

# Análise preditiva de ocorrências de incêndios no bioma amazônico do Maranhão

## Resumo

A presente pesquisa foi desenvolvida com a finalidade de analisar a incidência espaço-temporal das ocorrências de queimadas no bioma amazônico do Maranhão, com intuito de propor o desenvolvimento de um modelo preditivo de rápida aplicação com base nos dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais - INPE. O estudo consistiu na sobreposição de pontos de queimadas no bioma amazônico do Maranhão entre 1999 e 2017, risco de fogo - RF observado, dias sem chuvas registrados, além da potência radiativa da ocorrência - FRP, através da Krigagem. Com base no modelo proposto, foi possível identificar que 37,4% do bioma amazônico do Maranhão possuem risco mínimo/baixo, enquanto que 55,3% estão na faixa de risco moderado/alto e 7,3% são áreas que possuem nível crítico. Assim, a presente pesquisa buscou contribuir com as discussões ligadas à construção de políticas públicas, que possibilitem a real mitigação do risco de incêndios a partir das singularidades territoriais do bioma amazônico do Maranhão.

**Palavras-chave:** Incêndios, bioma amazônico, Maranhão.

## Abstract

PREDICTIVE ANALYSIS OF FIRE OCCURRENCES IN THE AMAZONIAN BIOME OF MARANHÃO

The present research is developed with the purpose of analyze the space-time incidence of burn occurrences in the Amazonian biome of Maranhão, with the purpose of proposing the development of a predictive model of rapid application based on the data provided by the National Institute of Space Research - INPE. The study consisted of the overlapping of burning points in the Maranhão Amazonian Biome between 1999 and 2017, observed RF fire risk, days without recorded rainfall, besides the radiative power of the occurrence - FRP, through Kriging. Based on the

proposed model, it was possible to identify that 37.4% of the Amazonian biome of Maranhão has low/low risk, while 55.3% is in the moderate/high risk range and 7.3% are areas with a critical level. Thus, the present research sought to contribute to the discussions related to the construction of public policies, which allow the real mitigation of the fire risk from the territorial singularities of the Amazonian biome of Maranhão.

**Key-words:** Fires, Amazonian Biome, Maranhão.

## 1. Introdução

A grande diversidade biológica da Amazônia brasileira traz consigo diversos desafios como: o desaparecimento e a fragmentação de habitats; a introdução de espécies e doenças exóticas; a exploração excessiva de espécies de plantas e animais; o uso de híbridos e monoculturas na agroindústria; a contaminação do solo, da água, e da atmosfera por poluentes. Entre estes, o uso do fogo é uma prática que traz consigo prejuízos em vários ecossistemas nos âmbitos econômico e ambiental, afetando também a saúde da população.

Conforme Souza et al. (2012), os debates nos últimos anos sobre a temática têm aumentado significativamente, pois existe uma grande preocupação em decorrência do lançamento de CO<sub>2</sub> e outros gases na atmosfera. O Brasil é considerado como um dos maiores contribuintes em emissões de CO<sub>2</sub>, decorrentes de queimadas das florestas, principalmente a amazônica. Nesse contexto, é imperativo salientar que as queimadas não são sinônimos de incêndios (MIRANDA et al., 2009). Os autores afirmam que a queimada é uma tecnologia agrícola, praticada há milhares de anos por povos tradicionais. O uso dessa técnica é uma prática generalizada na agricultura brasileira, sendo esta utilizada em diversos momentos nos sistemas de produção, desde o preparo das terras até a pré- e pós-colheita. Já em relação aos incêndios, pode-se reconhecer estes eventos como indesejáveis, genericamente associados ao ambiente florestal, sendo caracterizados por serem de difícil controle (VALLEJO, 2016).

A dispersão destes eventos pode ser de origem acidental ou criminosa; eles podem atingir grandes áreas, causando prejuízos ao patrimônio público e privado, além de significativos impactos ambientais. Este fenômeno pode

ser influenciado por eventos climáticos como El Niño e ações antrópicas, tratando-se de um sistema complexo, no qual a sazonalidade climática e sua variação regional influenciam na dinâmica das queimadas, intensificando as ocorrências que, mesmo de forma controlada, podem tomar proporções desastrosas. Sob esta perspectiva, estudos como os de Justino (2002); Sismanoglu e Setzer (2004); Fearnside (2005); Dwyer et al. (2010); Crespo et al. (2015); Torres et al. (2017) e Silva Junior et al. (2018) demonstram a grande importância da análise sistemática e multitemporal da incidência de queimadas, correlacionando-se as escalas local, regional e global.

Contribuindo com os debates sobre a temática, o presente estudo analisa a incidência espaço-temporal das ocorrências de queimadas no bioma amazônico do Maranhão, com o intuito de propor o desenvolvimento de um modelo preditivo de rápida aplicação, baseado nos dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais - INPE, bem como validar sua aplicabilidade para subsidiar políticas públicas de contenção e prevenção a incêndios. Para tanto, a pesquisa estruturou-se sob uma abordagem sistêmica, caracterizando a área de estudo e os procedimentos técnicos testados. Posteriormente, avalia-se os resultados alcançados com base no modelo proposto.

## **2. Metodologia**

Esta seção apresenta a abordagem metodológica proposta para o desenvolvimento do estudo, bem como descreve os procedimentos analíticos e estatísticos utilizados.

### *2.1 Área de Estudo*

Localizado em uma zona de transição, o Maranhão é composto pelos biomas Amazônia, Cerrado e Caatinga (figura 1). Isso lhe atribui grande diversidade morfológica e ambiental, com clima semiárido na faixa Nordeste e úmido equatorial na região da Amazônia. Essas características se refletem na formação do relevo, composto por planícies litorâneas e flúvio-marinhas ao norte; superfície sublitorânea e planaltos na região central; chapadas

e depressões ao sul. O mesmo ocorre quanto às formações vegetais que transicionam do cerrado no sul, para as florestas estacionais na região central e leste, e floresta ombrófila compondo o bioma amazônico, situado na região a noroeste do estado (EMBRAPA, 2013).

