



Influência das Condições Meteorológicas Atuais e Futuras na Ocorrência de Queimadas e Incêndios Florestais no Estado de Minas Gerais

Claudilene Aparecida Souto ¹, Ana Carolina Vasques Freitas ², Guilherme Martins ³

¹Graduada em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), CEP: 35903-087, Itabira (MG), Brasil, claudilene.souto@gmail.com. ²Doutora em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE e Professora na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), CEP: 35903-087, Itabira (MG), Brasil, ana.freitas@unifei.edu.br. ³Doutor em Ciência do Sistema Terrestre pelo INPE e Pesquisador no Programa Queimadas, do INPE, CEP: 12227-010, São José dos Campos (SP), Brasil, guilherme.martins@inpe.br.

Artigo recebido em 01/02/2021 e aceito em 23/08/2021

RESUMO

Eventos de queimadas vêm se tornando frequentes em Minas Gerais e são evidenciados por meio do monitoramento de focos de calor por satélite. Esse estudo buscou estabelecer a relação e a influência dos parâmetros meteorológicos (precipitação, temperatura, pressão à superfície, velocidade do vento e umidade relativa do ar) com os focos de calor nos meses de maior ocorrência (setembro e outubro) no período de 2015 a 2019. Para isso foram utilizados dados de focos de calor, dados meteorológicos e do índice de risco de incêndio florestal Fire Weather Index (FWI). Posteriormente, procedeu-se a uma análise de correlação entre as variáveis meteorológicas e os focos de calor, e entre estas e o FWI. Os resultados apontaram significativas correlações negativas entre a precipitação e umidade relativa com os focos de calor em todo o Estado. Valores positivos e significativos com a pressão à superfície e velocidade do vento foram observados, especialmente na parte sul do Estado. Já no caso da temperatura, valores positivos de correlação foram notados nas regiões sudoeste e nordeste do Estado. A relação entre a ocorrência dos focos e o uso e cobertura do solo no Estado também foi avaliada, evidenciando o fator antrópico associado à expansão agropecuária. Foram também analisadas as anomalias mensais projetadas para as variáveis meteorológicas no período de 2041 a 2070 no cenário RCP8.5. Com base nestas anomalias foi possível identificar que há o potencial de maior ocorrência de queimadas e incêndios florestais em um clima futuro em todo o Estado. Portanto, medidas adicionais de controle e maior eficiência no monitoramento destas ocorrências devem ser devidamente consideradas pelo poder público com o apoio da sociedade civil.

Palavras Chaves: Risco de Fogo. Sensoriamento Remoto. Mudanças Climáticas. Focos de Calor. Meteorologia.

Influence of Current and Future Meteorological Conditions on the Occurrence of Burnings and Forest Fires in the State of Minas Gerais

ABSTRACT

Burning events are becoming frequent in Minas Gerais and are evidenced through the monitoring of hot spots by satellite. This study sought to establish the relationship and influence of meteorological parameters (precipitation, temperature, surface pressure, wind speed and relative humidity) with the hot spots in the months of greatest occurrence (September and October) in the period from 2015 to 2019. For this purpose, data from heat sources, meteorological data and the Forest Fire Risk Index (FWI) were used. Subsequently, a correlation analysis was performed between meteorological variables and hot spots, and between these and the FWI. The results showed significant negative correlations between precipitation and relative humidity with hot spots across the state. Positive and significant values with the surface pressure and wind speed were observed, especially in the southern part of the State. In the case of temperature, positive correlation values were noted in the southwest and northeast regions of the state. The relationship between the occurrence of outbreaks and land use and land cover in the state was also assessed, highlighting the anthropic factor associated with agricultural expansion. The monthly anomalies projected for the meteorological variables in the period from 2041 to 2070 were also analyzed in the scenario RCP8.5. Based on these anomalies, it was possible to identify that there is the potential for a greater occurrence of forest fires and fires in a future climate throughout the state. Therefore, additional control measures and greater efficiency in monitoring these occurrences must be properly considered by the government with the support of civil society.

Keywords: Fire risk. Remote sensing. Climate changes. Heat Spotlights. Meteorology

Introdução

O homem utiliza o fogo desde as eras mais remotas. A *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO, 2006) afirmou, em seu relatório sobre incêndios na América do Sul que até 90% dos incêndios florestais são causados por atividades humanas. Santos, Soares e Batista (2006), corroboram essa afirmação, enfatizando que, apesar disso, são os fatores climáticos que influenciam a sua propagação e determinam os seus efeitos devastadores. Outro agravante está associado às questões culturais de uso da terra, como por exemplo, a prática de queimadas para manejo da pastagem e preparo do solo para plantio de culturas agrícolas. O fogo também é usado para manejo da pecuária, em savanas e campos naturais, para remoção do excesso de biomassa e estímulo da rebrota (PIVELLO *et al.*, 2021).

O Estado de Minas Gerais possui a maior produção e consumo de carvão de madeira do Brasil (Teixeira & Rodrigues, 2018), tendo cerca de 70% de sua cobertura original devastada devido ao desmatamento para obtenção de carvão vegetal e pela expansão de fronteiras agropastoris (Vital & Pinto, 2011).

De acordo com o Programa de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite (PRODES), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o “ano-calendário do desmatamento” 2019, período que vai de 01 de agosto de um ano até 31 de julho do ano seguinte (nesse caso, 01/08/2018 a 31/07/2019), o desmatamento no Cerrado, bioma predominante em Minas Gerais foi de 6.483 km², fazendo com que o Estado ocupasse o 6º lugar dentre os 12 Estados que apresentam esse bioma, com maior área de desmatamento, correspondente a aproximadamente 497 km² (INPE, 2020). Para o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011), esse cenário ocorre devido às características propícias que o bioma apresenta à prática de agricultura e pecuária, além da demanda por carvão vegetal para indústria siderúrgica, predominante em Minas Gerais. O desmatamento no Cerrado tem sido causa principal do aumento apresentado na ignição de incêndios antrópicos no bioma (Martins, Nogueira, Setzer & Morelli., 2020).

O Estado de Minas Gerais está entre os 17 Estados que apresentam o bioma Mata Atlântica e sozinho foi responsável pelo desmatamento de aproximadamente 50 km², sendo apontado pelo segundo ano consecutivo como o Estado com maior índice de desmatamento da Mata Atlântica (SOS Mata Atlântica & INPE, 2020).

De acordo com o Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros realizado

pelo MMA junto ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA (2011), o bioma Caatinga apresenta uma área correspondente à 826.411 km² (atualizada para 862.818 km² pelo IBGE em 2019), e no período de 2008 a 2009 sofreu supressão equivalente a 1.921,18 km² da sua cobertura vegetal nativa, sendo que em torno de 15 km² desta supressão ocorreu no Estado de Minas Gerais.

Minas Gerais foi o sétimo Estado do Brasil a apresentar o maior número de ocorrências de incêndios florestais no período de 2003 a 2018 (Martins *et al.*, 2019), e o terceiro em termos de registros de ocorrências de incêndios em Unidades de Conservação no período de 2008 a 2012, segundo Lima, Torres, Costa, Félix e Júnior (2018).

Segundo Pinto *et al.* (2021), os meses de setembro e outubro compõem a estação normal do fogo em todas as regiões do Brasil. Santos *et al.* (2019) avaliaram a distribuição espaço-temporal dos focos de calor no Estado de Minas Gerais no período de 2003 a 2017 e foi constatado que o maior número de queimadas ocorreu no período de julho a outubro, sendo o mês de setembro, o pico das queimadas.

Recentemente, a série histórica do INPE indicou elevação no número de focos de calor em todo o Estado em 2019 (9.999 focos) em comparação com o ano anterior (4.627 focos), representando um aumento de 116%. Os dados do Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Minas Gerais (CBMMG) mostraram que esse número é ainda maior, devido à sensibilidade do satélite às áreas superiores a 30 metros por 1 metro e a temperaturas a partir de 47°C.

Nesse cenário de registro de queimadas, foram desenvolvidos índices de risco de incêndio, sendo introduzidos pela primeira vez no Brasil em 1963, depois do trágico incêndio que atingiu cerca de 2 milhões ha no Estado do Paraná (Soares, 1998). Tais índices consistem em números que refletem, antecipadamente, a possibilidade de ocorrer um incêndio, bem como a sua facilidade de propagação, de acordo com as condições atmosféricas do dia, ou de uma sequência de dias, atuando como uma ferramenta importante para auxiliar no planejamento e supervisão das atividades de controle de incêndios florestais (Soares, 1972; Soares, 1998). O monitoramento desses índices, aliado ao acompanhamento de variáveis meteorológicas, é importante para caracterizar áreas com potencial de ocorrência de incêndios (Deppe, Paula, Meneghette & Vosgerau, 2004), como o Estado de Minas Gerais que em 1999 (Lima, 2000) apresentou cerca de 12.000 ha de área queimada, somente nas Unidades de

Conservação.

