



Distribuição Espaço-Temporal dos Focos de Calor no Estado de Minas Gerais
Space-Time Distribution of Active Fire in the Minas Gerais State

Brenda Almeida Santos¹; Melissa Dias da Silva Oliveira¹; Paola do Nascimento Silva¹;
José Guilherme Martins dos Santos²; Enrique Vieira Mattos¹ & Michelle Simões Reboita¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Avenida BPS, 1303 – Pinheirinho, Itajubá, MG, 37500-903, Brasil

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos,

Rodovia Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista, SP, 12630-000, Brasil

E-mails: brenda_almeida2009@hotmail.com; melissa.dso22@gmail.com;

paoola.silva@hotmail.com; guilherme.martins@inpe.br; enrique.vmatos@gmail.com; mireboita@gmail.com

Recebido em: 18/03/2019 Aprovado em: 16/05/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_3_64_84

Resumo

O monitoramento de focos de calor por satélites pode ser um importante subsídio para a definição de estratégias de combate e prevenção de incêndios, bem como para a avaliação de danos ecológicos, econômicos e sociais. Como no Brasil, o conhecimento sobre a evolução espacial e temporal dos focos de calor ainda é limitado, esse estudo tem como objetivo descrever a distribuição espacial e temporal de focos de calor e avaliar as cidades com as maiores ocorrências desses focos (definido como cidades *hotspots*) no Estado de Minas Gerais (MG). Além disso, é analisado a correlação dos focos de calor com a precipitação. Foram utilizados 15 (2003-2017) anos de dados de focos de calor estimados por meio de dados do satélite de órbita polar *Earth Observation System – AQUA*. No Estado de MG, a média anual de focos de calor é de aproximadamente de 11.421 detecções, sendo esses eventos mais frequentes entre os meses de julho a outubro, isto é, entre a estação seca e início da chuvosa, com máximo mensal em setembro (3.700 focos). Em termos espaciais, a maior concentração de focos de calor ocorre nos setores norte e noroeste do Estado. Por outro lado, a maioria das cidades *hotspots* (locais com as maiores ocorrências de focos de calor) localizam-se no noroeste do Estado, com a cidade de Paracatu sendo a de maior frequência desses eventos, com 3.376 focos durante o período de estudo, isto é, cerca de 50 % a mais de focos em relação à cidade que ficou em décimo lugar. As análises de correlação interanual e mensal mostraram que os focos de calor apresentam correlação negativa com a precipitação, isto é, anos mais secos possuem maior frequência de focos de calor. O maior coeficiente de correlação de Pearson (-0,52) foi obtido para uma defasagem temporal mensal de 2 meses, isto é, embora o inverno seja a estação do ano mais seca, os máximos de focos de calor ocorrem entre setembro e outubro. Portanto, a persistência de um solo seco por cerca de 60 dias antes fornece condições em parte favoráveis para a ocorrência de queimadas, seja de forma natural ou antrópica.

Palavras-chave: Minas Gerais; focos de calor; satélite AQUA

Abstract

The monitoring of active fire using by satellites can be an important subsidy for the definition of strategies to combat and prevent fires, as well as for the evaluation of ecological, economic and social damages. In Brazil the knowledge about the spatial and temporal evolution of active fire is still limited, so this study aims to describe the spatial and temporal distribution of active fire and to determine the hotspot cities of active fire in the State of Minas Gerais (MG). In addition, we studied the correlation between active fire and precipitation. We used 15 (2003-2017) years of data from Earth Observation System (AQUA) satellite. In the State of Minas Gerais, the average annual of active fire are approximately 11,421. These events are more frequent between the months of July to October, with a monthly maximum in September (3,700 actives fire). The highest concentration of active fire occurs in the north and northwest sectors of the State. On the other hand, the majority of hotspots cities are located in the northwest of the State, with the Paracatu city having the highest frequency, with 3,376 actives fire during the study period, that is, about 50 % more than the city that was in tenth place. The analysis of interannual and monthly correlation showed a negative correlation between precipitation and active fire, that is, dryer years have a higher frequency of active fire. The highest Pearson's correlation coefficient (-0.52) was obtained for a monthly time lag of 2 months, that is, although winter is the driest season of the year, the peak of active fire occurs between September and October. Therefore, the persistence of a dry soil for about 60 days before provides favorable conditions for the occurrence of fires, either naturally or anthropically.

Keywords: Minas Gerais; Active Fire; AQUA satellite

1 Introdução

As queimadas afetam os ecossistemas por meio de modificações na vegetação e fauna, contribuem para a poluição atmosférica causando alterações na composição química do ar e podem ocasionar mudanças no microclima local, nas características do solo, como também problemas de erosão, entre outros (Crutzen & Andreae, 1990; Oliveira, 2002; Cardoso *et al.*, 2008; Bowman *et al.*, 2009). Na região tropical, as queimadas ocorrem devido ao uso do fogo na expansão da fronteira agrícola, limpeza de áreas, rotação de culturas agrícolas, controle de pragas, remoção da vegetação seca e restos do cultivo e aumento e manutenção de pastagens (Lauk & Erb, 2009). Um foco de calor, nomenclatura que neste artigo será utilizada com o mesmo significado de um pixel de queima ou foco ativo, pode indicar tanto uma pequena queimada, assim como várias pequenas queimadas ou uma muito grande no seu interior. No Brasil, as queimadas são predominantes na região do arco do desmatamento (bioma Amazônia), na porção leste da região nordeste do país (bioma Cerrado) e na região centro-sul do Brasil. Nessa última, os focos de calor ocorrem devido à queima da palha da cana-de-açúcar e em áreas de manejo de pastagem para criação de gado (Piromal *et al.*, 2008; França *et al.*, 2012).

Informações sobre a localização e extensão das ocorrências de queimadas são importantes para a definição de estratégias de combate e prevenção de incêndios, bem como para a avaliação de danos ecológicos e econômicos; além disso, essa informação também pode ser utilizada em modelos numéricos de tempo e clima para estudos de sensibilidade (Setzer *et al.*, 2011). O monitoramento operacional das queimadas pode melhorar o entendimento sobre a variabilidade espacial e temporal dessas, bem como diagnosticar as causas de sua variabilidade; o que poderia auxiliar na elaboração de planos de prevenção (Santos, 2004).

A queimada é um processo que envolve o consumo de biomassa por meio da combustão incompleta no qual o material reage rapidamente com o oxigênio produzindo calor e luz. Para a sua eficácia são necessários três elementos básicos: combustível,

comburente e temperatura de ignição, que combinados produzem uma reação em cadeia que tem, como um de seus produtos o fogo (Souza, 2008). A ocorrência das queimadas está associada tanto a fatores naturais (relâmpagos e longos períodos de seca) quanto à ação humana (preparação do terreno para pastagens e agricultura, desflorestamento e ignição acidental) (Cardoso *et al.*, 2003; Cochrane, 2003). Quanto aos fatores naturais, o principal é a instabilidade do material combustível à ocorrência de fogo e a baixa umidade da vegetação, que está relacionada com a umidade relativa do ar e a temperatura (Alves *et al.*, 2009). Além disso, a topografia, que compreende a altitude, declividade e orientação do relevo, é um fator físico contribuinte, pois se relaciona ao comportamento do vento e afeta a propensão do incêndio (Jaiswal *et al.*, 2002). A topografia afeta o surgimento e propagação de focos de calor, alterando o fluxo de ar e o microclima local (Zhang *et al.*, 2003).

Diversas formas de detecção de focos de calor têm sido utilizadas nas últimas décadas. Dependendo das características do local, pode-se utilizar postos de vigilância terrestres e torres de observação, patrulhamento aéreo com aeronaves e monitoramento por imagens de satélites (Batista, 2004). Entretanto, um detalhado monitoramento espacial e temporal dos focos de calor em regiões extensas é facilitado através de informações obtidas por sensores a bordo de satélites ambientais. Em especial, o sensor *Moderate-resolution Imaging Spectro-radiometer* (MODIS), a bordo do satélite polar americano *Earth Observation System – AQUA*, tem mostrado uma grande habilidade em obter informações que podem ser utilizadas para o monitoramento global dos focos de calor (INPE, 2018). O princípio físico de detecção de focos de calor deve-se ao fato que um corpo em chamas emite máxima radiação eletromagnética (REM) na faixa termal média do espectro óptico de 3,7 μm a 4,1 μm (INPE, 2018). Através das informações fornecidas pelo sensor do satélite e com o auxílio de um programa computacional selecionam-se os pixels (elemento de resolução) com maior temperatura, identificando-se assim os focos de calor em uma determinada região (Antunes & Ribeiro, 2000). Dessa forma, interpreta-se esse registro recebido da superfície terrestre como um indicativo da existência

de um foco de calor. Em casos de queimadas muito extensas, a mesma será detectada não só por um pixel, mas por pixels vizinhos, ou seja, vários focos de calor poderão estar associados a uma única grande queimada (Antunes & Ribeiro, 2000).

O sensor MODIS a bordo do satélite AQUA opera em diversas bandas do espectro eletromagnético e detecta a radiação emitida pelos corpos em superfície que posteriormente é transformada em temperatura de brilho por meio da equação de Planck. As informações de temperatura de brilho no canal de 4 μm é utilizada por algoritmos para identificar os pixels com focos de calor. Uma queimada é identificada com uma extensão mínima de cerca de 30 m x 1 m de largura (INPE, 2018).

Desde a década de 1980, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tem desenvolvido e aprimorado o sistema operacional de detecção de queimadas que produz diariamente informações sobre focos de calor na vegetação na América do Sul a partir da detecção por sensores orbitais (Setzer *et al.*, 2011). O INPE utiliza vários satélites para estimar os focos de calor, como por exemplo, os satélites de órbita geoestacionária (*Geostationary Operational Environmental Satellite - GOES*) e os de órbita polar (*National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA, Joint Polar Satellite System - JPSS, TERRA e AQUA*) (INPE, 2018).

Nas últimas décadas essas informações de satélites têm sido utilizadas extensivamente para estimativas de focos de calor no Brasil (Setzer *et al.*, 1994; Pereira, 2009; Gontijo *et al.*, 2011; Pereira *et al.*, 2012; Mataveli & Chaves, 2014; Pereira *et al.*, 2014; Libonati *et al.*, 2015; Silva & White, 2016; Rodrigues *et al.*, 2018; Neves *et al.*, 2018) e em diversos outros locais do mundo (Dozier, 1981; Kaufman *et al.*, 1998; Duncan *et al.*, 2003; Giglio *et al.*, 2003; Wooster *et al.*, 2005; Giglio *et al.*, 2006; Chuvieco *et al.*, 2008; Roy *et al.*, 2008; Tansey *et al.*, 2008; Giglio *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2012; Sahu *et al.*, 2015; Panisset *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2018). Considerando o Estado de MG, Mataveli & Chaves (2014) evidenciaram que as maiores concentrações de focos de calor são registradas na região norte do Estado de MG e estão localizadas em sua grande

maioria no bioma Cerrado, enquanto que as menores ocorrências desses eventos estão concentradas nas regiões sul e leste de MG, geralmente pertencentes ao bioma Mata Atlântica. Ressalta-se que o estudo de Mataveli & Chaves (2014) se restringiu a um curto período de dados, 2009 a 2012, o que pode ser afetado por padrões anômalos da atmosfera, portanto, sugere-se a necessidade da realização de estudos com um período mais extenso de dados. Em adição, Pereira *et al.* (2014) utilizaram 11 (1999-2009) anos de dados do sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) a bordo dos satélites NOAA-12 e NOAA-15 para estudar os focos de calor no Estado de MG e documentaram uma média de 6.121 focos ano⁻¹ e uma densidade de 1,1 focos de calor por 1000 hectare. As maiores ocorrências foram registradas no mês de outubro e no setor norte e nordeste do estado. Embora Pereira *et al.* (2014) tenham utilizado uma série mais extensa de dados, informações do regime de precipitação não foram avaliadas.

Em adição aos trabalhos supracitados, alguns estudos (Pivello, 2011; Adámek *et al.*, 2015; Silva & White 2016) têm mostrado a relação entre a ocorrência de focos de calor com o tipo de bioma. Por exemplo, Silva & White (2016) analisaram os focos de calor em seis biomas brasileiros no período de 1999 a 2015 e observaram que o bioma Amazônia possui as maiores ocorrências, seguido pelo Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Pantanal e Pampa. Segundo Adámek *et al.* (2015) onde o clima é mais seco a paisagem plana favorece essa ocorrência uma vez que a distribuição de combustível é contínua e as barreiras que limitam a propagação do fogo não são constantes. Uma profunda descrição da ocorrência de focos de calor no Cerrado e na região da floresta Amazônica do Brasil pode ser encontrada em Pivello (2011). Alguns estudos (Flannigan *et al.*, 2000; Skinner *et al.*, 2002; Sahu *et al.*, 2015; Rodrigues *et al.*, 2018) têm documentado a existência de uma relação entre o regime da precipitação e a ocorrência de focos de calor. Por exemplo, Rodrigues *et al.*, (2018) mapearam os focos de calor através de dados do sensor *Operational Land Imager* (OLI) do satélite Landsat-8 na região serrana do Rio de Janeiro durante a seca de 2014 e encontraram alta ocorrência de focos de calor e de área queimada.