**Figura 1**  
 MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS MUNICÍPIOS SITUADOS NO BIOMA AMAZÔNICO DO MARANHÃO



MAPA DE LOCALIZAÇÃO	LEGENDA	ESCALA
	Limite Estadual Municípios do Bioma Amazônico	 0 25 50 100 150 200 KM Projeção Transversa de Mercator Datum SIRGAS 2000 - 23S Meridiano 45° GR GOVERNO DO <b>MARANHÃO</b> IMESC

## 2.2 Materiais e Métodos

A presente pesquisa estrutura-se sob uma abordagem sistêmica, considerando as diferentes dinâmicas territoriais existentes no bioma amazônico maranhense. Para tanto, os procedimentos técnicos da pesquisa são desenvolvidos em duas etapas:

*Etapa 1:* A primeira etapa baseia-se na coleta e no tratamento das informações das ocorrências de focos de calor obtidas através do Banco de Dados de Queimadas - BDQ do INPE, detectados pelo Sistema DETER - Detecção de Desmatamento em Tempo Real, com série histórica entre 1999 a 2017. Os dados obtidos foram processados através das imagens dos satélites TERRA/AQUA, através do sensor MODIS, satélite CBERS, com o sensor WFI, e o ERS, com o sensor ATSR. Dessa forma, capta-se e registra-se locais com temperatura acima de 47 °C, o que tornou possível a identificação das queimadas em áreas de no mínimo 900m<sup>2</sup>, mesmo com a resolução espacial baixa de 1,1km (ANTUNES, 2000).

Contudo, segundo Vallejo (2016), é imperativo frisar que existem circunstâncias que impedem a obtenção de dados e/ou ocasionam prejuízos. Entre estas pode-se citar: 1) frentes de fogo com menos de 30 metros; 2) fogo rasteiro numa floresta densa, sem afetar o dossel das florestas; 3) nuvens cobrindo a região; 4) queimadas de pequena duração, ocorrendo entre imagens disponíveis; 5) fogo na encosta oposta do posicionamento de observação do satélite e; 6) imprecisão na localização do foco de queimadas, de até 6km.

*Etapa 2:* Nessa etapa utilizou-se a interpolação de pontos para o desenvolvimento da análise preditiva das ocorrências de queimadas no bioma amazônico maranhense, com posterior trabalho de campo para registro fotográfico, identificação de agentes tensores e validação do método proposto, os quais ocorreram com uso de equipamentos como Drone 4 Phantom Pro e GPS Oregon 700. Buscou-se dessa forma identificar áreas que possuem maior probabilidade de ocorrência de queimadas, com base nos dados diários das ocorrências fornecidos pelo INPE.

Os dados coletados correspondem à coleção de pontos de queimadas no bioma amazônico do Maranhão entre 1999 e 2017 (base cartográfica obtida junto ao IMESC). Complementa-se o modelo com a sobreposição

dos dados de risco de fogo - RF<sup>1</sup> observado, dias sem chuvas registrados, além da potência radiativa da ocorrência - FRP<sup>2</sup>.

Para obtenção das áreas classificadas com valores preditos, utilizou-se o estimador para análise espacial, conhecido como Krigagem. Este é um método de interpolação geoestatístico que possibilita a estimação de um atributo, a partir da sobreposição de diferentes atributos, sendo reconhecido como Co-krigagem. Ressalta-se que esta técnica pode ser entendida como uma predição linear ou uma forma da inferência bayesiana, partindo-se do princípio que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos do que pontos mais afastados (LANDIM et al., 2002; JOHNSON e WICHERN, 2002).

Ao mesmo tempo, este método considera as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas<sup>3</sup> (FERNANDES, 2014). Essa análise fornece coeficientes que descrevem a variabilidade espacial do conjunto expressa em curvas de semivariogramas<sup>4</sup>. Ressalta-se que, na operação de krigagem, os coeficientes do semivariograma são fornecidos para o controle da interpolação no conjunto de amostras, no qual cada ponto, dentro de um raio de busca, é ponderado de acordo com a função de sua distância em relação ao ponto calculado (CAMARGO et al., 2004).

Para realização do procedimento técnico utilizou-se a ferramenta Geostatistic Analyst do ArcGIS 10.6, com o emprego da função Krigagem Ordinária<sup>5</sup>, sem nenhuma transformação nos dados e sem remover nenhum tipo de tendência. Em relação ao semivariograma, este foi selecionado como tipo de vizinhança com a função de suavização. Desse modo foi possível calcular o desvio padrão entre os diferentes níveis, o que regionalizou as variáveis com base na localização, na distância e na semivariância. No caso específico foram estabelecidos 5 níveis, como mostra o quadro 1.

**Quadro 1**  
ESCALA DE VALORAÇÃO

<b>NÍVEL</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
<b>Mínimo</b>	Áreas com reduzida probabilidade de ocorrências de queimadas/incêndios
<b>Baixo</b>	Áreas com incidência de queimadas, porém com baixa probabilidade de ocorrências de incêndios
<b>Moderado</b>	Áreas com significativa ocorrências de queimadas, porém com risco moderado a incêndios
<b>Alto</b>	Áreas com significativa incidência de queimadas e com alta probabilidade de ocorrência de incêndios com a necessidade de alertas sazonais para os municípios
<b>Crítico</b>	Áreas com elevadas taxas de ocorrências de incêndios, caracterizadas por extensas áreas queimadas e consideráveis alterações ambientais e sociais, com a necessidade de alertas preventivos periódicos

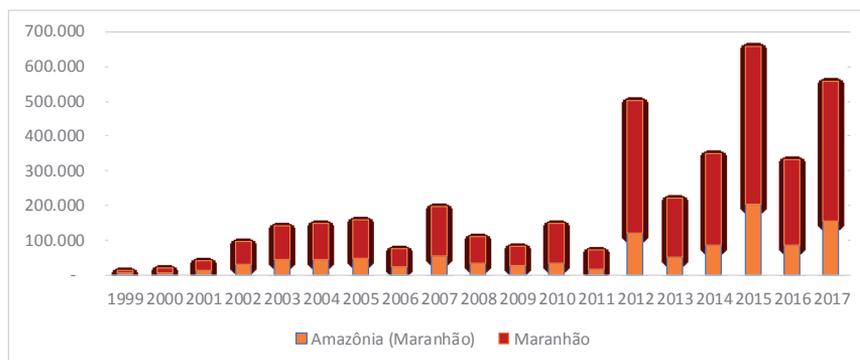
Fonte: adaptado de Forsyth e Le Maitre (2015).

### **3. Ocorrências de queimadas no bioma amazônico do Maranhão**

As características geográficas do Maranhão são influenciadas tanto pelo clima úmido da Amazônia quanto pelo semiárido nordestino. Isso singulariza não somente a proliferação dos focos das queimadas, como também a dispersão da área queimada (gráfico 1).