Nunes (2005) afirma que a intensidade de um incêndio e a velocidade com que ele avança estão associadas à umidade relativa do ar, à temperatura e à velocidade do vento. Quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa e a precipitação, menor é o teor de umidade do material combustível e, portanto, maior sua suscetibilidade ao fogo. Por outro lado, quanto maior a velocidade do vento, maior é a velocidade de propagação do fogo. Dessa forma, a utilização de dados meteorológicos precisos se torna fundamental para o planejamento de prevenção e combate aos incêndios florestais.

Portanto, o monitoramento do risco de incêndio, aliado ao monitoramento meteorológico, é fundamental para caracterizar regiões que apresentam vulnerabilidade à ocorrência deste evento, e ações que ajudem a sua prevenção, vigilância, monitoramento e o seu combate, bem como o dimensionamento de infraestrutura e de equipes (Machado, Silva & Biudes, 2014; Deppe *et al.*, 2004).

Neste contexto, as mudanças climáticas podem afetar a vulnerabilidade das florestas às queimadas de forma direta, por meio do aumento da temperatura e redução da precipitação e indireta ao induzir mudanças na estrutura da vegetação, resultando em florestas “menos densas, menos úmidas, mais inflamáveis e com menor capacidade de tamponar o fogo” (Copertino, Piedade, Vieira & Bustamante, 2019).

À medida que os efeitos das mudanças climáticas se tornam mais fortes, presume-se que o risco de eventos graves de incêndio tendem a aumentar futuramente (PIVELLO *et al.*, 2021). Segundo o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2013), o noroeste de Minas Gerais onde estão localizadas as cidades do Estado com maiores ocorrências de focos de calor (Santos *et al.*, 2019; Chaves *et al.*, 2021) estão entre as áreas do Brasil mais suscetíveis aos efeitos das mudanças climáticas que podem ocorrer até o final deste século.

Diante do exposto e considerando que Minas Gerais possui aproximadamente 36% de seu território em floresta natural (MapBiomias, 2019) e maior área de floresta plantada do país, mais de 2 milhões de ha (IBGE, 2019), torna-se evidente a importância e necessidade de estudos que forneçam cenários atuais e futuros propícios para a ocorrência de queimadas e incêndios florestais nesta região.

Assim, este estudo pretende primeiramente avaliar a relação entre as variáveis meteorológicas, os focos de calor e o índice meteorológico de incêndios (Fire Weather Index – FWI) no Estado

de Minas Gerais. A relação entre o FWI e as variáveis meteorológicas pode ser diferente da relação entre essas e os focos de calor, uma vez que o índice de risco ao fogo representa um risco potencial, que pode não se efetivar devido a fatores antrópicos. Por isso, as mudanças no uso e cobertura do solo também serão analisadas. Finalmente, pretende-se avaliar o cenário de risco ao fogo à luz das projeções climáticas futuras e quais as implicações para o Estado de Minas Gerais. Os resultados aqui obtidos poderão fornecer subsídios para ações de controle, monitoramento, prevenção e predição do índice de risco de incêndio na região.

Metodologia

Área de estudo

A área de estudo (Figura 1) compreende o Estado de Minas Gerais, localizado na região sudeste do Brasil, entre os paralelos de 14°13'58" e 22°54'00" de latitude sul e os meridianos de 39°51'32" e 51°02'35" de longitude a oeste de Greenwich, tendo como Estados vizinhos, São Paulo (sul e sudoeste), Rio de Janeiro (sudeste), Mato Grosso do Sul (oeste), Goiás e Distrito Federal (noroeste), Espírito Santo (leste) e Bahia (norte e nordeste) (Minas Gerais, 2019). O Estado de Minas Gerais conta com uma área territorial de 586.521,123 km² (IBGE, 2019) e população estimada em 21.168.791 de pessoas, de acordo com a Resolução nº 3, de 26 de agosto de 2019 (Brasil, 2019, p. 374), representando cerca de 10% da população total do país.

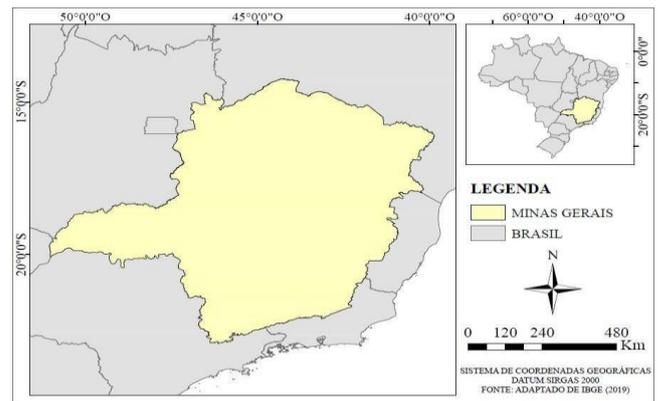


Figura 1. Localização da área de estudo. O Estado de Minas Gerais é representado pela região hachurada em amarelo

Dados utilizados

Foram utilizados dados de focos de calor para os meses de setembro e outubro no período de 2015 a 2019 disponibilizados pelo Programa Queimadas do INPE, derivados do sensor *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*

(MODIS), a bordo do satélite de referência *Earth Observation System* (AQUA), de órbita polar. Os dados estão em formato *shapefile* e são referentes à segunda passagem diária do satélite, que ocorre no período da tarde, quando o número de queimadas é maior devido à temperatura do ar ser mais elevada.

Utilizando como dado de entrada os pontos correspondentes aos focos de calor obtidos na base de dados mencionada anteriormente, foram estimadas suas densidades na área de estudo a partir da aplicação do estimador de densidade *Kernel*, disponível na extensão “*Spatial Analyst Tools*” do software ArcGIS 10.3.

Segundo Silverman (1986), este estimador (Equação 1) projeta uma vizinhança circular ao redor de cada ponto da amostra, correspondendo ao raio de influência, e então é aplicada uma função matemática que vai de 1, na posição do ponto, a 0, na fronteira da vizinhança. O valor para a célula é a soma dos valores *Kernel* sobrepostos e divididos pela área de cada raio de pesquisa.

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (1)$$

em que: n é o número de pontos observados; h é a largura de banda; k é a função *Kernel*; x é o vetor de coordenada que representa a localização do ponto estimado; e X_i é o vetor da i -ésima coordenada que representa cada ponto observado em relação ao estimado.

A partir da densidade de *Kernel* foram criados seis mapas, cinco referentes ao acumulado anual de focos de calor para os meses de setembro e outubro de cada ano do período estudado e um que representa a média dos focos acumulados desse período. Os mapas foram classificados com níveis de densidade que variam de acordo com a cor e a sua tonalidade, em que: vermelho significa densidade muito alta, laranja: densidade alta; amarelo: densidade moderada; verde com tonalidade clara: densidade baixa e verde com tonalidade escura: densidade muito baixa.

Os mapas são gerados no formato raster e para conseguir um resultado eficiente utilizou-se um arquivo *shapefile* do Estado de Minas Gerais, em escala 1:250.000, disponibilizado pelo IBGE (2019), como máscara para delimitar a fronteira dos mapas, além de ter sido realizado o ajuste do método de reamostragem de pixels para “*Bilinear Interpolation*”.

Para obtenção dos dados referentes ao uso e cobertura do solo da área de estudo, utilizou-se a

coleção 5.0, de 2019, da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil do projeto MapBiomass, que representa uma iniciativa do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima (SEEG/OC). A coleção é composta por imagens do satélite Landsat, com resolução de 30 metros, disponíveis na plataforma *Google Earth Engine* e com uma série temporal de mais de 30 anos.

Também foram utilizados os dados meteorológicos mensais de precipitação, umidade relativa, temperatura do ar, velocidade do vento a 10 metros, e pressão a superfície da reanálise do ERA5 produzida pelo *European Centre for Medium Range Weather Forecasts* (ECMWF) (C3S, 2017) com resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

As informações sobre as condições meteorológicas durante o período analisado neste estudo foram obtidas por meio do Infoclima, boletim de informações climáticas disponível no site do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)/INPE, e por meio de dados do monitoramento climático do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A base de dados do *Copernicus Climate Change Service* (C3S) foi utilizada para a obtenção do FWI no período de 2015 a 2019. Estes dados são diários na resolução espacial de 0.25° longitude \times 0.25° latitude. Os dados diários foram convertidos em médias mensais para posterior cálculo da correlação entre o FWI e focos de calor, como também com as variáveis meteorológicas.