Embora, regionalmente e globalmente, diversos trabalhos têm sido realizados sobre a distribuição dos focos de calor, em geral são escassos os estudos que utilizam séries temporais mais extensas (> 10 anos) de dados fornecidos por satélite e que os associem com o regime de precipitação. Como a disponibilidade de dados relacionados à distribuição das queimadas sobre o território brasileiro é algo relativamente recente, ainda não foram desenvolvidos muitos estudos no país que pudessem analisar sua evolução temporal. Portanto, os estudos sobre queimadas no Estado de MG são escassos e o seu entendimento é fundamental para auxiliar nas políticas públicas de contenção e minimização de problemas associados a elas. Com base nestas lacunas encontradas na literatura, o presente trabalho tem como objetivo descrever a distribuição espaço-temporal dos focos de calor num período de quinze anos (2003 a 2017) no Estado de MG e avaliar as possíveis relações com a precipitação.

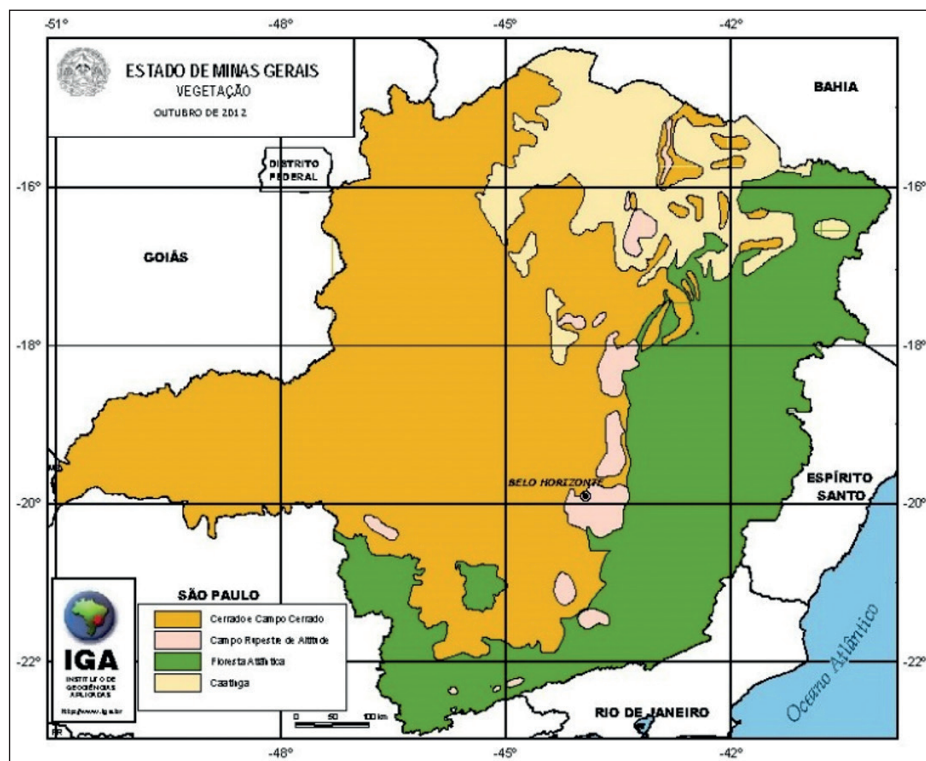
2 Dados e Metodologia

2.1 Área de Estudo

O Estado de MG está localizado na região sudeste do Brasil, entre as latitudes 14°13'57"

S e 22°55'47" S e as longitudes 39°51'24" W e 51°02'56" W. Sua extensão territorial é de 582.520,732 km² (IBGE, 2017) e abriga uma população de 21.119.536 habitantes conforme estimativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2017. O Estado possui diferentes formações topográficas, como as serras da Mantiqueira, da Canastra e do Espinhaço (Reboita *et al.*, 2015b) e é constituído por quatro biomas: Mata Atlântica, Cerrado, Caatinga e campos rupestres de altitude, como indicado na Figura 1 (Governo MG, 2017), sendo o Cerrado o bioma mais predominante. Com relação às características climáticas, os totais de precipitação em MG são maiores no verão, sendo que nessa época a precipitação corresponde a quase 60 % do total anual. Ainda considerando o verão, a precipitação pode chegar até 900 mm no centro-sul e a 400 mm no norte do Estado (Reboita *et al.*, 2015b). As menores temperaturas mínimas ocorrem no inverno (~15°C) e as maiores temperaturas máximas no verão (~33°C) (Reboita *et al.*, 2015b). A justificativa para o Estado de MG ser o foco do estudo deve-se ao fato da existência de uma grande área de reserva ecológica da Mata Atlântica, bem como a escassez de estudos e a grande incidência de focos de calor, que ocorre em boa parte pela expansão agrícola.

Figura 1 Distribuição dos biomas presentes no Estado de Minas Gerais. Fonte: Governo de MG (s/d).



2.2 Dados

A contabilização dos focos de calor foi feita através dos dados fornecidos pelo satélite AQUA (Justice *et al.*, 2006). A detecção dos focos de calor é realizada por meio das estimativas do sensor MODIS coleção 6. Este sensor possui 36 canais abrangendo as faixas do visível e infravermelho, com resolução espacial variando entre 250 m e 1 km. O canal utilizado para detecção de queimadas é o 4,050 μm , com resolução espacial de 1 km. Os dados foram obtidos por meio da plataforma do Programa Queimadas do INPE (<http://www.inpe.br/queimadas/portal>) e correspondem à latitude, longitude, data e horário de todos os focos de calor registrados entre os anos de 2003 e 2017 para o Estado de MG. Os dados utilizados são referentes à passagem vespertina do satélite, estando as passagens centradas entre 15:45 e 17:30 UTC. Dessa forma, foi possível contabilizar a quantidade de focos de calor que ocorreram no período de estudo.

No intuito de avaliar a possível relação entre a precipitação e os focos de calor, foram utilizados dados diários de precipitação provenientes do *Climate Prediction Center* (CPC, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html>). Esses dados são globais com resolução horizontal de 50 km x 50 km e correspondem à interpolação de informações medidas por pluviômetros (Chen *et al.*, 2008).

2.3 Análises

Inicialmente os dados de focos de calor e de precipitação foram organizados na escala espacial e temporal adequadas para o presente estudo. Através das informações da latitude e longitude, os focos de calor foram interpolados para uma grade regular de 10 km de resolução espacial centrada no Estado de MG. Foram testadas diversas resoluções espaciais e aquela com 10 km teve uma qualidade suficiente para representar o padrão espacial dos focos de calor e ainda assim manter uma boa eficiência computacional no tratamento dos dados. Após a interpolação espacial, os dados diários de focos de calor foram acumulados na escala mensal e anual para os 15 anos de dados. Os dados de precipitação diária do CPC,

que originalmente possuíam resolução espacial de 0,5°, também foram interpolados para uma grade de 10 km para manter uma coerência com os dados de focos de calor. Em seguida foram determinados os totais mensais e anuais de precipitação.

A metodologia do estudo envolve quatro etapas: i) avaliação descritiva dos focos de calor; distribuição ii) anual e iii) mensal dos focos de calor e iv) caracterização dos municípios *hotspots*. A avaliação descritiva dos focos de calor foi realizada através da caracterização da série histórica total e mensal dos dados aplicando-se a análise de tendência e a verificação de significância estatística através do teste de Mann-Kendall com o valor-p ao nível de 0,05 de significância. Quando o valor-p é menor do que o valor da significância, rejeita-se a hipótese nula (que não há tendência) e aceita-se a alternativa (que há tendência). Além dessa análise foram construídos *boxplots*.

Na segunda etapa desse trabalho avaliou-se a distribuição anual dos focos de calor e precipitação por meio das análises estatísticas da anomalia padronizada (Wilks, 2005). Consistente com a metodologia utilizada por Sahu *et al.* (2015), a anomalia padronizada é calculada através da diferença entre o total anual de focos de calor (ou precipitação) de um ano específico e o total anual médio considerando os 15 anos de dados e normalizando-se essa diferença pelo desvio-padrão da amostra de dados. A anomalia padronizada pode ter valores positivos (negativos) indicando que o dado é maior (menor) do que o valor médio, possuindo uma média igual a zero e desvio padrão igual a 1. Com o objetivo de avaliar a variação da correlação entre focos de calor e precipitação no Estado de MG foram calculadas a correlação espacial anual pixel-a-pixel entre os dados de focos de calor e a precipitação. Análise de significância do campo de correlação foi realizada aplicando-se o teste t de *Student* com significância estatística de 95 % de confiança ($\alpha=0,05$).

Na terceira etapa foi avaliada a distribuição mensal dos focos de calor e a precipitação através de mapas mensais médios. Uma análise de correlação entre focos de calor e a precipitação também foi realizada com os dados mensais médios. Além

disso, foi avaliada a correlação entre focos de calor e a precipitação aplicando-se diferentes defasagens temporais mensais na série de focos (variando de 1 a 4 meses). Para tanto, foram utilizadas as ocorrências de focos de calor e precipitação de todos os meses de todo o período de estudo (2003-2017).

A quarta etapa teve como objetivo identificar os municípios com as maiores ocorrências (doravante denominados municípios *hotspots*) de focos de calor ao longo dos 15 anos de dados. Para a determinação dos *hotspots* foi calculada a soma dos focos de calor para cada município para os 15 anos de dados. Portanto, esse método considera os municípios com as maiores ocorrências de focos de calor.

3 Resultados e Discussão

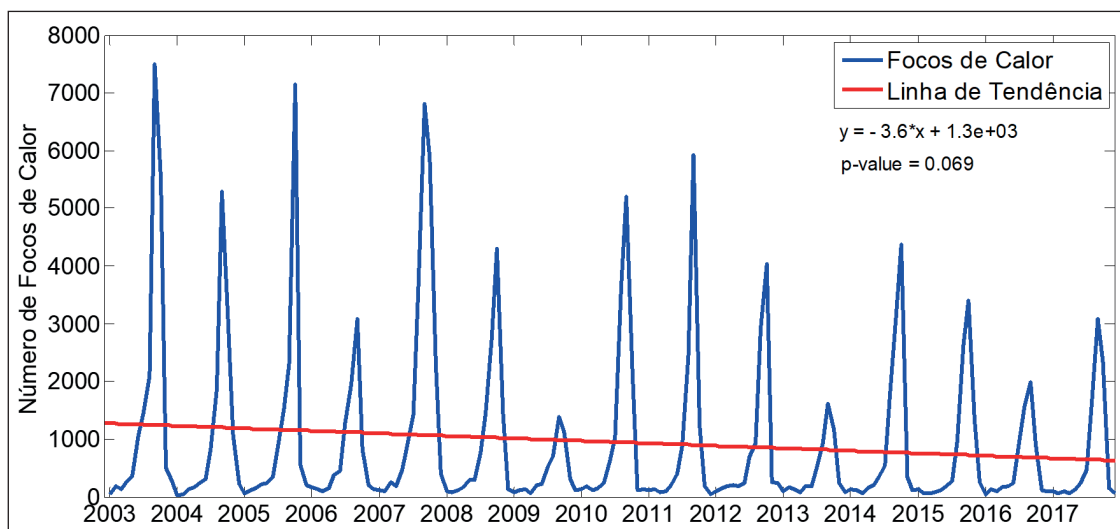
3.1 Estatística Descritiva dos Focos de Calor

A Figura 2 mostra a série temporal (linha azul) e a tendência (linha vermelha) na escala mensal dos focos de calor no período de 2003 a 2017. Os resultados mostram claramente uma sazonalidade, com máximo (mínimo) de focos de calor ocorrendo durante o inverno-primavera (verão). Em relação à distribuição interanual de focos, há uma tendência moderada de diminuição no número de focos de calor (observada em relação aos picos máximos) ao longo dos anos. Entretanto, como a análise de significância mostra o p-valor (0,069) sendo maior do que o nível de significância (0,05), é sugerido que essa tendência não é significativamente relevante.