**Gráfico 1**

INCIDÊNCIA DE QUEIMADAS NO ESTADO DO MARANHÃO E BIOMA AMAZÔNICO (1999 – 2017)



Fonte: INPE, 2018.

Observa-se que o território maranhense, entre os anos de 1999 e 2017, possui média superior a 100 mil focos de queimadas por ano. Destaca-se nessa série histórica 2 (dois) períodos, o primeiro, entre 2002 e 2007, caracteriza-se por reduzida variação e incidência de focos de queimadas, enquanto que entre 2012 e 2017 registrou-se elevação vertiginosa do quantitativo de queimadas, seguindo a tendência nacional.

Conforme Silva Junior et al. (2017), a dinâmica de ocorrência e dispersão das queimadas no Maranhão é modulada pela ocorrência ou não da precipitação, ou seja, os padrões de seca no Maranhão determinam o nível de concentração do fenômeno de queimadas nos biomas maranhenses. Autores como Shimabukuro e Smith (1991) afirmam que o aumento da inflamabilidade da vegetação, em consequência do déficit hídrico decorrente do período de poucas chuvas, acaba por propiciar um cenário no qual as atividades humanas se apresentam como principal agente de alteração da dinâmica da paisagem local.

As ocorrências de queimadas no Maranhão apresentam significativa dinâmica espaço-temporal, com concentração e dispersão dos focos em diferentes regiões do estado. Essa dinâmica apresenta-se como resultado da influência gerada pelas atividades ligadas ao agronegócio e por investimentos federais e estaduais, que modelam a economia local e o processo de uso e ocupação nas diferentes regiões do estado. Ao mesmo tempo, autores como Vallejo (2016) ressaltam que esse padrão de distribuição

espacial dos focos de queimadas vem se repetindo ao longo da última década, fato que tem sido alicerçado pela redução das chuvas, da umidade do ar e pela elevação das temperaturas. Isso proporciona um acúmulo de biomassa seca no solo, o que favorece a combustibilidade e os incêndios e possibilita o avanço dessas ocorrências na faixa de transição entre o bioma do cerrado e o amazônico.

A perspectiva apresentada é corroborada por estudos, como o desenvolvido por Silva Júnior et al. (2017). Os autores avaliaram a ocorrência de focos de queimadas no Maranhão entre 2010 a 2016, período no qual foi observado um expressivo evento de seca em toda a região nordeste do país. Para Vallejo (2016), no Brasil, esse cenário consolida-se através dos processos de implantação de pastagens e atividades agrícolas que se intensificaram ao longo das últimas décadas, o que torna tais atividades os grandes agentes de transformação na paisagem do Centro-Oeste, além de possibilitar o avanço das queimadas para a região amazônica brasileira.

Nesse contexto, entre as práticas que solidificam o panorama identificado, além da agricultura mecanizada, no Maranhão e em diversos estados no Norte e Nordeste, está a técnica popularmente conhecida como “roça no toco”, utilizada como ação inicial para o preparo do solo. Esta atividade aumenta as chances de ocorrência de incêndios descontrolados, uma vez que o fogo é, em geral, utilizado por agricultores sem a capacitação necessária para seu manuseio.

Corroborando com essa tendência nota-se que a predominância de focos de queimadas no Maranhão, segundo os relatórios técnicos do IMESC (2015), ocorrem no segundo semestre de cada ano. Essa amostra indica um forte padrão sazonal para ocorrência de queimadas no Maranhão, o que corrobora com a hipótese de que os meses de estiagem intensificam os eventos de queimadas em território maranhense, como indicam diversos autores, a exemplo de Bezerra et al. (2018).

França e Setzer (2001) reconhecem esse período de maior ocorrência de focos de queimadas como “estação do fogo”. Essa fase geralmente começa a se intensificar no final de agosto/início de setembro. Tais afirmações consideram que as áreas queimadas foram sempre maiores no final da estação seca (setembro a novembro), em comparação com as datas do primeiro semestre. De acordo com Coutinho (1990), na estação seca o

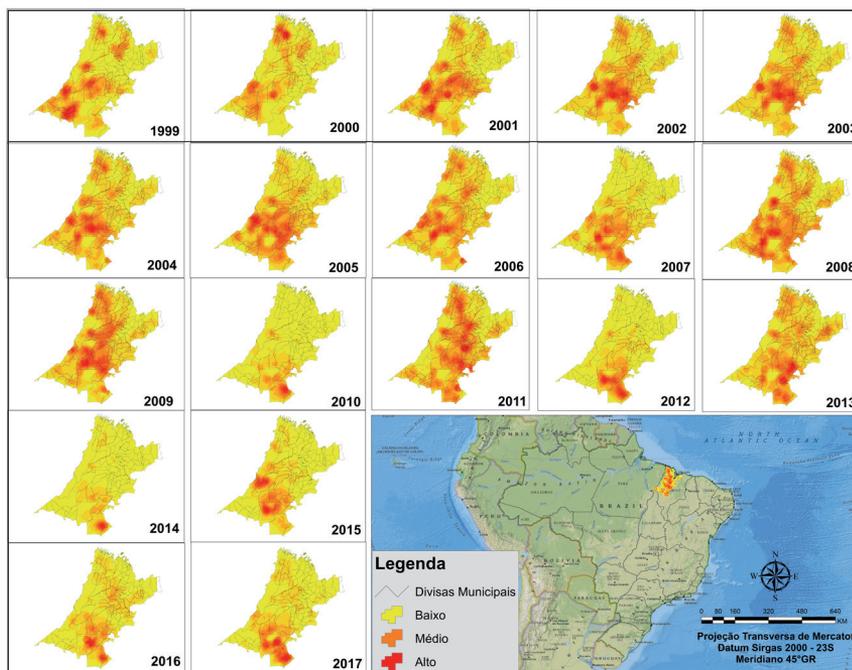
gado sofre pela falta de bons pastos. Para sanar tal problema, fazendeiros e pequenos proprietários utilizam-se de práticas baratas de manejo, como a queima da vegetação, considerando que depois de poucos dias ocorre a rebrota com boa qualidade para a pastagem.

Relativo à área do bioma amazônico do estado, identifica-se concentração de 37,8% dos registros de queimadas do Maranhão. Entre os municípios com maior ocorrência de focos de queimadas, destacam-se os de Grajaú, Amarante do Maranhão, Santa Luzia do Paruá, Bom Jardim, Arame, Buriticupu, Itinga do Maranhão, Centro do Guilherme, Açailândia e Bom Jesus das Selvas. É importante frisar que estes municípios concentram aproximadamente 57% dos focos de queimadas registrados no território do bioma.