Para ajustar o domínio espacial dos dados do ERA5 para o mesmo domínio das informações do FWI e dos focos de calor com o objetivo de calcular a correlação temporal de Pearson, realizou-se uma interpolação bilinear utilizando a função *remapbil* do programa *Climate Data Operators* (CDO 1.9.9), e, posteriormente, utilizou-se a função *timcor* (calcula a correlação, Equação 2) do mesmo programa. Os mapas finais de correlação foram gerados por meio do programa GrADS versão 2.0.2.

Para obtenção do grau de relação entre as variáveis, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson, representado por r e definido pela Equação abaixo:

$$r = \frac{\sum XY - \frac{(\sum X)(\sum Y)}{n}}{\sqrt{\left[\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}\right] \left[\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}\right]}} \quad (2)$$

onde n = o número de elementos da amostra, neste caso, representa o número de tempos.

“A quantidade r mede a força e a direção de uma relação linear entre duas variáveis” (Vieira, 2018).

Após verificar como as variáveis meteorológicas se relacionam com os focos de calor e o risco de incêndio, será feita uma avaliação do quanto as mudanças climáticas podem afetar a dinâmica de ocorrências dos focos e o risco de fogo. Para auxiliar nesta discussão, mapas das anomalias das projeções climáticas foram elaborados a partir dos dados extraídos do Portal “Projeções Climáticas no Brasil” do INPE/MCTI utilizando também o software ArcGIS versão 10.3. Foram utilizadas as projeções para o Brasil regionalizadas pelo modelo Eta a partir do modelo global Hadgem2-ES (método de *downscaling*) para uma resolução de 20 km. O cenário *Representative Concentration Pathway 8.5* (RCP8.5) será avaliado para os meses de setembro e outubro no período de 2041- 2070. As variáveis selecionadas foram: precipitação, temperatura do ar, pressão à superfície, umidade relativa e intensidade do vento.

Em relação à concentração de gases do efeito estufa, o cenário RCP8.5 assume que o dióxido de carbono (CO₂) equivalente excederá 1.000 ppm no final do século 21 e o forçamento radiativo atingirá 8,5 W/m² até 2100. Segundo consta no portal: “Esse cenário é o mais próximo das tendências observadas nas medições atuais das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera”. Os dados do período histórico, também chamado de *baseline* ou referência, correspondem aos valores históricos das concentrações de gases do efeito estufa no período de 1961 até 1990.

Fire Weather Index - FWI

O índice meteorológico de incêndios FWI (Van Wagner, 1987) foi desenvolvido pelo *Canadian Forest Fire Danger Rating System* (CFFDRS) em 1970 e, de acordo com Reis e Torres (2018), pode ser aplicado para todo o Estado de Minas Gerais, visto que apresentou os melhores resultados dentre os sete índices avaliados pelos autores. Este índice compreende seis componentes, sendo eles:

1. Quantidade de umidade do combustível fino (*Fine Fuel Moisture Code - FFMC*): corresponde à classificação numérica do conteúdo de umidade da camada orgânica e dos combustíveis finos existentes na floresta;

2. Quantidade de umidade da turfa (*Duff Moisture Code - DMC*): corresponde à classificação numérica para a umidade média existente na camada orgânica pouco compacta de profundidade moderada;

3. Grau de secura (*Drought Code - DC*): corresponde à classificação numérica da umidade média existente nas camadas orgânicas compactas e profundas. Esta quantificação deve ser utilizada como um guia nas atividades de supressão e preparação de longo prazo, em grandes áreas;

4. Índice de propagação inicial (*Initial Spread Index - ISI*): corresponde à classificação numérica da velocidade de propagação do incêndio, imediatamente após a ignição, em um determinado tipo de material combustível;

5. Ajuste da quantidade de umidade da turfa (*Buid-Up Index - BUI*): corresponde à classificação numérica da quantidade de material combustível disponível para a combustão. Esta quantificação é adequada para uso como um guia nas atividades de controle e preparação de curto prazo;

6. Índice meteorológico de incêndios (*Fire Weather Index - FWI*): corresponde à classificação numérica da intensidade potencial do incêndio em um determinado tipo de combustível, e combina ISI e BUI.

O FWI é baseado em leituras instantâneas dos dados meteorológicos de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento ao meio-dia do horário local e precipitação acumulada nas últimas 24 horas, prevendo o risco de incêndio durante o período de pico entre às 14:00 e 16:00 horas local ou *Greenwich Mean Time* (GMT) (Van Wagner, 1987).

O FWI é classificado em seis classes de perigo (iguais para todos os países) de acordo com a definição de níveis de classe do *European Forest Fire Information System - EFFIS*, sendo elas: muito baixa (FWI < 5,2), baixa (5,2 >= FWI < 11,2), moderada (11,2 >= FWI < 21,3), alta (21,3 >= FWI < 38,0), muito alta (38,0 >= FWI < 50,0) e extrema (FWI >= 50,0) (C3S, 2017).

Para que fosse realizada a correlação entre a média mensal dos dados diários deste índice para os meses de setembro e outubro de 2015 a 2019.

Resultados e discussão

Focos de calor para o período de 2015 a 2019 e relação com o uso e cobertura do solo

A média mensal de focos de calor no período de 2015 a 2019, foi maior nos meses de setembro (2.677) e outubro (1.906) que juntos representam 59% dos focos (Figura 2). Por essa razão, estes dois meses foram selecionados para análise neste estudo.

Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2017), a estação chuvosa

em Minas Gerais acontece entre os meses de outubro e março, sendo completamente estabelecida no mês novembro, ou seja, a maior ocorrência de focos de calor para o período

estudado acontece entre o final da estação seca e o início da chuvosa.

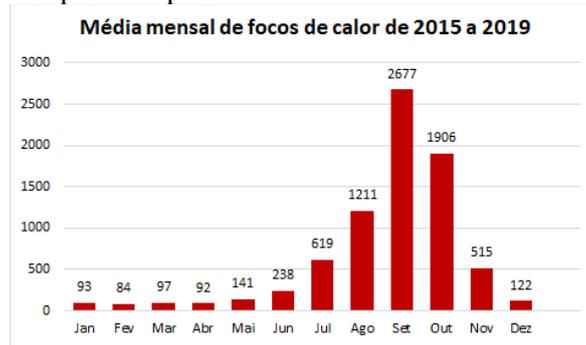


Figura 2. Média mensal de focos de calor no período de 2015 a 2019. Fonte: Elaborada pelos autores com base nas informações fornecidas pelo Programa Queimadas do INPE (2020).

Nota-se que a distribuição espacial anual dos focos de calor no Estado de Minas Gerais é bastante variável em cada um dos anos analisados, sendo que nos anos de 2015 e 2018 (Figura 3 (a) e (d)) a maior concentração ocorre nas regiões norte, noroeste e nordeste. Por outro lado, em 2016 a maior concentração é verificada na região noroeste e principalmente na parte leste do Triângulo

Mineiro (Figura 3 (b)), e em 2017 nestas mesmas regiões e na parte centro-sul do Estado (Figura 3 (c)). Em 2019 a porção centro-sudeste é a que apresenta o maior número de focos (Figura 3 (e)). Finalmente, por meio da média do número de focos para todo o período, nota-se que as regiões central-nordeste são as que apresentam as maiores ocorrências (Figura 3 (f)).

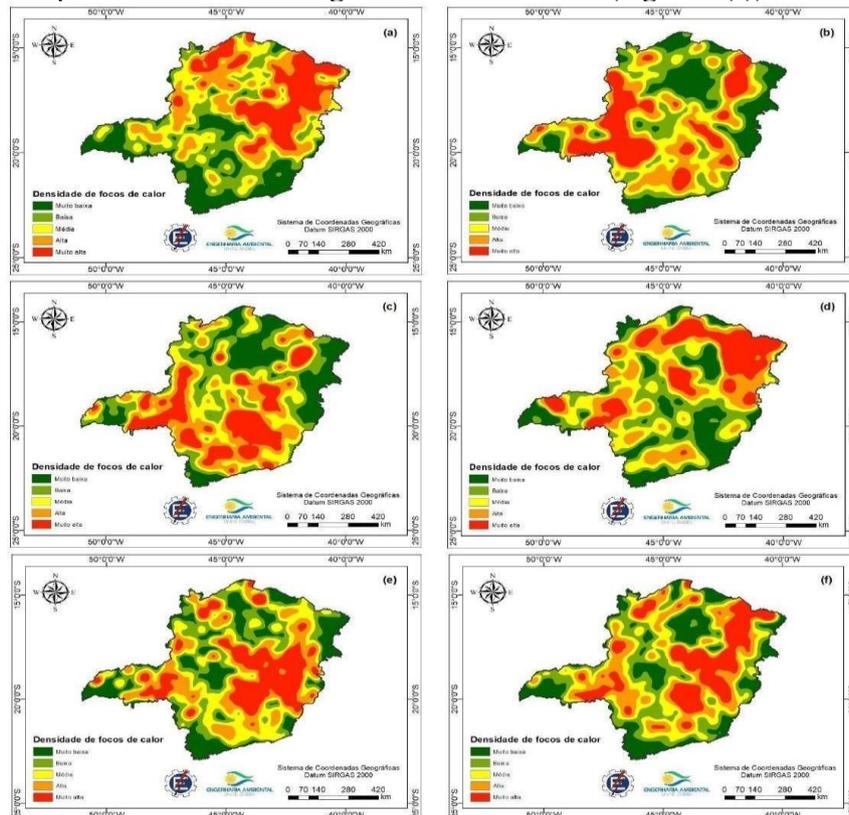


Figura 3. Acumulado dos focos de calor no Estado de Minas Gerais nos anos (a) 2015, (b) 2016, (c) 2017, (d) 2018 e (e) 2019, considerando os meses de setembro e outubro. (f) Média dos focos de calor de 2015 a 2019 para os meses de setembro e outubro. Fonte: Elaborada pelos autores com base nas informações fornecidas pelo Programa Queimadas do INPE.