Adicionalmente, pode-se observar a existência de anos com ocorrências bem distintas de focos de calor. Por exemplo, 2003 registrou cinco vezes mais focos de calor em relação a 2009 (7.500 contra 1.500 focos de calor). Como a degradação do sensor do satélite ao longo do período estudado pode ser considerada desprezível, provavelmente, a variação interanual anual dos focos pode estar associada a fatores meteorológicos, mudança no uso e ocupação do solo ou políticas públicas governamentais. Do ponto de vista meteorológico, alguns estudos (Sahu *et al.* 2015) mostram que a precipitação associada à ocorrência de eventos El Niño poderia ter importante influência nos focos de queimadas. Porém, como MG localiza-se numa região de transição entre os efeitos de abundância e déficit de precipitação, sugere-se que o El Niño tenha (ou que tenha de forma reduzida) impactos na ocorrência dos focos de calor no Estado.

Na Figura 3 têm-se a distribuição mensal de focos de calor considerando o período de 2003 a 2017. A quantidade de focos aumenta entre julho (900 focos) e novembro (500 focos), com máximo no mês de setembro (3.000 focos). Há dois períodos bem distintos: i) um com pouca (máximo de 500 focos) ocorrência de focos de calor entre dezembro-junho e outro com ii) alta (máximo de 7000 focos) ocorrência entre julho-novembro. Associado a essas observações está o fato que o mês de setembro, registra 30 vezes mais focos de queimadas em relação ao mês de janeiro (mês de menor ocorrência), indican-

Figura 2 Série temporal histórica (linha azul) de 2003-2017 dos focos de calor com o valor-p para o teste de Mann-Kendall. A linha de tendência é representada pela reta na cor vermelha.



do uma intensa variabilidade mensal. Em contraste, Pereira *et al.* (2014) encontraram máxima quantidade de focos de calor no mês de outubro (20 % a mais de focos de calor em outubro em comparação a setembro) para o Estado de MG. A diferença entre os estudos pode estar associada aos diferentes sensores (AVHRR versus MODIS) que proveram os dados e a metodologia para identificação dos focos de calor. No entanto, os resultados do presente estudo ainda mostram que embora o mês de setembro possua as maiores ocorrências de focos de calor, existe uma variabilidade nesses valores entres os anos, com variações entre 1.500 e 7.000 (Figura 3).

3.2 Distribuição Anual dos Focos de Calor

Na Figura 4 observa-se a anomalia padronizada anual dos focos de calor no período de 2003 a 2017. Esse campo possui grande variação espacial em MG entres os anos. Por exemplo, anomalias positivas (especificamente no valor de 2,0 desvios-padrão acima da média do período) são predominantes nos anos de 2003, 2007, 2010, 2014 e 2017, enquanto nos demais anos, há predominância de anomalias negativas na região (mínimo de 2,0 desvios-padrão abaixo da média do período). Esses resultados, em geral, são coerentes com a análise do total de focos de calor mostrada na Figura 2. Além disso, diferenças espaciais nessa distribuição são evidentes. Nos anos de 2010, 2014 e 2017 as anomalias positivas são concentradas nos setores centro-sul da região de estudo, enquanto que em 2003 e 2007 são concentradas no setor centro-norte e centro-leste. Essa

diferença no padrão espacial pode estar relacionada ao regime de precipitação entre os anos, citado anteriormente, e aos biomas típicos de cada setor.

Com o objetivo de avaliar uma possível relação entre o padrão espacial da ocorrência de focos de calor e a precipitação, também foram calculadas as anomalias anuais padronizadas da precipitação, como mostrado na Figura 5. O campo de precipitação apresenta uma notável variação interanual e espacial. Anomalias padronizadas negativas (aproximadamente 0,3 desvios-padrão abaixo da média do período) são mais predominantes nos anos de 2007, 2012, 2014, 2015 e 2017, enquanto que anomalias positivas (aproximadamente 0,3 desvios-padrão acima da média do período) são, em geral, predominantes nos anos de 2004, 2006, 2009, 2011 e 2013. O ano de 2014 foi o que apresentou as anomalias padronizadas negativas de precipitação mais intensas (0,3 desvios-padrão abaixo da média do período), principalmente na região centro-sul do Estado de MG. Em consistência com o resultado obtido, Rodrigues *et al.* (2018) encontraram alta ocorrência de focos de calor e de área queimada na região Serrana do Rio de Janeiro durante a seca de 2014. Segundo Coelho *et al.* (2016), a seca de 2014 no sudeste do Brasil foi atribuída a vários fatores como o deslocamento do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) para oeste de sua posição climatológica, que foi influenciado por um trem de ondas proveniente do norte da Austrália, e que contribuiu para reduzir a convecção sobre o sudeste do Brasil. O ano de 2015 também teve parte do verão considerado anomala-mente seco (Reboita *et al.*, 2015a).

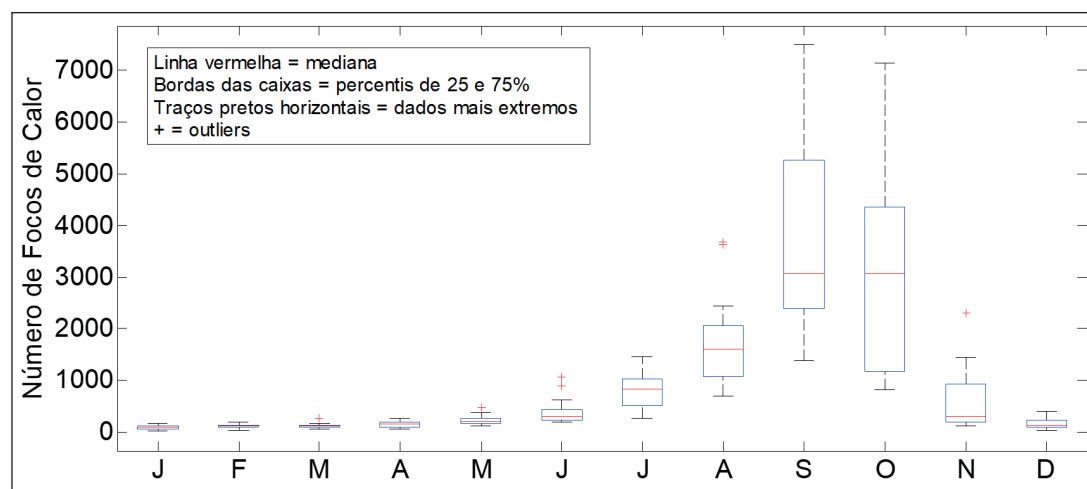


Figura 3 Boxplot da distribuição mensal do número de focos de calor para 15 anos de dados (2003-2017) proveniente do sensor MODIS a bordo do satélite AQUA.

Distribuição Espaço-Temporal dos Focos de Calor no Estado de Minas Gerais
Brenda Almeida Santos; Melissa Dias da Silva Oliveira; Paola do Nascimento Silva;
José Guilherme Martins dos Santos; Enrique Vieira Mattos & Michelle Simões Reboita

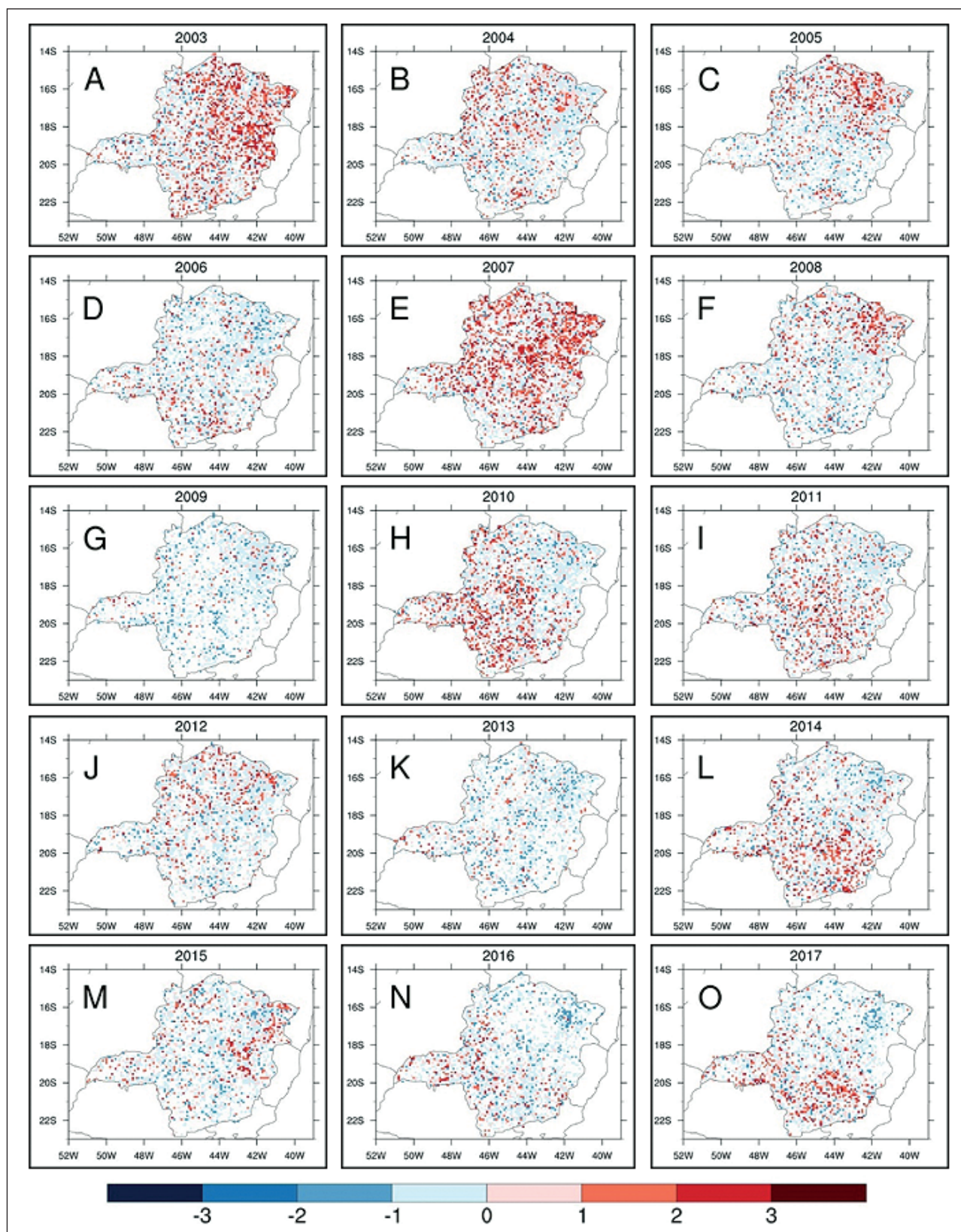


Figura 4 Anomalia padronizada anual de focos de calor do período de 2003 a 2017 fornecidas pelo sensor MODIS a bordo do satélite AQUA. A resolução horizontal é de 10 km.

Distribuição Espaço-Temporal dos Focos de Calor no Estado de Minas Gerais
Brenda Almeida Santos; Melissa Dias da Silva Oliveira; Paola do Nascimento Silva;
José Guilherme Martins dos Santos; Enrique Vieira Mattos & Michelle Simões Reboita