Observa-se, no intervalo de 1999 a 2017, centralização dos casos na faixa sudoeste, com dispersão das ocorrências de queimadas na área central e sul do bioma no Maranhão (figura 2). Estudos realizados pelo IMESC e por outros órgãos governamentais consideram, como fator determinante para a dinâmica espacial das ocorrências de queimadas no Maranhão, o processo histórico de grandes alterações da paisagem ocorrido no bioma amazônico maranhense, que transformou extensas áreas de florestas em pastagens, monoculturas, agroindústrias, mineradoras e madeireiras, seja de pequeno, médio ou grande portes.

**Figura 2**

DINÂMICA ESPACIAL DOS FOCOS DE QUEIMADAS NA AMAZÔNIA MARANHENSE (1999 – 2017)



Fonte: INPE, 2018.

#### 4. Modelagem para predição de ocorrências de incêndios

Nesse tópico objetiva-se avaliar e propor formas de construir métodos que possibilitem análises preditivas de ocorrências de queimadas, tendo em vista que o risco de incêndios pode ser calculado e mapeado usando-se procedimentos de avaliação geoespacial, como demonstrado por Forsyth e Le Maitre (2015). Os autores afirmam que esses procedimentos devem ser de rápida aplicação, além de abranger os diferentes tipos de biomas. Busca-se desse modo compreender suas características singulares e territorialidades, objetivando informar os proprietários e os governos locais, bem como compartilhar responsabilidades na mitigação dos riscos de incêndios.

Para Souza et al. (2012), desenvolver métodos que possam indicar a prevenção do grau de risco de ocorrência e de medidas de prevenção de queimadas e/ou incêndios, apresenta particularidades e procedimentos próprios. No entanto, todos os modelos produzidos dependem das condições atmosféricas presentes e de dados meteorológicos.

Nesse contexto, primeiramente faz-se necessário reconhecer que a área do bioma da Amazônia do Maranhão se localiza na faixa equatorial, caracterizada por altas temperaturas e elevados volumes pluviométricos. Em decorrência dessas características, os principais mecanismos que explicam o regime pluviométrico na região resultam da combinação ou da atuação predominante da Zona de Convergência Intertropical, das brisas marítimas e das precipitações predominantemente convectivas. Essas características ocasionam altas temperaturas, associadas à intensa radiação solar incidente na região, mesmo que, em grande parte, a energia seja convertida em calor latente de evaporação e outra parcela levada para a atmosfera superior e liberada na forma de calor sensível (OLIVEIRA et al., 2016).

Desse modo, deve-se considerar que o risco de queimada/incêndio, compõe-se pela vulnerabilidade e pelo fator de ameaça a que está submetido o ambiente (NUNES et al., 2006). Ou seja, a predição de incêndios estrutura-se a partir da avaliação da probabilidade de ocorrência de queimadas. Estas podem ser influenciadas pela expectativa de ocorrência de duas situações: haver uma fonte de ignição e existir condições favoráveis para sua propagação. Entretanto, observa-se que fatores como a temperatura e a umidade relativa do ar, bem como a precipitação pluviométrica são elementos que, associados, aumentam as possibilidades de ocorrência de incêndios (OLIVEIRA et al., 2016).

Ao mesmo tempo, considera-se que a ocorrência e a propagação dos incêndios estão ligadas às características físicas e químicas do combustível, o que necessariamente é influenciado pela estrutura topográfica e o tipo de uso e ocupação da terra existentes na região (SOUZA et al., 2012). Por outro lado, a ampliação da homogeneidade da paisagem, com a introdução de plantações florestais uniformes e inflamáveis, o êxodo rural e o aumento das áreas degradadas e de pastagem levaram a uma elevação da susceptibilidade à ocorrência de incêndios (FERREIRA et al., 2015).

Esse conjunto de informações torna-se importante para a elaboração de programas de cenários, haja vista que a utilização de técnicas de geração de cenários e de prevenção, bem como a realização de um planejamento estratégico de combate, é alternativa viável para redução das ocorrências (FERRAZ; VETORAZZI, 2003). Sob essa perspectiva, desenvolveram-se diferentes métodos e abordagens, com a finalidade de desenvolver formas e mecanismos de prevenção ao risco de ocorrência de incêndios. Entre estes métodos podemos citar estudos como os de Takagi e Sugeno (1985); Chuvieco et al. (2010) e Sá et al. (2017).

Diante dessas observações, Linn et al. (2012) afirmam que a modelagem e a predição de incêndios se torna complexa, porque o comportamento do fogo é determinado por um conjunto de processos acoplados, que ocorrem ao longo de um vasto leque de escalas espaciais e temporais.