Dos 853 municípios de Minas Gerais, 92% (782) apresentam no mínimo um foco de calor. A

Tabela 1, apresenta os dez municípios responsáveis pelo maior número de ocorrências de focos de calor

nos meses de setembro e outubro, o que equivale a 13% (2.939) do total de focos observados. Entre as 12 mesorregiões do Estado, quatro apresentam as maiores quantidades de focos (Noroeste de Minas, Jequitinhonha, Norte de Minas e Triângulo Mineiro), com destaque para o Noroeste com 41% (1207) das ocorrências (Tabela 1). Os municípios com as maiores quantidades são: Paracatu (370), Araçuaí (342) e Itinga (334), os quais também aparecem nesta ordem na lista dos dez municípios com maior ocorrência de focos de calor elaborada por Santos *et al.* (2019) entre os anos de 2003 e 2017. Verifica-se que 80% dos municípios listados estão compreendidos no bioma Cerrado, enquanto os outros 20% estão no bioma Mata Atlântica (Tabela 1).

Segundo Pivello (2011), a Mata Atlântica é um bioma sensível ao fogo, diferentemente dos campos e savanas abertas do Cerrado, considerados ecossistemas adaptados ao fogo e dependentes dele. Entretanto, todos os biomas contêm tipos de vegetação com diferentes sensibilidades ao fogo,

sendo assim, manchas de vegetação sensível ao fogo podem ser encontradas no Cerrado (Pivello *et al.*, 2021). Apesar dessa adaptação, a intensa utilização do fogo em atividades agropecuárias e para abertura de áreas agrícolas ocasiona perda de espécies da fauna e da flora, além de perda de nutrientes do solo (Pivello, 2011).

O bioma Cerrado apresenta, predominantemente, um clima tropical sazonal. Assim, durante a estação seca (de maio a setembro), a precipitação pode ser zero em alguns meses, sendo que a média anual é de 1.500 mm, podendo variar entre 600 e 800 mm nas regiões limítrofes com a Caatinga; já a temperatura média anual fica em torno de 22 a 23°C (MMA, 2011). Portanto, as condições climáticas deste bioma contribuem de forma significativa para o aumento na ocorrência de incêndios florestais, podendo ser de origem natural ou não. De acordo com o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio, 2017), 90% dos incêndios florestais têm origem antrópica.

Tabela 1: Relação dos municípios que apresentaram maior ocorrência de focos de calor nos meses de setembro e outubro de 2015 a 2019 no Estado de Minas Gerais.

Município	Mesorregião	Bioma	Número de focos
Paracatu	Noroeste de Minas	Cerrado	370
Araçuaí	Jequitinhonha	Mata Atlântica	342
Itinga	Jequitinhonha	Mata Atlântica	334
Diamantina	Jequitinhonha	Cerrado	323
Arinos	Noroeste de Minas	Cerrado	316
Uberaba	Triângulo Mineiro	Cerrado	286
João Pinheiro	Noroeste de Minas	Cerrado	270
Unaí	Noroeste de Minas	Cerrado	251
Lassance	Norte de Minas	Cerrado	229
Buritizeiro	Norte de Minas	Cerrado	218

Fonte: Elaborada pelos autores com base nas informações fornecidas pelo Programa Queimadas do INPE (2020).

Em relação ao uso e cobertura do solo (Figura 4), ao comparar os anos com menor e maior número de focos, 2018 e 2019, respectivamente, através dos dados fornecidos anualmente pelo MapBiomas, é possível verificar a diminuição da área florestada (3.596,89 km²) e formação não

florestal (378,96 km²). Por outro lado, nota-se um aumento das áreas de agropecuária (3.840,18 km²), área não vegetada (87,42 km²) e corpos d'água (72,34 km²) (MapBiomas, 2020).

De acordo com Santos *et al.* (2019), parte considerável dos focos de calor no Estado ocorre

devido à expansão agrícola, que exige limpeza da área para lavouras e pastagens. Portanto, o fato da classe agropecuária apresentar o maior crescimento pode estar associado ao aumento no número de focos de calor neste período.

Considerando os 10 municípios que apresentaram maior ocorrência de focos de calor no período estudado (Tabela 1), essa relação pode ser

corroborada, visto que todos apresentaram crescimento na área destinada à agropecuária de 2018 para 2019, sendo juntos responsáveis pelo aumento de aproximadamente 9% (349,65 km²) desta classe.

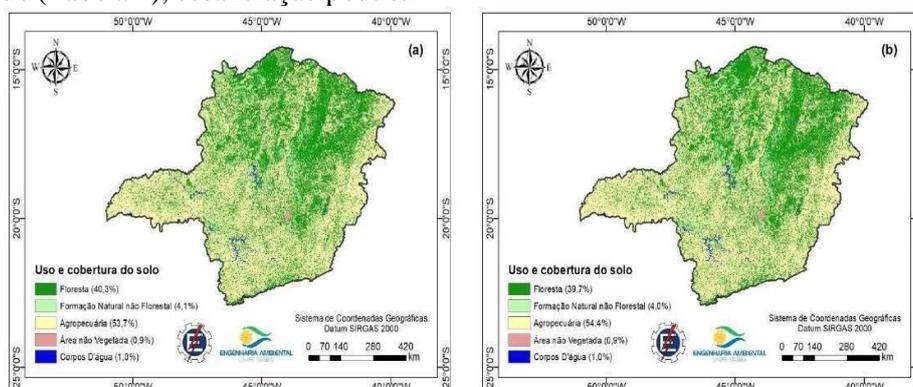


Figura 4. Uso e cobertura do solo no Estado de Minas Gerais nos anos de (a) 2018 e (b) 2019. Fonte: Adaptado pelos autores com base nas informações do MapBiomias.

Segundo iniciativa recente do MapBiomias, o “MapBiomias Fogo” (2020), que mapeia cicatrizes de queimadas anuais no Brasil, em 2019, foram queimados mais de 10 mil km² no Estado de Minas Gerais, sendo que 61% (6.108 km²) ocorreram em vegetação nativa e 39% (3.929 km²) em locais de uso agropecuário. A área queimada em 2019 foi 43% maior do que em 2018, quando as cicatrizes de fogo corresponderam a aproximadamente 7 mil km².

Condições meteorológicas e focos de calor de 2015 a 2019 para setembro e outubro

Durante o mês de setembro de 2015, as chuvas estiveram abaixo da média histórica na maior parte do Brasil, com exceção da região centro-sul, que apresentou índices pluviométricos muito acima da normal climatológica. Segundo o infoclima, esse padrão foi determinado pela evolução do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) classificado como condição ainda mais intensa, com valores de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) excedendo em até 3°C os valores médios históricos na área mais central do Pacífico Equatorial. Já em outubro de 2015, o infoclima menciona que as chuvas foram escassas em Minas Gerais e os baixos valores de umidade relativa do ar foram associados ao início tardio da estação chuvosa. Além disso, as anomalias de temperatura, de acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foram negativas (da ordem de 2 a 3°C) em todo o Estado de Minas Gerais. O ano de 2015 foi o que apresentou maior

número de ocorrência de focos ao considerar a soma de setembro e outubro (6.024), seguido por 2019 (5.882) e 2017 (5.420). Os anos de 2016 (2.890) e 2018 (2.700) apresentaram as menores ocorrências.