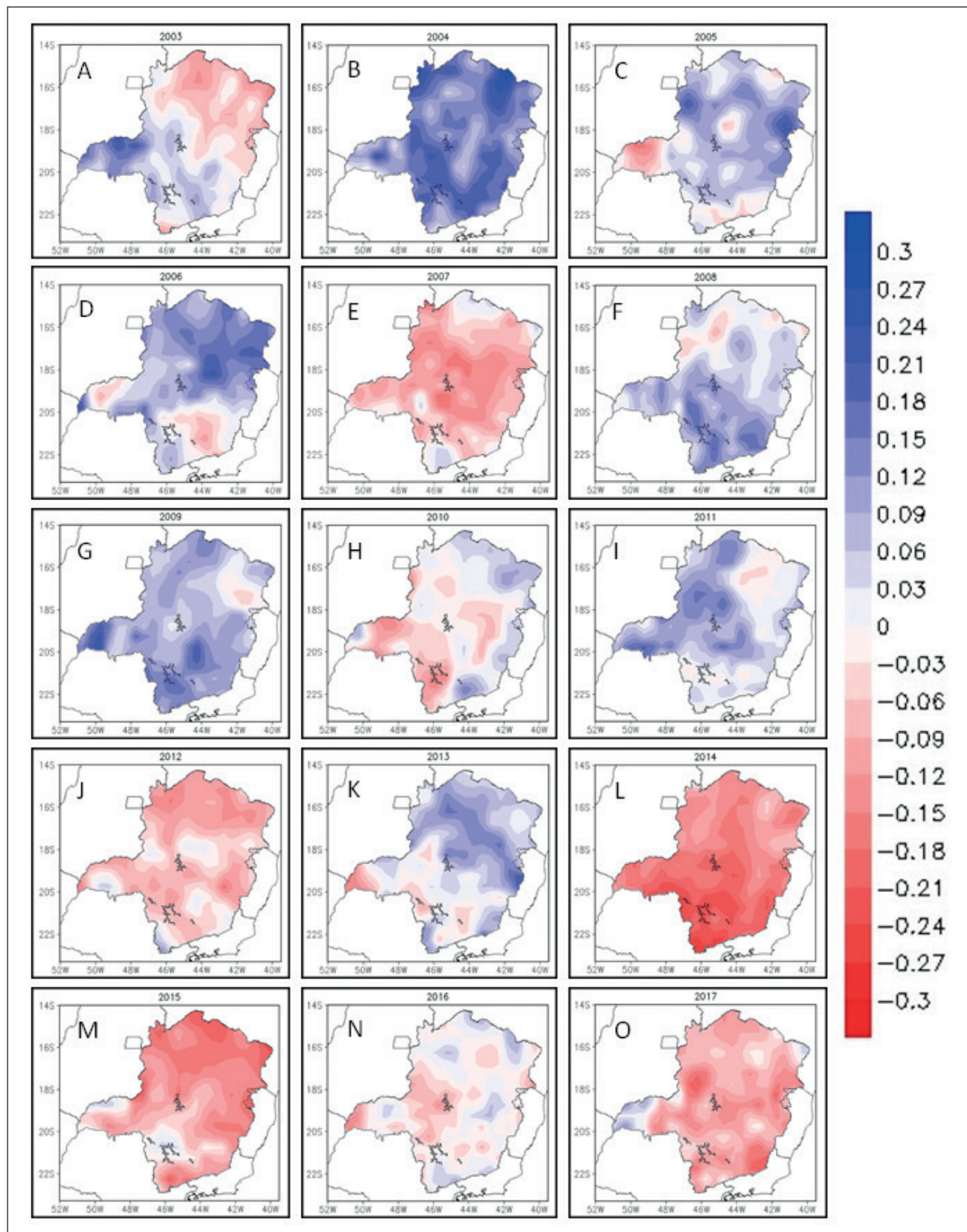


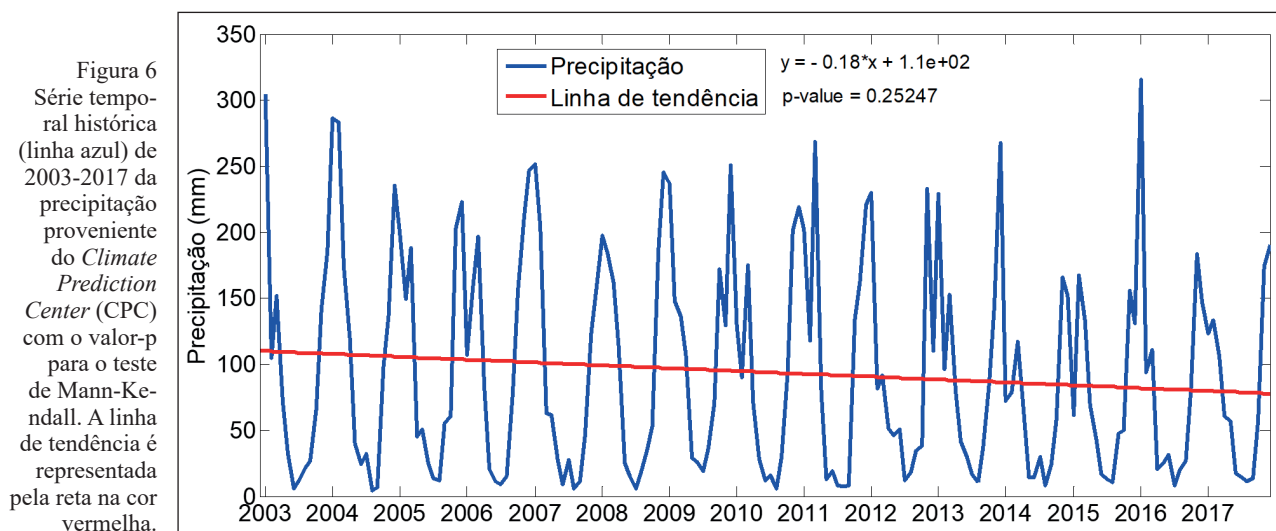
Figura 5 Distribuição espacial da anomalia padronizada anual de precipitação no Estado de Minas Gerais no período de 2003 a 2017 proveniente do *Climate Prediction Center* (CPC). A resolução horizontal é de 10 km.

A variabilidade espacial da precipitação na escala interanual observada na Figura 5 também é evidenciada na análise da série temporal do período de estudo (Figura 6). Os maiores acumulados de precipitação (~310 mm) ocorreram em 2003 e 2016, enquanto que o valor mínimo foi detectado em 2015 (~160 mm). Como discutido por Reboita *et al.* (2015a) esse mínimo de precipitação provavelmente está associado ao deslocamento do ASAS para oeste de sua posição climatológica, o que dificultou a ocorrência de precipitação. Em termos de tendência da série temporal de precipitação, nota-se um sutil declínio da reta de tendência (coeficiente angular de aproximadamente -0,18) que é desprovido de significância estatística (ao nível de 0,05).

Ao se comparar a série histórica de precipitação (Figura 6) e de focos de calor (Figura 2), observa-se um comportamento invertido, onde de maneira geral anos com grandes acumulados de precipitação estão associados à baixa ocorrência de focos de calor. Porém esse comportamento apresenta algumas discrepâncias. Por exemplo, o ano que apresentou a maior ocorrência de focos de calor foi 2013, porém o ano que registrou o menor acumulado de precipitação (320 mm) foi 2016. De fato, embora pareça existir uma relação entre ambas variáveis (precipitação e focos de calor), esses resultados indicam que outros fatores ambientais (vento, umidade do solo e do ar, temperatura do solo e do ar) e antrópicos (ação humana na ignição do fogo) podem contribuir para a variação anual no total de focos de calor,

como discutido por Corrêa *et al.* (2013) e Miranda *et al.* (2018). Por exemplo, Corrêa & Alencar (2013) documentaram para o Parque Nacional da Serra da Canastra e Santuário da Serra da Piedade no Estado de MG entre 2008 e 2012 que a baixa umidade relativa do ar e precipitação podem contribuir para uma maior variabilidade da vegetação local, facilitando a ignição e o alastramento dos focos de calor. Não obstante, a incidência de focos de calor possui forte influência da ação humana, devido às atividades agrícolas, através da limpeza de terras para a conversão do bioma local em lavouras e pastagens, entre outros.

Para uma análise mais robusta estatisticamente, foi calculada a correlação temporal (coeficiente de correlação de Pearson) entre as anomalias anuais padronizadas de focos de calor e de precipitação em cada ponto de grade e realizou-se também o teste de significância estatística *t* de *Student* considerando o nível de 95 % de confiança (Figura 7). Pode-se observar uma predominância de correlação negativa (positiva) de aproximadamente -0,8 (0,6) no centro leste do Estado (no oeste e noroeste) e estatisticamente significativa. Portanto, os resultados sugerem uma possível relação entre precipitação e ocorrência de focos de calor; de forma que uma diminuição anual da precipitação pode impactar a ocorrência de focos de calor. Como discutido por Pyne *et al.* (1996) e Kunkel (2001), o regime dos focos de queimadas pode ser controlado pelo regime da precipitação. Entretanto, é importante ressaltar que fatores antró-



picos na ignição do fogo podem afetar o padrão de ocorrência de focos de calor. Por exemplo, os anos de 2005 e 2011 apresentaram anomalias positivas de focos de calor (Figura 4) e precipitação (Figura 5) na região norte do Estado, sugerindo que a ação humana pode ter contribuído em parte para esses resultados (porém está fora do escopo do presente estudo discutir a influência antrópica na ocorrência focos de calor).

3.3 Distribuição Mensal dos Focos de calor

A Figura 8 apresenta a distribuição espacial mensal dos focos de calor entre 2003 e 2017. O período de maior concentração corresponde aos meses de julho a outubro. Esse período está dentro da estação seca no sudeste do Brasil, que ocorre de abril até meados de outubro (Silva & Reboita, 2013) e, que de acordo com Tebaldi *et al.* (2012), é mais vulnerável à ocorrência de queimadas, devido à baixa umidade do ar e ausência de precipitação, o que torna a vegetação mais seca. Destaca-se aqui que os máximos registros de focos de calor não ocorrem ao longo de todo o inverno e, sim, de meados dessa estação a meados da primavera. Sugere-se que no início do inverno o solo

ainda tenha armazenamento de água o que auxilia a maior evapotranspiração da vegetação contribuindo para um ambiente mais úmido, mas esse suprimento não se mantém por muito tempo, de forma que em julho nota-se o aumento de ocorrências de focos de calor. Na primavera, as temperaturas máximas atingem seus maiores valores ($\sim 31\text{ }^{\circ}\text{C}$) no sudeste do Brasil, uma vez que a nebulosidade é mais reduzida em comparação ao verão (INMET, 2018); isso, consequentemente, contribui para a grande quantidade de queimadas observada em MG, principalmente nos meses de setembro e outubro. A partir de meados de outubro, a estação chuvosa se estabelece na maior parte de MG (Silva & Reboita, 2013), mas os totais de precipitação são mais reduzidos na região nordeste em relação ao centro-sul do Estado, de forma que haverá mais condições propícias aos focos de calor em direção às latitudes mais baixas.

Os resultados ainda mostram que os setores norte e nordeste do Estado concentram as maiores quantidades de focos de calor ao longo dos meses. Por exemplo, em setembro e outubro a região norte registra em média 5 focos de calor por 100 km^2 , enquanto que o setor sul registra apenas 3 focos de ca-

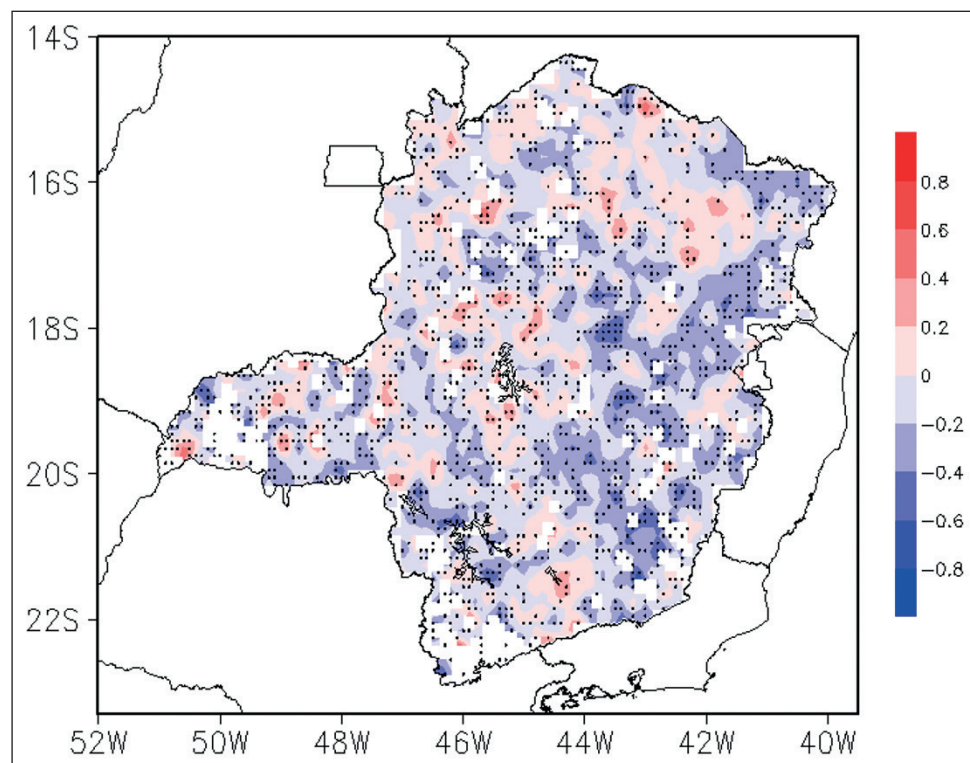


Figura 7 Correlação espacial anual entre a anomalia de precipitação proveniente do *Climate Prediction Center* (CPC) e os focos de calor do satélite AQUA. O teste *t* de *Student* foi aplicado considerando 95 % de confiança ($\alpha=0,05$) e os pontos na cor preta na figura representam locais onde a correlação é significativa (em geral, valores acima de 0,3).

lor por 100 km². Em janeiro (mês de menor ocorrência) o máximo é de apenas 3 focos de calor por 100 km² e se concentra no setor norte do Estado. Essa variabilidade mensal é consistente com os resultados documentados por Pereira *et al.* (2014) e sugere uma associação com o regime mensal de precipitação e a limpeza de pastos. Como discutido por Jacques (2003), nos meses de setembro e outubro ocorre a limpeza de pastos, visando o plantio agrícola ou

silvícola, e a limpeza para colheita, ou eliminação de pragas e plantas invasoras podendo ser uma das causas do aumento da ocorrência de focos de calor. De fato, esses resultados também mostram que a utilização do fogo para limpeza de pastos pode estar associada a práticas agrícolas com menor grau técnico.