#### *4.1 Predição de ocorrências de Incêndios no bioma amazônico do Maranhão*

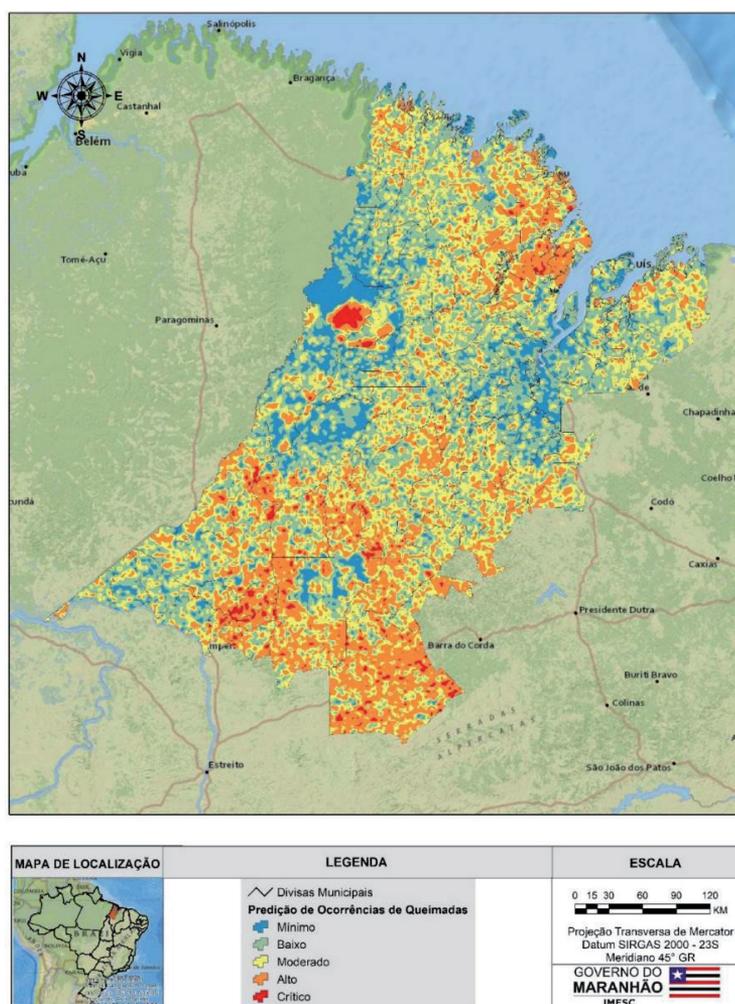
No presente estudo, propôs-se uma metodologia em escala regional, de rápida aplicação e que sirva como base de referência, comparação e nível de associação espacial, além de possibilitar a geração de cenários de modelos preditivos para ocorrências de queimadas, seguindo as recomendações de Forsyth e Le Maitre (2015). Os autores orientam que a otimização das avaliações de risco de incêndios passa pela ampliação da modelagem dos dados, incluindo informações do tipo de combustível, da carga de combustível (biomassa), da umidade e da precipitação, além de utilizar a série histórica de queimadas (tempo desde a última queima); todos estes dados já podem, inclusive, ser derivados de imagens de satélite em uma base contínua.

A partir da conexão entre os diversos níveis e parâmetros técnicos utilizados, foi possível identificar o percentual de área do bioma amazônico do Maranhão que possui maior probabilidade de ocorrências de queimadas, com base no mapa preditivo desenvolvido (tabela 1 e figura 3).

**Tabela 1**  
ESCALA DE PREDIÇÃO DE OCORRÊNCIAS DE INCÊNDIOS

Nível	Probabilidade (%)	Percentual de área (%)
Mínimo	< 5	34
Baixo	6 – 10	3,4
Moderado	11 – 15	27,1
Alto	16 – 30	28,2
Crítico	> 30	7,3

**Figura 3**  
MAPA DE PREDIÇÃO DE OCORRÊNCIA DE QUEIMADAS NA ÁREA DO BIOMA DA AMAZÔNIA DO MARANHÃO



Conforme a metodologia proposta, observa-se que 34% da área do bioma da Amazônia do estado estão classificados com nível mínimo de risco, sendo caracterizados por reduzida probabilidade de ocorrência de incêndios. Essa faixa está concentrada principalmente na região do Gurupi (Centro Novo do Maranhão, Bom Jardim, Junco do Maranhão, Maracaçumé e Centro do Guilherme), além da região dos Campos e Lagos. Essas localidades são caracterizadas principalmente por relevo plano, vegetação ombrófila densa, baixo grau de urbanização e consequente reduzida densidade demográfica.

O relevo da região identificado na Baixada maranhense caracteriza-se por um ambiente plano e suavemente ondulado, ponteadado por relevos residuais que formam superfícies tabulares (FEITOSA, 2006). Essa faixa da superfície do bioma em análise é alagada durante o período chuvoso. No interior dos ambientes rebaixados formam-se tesos por acumulação de sedimentos, cujos topos ficam descobertos durante o período de inundação e onde se desenvolvem arbustos com características de terra firme (figura 4).

**Figura 4**  
ASPECTOS FISIográficos DA BAIXADA MARANHENSE, MONÇÃO-MA



Fonte: Dados da Pesquisa, 2018.

O modelo empregado também identifica que 55,3% do bioma em análise se enquadram entre as faixas reconhecidas como moderada e de alta probabilidade de ocorrências de incêndios. Esse resultado demonstra que a maior parcela do território amazônico do Maranhão apresenta elevado

grau de incidência de incêndios, com a necessidade de alertas sazonais para os municípios. Essa dinâmica apresenta avanços na região das reentrâncias (Bequimão, Mirinzal, Guimarães e Pinheiro), mesmo com relevo plano a suavemente ondulado. Nota-se conjuntamente a ampliação, nas últimas décadas, das atividades ligadas ao agronegócio, o que deflagra consideráveis alterações na paisagem local e vem influenciando a dinâmica evidenciada.

Ao mesmo tempo, observa-se uma diminuição do risco de ocorrências, à medida que nos afastamos das áreas urbanas. Essa dinâmica pode ser visualizada principalmente nos municípios circunvizinhos à estrada de ferro Carajás, que registraram considerável crescimento urbano na última década nesta região. Torres et al. (2017) registraram cenário semelhante no município de Viçosa-MG. Para os autores, uma das razões desse fenômeno é que há um nível muito mais elevado de atividade humana, originando mais fontes de ignição em torno dos equipamentos urbanos.

Como resultado dessas alterações na paisagem, evidencia-se um processo de transição gradual do estrato arbóreo (floresta) para o arbustivo e o herbáceo (vegetação aberta). Isso consolida uma tendência de aumento da fragmentação da paisagem identificado por Masullo et al. (2018), em diferentes regiões do Maranhão, e que pode ser comparável com os resultados obtidos por Bracchetti et al., (2012) e Martinez del Castillo et al. (2015). Estes autores identificaram dinâmicas semelhantes em diferentes regiões do mundo, onde o avanço das atividades ligadas ao agronegócio amplia a fragmentação da paisagem independentemente do ganho ou da perda de florestas (figuras 5 e 6).

**Figura 5**  
PLANTAÇÃO DE EUCALIPTO, BOM JESUS DAS SELVAS-MA



Fonte: Dados da Pesquisa, 2018.

**Figura 6**  
ÁREA PREPARADA PARA CULTIVO, SANTA LUZIA-MA



Fonte: Dados da Pesquisa, 2018.

Para Ferreira et al. (2015), tal realidade é originária da introdução de plantações florestais uniformes e inflamáveis, do êxodo rural e do aumento das áreas degradadas e de pastagem que ampliam a homogeneidade da paisagem, levando a uma ampliação da susceptibilidade à ocorrência de incêndios. Esse cenário corrobora com os resultados obtidos por Ribeiro

et al. (2008). Os autores, em estudo desenvolvido para o zoneamento de áreas de risco no Paraná, consideram que áreas referentes à agricultura se enquadram como regiões de risco extremo, enquanto que remanescentes de floresta nativa são geralmente reconhecidos como risco moderado. Seguindo essa perspectiva, Armenteras-Pascual et al. (2011) em pesquisa desenvolvida na Colômbia, identificaram que a vegetação herbácea foi o tipo mais afetado pelo fogo, seguido por capoeiras, florestas e áreas agrícolas.