Os meses de setembro e outubro de 2016 também apresentaram déficits pluviométricos e temperaturas acima da média histórica em quase todo Estado de Minas Gerais. Em setembro foram detectadas 1.979 ocorrências de focos de calor no Estado, segundo imagens do sensor MODIS do satélite AQUA, representando uma diminuição de 25% em comparação a setembro de 2015. Já em outubro, foram detectadas cerca de 911 ocorrências de focos de calor no Estado, este valor foi 54% inferior ao detectado em setembro, sendo esta redução climatologicamente normal e esperada devido ao início da estação chuvosa na maior parte do Brasil central. Setembro de 2017 apresentou acentuada redução das chuvas numa extensa área da região sudeste do Brasil. A escassez de chuva foi decorrente da circulação anticiclônica anômala que se estabeleceu sobre o Atlântico Sul associada a uma condição de bloqueio atmosférico. Além disso, a situação se agravou pela baixa umidade do solo e pelo fraco transporte de umidade da Amazônia em direção ao interior do Brasil. Em comparação com setembro do ano anterior, este foi muito mais seco e quente, resultando em um aumento de 56% nas detecções de focos de calor em Minas Gerais, que apresentou 3.084 focos.

Em setembro de 2018 a precipitação ficou abaixo da média na região norte, sudeste e especialmente na região nordeste do Estado de Minas Gerais. Em outubro, a parte sul do Estado

registrou precipitações acima da média, enquanto que a região nordeste ficou bem abaixo da média histórica. Isso explica o comportamento dos focos em 2018 (Figura 3 (d)), onde é possível observar níveis de densidade muito alta na região nordeste do Estado. Em outubro houve predominância de chuvas abaixo da média histórica na maior parte da região sudeste devido a persistência de uma condição de bloqueio atmosférico. Além disso, esse padrão no escoamento atmosférico também foi consistente com a ausência de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Neste mês foram registrados 840 focos de calor em Minas Gerais.

Em setembro de 2019, partes da região noroeste, nordeste e sudeste do Estado de Minas Gerais tiveram precipitação abaixo da média. Em outubro a precipitação em todo o Estado esteve muito abaixo da média com anomalias negativas em torno de 200 mm em algumas regiões. A maior densidade de focos de calor pôde ser observada na região sudeste do Estado (Figura 3 (e)).

Correlação dos focos de calor e FWI com as variáveis meteorológicas

Como este estudo abrange a análise de dois meses (setembro e outubro) em um período de cinco anos (2015 a 2019), o valor absoluto mínimo para o coeficiente de correlação de Pearson ser significativo a 95% é 0,632, de acordo com o teste *t* de *Student*. Desta forma, foi analisada a correlação entre os focos de calor e as variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura, pressão à superfície, velocidade do vento e umidade relativa do ar) (Figura 5). Pode-se notar que a correlação entre os focos de calor e a precipitação é predominantemente negativa e significativa em todo o Estado (Figura 5 (a)), o que indica que os focos de calor e esta variável são inversamente proporcionais, ou seja, quando a precipitação aumenta, os focos de calor diminuem. O mesmo pode ser afirmado ao considerar a correlação com a umidade relativa (Figura 5 (e)).

O período avaliado (setembro e outubro), compreende duas estações, inverno (até o dia 21/09) e primavera (do dia 22/09 até final de

outubro), sendo o inverno o período mais seco no Estado de Minas Gerais. Os totais pluviométricos nesse período no setor sul do Estado variam entre 50 e 100 mm, no setor centro-oeste e leste são de 25 mm, enquanto no setor norte quase não há precipitação, o que justificaria maiores ocorrências de focos de calor, especialmente na região norte nesse período.

Já na primavera, com exceção do setor sul, a precipitação volta a aumentar, com totais pluviométricos da ordem de 200 a 350 mm (Silva, 2014). As anomalias de temperatura média para setembro e outubro de 2018, de acordo com os dados do INMET, foram positivas em praticamente todo o Estado. Em 2019 esse padrão foi observado, com anomalias da ordem de 3°C no Triângulo Mineiro em setembro e outubro.

A correlação com a temperatura apresenta maior variabilidade espacial, sendo que a região centro-norte do Estado mostra correlação predominantemente positiva e significativa (Figura 5 (b)), o que significa que o aumento de temperatura está associado a maiores ocorrências de focos de calor nesta região. Justino, Souza e Setzer (2002) afirmam que a maior parte das queimadas e incêndios florestais no Brasil é detectada nos períodos de estiagem, quando a umidade relativa do ar está baixa e as temperaturas estão elevadas.

A correlação entre os focos de calor e a pressão à superfície é predominantemente positiva e significativa, especialmente na parte sul do Estado, bem como na parte leste da região do Triângulo Mineiro (Figura 5 (c)). O aumento da pressão atmosférica normalmente está associado à diminuição da precipitação e, por isso, nesta condição ocorre mais focos de calor.

Em termos de velocidade do vento, esta variável apresenta padrão similar ao visto para a pressão atmosférica (Figura 5 (c) e (d)), porém com uma dominância maior de correlações positivas no Estado, principalmente na sua parte sul. Quanto maior a velocidade do vento, maior o número de focos de calor, uma vez que o vento é o principal elemento para a propagação do fogo.

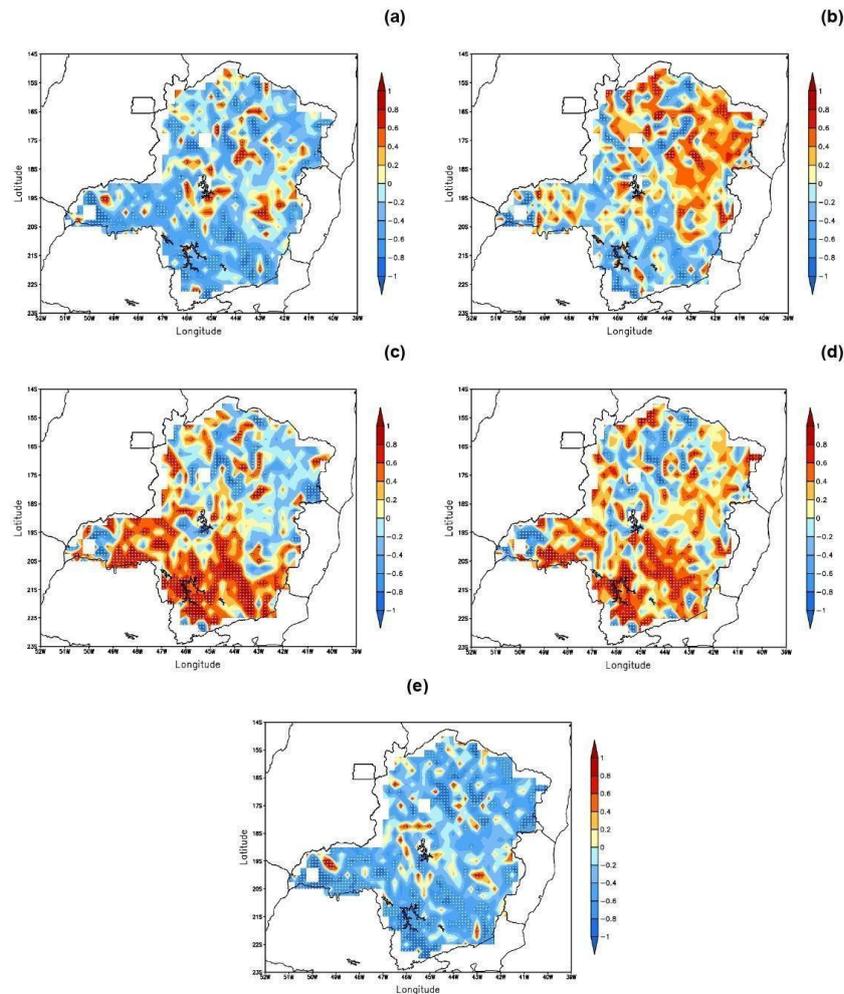


Figura 5. Correlação entre os focos de calor e as variáveis meteorológicas: (a) Precipitação, (b) Temperatura, (c) Pressão à superfície, (d) Velocidade do vento e (e) Umidade relativa do ar. Fonte: Autores com base nos dados do INPE e ECMWF.

Ao observar a correlação entre o FWI e as variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura, pressão à superfície, velocidade do vento e umidade relativa do ar) (Figura 6), nota-se que diferente dos focos de calor, a correlação com o FWI apresenta menor variabilidade espacial, com destaque para as variáveis precipitação (Figura 6 (a)) e umidade relativa do ar (Figura 6 (e)), as quais apresentam correlação negativa significativa em todo o Estado, diferentemente da correlação apresentada entre essas variáveis e os focos de calor, em termos do sinal da correlação em algumas regiões.

A correlação com a temperatura também apresenta um padrão diferente do que é observado em relação aos focos de calor (Figuras 5 (b) e 6 (b)). Valores positivos de correlação somente são observados nas regiões sudoeste e nordeste do Estado, sendo que só uma pequena parte da região nordeste apresenta valores significativos, indicando que quanto maior a temperatura nesta

região, maior o risco de fogo. Além disso, deve-se ressaltar que o risco de fogo leva em consideração no cálculo a temperatura máxima diária.