A análise seguinte consistiu em determinar o mês com máximo número de focos para cada ponto

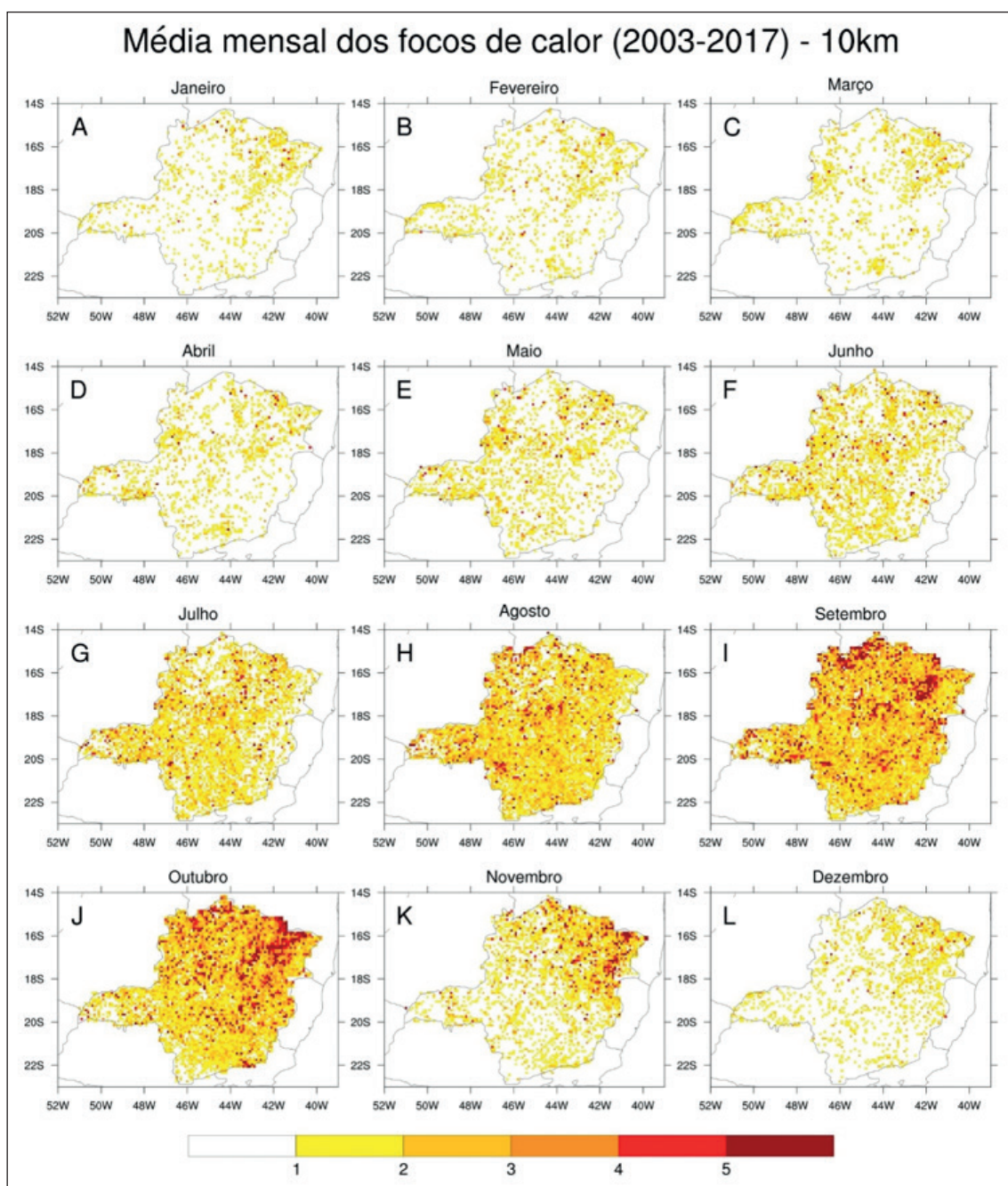


Figura 8
Média mensal dos focos de calor (número de focos mês⁻¹ (100 km²)⁻¹) no período de 2003 a 2017 com resolução horizontal de 10 km.

de grade de 10 x 10 km² (Figura 9). Para tanto, utilizou-se a quantidade mensal média de ocorrência de focos de calor registrada em cada ponto de grade. Assim foi possível definir o mês com maior média de focos de calor e representá-lo graficamente. A Figura 9 mostra a existência de duas regiões com características distintas. A primeira região se concentra nos setores norte-nordeste e leste do Estado de MG, abrangendo os meses de outubro-novembro com as maiores ocorrências de focos de calor. A segunda região está localizada próximo ao triângulo mineiro e centro-sul do Estado, registrando máximas ocorrências entre agosto e setembro. Os resultados de Pereira *et al.* (2014) para o Estado de MG mostraram maior ocorrência em outubro; porém os autores não avaliaram a variabilidade espacial nos valores mensais. Como já citado anteriormente, esses resultados podem ser indicativos da influência da variabilidade espacial do regime de precipitação no Estado e da sazonalidade na limpeza de pastos para o plantio de diferentes culturas agrícolas.

Na Figura 10 são apresentados a média mensal da precipitação no Estado de MG. O período mais chuvoso ocorre no verão (dezembro, janeiro

e fevereiro) com valores de precipitação iguais ou superiores a 5 mm dia⁻¹ e o período mais seco ocorre no inverno (junho, julho e agosto) com valores menores que 2 mm dia⁻¹. A precipitação no verão (principalmente em dezembro e janeiro) é concentrada no setor centro-sul dessa região. Segundo Reboita *et al.* (2015b), o sistema de monção da América do Sul é o responsável pelas condições úmidas no verão no sudeste do Brasil. Em contrapartida, no inverno as condições são desfavoráveis para a precipitação, uma vez que há o enfraquecimento da monção e da convecção local e o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) atua em parte sobre a região sudeste do Brasil (Reboita *et al.*, 2019).

Ao se comparar os resultados das Figuras 8 (focos de calor mensal) e 10 (precipitação mensal), nota-se que em todos os meses do ano a parte norte-nordeste do Estado é a mais seca, justificando a grande quantidade de ocorrência de focos de calor nesse setor. Além disso, no mês de setembro observam-se baixos valores de precipitação, contribuindo para a maior quantidade de focos. Esses resultados são corroborados por diversos estudos (Goulart *et al.*, 2011; Carvalho *et al.*, 2016; Lima,

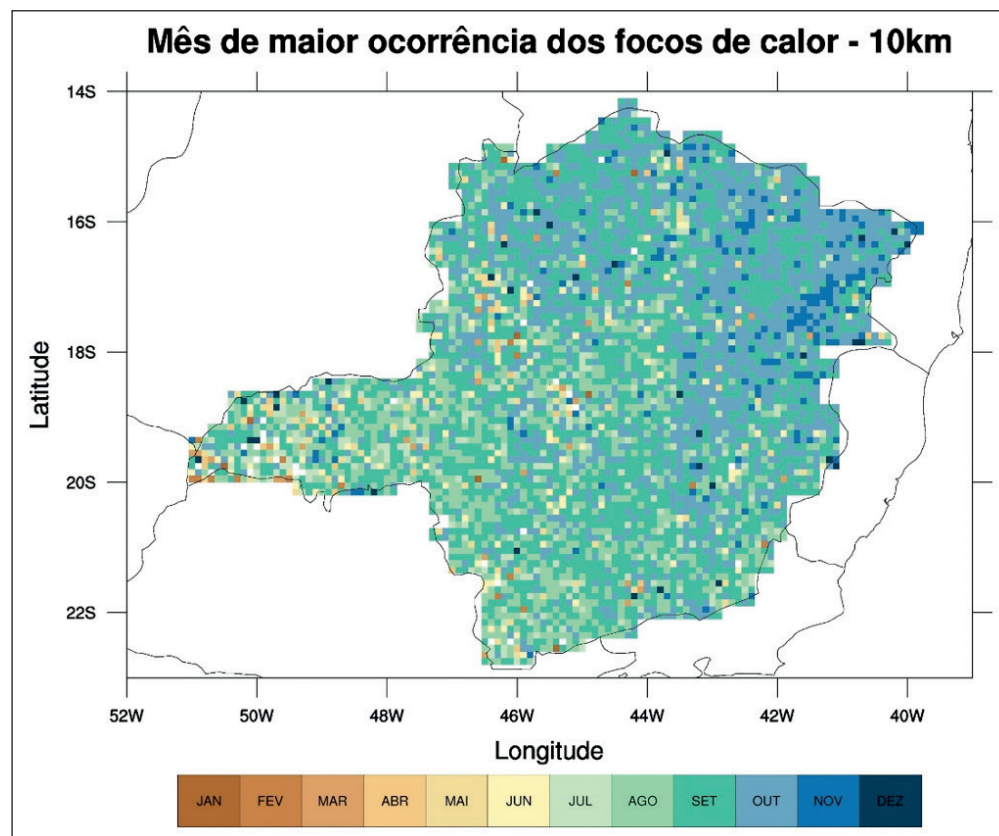


Figura 9
Mês de maior ocorrência dos focos de calor utilizando o período médio de 2003 a 2017 com resolução horizontal de 10 km.

2018; Neves *et al.*, 2018). Por exemplo, Lima (2018) documentaram que durante a estação chuvosa no sudeste do Brasil, o número de focos de calor é consideravelmente menor quando comparado à estação seca. Neves *et al.* (2018) verificaram uma elevada incidência de incêndios nos meses mais secos, indicando que as anomalias negativas de precipitação podem contribuir para isso. Em adição, Carvalho *et al.* (2016) avaliaram as relações entre condições atmosféricas e o risco de fogo para uma região cobrindo trechos dos estados de MG, Rio de Janeiro e São Paulo e encontraram um aumento na susceptibilidade entre os meses de junho e novembro em 2011, e entre os meses de agosto e novembro em 2012. Resultados compatíveis com condições de menor umidade e corroborando para o aumento no número de focos de calor detectados por satélites no mesmo período.

A Figura 11 apresenta a média mensal dos focos de calor e da precipitação (consideradas aqui como valores climatológicos) bem como o coeficiente de correlação entre essas variáveis. Uma moderada correlação negativa (-0,42) é documentada entre a precipitação e os focos de calor. Além de existir um comportamento inverso entre as variáveis, há uma defasagem temporal mensal como indica a Figura 11, ou seja, os meses de grande ocorrência de focos de calor são precedidos por meses com baixos acumulados de precipitação. Nota-se, por exemplo, que o mês de julho registrou um dos mais baixos acumulados de precipitação (10 mm mês⁻¹) e após 2 meses (setembro) foi registrado o máximo (3.700 focos) no ciclo mensal de focos de calor. Estes resultados sugerem a necessidade de persistência temporal na diminuição da precipitação para influenciar o aumento dos focos de calor, pois embora a preci-

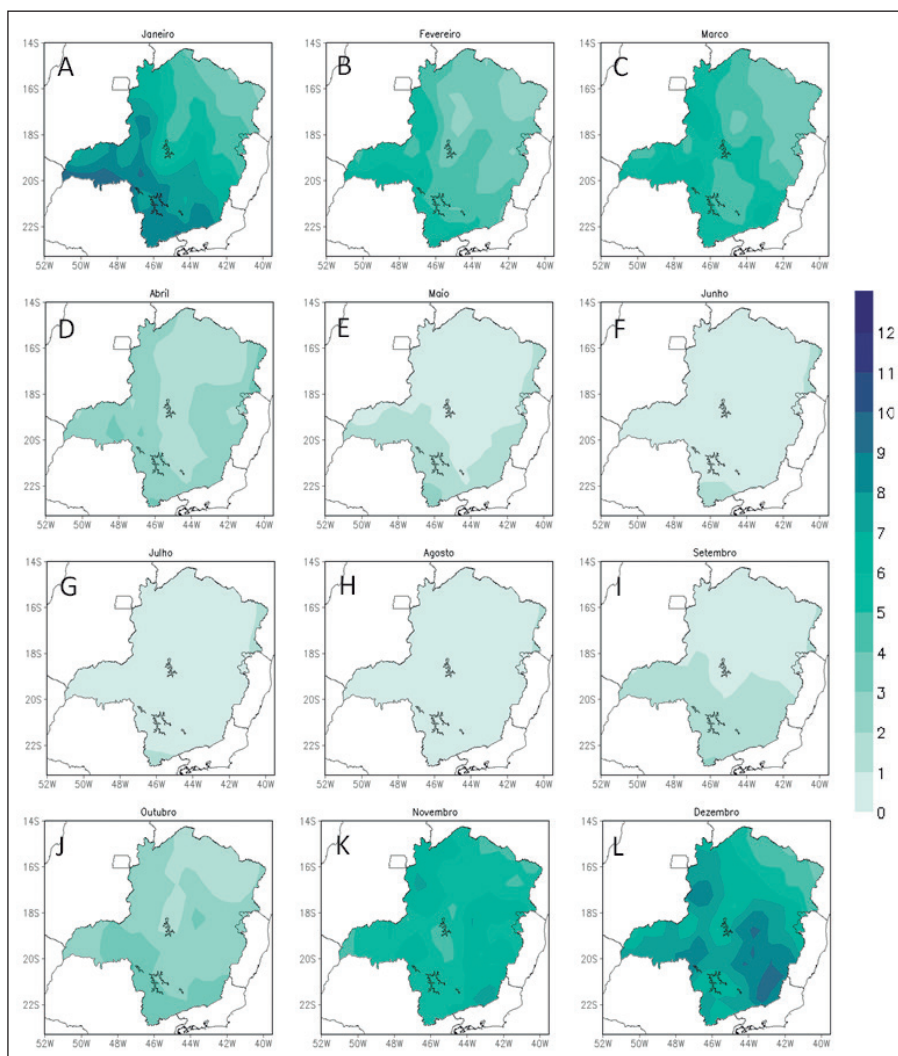


Figura 10 Média mensal de precipitação (mm dia⁻¹) no período de 2003 a 2017 proveniente do Climate Prediction Center (CPC). A resolução horizontal é de 10 km.

pitação seja reduzida no inverno, pode ser que haja armazenamento de água no solo, o que dificultaria a ocorrência dos focos de calor.