No mesmo patamar de alto risco destacam-se os municípios que compõem a Região Metropolitana do Sudoeste Maranhense (Lei Complementar Estadual N° 204/2017) e os municípios circunvizinhos. Esta região se caracteriza pelo maior grau de urbanização, por uma significativa área destinada a atividades ligadas ao agronegócio, bem como pelo relevo formado por um conjunto de morfoesculturas, com altitudes máximas acima de 300m e lineamento nordeste-sudoeste, onde predominam as serras do Gurupi, Tiracambu e Desordem (FEITOSA, 2006) (figura 7).

**Figura 7**  
CARACTERÍSTICAS FISIográficas DA REGIÃO SUDOESTE DO MARANHÃO



Fonte: Dados da Pesquisa, 2018.

A variação topográfica demonstrada forma vales, que separam as formações planálticas umas das outras por meio de entalhes profundos, e, por essa razão, as chapadas visualizadas apresentam escarpas abruptas em contraste com o topo regular. Sobre a ampliação do risco de incêndios ser influenciada pela variação morfológica identificada no eixo oeste-sudoeste do estado, Adámek et al. (2015) esclarecem que em regiões, onde o clima possui características mais úmidas, há tendência à irregularidade do relevo, o que favorece a ocorrência de incêndios. Segundo Ganteaume e Jappiot (2013), identifica-se uma maior probabilidade de ocorrência de grandes incêndios, em áreas com maiores variações topográficas. Isso ocorre porque, em áreas com maiores declividades, existe a tendência de maior exposição ao sol, bem como ampliam-se as limitações de acesso para o combate, o que possibilita maior propagação do fogo.

Entretanto, Torres et al. (2017) afirmam que, independentemente do relevo, das condições climáticas ou da vegetação, a fonte de ignição de origem antrópica não é homogênea no território. Os autores consideram que as pessoas interferem nos ciclos anuais do fogo, o que reduz e/ou aumenta as épocas e áreas mais propícias à ocorrência de incêndios. Contexto semelhante pode ser visualizado no bioma amazônico maranhense. As regiões identificadas com o patamar de risco moderado e alto possuem as suas principais atividades econômicas interligadas ao setor madeireiro e agropecuário, vinculando-se fortemente à ação antrópica direcionadas ao avanço das explorações dos recursos naturais e das fronteiras imobiliárias e agropecuárias (figura 8).

Essas atividades alteram a dinâmica microclimática local, uma vez que se modifica a presença de umidade no solo e na vegetação. Amplia-se, por conseguinte, a quantidade de gases e aerossóis desprendidos no processo de queima da biomassa, como demonstrado pela relação direta da FRP com o total de biomassa disponível na vegetação.

**Figura 8**

ÁREA QUEIMADA PARA CONSTRUÇÃO DE LOTEAMENTOS IMOBILIÁRIOS, BURITICUPU-MA



Fonte: Dados da Pesquisa, 2018.

Apesar de ser complexo o monitoramento para a construção de mecanismos de alerta e prevenção de incêndios, deve-se considerar que o risco é permanente em regiões onde este alcança o nível crítico. No caso específico do bioma amazônico do Maranhão, destaca-se que cerca de 7% da região foram reconhecidos como áreas caracterizadas por elevadas taxas de ocorrência de incêndios, com extensas queimadas e graves alterações ambientais e sociais, necessitando de alertas preventivos permanentes.

Observa-se o nível crítico de risco em regiões intra e circunvizinhas às terras indígenas Urubu Kabor, Awa e Guajajaras, situadas nos municípios de Centro Novo, Nova Olinda do Maranhão e Amarante. Ressalta-se que o grau de risco de incêndio identificado é determinado não só pela ameaça que apresenta em um único dia, mas sim pelo acúmulo do efeito de dias desfavoráveis. Isso ocorre porque, quanto mais dias críticos houver, mais seco se tornará o material florestal e mais favoráveis se tornarão as condições atmosféricas para o surgimento e propagação de ocorrências de queimadas descontroladas (SOUZA et al., 2012).

## **5. Considerações Finais**

De acordo com os resultados obtidos no presente estudo, observa-se que:

- A gradual conversão do estrato arbóreo (floresta) para arbustivo e herbáceo (vegetação aberta), deflagrada na última década, ampliou a abrangência de áreas com maior risco de incêndios;

- A maior densidade de focos em áreas com predominância de vegetação herbácea e arbustiva, mostra a possibilidade de eventos recorrentes nesses locais;

- Áreas com maior inclinação do terreno apresentaram maior risco de ocorrências, mostrando que, apesar das atividades antrópicas terem maior influência sobre a origem dos incêndios, as características fisiográficas locais exercem significativa influência na propagação e na abrangência dos incêndios;

- O risco de ocorrências de incêndios diminui conforme a distância de áreas urbanas.

No entanto, sob orientação de diversos autores citados na presente pesquisa, ressalta-se que as condições de risco de ocorrência de queimadas e incêndios não estão relacionadas com a obrigatoriedade do episódio, mas sim com o cenário climático que torna propícia a ocorrência. Dessa forma, a análise preditiva, considerando as condições de risco de incêndios, com base em elementos meteorológicos, demonstra tendências substanciais e padrões específicos para organização e otimização de ações preventivas. Contudo, a tendência identificada não deve ser relacionada com a obrigatoriedade de ocorrência do evento, e sim com a prospecção de um cenário climático propício para sua ocorrência. Para ampliar as possibilidades e precisão da informação, deve-se alinhar o modelo apresentado a um conjunto de fatores específicos, pois nenhum fator isolado pode determinar ou mesmo explicar o nível do risco de incêndios.

Por fim, a presente pesquisa buscou contribuir com as discussões ligadas à construção de políticas públicas que possibilitem a real mitigação do risco de incêndios. Para tanto, isso exigirá: (A) mais pesquisas sobre a ocorrência e o comportamento de incêndios alinhados com as singularidades territoriais dos biomas brasileiros; (B) o desenvolvimento de um sistema para mapear a probabilidade de incêndios acidentais/ criminosos; (C) a comunicação mais ampla do perigo de incêndio baseado nas condições climáticas; (D) o financiamento para manter os sistemas de informações operacionais; (E) estreita colaboração entre os proprietários

locais e os governos, por meio de associações de proteção contra incêndios para mitigar os riscos.