Foi possível notar valores positivos de correlação do FWI com a pressão à superfície (Figura 6 (c)). Esta correlação é significativa em toda a parte centro-sul do Estado. Conforme explicado anteriormente, quando a pressão atmosférica está elevada, isto significa que há a presença de um escoamento anticiclônico que inibe a formação de nuvens, por isto, este resultado está em concordância com os valores negativos de correlação entre a precipitação e o FWI (Figura 6 (a)).

A correlação entre o FWI e a velocidade do vento é positiva e significativa especialmente na parte sul do Estado (Figura 6 (d)). A velocidade de propagação do fogo depende da velocidade do vento e, por isso, este é um importante parâmetro para análise do risco de fogo.

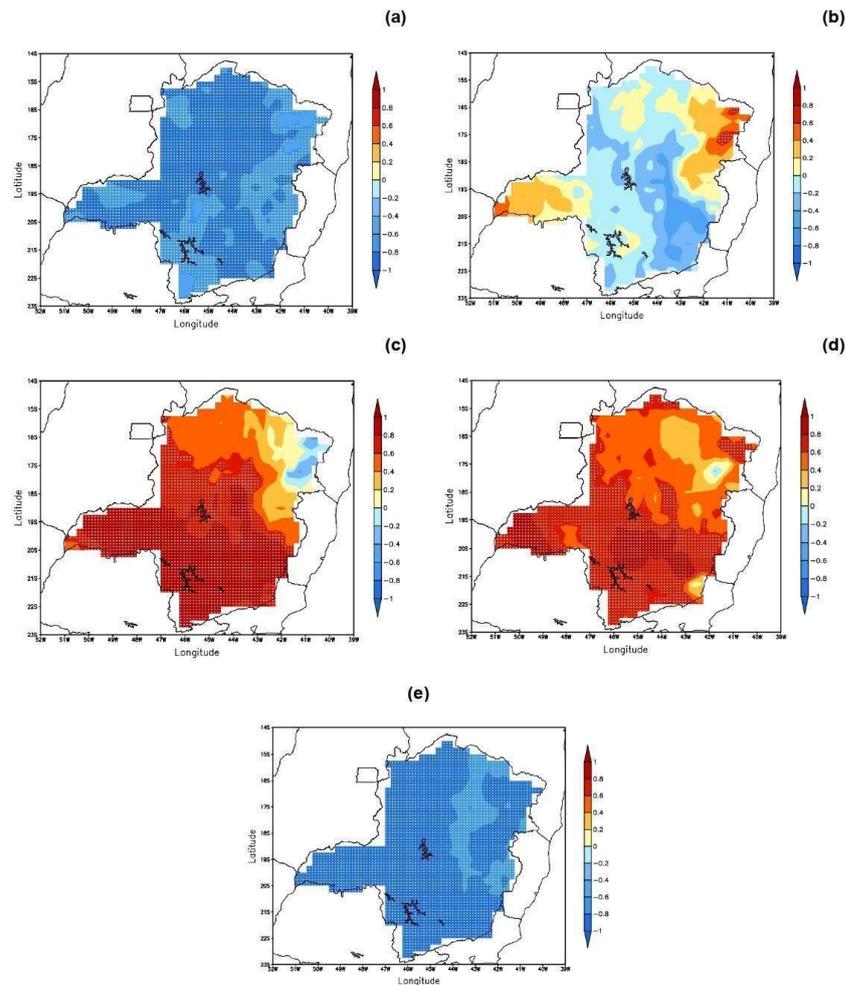


Figura 6. Correlação entre o FWI e as variáveis meteorológicas: (a) Precipitação, (b) Temperatura, (c) Pressão à superfície, (d) Velocidade do vento e (e) Umidade relativa do ar. Fonte: Autores com base nos dados do ECMWF.

É importante ressaltar que todos os índices de risco ao fogo permitem fazer uma estimativa quantitativa da ocorrência de incêndios florestais. Contudo, segundo Reis e Torres (2018), mesmo que um índice de risco apresente o valor máximo, o incêndio pode não ocorrer, sendo que o oposto também é verdadeiro, o que significa que podem ocorrer incêndios mesmo em dias em que o índice de risco tenha valor zero. Portanto, a correlação entre o FWI e as variáveis meteorológicas pode apresentar variações em relação à correlação entre os focos de calor e as mesmas variáveis.

Projeções climáticas

As anomalias médias mensais consistem

nas diferenças entre a média para o período futuro futuro (2041-2070) e a média relativa ao período histórico (1961-1990). Para cada um dos dois meses analisados para a precipitação e temperatura (Figura 7) é possível notar que as anomalias de precipitação apresentam valores negativos em todo o Estado, especialmente em outubro (Figura 7 (b)), denotando um possível cenário de precipitação abaixo da média. Com relação a temperatura, foram observadas anomalias positivas em todo o Estado, com temperaturas mais elevadas na parte ocidental, tanto em setembro como em outubro (Figuras 7 (c) e (d)). Se estas projeções de precipitação e temperatura se configurarem, teremos um aumento na ocorrência de focos de calor, dado às análises anteriores que demonstram a relação entre estas variáveis.

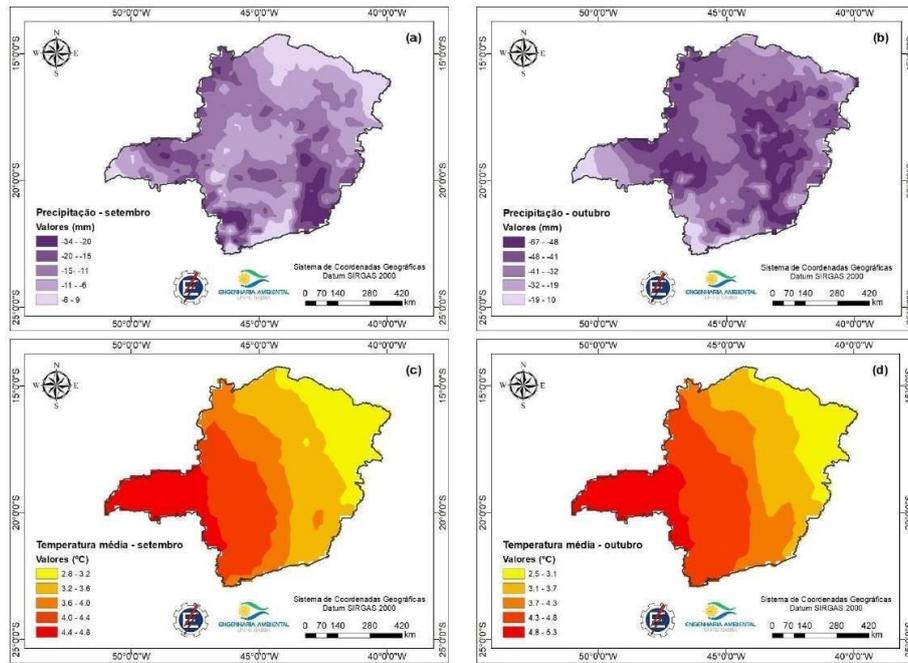


Figura 7. Anomalia média mensal de 2041 a 2070 para a precipitação em (a) setembro e (b) outubro e temperatura em (c) setembro e (d) outubro. Fonte: Adaptado pelos autores com base em INPE/MCTI (2020).

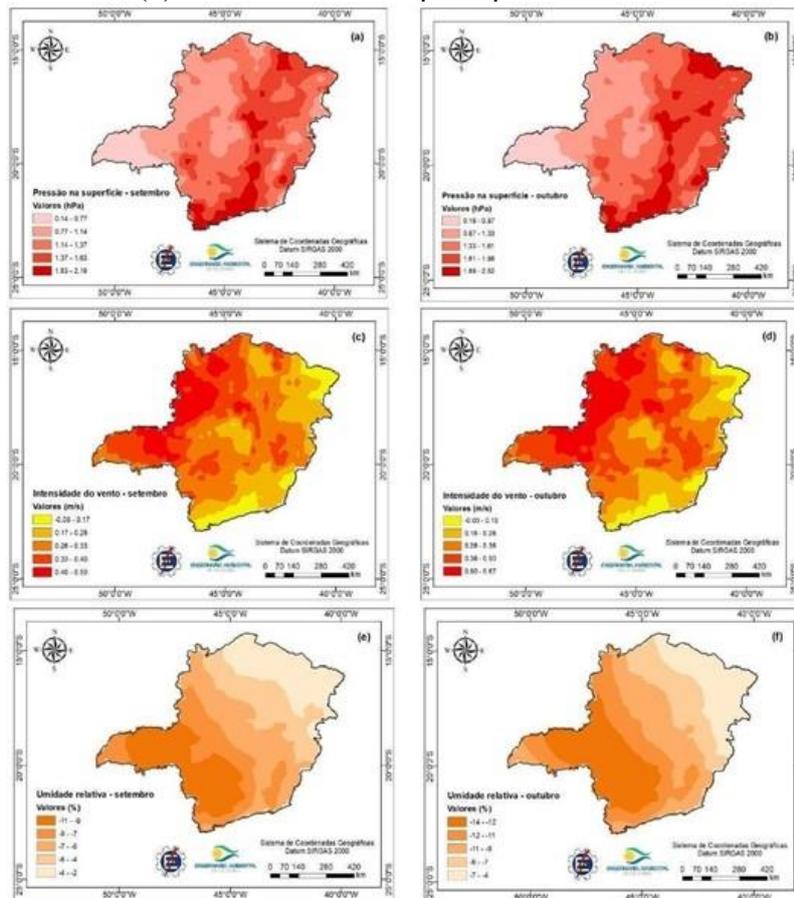


Figura 8. Anomalia média mensal de 2041 a 2070 para a pressão à superfície em (a) setembro e (b) outubro, intensidade do vento em (c) setembro e (d) outubro, e umidade relativa em (e) setembro e (f) outubro. Fonte: Elaborado pelos autores com base em INPE/MCTI (2020).