Como já discutido previamente, a precipitação mensal parece produzir condições ambientais favoráveis à ocorrência de focos de calor (embora, não se descarte a possível influência antrópica e demais variáveis ambientais). Assim, a sua variação mensal entre o período de estudo pode indicar como a mesma impacta essa relação. De modo semelhante ao realizado para os focos de calor (Figura 3), a Figura 12 mostra a distribuição mensal da precipitação. Em termos da mediana, existe um ciclo mensal bem definido, sendo dezembro o mês com o maior (230 mm mês^{-1}) valor acumulado de precipitação. No entanto, observa-se grande variabilidade nos dados de precipitação, enquanto dezembro varia entre 110 a 270

mm mês^{-1} , janeiro varia entre 55 a 310 mm mês^{-1} . Esses resultados são consistentes com os resultados de Reboita *et al.* (2015b) e sugerem que a relação entre precipitação e focos de calor para um determinado mês pode apresentar significativa variabilidade entre os anos.

A defasagem temporal entre os focos de calor e precipitação pode ser melhor caracterizada com o cálculo da correlação temporal defasada. Como os resultados da Figura 11 indicaram que o máximo mensal de focos é precedido por um mínimo de precipitação, foi utilizado o método de fixar o mês da precipitação e deslocar no tempo o mês dos focos de calor. Por exemplo, uma correlação com *lag-time2* (2 meses), considera os dados de precipitação de janeiro com os focos de calor de março, precipitação de fevereiro e focos de abril, e assim por diante. No

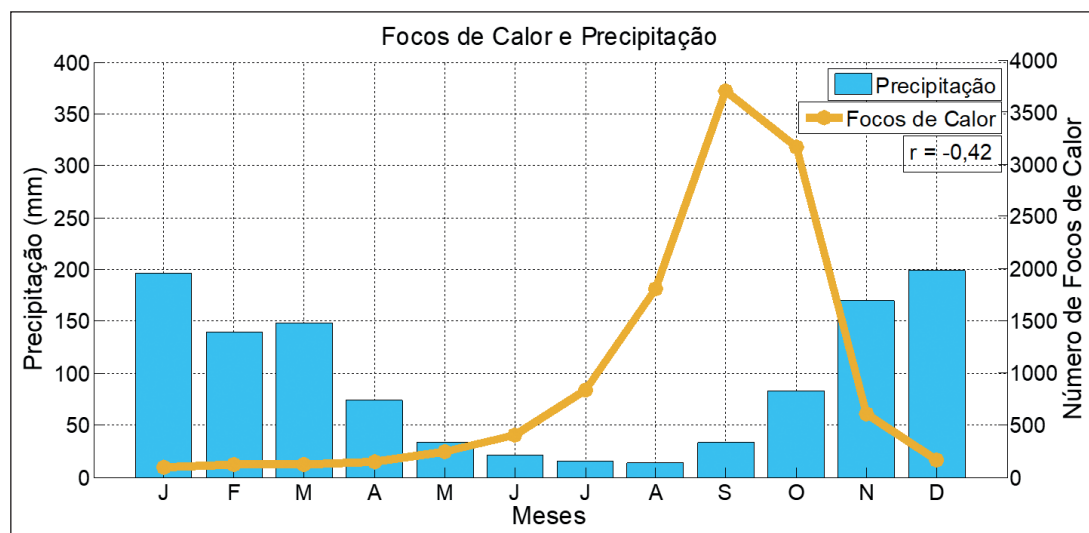


Figura 11 Média mensal climatológica dos focos de calor e precipitação no período de 2003 a 2017.

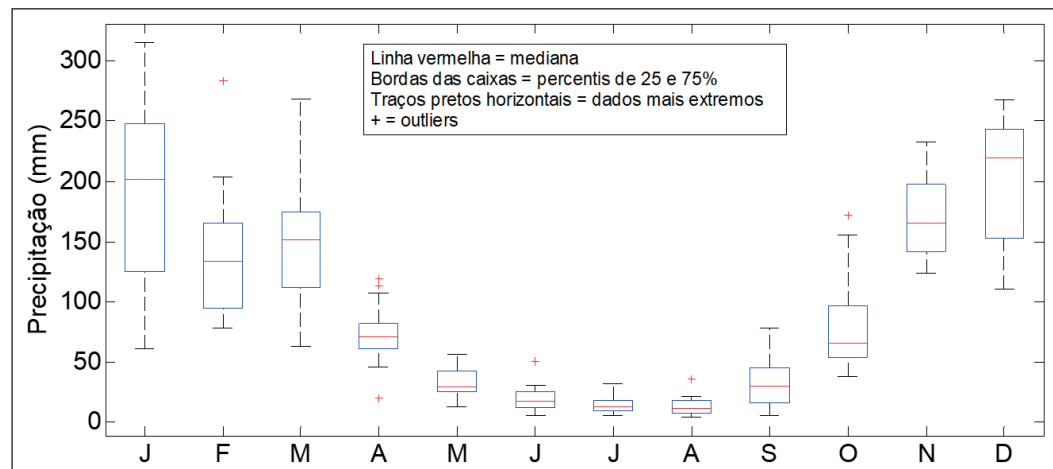


Figura 12 *Boxplot* da distribuição mensal da precipitação para 15 anos de dados (2003-2017) proveniente do *Climate Prediction Center* (CPC).

presente estudo, foi considerada defasagens de um a quatro meses e os resultados são mostrados na Tabela 1.

As correlações entre a precipitação e os focos de calor foram todas negativas, em conformidade com as análises anteriores. A correlação aumenta em módulo gradativamente até a defasagem de 2 meses, alcançando um valor de -0,52 e volta a diminuir após essa defasagem temporal. O moderado valor do coeficiente de correlação indica que a precipitação colabora em parte com as condições favoráveis para a ocorrência de focos de calor e indicam que uma persistência de um solo seco aproximadamente 60 dias antes poderia produzir as condições favoráveis para a ocorrência de queimadas, seja de forma natural ou antrópica.

Defasagem Temporal Mensal	Correlação
t + 0 mês	-0,37
t + 1 mês	-0,50
t + 2 meses	-0,52
t + 3 meses	-0,46
t + 4 meses	-0,33

Tabela 1 Correlação defasada calculada com dados mensais no período de 2003 a 2017. A correlação é calculada fixando o mês da precipitação e deslocando os focos mensais de calor.

Como os resultados mensais médios mostrados na Tabela 1 indicaram que a melhor correlação negativa entre a precipitação e focos de calor é com uma defasagem temporal de 2 meses, torna-se importante avaliar como esses valores variam espacialmente dentro da área de estudo. Nesse sentido, a Figura 13 mostra a correlação temporal mensal entre a precipitação e focos de calor com defasagem de 2 meses. De maneira geral, a correlação é predominantemente negativa ao longo dos meses (com mínimo de -0,8), embora seja perceptível uma variação mensal na distribuição espacial. Por exemplo, entre dezembro e junho há uma predominância de correlação negativa no setor norte do Estado, enquanto correlações positivas aumentam no setor centro-nordeste entre julho a novembro. Além disso, os meses de setembro e outubro (que são os meses que possuem máxima atividade de focos) registraram cor-

relação mínima (máxima) de aproximadamente -0,8 (+0,7). Esses resultados são consistentes com alguns estudos (Pyne *et al.*, 1996; Kunkel, 2001; Silva *et al.*, 2016; Sahu *et al.*, 2015) que têm mostrado que o regime de fogo pode ser controlado pelas condições climáticas locais.

3.4 Municípios Hotspots de Focos de Calor

A Tabela 2 mostra a quantidade de focos de calor registrada nos dez municípios *hotspots*, isto é, com as maiores ocorrências de focos de calor no período de estudo. A maior quantidade de focos ocorre no município de Paracatu, com um total de 3.376 focos de calor durante os quinze anos de dados, seguido por Araçuaí registrando 2.444 focos e Itinga com 2.236 focos (Tabela 2 e Figura 14). Pereira *et al.* (2014) também documentaram alta frequência de focos de calor para os municípios no norte-noroeste de MG, como Paracatu, Januária, Unaí, Arinos e João Pinheiro. O município de Paracatu possui 50 % mais focos de calor que o último colocado, o município de Almenara (1.714 focos) e está localizado no bioma Cerrado. De fato, 70 % dos dez primeiros municípios estão localizados no bioma Cerrado e os demais 30 % estão localizados na Mata Atlântica. Os resultados apresentados são consistentes com os de Santos *et al.* (2014) que mostraram que as áreas mais atingidas pelas queimadas em MG localizam-se no norte território, com ocorrências superiores a 4 focos km⁻². De fato, Como discutido por Santos *et al.* (2014) a fitofisionomias desses biomas apresentam de maneira geral alta inflamabilidade o que pode proporcionar o alastramento do fogo em determinadas situações de tempo e clima favoráveis.

De maneira geral, a análise da Figura 14 mostra a necessidade de criação de políticas públicas pelos órgãos de monitoramento e de tomada de decisão para as regiões noroeste e nordeste do Estado de MG que são aquelas com as maiores atividades de ocorrência de focos de calor.

4 Conclusão

O presente estudo avaliou a distribuição espaço-temporal dos focos de calor no Estado de Minas Gerais nas escalas temporal mensal e anual usando

Distribuição Espaço-Temporal dos Focos de Calor no Estado de Minas Gerais
 Brenda Almeida Santos; Melissa Dias da Silva Oliveira; Paola do Nascimento Silva;
 José Guilherme Martins dos Santos; Enrique Vieira Mattos & Michelle Simões Reboita