## Notas

- <sup>1</sup> O Risco de Fogo - RF foi desenvolvido internamente no CPTec/INPE, em função da análise das condições e dos históricos meteorológicos dos principais biomas brasileiros. Atualmente, o RF é parte essencial para o Sistema de Queimadas e Incêndios Florestais do INPE, fornecendo dados referentes aos RF Observados (obtidos em estações de superfície ou inferidos por meio de técnicas de sensoriamento remoto); RF Previstos (para alguns dias) e os RF Futuros (para algumas semanas) (SETZER; SISMANOGLU, 2012). No caso, utilizou-se o RF observado, sistematizado a partir de técnicas de Sensoriamento Remoto com base em modelagem numérica, resultante basicamente de variáveis climáticas tais como o histórico da precipitação, a umidade relativa mínima e a temperatura máxima do ar (SISMANOGLU; SETZER, 2004). Segundo Sismanoglu e Setzer, o princípio do RF é o de que, quanto mais dias seguidos sem chuva, maior o risco de queima da vegetação. Adicionalmente, são incluídos no cálculo efeitos do tipo e do ciclo natural de desfolhamento da vegetação, temperatura máxima e umidade relativa mínima do ar diárias, assim como a presença de fogo na área de interesse, com base na análise da ocorrência de centenas de milhares de queimadas/incêndios nos principais biomas (tipos de vegetação) do País durante a última década.
- <sup>2</sup> A potência radiativa do fogo (do inglês Fire Radiative Power, FRP), é uma taxa de energia, que na forma de radiação eletromagnética emitida pelo fogo, ou liberada no processo de combustão, constitui-se como um indicador da quantidade de biomassa consumida ou mesmo da taxa de emissão de gases traços e aerossóis liberados para a atmosfera (PEREIRA et al., 2015). Este índice reconhece a distribuição de temperatura no interior de um pixel, com resolução espacial nominal de 1 km, obtido através das plataformas Terra e Aqua. Ressalta-se que a FRP integrada em todos os comprimentos de onda pode ser calculada pela equação 2.1 de WOOSTER et al. (2005). Basicamente o FRP é uma taxa na qual a energia é emitida pela forma da radiação durante queimada (WOOSTER et al., 2003).
- <sup>3</sup> Uma variável regionalizada é reconhecida como uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um local para o outro com continuidade aparente, cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).
- <sup>4</sup> Conforme Camargo et al. (2004), o semivariograma é reconhecido como uma ferramenta de suporte às técnicas de Krigagem, por permitir a representação quantitativa da dinâmica de um fenômeno regionalizado no espaço.
- <sup>5</sup> Segundo CAMARGO (1997), a função Ordinária é a mais usada nos métodos de krigagem. Esta é utilizada quando se pretende estimar um determinado local, assumindo que a constante média é desconhecida.

## Referências

ADÁMEK M, et al. Forest fires within a temperate landscape: a decadal and millennial perspective from a sandstone region in Central Europe. **Forest Ecology and Management**, v. 336, p. 81-90, 2015.

- ANTUNES, M. A. H. Uso de satélites para detecção de queimadas e para avaliação do risco de fogo. **Ação Ambiental**, São Paulo, v. 12, p. 24-27, 2000.
- ARMENTERAS-PASCUAL D, et al. Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 3, p. 279-289, 2011.
- BEZERRA, D. da S. et al. Análise dos focos de queimadas e seus impactos no maranhão durante eventos de estiagem no período de 1998 a 2016. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 22, p. 446-462, 2018.
- BRACCHETTI, L., et al. Land-cover changes in a remote area of central Apennines (Italy) and management directions. **Landscape and Urban Planning**, v. 104, n. 2, p. 157–170, 2012.
- CAMARGO, E. C. G. **Desenvolvimento, Implementação e Teste de Procedimentos Geostatísticos (Krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING)**. 1997. 105f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.
- CAMARGO, E. C. G. et al. Análise espacial de superfície. **Embrapa Cerrados**, Planaltina, p. 79-122, 2004.
- COUTINHO, L. M. Fire in the Ecology of the Brazilian Cerrado. In: GOLDAMMER, J.G. **Fire in the Tropical Biota: Ecosystem Processes and Global Challenges**. Berlim: Springer Verlag, 1990. p. 82-103.
- CRESPO, C. A. et al. Forest edge burning in the Brazilian Amazon promoted by escaping fires from managed pastures. **J. Geophys. Res. Biogeosci**, v. 120, p. 2095-2107. 2015.
- CHUVIECO, E. A. et al. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system Technologies. **Ecological Modelling**, v. 221, p. 46-58, 2010.
- DWYER, E. et al. Global spatial and temporal distribution of vegetation fire determined from satellite observations. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 6, p. 1289-1302, 2010.
- EMBRAPA. **Relatório do Diagnóstico do Macrozoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão**. Campinas: Embrapa, 2013. 450p.
- FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e consequências. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 103-113, 2005.

FEITOSA, A. C. Relevo do estado do Maranhão: uma nova proposta de classificação topomorfológica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6., Goiânia, 2006. **Anais...** Goiânia, 2006. p. 1-10.

FERNANDES, T. T. **Krigagem indicativa para elaboração de mapas probabilísticos em agricultura de precisão**. 2014. 81f. Dissertação (Mestrado em Biometria) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2014.

FERRAZ, S.; VETORAZZI, C. Identificação de áreas para recomposição florestal com base em princípios de ecologia de paisagem. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 575-583, 2003.

FERREIRA A. J. D. et al. Strategies to prevent forest fires and techniques to reverse degradation processes in burned areas. **Catena**, n. 128, p. 224-237, 2015.

FORSYTH, G.G.; LEMAITRE, D.C. **Risk to Communities at the Wildland-Urban Interface**. Report No: CSIR/NRE/ECOS/ER/2015/0075/B, Natural Resources and the Environment, CSIR, Stellenbosch, 2015. 70p.

FRANÇA, H.; NETO, R. B. M.; SETZER, A. **O Fogo no Parque Nacional das Emas**. Brasília: MMA. 2007. 140p.

FRANÇA, H.; SETZER, A. AVHRR Analysis of a Savanna Site Through a Fire Season in Brazil. **Int. J. Remote Sensing**, v. 22, n. 13, p. 2449-246, 2001.