Ao considerar as variáveis pressão à superfície, intensidade do vento e umidade relativa nos meses de setembro e outubro (Figura 8), observa-se que anomalias no campo de pressão

atmosférica à superfície são maiores especialmente na porção oriental do Estado em outubro, indicando que estas regiões podem ter maior ocorrência de focos de calor no futuro, associado a condições de

anomalias negativas de precipitação (Figura 7 (b)).

É projetado para o cenário RCP8.5 um aumento entre 0,4 a 0,5 ms^{-1} na intensidade do vento em praticamente toda a porção ocidental do Estado (Figura 8 (c) e (d)), o que também indica maior propensão ao espalhamento dos focos de calor nestas regiões com maior intensidade, especialmente no mês de outubro. Soma-se a isso as anomalias negativas de umidade relativa do ar em todo o Estado, mas com maiores valores na sua porção sudoeste (Figuras 8 (e) e (f)). Em outubro as anomalias negativas mais intensas abrangem um maior número de regiões (Figura 8 (f)). Portanto, conclui-se que a partir das anomalias projetadas para as variáveis meteorológicas no cenário RCP8.5 há maior potencial de ocorrência de focos de calor, especialmente no mês de outubro, em praticamente todo o Estado de Minas Gerais.

Conclusões

A partir deste estudo foi possível avaliar a influência das condições meteorológicas atuais e futuras na ocorrência de queimadas no Estado de Minas Gerais, bem como estabelecer a relação com os fatores antrópicos na ocorrência de focos de calor, tendo em vista a expansão da agropecuária sobre as áreas anteriormente florestadas. O ano de 2015 foi o que apresentou maior número de ocorrência de focos quando se considera a soma de setembro e outubro (6.024), seguido por 2019 (5.882) e 2017 (5.420). Os anos de 2016 (2.890) e 2018 (2.700) foram os que apresentaram as menores ocorrências. Estes dados estão condizentes com as condições meteorológicas verificadas nos meses de setembro e outubro desses anos para o Estado de Minas Gerais.

Além disso, por meio das análises realizadas pode-se verificar significativas correlações negativas entre a precipitação e a umidade relativa com o FWI em todo o Estado.

Valores positivos e significativos de correlação entre FWI e pressão à superfície e velocidade do vento também foram observados, especialmente na parte sul do Estado. No caso da temperatura, valores positivos de correlação foram notados nas regiões sudoeste e nordeste do Estado, sendo que só uma pequena parte da região nordeste apresentou valores significativos. Os padrões espaciais de correlação apresentam algumas diferenças entre os focos de calor e o FWI, uma vez que este último indica uma estimativa de ocorrência de focos e o primeiro apresenta os que efetivamente ocorreram.

Finalmente, as projeções climáticas permitiram verificar que, de forma geral, há o

potencial de maior ocorrência de queimadas e incêndios florestais em um clima futuro em todo o Estado, principalmente no mês de outubro. Portanto, se estas projeções se confirmarem teremos aumento nos focos de calor e um cenário possivelmente bastante diferente do período avaliado aqui, em que o mês de setembro apresentou as maiores ocorrências de focos em relação a outubro (com exceção para 2015).

Para estudos futuros, sugere-se análise mais aprofundada dos municípios que apresentaram maior ocorrência de focos de calor e sua relação com o uso e cobertura do solo, a fim de avaliar as atividades mais recorrentes.

Por fim, acredita-se que este estudo poderá ser utilizado para embasar políticas públicas para evitar ou reduzir focos de incêndio no Estado de Minas Gerais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Monitoramento de Queimadas do CPTEC/INPE por disponibilizar os dados de focos de calor do satélite AQUA, ao INPE/MCTI pelos dados em geotiff de projeções climáticas para o futuro no Brasil e ao ECMWF pelos dados da reanálise do ERA5 e do índice de risco ao fogo FWI.

Referências

- Brasil. Ministério da Economia/Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução Nº 3, de 26 de agosto de 2019. Seção 1, p. 374. [online] Disponível: <http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=28/08/2019&jornal=515&pagina=374&totalArquivos=485>. Acesso em: 15 maio. 2020
- Chaves, M.; Martins, F.; Mataveli, G.; Conceição, K.; Barros, K.; Guerrero, J. Focos de calor no Cerrado e na Caatinga de Minas Gerais identificados por sensor orbital. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v. 2, n. 1, p. 42–54. 2021. Disponível: <https://rbsr.com.br/index.php/RBSR/article/view/40>. Acesso em: 17 ago. 2021.
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). Disponível: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>. Acesso em: 10 nov. 2020.
- Copertino, M.; Piedade, M.; Vieira, I.; Bustamante, M. Desmatamento, fogo e clima estão intimamente conectados na Amazônia. *Ciência*

- e Cultura, [s.l.], v. 71, n. 4, p. 04-05, out. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602019000400002>. Disponível: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252019000400002&tlng=pt. Acesso em: 20 ago. 2020
- Deppe, F.; Paula, E. V. de; Meneghette, C. R.; Vosgerau, J.. Comparação de índice de risco de incêndio florestal com focos de calor no Estado do Paraná. *Floresta*. Curitiba, p. 119-126. maio 2004. Disponível: https://www.researchgate.net/publication/279437615_Comparacao_de_indice_de_risco_de_incendio_florestal_com_focos_de_calor_no_Estado_do_Parana. Acesso em: 10 jun. 2020
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Global Forest Resources Assessment: Progress towards sustainable forest management*. Roma, 2006. 350 p. Disponível: <http://www.fao.org/3/a-a0400e.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2020
- Fundação SOS Mata Atlântica; INPE. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: relatório técnico: período 2017-2018. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica, 2019. Disponível: <https://www.sosma.org.br/wp-content/uploads/2019/06/Atlas-mata-atlanticaDIGITAL.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2020.
- Fundação SOS Mata Atlântica; INPE. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: relatório técnico: período 2018-2019. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica, 2020. Disponível: https://www.sosma.org.br/wp-content/uploads/2020/06/2020_Atlas_Mata_At_lantica_2018-2019_relatorio_tecnico_final-1.pdf. Acesso em: 14 jun. 2020.
- ICMBio. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. O Instituto adota várias técnicas de prevenção ao fogo. 2017. [online] Disponível: <https://www.icmbio.gov.br/portal/ultimas-noticias/20-geral/9057-as-varias-tecnicas-de-prevencao-e-combate-ao-fogo>. Acesso em: 17 ago. 2021.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (ed.). *Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000*. Rio de Janeiro: Ibge, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2019. 164 p. [online] Disponível: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101676>. Acesso em: 20 maio. 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Malha Municipal Digital*. 2019. [online] Disponível: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=downloads>. Acesso em: 20 maio. 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2018*. Rio de Janeiro. v. 33, 2019. [online] Disponível: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2018_v33_informativo.pdf. Acesso em: 18 jun. 2020.
- IEF. Instituto Estadual de Florestas. *Alterações na Lei Florestal garantem proteção às matas do Estado*. 2009. [online] Disponível: <http://www.ief.mg.gov.br/noticias/924-alteracoes-na-lei-florestal-garantem-protecao-as-matas-do-estado>. Acesso em: 15 jun. 2020.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; CPTEC, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. *Infoclima*. 2020. [online] Disponível: <http://infoclima.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 10 nov. 2020.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia -. *Clima*. [online] Disponível: <https://clima.inmet.gov.br/prec>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. *Estação chuvosa em Minas Gerais*. 2017. [online] Disponível: https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Nota_tecnica_CEDEC_04_17.pdf. Acesso em: 20 nov. 2020.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios*. 2018. [online] Disponível: <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal>. Acesso em: 16 jun. 2020.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios: Monitoramento dos Focos Ativos por Estado*. [2020?]. [online] Disponível: http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_estados/. Acesso em: 16 maio. 2020.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Projeto PRODES digital: Mapeamento do desmatamento da Amazônia com imagens de satélite*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2020. [online] Disponível: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/>. Acesso em 14 de out. de 2020.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. *Projeções Climáticas no Brasil*.