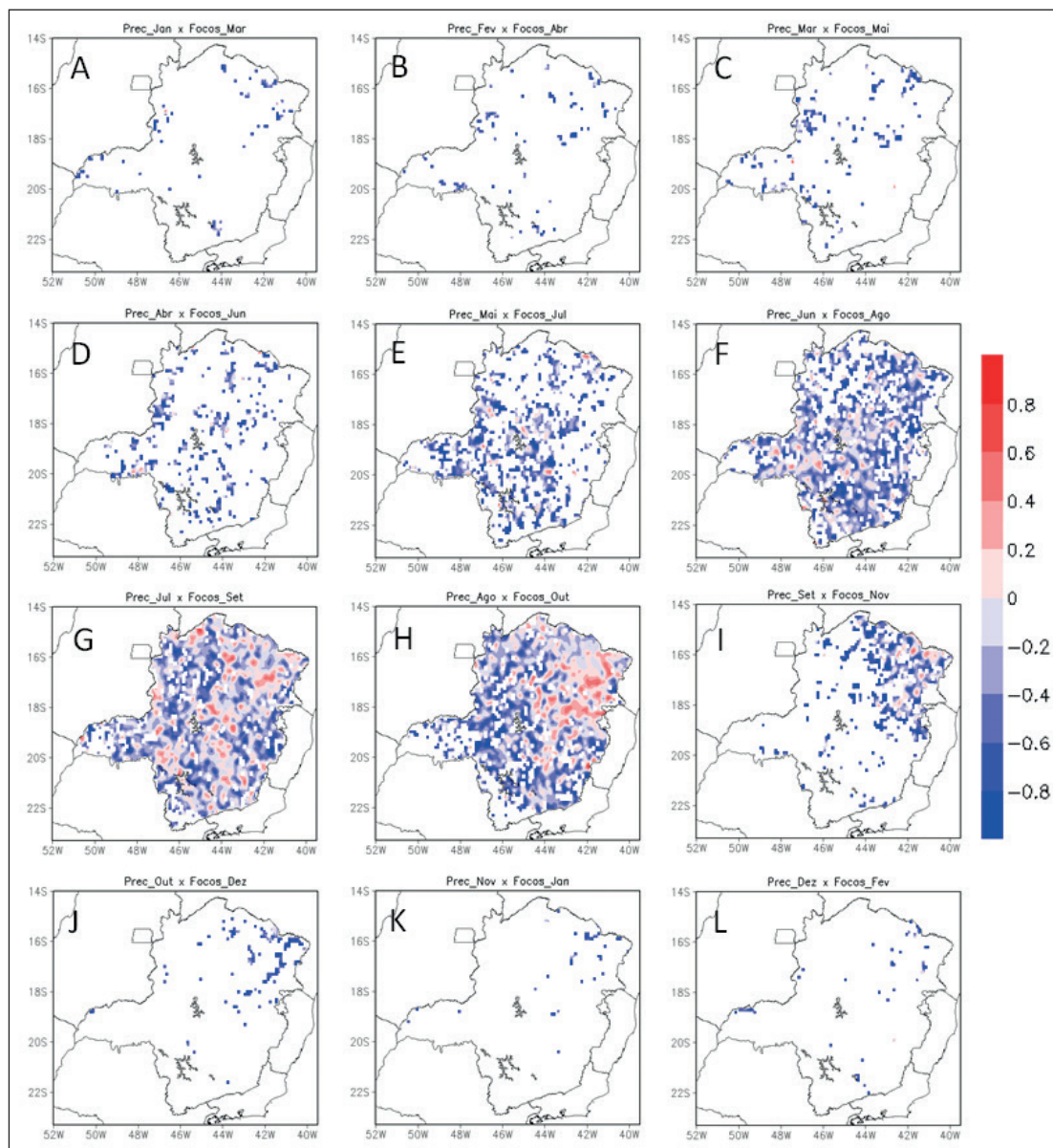


Figura 13 Correlação espacial mensal com defasagem de dois meses entre a precipitação e os focos de calor. A resolução horizontal é de 10 km.

Quantidade de Focos de Calor das Cidades Hotspots					
Posição	Acumulado	Município	Latitude	Longitude	Bioma
1°	3.376	Paracatu	17° 13' 20"S	46° 52' 29"O	Cerrado
2°	2.444	Araçuaí	16° 50' 59"S	42° 04' 13"O	M. Atlântica
5°	2.236	Itinga	16° 36' 47"S	41° 45' 55"O	M. Atlântica
3°	2.221	Januária	15° 29' 17"S	44° 21' 43"O	Cerrado
4°	2.195	Unai	16° 21' 27"S	46° 54' 22"O	Cerrado
6°	2.111	Bonito de Minas	15° 19' 24"S	44° 45' 16"O	Cerrado
7°	1.981	Arinos	15° 55' 01"S	46° 06' 20"O	Cerrado
8°	1.894	Buritzeiro	17° 21' 04"S	44° 57' 44"O	Cerrado
9°	1.858	João Pinheiro	17° 44' 33"S	46° 10' 21"O	Cerrado
10°	1.714	Almenara	16° 11' 00"S	40° 41' 39"O	M. Atlântica

Tabela 2 Quantidade de focos de calor nas dez cidades *hotspots* (locais com as maiores ocorrências de focos de calor) no período de 2003 a 2017 para o Estado de Minas Gerais.

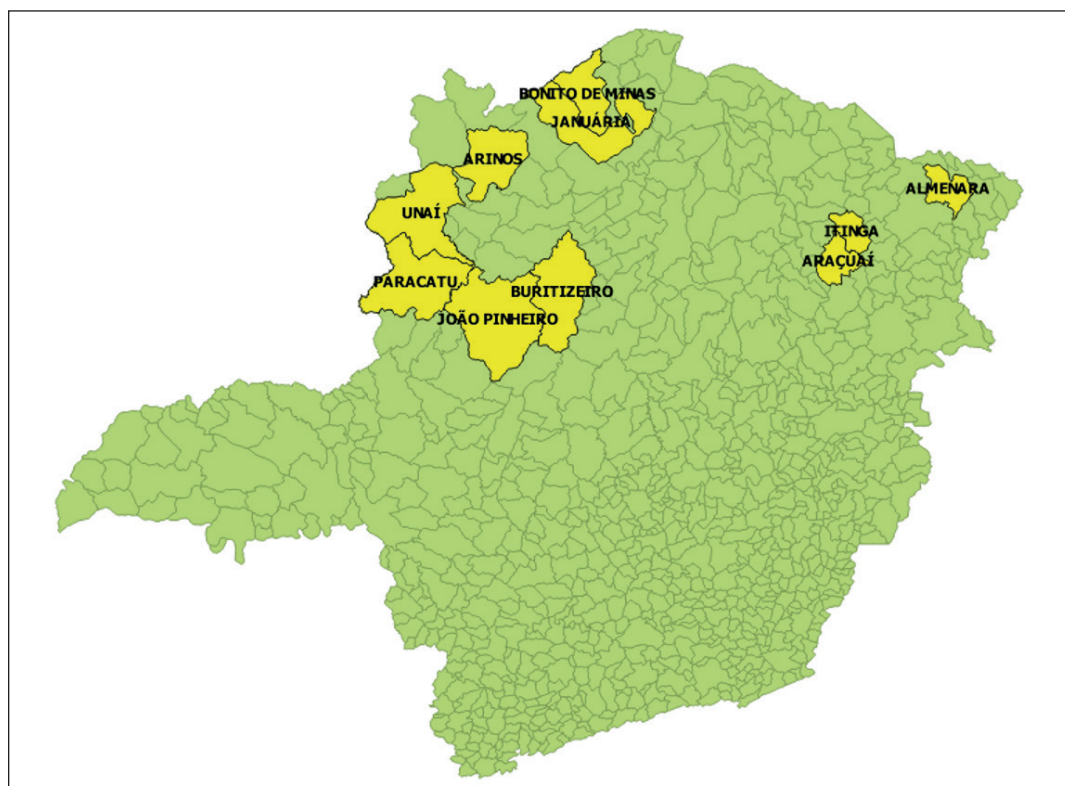


Figura 14
Localização dos municípios *hotspots* de focos de calor no período de 2003 até 2017 para o Estado de Minas Gerais.

15 anos (2003-2017) de dados do satélite AQUA. A utilização de um extenso período de dados para mapear os principais municípios com as maiores ocorrências de focos de calor para MG foi inédito.

O período de máxima ocorrência de queimadas ocorre de julho a outubro, entre a estação seca e início da chuvosa no sudeste do Brasil, sendo setembro o mês de máxima ocorrência. Este estudo também mostrou a existência de duas regiões com máximos ocorrendo em meses distintos; na região norte (centro-sul) do estado os focos de calor ocorrem com maior frequência entre outubro e dezembro (junho e setembro). Em termos de precipitação, os meses de junho a agosto foram os mais secos, o que indica a existência de uma defasagem temporal entre os mínimos de precipitação e a máxima ocorrência de focos de calor. Por meio das análises de correlação com diversas defasagens temporais mensais, foi encontrado o máximo coeficiente de correlação de Pearson (-0,52) para a defasagem temporal de 2 meses entre a precipitação e os focos de calor. A persistência de um solo seco aproximadamente 60 dias antes pode contribuir em partes para a ocorrência

de queimadas, seja de forma natural ou antrópica. Portanto os resultados sugerem que a precipitação possui uma contribuição parcial no favorecimento da existência das condições para a ocorrência de focos de calor e que de fato diversos outros fatores ambientais e antrópicos podem contribuir.

Um mapa indicando os municípios *hotspots* de ocorrência de focos de calor mostrou que a maioria dessas localidades estão situadas no setor noroeste do Estado de MG, predominantemente no bioma Cerrado, sendo Paracatu o município com maior incidência. Esse mapeamento feito pela primeira vez para o estado de MG será útil para o uso da Defesa Civil e órgãos governamentais locais para tomadas de decisão associadas ao monitoramento ambiental e para fiscalização dessas áreas, assim como para futuras melhorias nas leis ambientais locais.

De maneira geral, os resultados mostraram que a precipitação possui papel importante na distribuição dos focos de calor em MG, mas não é a única variável que pode impactar a sua ocorrência. É importante salientar que outras informações também

devem ser consideradas, como a umidade, o uso e a ocupação do solo, assim como o tipo de agricultura e incentivos do governo através das políticas públicas regionais. Adicionalmente, também foi evidenciado que a detecção de focos de calor por meio do sensoriamento remoto é a forma mais viável de monitoramento não somente para MG, mas para o Brasil devido a sua diversidade de cobertura vegetal e extensão territorial, além da disponibilidade de dados a cada 12 horas.

Para estudos futuros, sugere-se comparar a quantidade de focos de calor de MG com outras regiões do país. Além disso, realizar a validação de alguns casos por meio de medidas de monitoramento *in situ* dos focos de calor. Como sugestão adicional, seria interessante verificar a influência de outros fatores, como por exemplo, a densidade demográfica, o uso e a ocupação do solo, a umidade relativa, e outras variáveis meteorológicas que podem influenciar na ocorrência dos focos de calor.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Monitoramento de Queimadas do CPTEC/INPE (<http://www.inpe.br/queimadas/portal>) por disponibilizar os dados de focos de calor do satélite AQUA e ao *Climate Prediction Center* (CPC, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html>) pela disponibilização dos dados de precipitação.

6 Referências

- Adámek, M.; Bobek, P.; Hadincová, V.; Wild, J. & Kopecký, M. 2015. Forest fires within a temperate landscape: a decadal and millennial perspective from a sandstone region in Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 336: 81-90.
- Alves, M.V.G.; Batista, A.C.; Soares, R.V.; Koehler, H.S. & Pereira, J.F. 2009. Modelagem de umidade do material combustível, baseada em variáveis meteorológicas. *Floresta*, 39(1): 167-174.
- Antunes, M.A.H. & Ribeiro, J.C. 2000. Uso de satélites para detecção de queimadas e para avaliação do risco de fogo. *Ação Ambiental*, 12: 24-27.
- Batista, A.C. 2004. Detecção de incêndios florestais por satélites. *Floresta*, 34(2): 237-241.
- Bowman, D.M.J.S.; Balch, J.K.; Artaxo, P.; Bond, W.J.; Carlson, J.M.; Cochrane, M.A.; D'Antonio, C.M.; Defries, R.S.; Doyle, J.C.; Harrison, S.P.; Johnston, F.H.; Keeley, J.E.; Krawchuk, M.A.; Kull, C.A.; Marston, J.B.; Moritz, M.A.; Prentice, I.C.; Roos, C.I.; Scott, A.C.; Swetnam, T.W.; Van der Werf, G.R. & Pyne, S.J. 2009. Fire in the Earth system. *Science*, 324(5926): 481-484.
- Cardoso, M.F.; Hurr, G.C.; Moore, B.; Nobre, C.A. & Prins, E.M. 2003. Projecting future fire activity in Amazonia. *Global Change Biology*, 9(5): 656-669.
- Cardoso, M.F.; Nobre, C.A.; Lapola, D.M.; Oyama, M.D. & Sampaio, G. 2008. Long-term potential for fires in estimates of the occurrence of savannas in the tropics. *Global Ecology and Biogeography*, 17(2): 222-235.
- Carvalho, M.F.O.; Cardoso, M.F. & Almeida, B.N. 2016. Estimativa da flamabilidade da vegetação com base em fitofisionomias e fatores climáticos. *Biodiversidade Brasileira*, 6(2): 187-204.
- Chen, M.; Shi, W.; Xie, P.; Silva, V.B.S.; Kousky, V.E.; Higgins, R.W. & Janowiak, J.E. 2008. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 113(D4): 1-13.
- Chuvieco, E.; Englefield, P.; Trischenko, A. & Lio, Y. 2008. Generation of long time series of burn area maps of the boreal forest from NOAA-AVHRR composite data. *International Journal Remote Sensing*, 23: 5103-5110.
- Cochrane, M.A. 2003. Fire science for rainforests. *Nature*, 421(6926): 913-919.
- Coelho, C.A.S.; Oliveira, C.P.; Ambrizzi, T.; Reboita, M.S.; Carpenedo, C.B.; Campos, J.L.P.S.; Tomaziello, A.C.N.; Pampuch, L.A.; Custódio, M.S.; Dutra, L.M.M.; Rocha, R.P. & Rehbein, A. 2016. The 2014 Southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. *Climate Dynamics*, 46(11): 3737-3752.
- Corrêa, C.R. & Alencar, R.C.C. 2013. Focos de queimadas em unidades de conservação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, Foz do Iguaçu, 2013. *Anais...*, Foz do Iguaçu, p. 3954.
- Crutzen, P.J. & Andreae, M.O. 1990. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*, 250(4988): 1669-1678.
- Dozier, J. 1981. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. *Remote Sensing Environment*, 11: 221-229.
- Duncan, B.N.; Martin, R.V.; Yevitch, A.C.R. & Logan, J.A. 2003. Interannual and seasonal variability of biomass burning emissions constrained by satellite observations. *Journal of Geophysical Research*, 108: 1-28.
- Flannigan, M.D.; Stocks, B.J. & Wotton, B.M. 2000. *Climate change and forest fires. Science of the Total Environment*, 262: 221-229.
- França, D.A.; Longo, K.M.; Neto, T.G.S.; Santos, J.C.; Freitas, S.R.; Rudorff, B.F.T.; Cortez, E.V.; Anselmo, E. & Carvalho Jr., J.A. 2012. Pre-harvest sugarcane burning: determination of emission factors through laboratory measurements. *Atmosphere*, 3(1): 164-180.
- Giglio, L.; Descloitres, J.; Justice, C.O. & Kaufman, Y.J. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing Environment*, 87: 273-282.
- Giglio, L.; Randerson, J.T.; Van der Werf, G.R.; Kasibhatla, P.S.; Collatz, G.J.; Morton, D.C. & DeFries, R.S. 2010. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. *Biogeosci-*

