista Árvore*, vol. 41, n. 2, p. 1-10. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882017000200009>
- Torres, F.T.P. & Ribeiro G.B. (2008) – Índices de risco de incêndios florestais em Juiz de Fora/MG. *Floresta e Ambiente*, vol. 15, n. 2, p. 24-34.
- Tucci, C.E.M. (2009) – *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH; 943 p.
- VanWagner, C.E. (1987). *Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Vol. 35. Canadian Forestry Service, Ottawa, Canada, 35 p.
- Venäläinen, A.; Korhonen, N.; Hyvärinen, O.; Koutsias, N.; Xystrakis, F.; Urbietta, I.R. & Moreno, J.M. (2014) – Temporal variations and change in forest fire danger in Europe for 1960-2012. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 14, n. 6, p. 1477-1490. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1477-2014>
- Vicente-Serrano, S.M.; Beguería, S.; López-Moreno, J.I.; García-Vera, M.A. & Stepanek P. (2010) – A complete daily precipitation database for northeast Spain: reconstruction, quality control, and homogeneity. *International Journal of Climatology*, vol. 30, n. 8, p. 1146-1163. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1850>
- Viegas, D.X.; Bovio, G.; Ferreira, A.; Nosenzo, A. & Sol, B. (1999) – Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 9, n. 4, p. 235-246. <https://doi.org/10.1071/WF00015>