2020. [online] Disponível: <http://pclima.inpe.br/analise/>. Acesso em: 08 nov. 2020.
- Justino, F. B.; Souza, S. S.; Setzer, A. Relação entre “focos de calor” e condições meteorológicas no Brasil, XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu-PR, 2002. p. 2086-2093. [online] Disponível: http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/documentos/200208_justino&desouza&setzer_cbmet7_iguacu_2643-1.pdf.
- Lemos, C. F.; Justino, F. B.; Costa, L. C.; Maddock, J. E. L. Distribuição espacial do índice de Haines para Minas Gerais por análise da média atmosfera. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)*, [s.l.], v. 2, n. 1, p. 132-143, jul. 2012. [online] Disponível: <https://periodicos.ufv.br/rbas/article/view/2667/1151>. Acesso em: 6 jun. 2020.
- Lima, G. S.; Torres, F. T. P.; Costa, A. das G.; Félix, G. de A.; Júnior, M. R. da S. Avaliação da Eficiência de Combate aos Incêndios Florestais em Unidades de Conservação Brasileiras. *Floresta*, Curitiba, v. 48, n. 1, p. 113-122, 13 mar. 2018. Universidade Federal do Paraná. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v48i1.53550>. [online] Disponível: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/53550>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- Lima, G. S. A prevenção de incêndios florestais no estado de Minas Gerais. *Floresta*, [s.l.], v. 30, n. 12, p. 37-43, 31 dez. 2000. Universidade Federal do Paraná. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v30i12.2364>. [online] Disponível: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/2364>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- Machado, N. G.; Silva, F. C. P.; Biudes, M. S. Relações entre queimadas urbanas e condições meteorológicas em Cuiabá/MT, Brasil. *Ciência e Natura*, [s.l.], v. 36, n. 3, p. 459-469, 12 set. 2014. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/2179460x11892>. [online] Disponível: https://www.researchgate.net/publication/265786669_Efeito_das_condicoes_meteorologicas_sobre_o_risco_de_incendio_e_o_numero_de_queimadas_urbanas_e_focos_de_calor_em_Cuiaba-MT_Brasil. Acesso em: 14 jun. 2020.
- MapBiomas. Google Earth Engine. 2019. [online] Disponível em: <https://mapbiomas.org/google-earth-engine>. Acesso em: 18 nov. 2020.
- MapBiomas. Uso e cobertura do solo. 2020. [online] Disponível: <https://plataforma.mapbiomas.org/>. Acesso em: 15 nov. 2020.
- Martins, G.; Nogueira, J. M. P.; Setzer, A. W.; Morelli, F. Fire patterns in the Brazilian Cerrado: an approach comparing different input datasets in the fire risk modelling. *Biodiversidade Brasileira*, v. 10, p. 76-76, 2020.
- Martins, G.; Rosa, A. S.; Setzer, A. W.; Rosa, W.; Morelli, F.; Bassanelli, A. Dinâmica Espaço-Temporal das Queimadas no Brasil no Período de 2003 a 2018. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 2019.
- Minas Gerais (Estado). Portal do Governo de Minas Gerais: Localização Geográfica. 2019. [online] Disponível: <https://www.mg.gov.br/conteudo/conhecaminas/geografia/localizacao-geografica-0>. Acesso em: 10 maio 2020.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente; IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite: monitoramento do bioma caatinga. Brasília: [s.n.], 2011. 46 p. [online] Disponível: https://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/relatorio_tecnico_caatinga_2008_2009_72.pdf. Acesso em: 14 jun. 2020.
- Nunes, J. R. S. FMA+ - Um novo índice de perigo de incêndios florestais para o Estado do Paraná - Brasil. 2005. 169 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. [online] Disponível: <https://pdfs.semanticscholar.org/6e8a/732e18c8714cab79ef2eaea09cfa08ed3d1.pdf>. Acesso em: 14 maio. 2020.
- Pereira, A. A. et al. Validação de focos de calor utilizados no monitoramento orbital de queimadas por meio de imagens TM. *Ceme* [s.l.], v. 18, n. 2, p. 335-343, jun. 2012. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-77602012000200019>. [online] Disponível: <https://www.scielo.br/pdf/ceme/v18n2/a19v18n2.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2020.
- Pinto, D. L. et al. Periods of highest occurrence of forest fires in Brazil. *Floresta*, [S.l.], v. 51, n. 2, p. 484-491, mar. 2021. ISSN 1982-4688. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/70286>. Acesso em: 17 ago. 2021. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/rf.v51i2.70286>.
- Pivello, V. R. The Use of Fire in the Cerrado and Amazonian Rainforests of Brazil: past and present. *Fire Ecology*, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 24-39, abr. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.4996/fireecology.0701024>. [online] Disponível:

- <https://fireecology.springeropen.com/articles/10.4996/fireecology.0701024>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- Pivello, Vânia et al. Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2530064421000560>. Acesso em: 06 ago. 2021.
- Reis, T. L. dos.; Torres, F. T. P. Avaliação da eficiência de índices de perigo meteorológico de incêndios florestais para o Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, [s.l.], v. 1, p. 311-319, 8 nov. 2018. Universidade Federal do Paraná. [online] Disponível: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i0.61074>
- Santos, B. A.; Oliveira, M. D. S.; Silva, P. N.; Santos, J. G. M.; Mattos, E. V. ; Reboita, M. S. Distribuição Espaço-Temporal dos Focos de Calor no Estado de Minas Gerais. *Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ. IMPRESSO)*, 42, 64-84, 2019.
- Santos, J. F.; Soares, R. V.; Batista, A. C. Perfil dos Incêndios Florestais no Brasil em Áreas Protegidas no Período de 1998 a 2002. *Floresta*, [s.l.], v. 36, n. 1, p. 93-100, 24 ago. 2006. Universidade Federal do Paraná. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v36i1.5510>. [online] Disponível: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/5510/4040>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- Silva, E. D. da. Estudo da precipitação no Estado de Minas Gerais-MG. *Revista Brasileira de Climatologia*, [s.l.], v. 13, p. 120-136, 8 jun. 2014. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v13i0.33345>. [online] Disponível: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/33345/22585>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- Silverman, B. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Monographs on Statistics and Applied Probability, London, 1986.
- Soares, R. V. Desempenho da "Fórmula De Monte Alegre" Índice Brasileiro de Perigo de Incêndios Florestais. *Cerne*, [s.l.], v. 4, n. 1, p. 87-99. 1998. [online] Disponível: <http://cerne.ufpa.br/site/index.php/CERNE/article/view/602/512>. Acesso em: 15 jun. 2020.
- Soares, R. V. Determinação de um índice de perigo de incêndio para a região centro paranaense, Brasil. Dissertação. 1972, 72 f. Tese (Mestrado) – Centro Tropical de Ensino e Investigação - Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas OEA, Turrialba, Costa Rica, 1972. [online] Disponível: http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/1136/Determinacao_de_um_indice_de_perigo.pdf;jsessionid=1E380C189B98100253C49FFF2FD35862?sequence=1. Acesso em: 28 maio. 2020.
- Teixeira, G.; Rodrigues, G. S. de. S. C. Silvicultura e siderurgia a carvão vegetal: implicações na organização territorial no vale do jequitinhonha, minas gerais. *Caminhos de Geografia, Uberlândia*, v. 19, n. 66, p. 297-312, 24 jul. 2018. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/rcg196621>. [online] Disponível: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/39560/23320>. Acesso em: 30 jun. 2020.
- Van Wagner, C.E., 1987, *Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*: Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 35, Ottawa, Ontario
- Vieira, S. *Estatística básica - 2ª edição revista e ampliada*, 2nd Edition. Cengage Learning Brazil, 2018. VitalBook file
- Vital, M. H. F.; Pinto, M. A. C. Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 30, p. 237-297, set. 2009. [online] Disponível: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1661>. Acesso em: 25 jun.2020
- Werf, G. R. van der et al. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmospheric Chemistry And Physics*, [s.l.], v. 10, n. 23, p. 11707-11735, 10 dez. 2010. Copernicus GmbH. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/acp-10-11707-2010>. [online] Disponível: <https://www.atmos-chemphys.net/10/11707/2010/acp-10-11707-2010.pdf>. Acesso em: 17 maio. 2020
- WHO - World Health Organization. *Health Guidelines for Vegetation Fire Events*, ed. Schwela DH Goldammer JG, Morawska LH, Simpson, O. Geneva, World Health Organization, 1999. [online] Disponível: https://www.who.int/docstore/peh/Vegetation_fires/Executive_Summary.pdf. Acesso em: 02 out. 2020.