GANTEAUME, A.; JAPPIOT, M. What causes large fires in Southern France. **Forest Ecology and Management**, v. 294, p. 76-85. 2013.

HERAWATI, H.; SANTOSO, H. Tropical forest susceptibility to and risk of fire under changing climate: a review of fire nature, policy and institutions in Indonesia. **Forest Policy and Economics**, v. 13, p. 227-233, 2011.

IMESC, Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos. **Análise da Incidência de Focos de Queimadas nas Terras Indígenas do Estado do Maranhão**. In: Relatório Técnico. São Luís, 2015. 25p.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível: [www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas](http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas). Acesso em 25 de junho de 2018.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 5. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2002. 767p.

JUSTINO, Flavio Barbosa. Relação entre “Focos de Calor” e Condições Meteorológicas no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., Foz de Iguaçu-PR, 2002. **Anais...** Foz do Iguaçu-PR, 2002. p. 2086-2093.

LANDIM, P. M. B. et al. **Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada**. Rio Claro: DGA/IGCE/UNESP, 2002.

LIBONATI, R. et al. Future projections of fire danger in Brazilian biomes in the 21st century. **Geophysical Research Abstracts**, v. 18, p.172-178, 2016.

LINN R. R. et al. Using periodic line fires to gain a new perspective on multi-dimensional aspects of forward fire spread. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 157, p. 60-76, 2012.

KREWENKA, K. M. et al. Landscape elements as potential barriers and corridors for bees, wasps and parasitoids. **Biological Conservation**, Essex, v. 144, p. 1816-1825, 2011.

MARTINEZ DEL CASTILLO, E. et. al. Evaluation of forest cover change using remote sensing techniques and landscape metrics in Moncayo Natural Park (Spain). **Applied Geography**, v. 62, p. 247-255, 2015.

MASULLO, Y. A. M. et al. O passado e o presente das unidades de conservação do Maranhão, Brasil. **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 19, n. 66, p. 250-268, 2018.

MELO, A. S. et. al. Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas sob condições climáticas atuais e de futuro aquecimento global. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 3, p. 401-418, 2011.

MELO, A. S. et al. Índices de risco de fogo de Haines e Setzer em diferentes condições climáticas. **Mercator**, Fortaleza, v. 11, n. 24, p. 187-207, 2012.

MIRANDA, H. S. et al. Fires in the Cerrado, the Brazilian savanna. In: COCHRANE, M. A. (Ed.). **Tropical fire ecology: climate change, land use, and ecosystem dynamics**. New York: Springer-Praxis, 2009.

MESQUITA, A. G. G. et al. Impactos das Queimadas sobre o Ambiente e a Biodiversidade Acreana. **Revista Ramal de Idéias**, p. 1-14, 2010.

NUNES, J. R. S. et al. Especificação de um sistema computacional integrado de controle de incêndio florestal. **Floresta**, Curitiba, v. 36, p. 201-211, 2006.

OLIVEIRA, M. do C. F. de et al. Risco de ocorrência de queimada e de incêndio e as medidas de prevenções, em Belém-PA, ano de 2015. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09, n. 04, p.1030-1042, 2016.

PAZ, S. et al. Post-fire analysis of pre-fire mapping of fire-risk: a recent case study from Mt. Carmel (Israel). **Forest Ecology and Management**, v. 262, p. 1184-1188, 2011.

PEREIRA, A. A. et al. Validação de focos de calor utilizados no monitoramento orbital de queimadas por meio de imagens TM. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 335-343, 2012.

PEREIRA, G. et al. Avaliação da assimilação da potência radiativa do fogo no Brazilian Biomass Burning Emission Model e comparação com inventários utilizados no SAMBBA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 17., João Pessoa-PB. **Anais...** João Pessoa-PB, 2015. p. 4278-4285.

RIBEIRO, L. et al. Zoneamento de Riscos de Incêndios Florestais para a Fazenda Experimental do Canguiri, Pinhais (PR). **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 551-562, 2008.

SÁ, A et al. Comparação e validação da modelagem espacial de riscos de incêndios considerando diferentes métodos de predição. **Bull. Geod. Sci, Articles Section**, Curitiba, v. 23, n. 4, p. 556-577, 2017.

SETZER, A. W; SISMANOGLU, R. **Risco de Fogo: Metodologia do Cálculo – Descrição sucinta da Versão 9**. São José dos Campos, 2012.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, p.16-20, 1991.

SILVA JUNIOR, C. H. L. et al. O papel da fragmentação e do efeito de borda na ocorrência e intensidade de incêndios florestais na Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO, 18., Santos-SP, 2017. **Anais...** Santos-SP: INPE, 2017. p. 5952-5959.

\_\_\_\_\_. Landsat-Based Land Use Change Assessment in the Brazilian Atlantic Forest: Forest Transition and Sugarcane Expansion. [www.mdpi.com/journal/remotesensing](http://www.mdpi.com/journal/remotesensing). **Sensores remotos**, v. 996, n. 10, p. 2 -20, 2018.

SISMANOGLU, R.A.; SETZER, A.W. Previsibilidade do risco de fogo semanal aplicando o modelo ETA em até quatro semanas com atualização de dados observacionais na América do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA - SBMET, 13., Fortaleza-CE, 2004. **Anais...** Fortaleza-CE, 2004.

SOUZA, A. P. et al. Avaliação dos riscos de ocorrência de incêndios florestais nas regiões Norte e Noroeste da Amazônia Matogrossense. **Scientia Plena**, n. 8, p. 1-14, 2012.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 15, n. 1, p. 116-132,1985.

TORRES F. T. P. et al. Mapeamento do Risco de Incêndios Florestais Utilizando Técnicas de Geoprocessamento. **Floresta e Ambiente**, n. 24, p. 1-10, 2017.

VALLEJO, L. R. Os focos de calor e os incêndios em unidades de conservação brasileiras no ano de 2010. In: BARBOSA, J. L.; LIMONAD, E. (Org.). **Ordenamento territorial e ambiental**. Rio de Janeiro: Capital Editora, 2016. p. 292-307.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: Conceitos e Aplicações**. Editora Oficina de Textos, 2013. 215p.

WOOSTER, M. J. et al. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. **Remote Sensing Environment**, v. 86, n. 1, p. 83-107, 2003.

WOOSTER, M. J. et al. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. D21111, p. 1-24, 2005.

Recebido em: 17/09/2018

Aceito em: 13/10/2018