- ences, 7: 1171-1186.
- Giglio, L.; Van der Werf, G.R.; Randerson, J.T.; Collatz, G.J. & Kasibhatla, P.S. 2006. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6: 957-974.
- Gontijo, G.A.B.; Pereira, A.A.; Oliveira, E.D.S. & Acerbi Jr., F.W. 2011. Detecção de queimadas e validação de focos de calor utilizando produtos de Sensoriamento Remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), Curitiba, 2011. *Anais...* São José dos Campos; INPE, p. 7966.
- Goulart, A.A.; Morelli, F. & Setzer, A. 2011. Focos de queimadas e incêndios detectados por satélites nas unidades de conservação do cerrado no Mato Grosso em 2010. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 14, Dourados, 2011. Resumos expandidos, Dourados, 1-10.
- Governo MG. 2017. Governo do Estado de Minas Gerais. Clima, vegetação e relevo. Disponível em: <<https://www.mg.gov.br/conteudo/conheca-minas/geografia/clima-vegetacao-e-relevo>>. Acesso em: 02 nov. 2017.
- Huang, R.; Zhang, X.; Chan, D.; Kondragunta, S.; Russell, A.G. & Odman, M.T. 2018. Burned area comparisons between prescribed burning permits in southeastern United States and two satellite-derived products. *Journal of Geophysical Research*, 123: 4746-4757.
- IBGE. 2017. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Geociências: Área Territorial Brasileira. Disponível em: <<https://www2.ibge.gov.br/home/geociencias/areaterritorial/principal.shtm>>. Acesso em: nov. 2017.
- INMET. 2018. Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil (INMET). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>> Acesso em: abril 2018.
- INPE. 2018. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), BD Queimadas - Banco de queimadas. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas>>. Acesso em: dez. 2018.
- Jaiswal, R.K.; Mukherjee, S.; Raju, K.D. & Saxena, R. 2002. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(1): 1-10.
- Jacques, A.V.A. 2003. A queima das pastagens naturais: efeitos sobre o solo e a vegetação. *Ciência Rural*, 33: 177-181.
- Justice, C.O.; Giglio, L.; Boschetti, L.; Roy, D.P.; Csizsar, I.; Morisette, J & Kaufman, Y. 2006. Algorithm Technical Background Document. *MODIS ATBD: Fire*, 1-34.
- Kaufman, Y.J.; Justice, C.O.; Flynn, L.P.; Kendall, J.D.; Prins, E.M., Giglio, L.; Ward, D.E.; Menzel, W.P. & Setzer, A.W. 1998. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. *Journal of Geophysical Research*, 32: 215-238.
- Kunkel, K.E. 2001. Surface energy budget and fuel moisture. In: JOHNSON, E.A. & MIYANISHI, K. (eds.). *Forest Fires: Behavior and Ecological Effects*. Academic Press, p. 303-350.
- Lauk, C. & Erb, K.H. 2009. Biomass consumed in anthropogenic vegetation fires: Global patterns and processes. *Ecological Economics*, 69(2): 301-309.
- Libonati, R.; Dacamara, C.C.; Setzer, A.W.; Morelli, F. & Melchiori, A.E. 2015. An algorithm for burned area detection in the Brazilian Cerrado using 4 µm MODIS Imagery. *Remote Sensing*, 7(11): 15782-15803.
- Lima, I.C. 2018. *Monitoramento dos focos de queimadas nos biomas Amazônia e Cerrado nas estações seca e chuvosa de 2017*. Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Uberlândia, Trabalho de Conclusão de Curso, 37p.
- Mataveli, G.A.V. & Chaves, M.E.D. 2014. Análise da distribuição espacial dos focos de calor no estado de Minas Gerais entre 2009 e 2012. In: SIMPÓSIO MINEIRO DE GEOGRAFIA, Alfenas, 2014. *Anais...* Alfenas; UFAL, p. 1657.
- Miranda, M.R.S.M.; Neves, L.F.S.; Kreitlow, J.P.; Neves, S.M.A.S. & Neves, R.J. 2018. Distribuição de queimadas e mudanças na cobertura vegetal e uso da terra no bioma Pantanal, Cáceres-Brasil. *Caminhos de Geografia*, 19 (65): 91-108.
- Neves, L.F.S.; Marimon, B.S.; Anderson, L.O. & Neves, S.M.A.S. 2018. Dinâmica de fogo no Parque Estadual do Araguaia, zona de transição Amazônia-Cerrado. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*, 44: 85-103.
- Oliveira, D.S. 2002. *Zoneamento de risco de incêndios em povoamentos florestais no norte de Santa Catarina*. Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná. Dissertação de Mestrado, 124p.
- Panisset, J.; Dacamara, C.C.; Libonati, R.; Peres, L.F.; Calado, T.J. & Barros, A. 2017. Assigning dates and identifying areas affected by fires in Portugal based on MODIS data. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 89(3): 1487-1501.
- Pereira, A.A. 2009. *Uso de geotecnologia para detecção e análises de queimadas e focos de calor em unidades de conservação no norte de Minas Gerais*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Dissertação de Mestrado, 91p.
- Pereira, A.A.; Barros, D.A.; Pereira, J.A.A.; Acerbi Jr., F.W.; Morelli, F.; & Scolforo, J.R.S. 2014. Frequência espaço-temporal dos focos ativos em Minas Gerais durante o período de 1999 a 2009. *Cerne*, 20(3): 459-469.
- Pereira, A.A.; Pereira, J.A.A.; Morelli, F.; Barros, D.A.; Acerbi Junior, F.W & Scolforo, J.R.S. 2012. Validação de focos de calor utilizados no monitoramento orbital de queimadas por meio de imagens TM. *Cerne*, 18(2): 335-343.
- R.A.S.; Riveira-Lombardi, R.J.; Shimabururo, Y.E.; Formaggio, A.R. & Krug, T. 2008. Utilização de dados MODIS para a detecção de queimadas na Amazônia. *Acta Amazônica*, 38(1): 77-84.
- Pivello, V.R. 2011. The use of fire in the Cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: Past and present. *Fire Ecology*, 7(1): 24-39.
- Pyne, S.J.; Andrews, P.L. & Laven, R.D. 1996. *Introduction to wild land fire*. Nova Iorque, Wiley, 808 p.
- Reboita, M.S.; Ambrizzi, T.; Silva, B.A.; Pinheiro, R.F. & da Rocha, R.P. 2019. The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and future climate. *Frontiers Earth Science*, 7(8), 1-15.
- Reboita, M.S.; Oliveira, M.O.; Freitas, C.H; Oliveira, G.M. & Pereira, R.A.A. 2015a. Anomalias dos Padrões Sinóticos da Atmosfera na América do Sul nos Meses de Janeiro de 2014 e 2015. 2015. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 4: 1-12.
- Reboita, M.S.; Rodriguez, M.; Silva, L.F. & Alves, M.A. 2015b. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. *Revista*

- Brasileira de Climatologia*, 17: 206-226.
- Rodrigues, J.A.; Libonati, R.; Peres, L.F. & Setzer, A. 2018. Mapeamento de áreas queimadas em unidades de conservação da região serrana do Rio de Janeiro utilizando o satélite Landsat-8 durante a Seca de 2014. *Anuário do Instituto de Geociências*, 41: 318-327.
- Roy, D.P.; Boschetti, L.; Justice, C.O. & Ju, J. 2008. The Collection 5MODIS burned area product: Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. *Remote Sensing Environment*, 112: 3690-3707.
- Sahu, L.K.; Sheel, V.; Pandey, K.; Yadav, R.; Saxena, P. & Gunthe, S. 2015. Regional biomass burning trends in India: Analysis of satellite fire data. *Journal of Earth System Science*, 124(7): 1377-1387.
- Santos, J.F. 2004. *Estatística de incêndios florestais em áreas protegidas no período de 1998 a 2002*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado, 76p.
- Santos, P.R.; Pereira, G. & Rocha, L.C. 2014. Análise da distribuição espacial dos focos de queimadas para o bioma cerrado. In: SIMPÓSIO MINEIRO DE GEOGRAFIA DAS DIVERSIDADES À ARTICULAÇÃO GEOGRÁFICA, 1, Alfenas, 2014. *Anais...* Alfenas, UNIFAL, p.1740.
- Setzer, A.W.; Morelli, F. & Jesus, C.S. 2011. Validação de focos de calor no Cerrado em imagens TM/Landsat – 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 15, Curitiba, 2011. *Resumos expandidos*, Curitiba, p.8051.
- Setzer, A.W.; Pereira, M.C. & Pereira Jr., A.C. 1994. Satellite studies of biomass burning in Amazonia-Some practical aspects. *Journal Remote Sensing Reviews*, 10: 91-103.
- Silva, P.; Bastos, A.; Dacamara, C.C. & Libonati, R. 2016. *Future projections of Fire occurrence in Brazil using EC-Earth climate model*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(3): 288-297.
- Silva, E.D. & Reboita, M.S. 2013. Estudo da Precipitação no Estado de Minas Gerais – MG. *Revista Brasileira de Climatologia*, 13: 12-136.
- Silva, M.F.A & White, B.L.A. 2016. Detecção de focos de calor através de satélites nos distintos biomas brasileiros de 1999 a 2015. In: IV SIMPÓSIO SOBRE AS GEOTECNOLOGIAS E GEOINFORMAÇÃO NO ESTADO DO ALAGOAS, 4, Maceió, 2016. *Anais...*, Maceió, p.248.
- Skinner, W.R.; Flannigan, M.D.; Stocks, B.J.; Martell, D.L.; Wotton, J.B.; Todd, J.B.; Mason, J.A.; Logan, K.A. & Bosch, E.M. 2002. *A 500 hPa synoptic wild land fire climatology for large Canadian forest fires, 1959-1996*. *Theoretical and Applied Climatology*, 71: 157-169.
- Souza, L.S.N. 2008. *Análise de Impactos das Queimadas sobre a Saúde Humana: Um estudo de caso do Município de Rio Branco, Acre*. Programa de Pós-graduação em Saúde Pública e Meio Ambiente, Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca, Dissertação de Mestrado, 129p.
- Tansey, K.; Gregoire, J.M.; Defourny, P.; Leigh, R.; Pekel, J. F.O.; Van Bogaert, E. & Bartholome, E. 2008. A new, global, multi-annual (2000-2007) burnt area product at 1 km resolution. *Geophysical Research Letters*, 35: 1-6.
- Tebaldi, A.L.C.; Fiedler, N.C.; Sant'anna, C.M. & Minette, L.J. 2012. *Controle de Incêndios Florestais: Contribuições para o Corredor Central da Mata Atlântica*. Espírito Santo, Editora IEMA, p.156.
- Wilks, D.S. 2005. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Cambridge, Academic Press, 648p.
- Wooster, M.J.; Roberts, G. & Perry, G.L.W. 2005. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. *Journal of Geophysical Research*, 110: 1-24.
- Zhang, G.; Liu, F. & Yang, Z. 2003. Study of Guangzhou's forest fire hazardous areas based on RS and GIS. *Journal of Central South Forestry University*, 23(4): 62-66.
- Zhang, X.; Kondragunta, S.; Ram, J.; Schmidt, C. & Huang, H. 2012. Near-real-time global biomass burning emissions product from geostationary satellite constellation. *Journal of Geophysical Research*, 117:1-18.