



**Universidade Federal do Rio de Janeiro**

**Centro de Ciências e Matemáticas da Natureza**

**Instituto de Geociências**

**Departamento de Meteorologia**

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE INCÊNDIOS CAUSADOS  
POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS POR MEIO DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

Lucas da Silva Menezes

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Renata Libonati dos Santos

Coorientadora: Dra. Ana Cristina Machado Russo

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Outubro de 2023

IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE INCÊNDIOS CAUSADOS  
POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS POR MEIO DE SENSORIAMENTO  
REMOTO

Lucas da Silva Menezes

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia.

Avaliada por:

---

D. Sc. Renata Libonati dos Santos – IGEO/UFRJ

(Orientadora)

---

D. Sc. Ana Cristina Machado Russo – IDL/Universidade de Lisboa

(Coorientadora)

---

D. Sc. Ana Maria Bueno Nunes – IGEO/UFRJ

---

D. Sc. Ricardo Trigo – IDL/Universidade de Lisboa

---

D. Sc. Carlos Augusto Morales Rodriguez – IAG/USP

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Outubro de 2023

## **AGRADECIMENTOS**

Dedico esta seção para expressar a minha gratidão aquelas pessoas especiais que me apoiaram e me guiaram por todo esse tempo desde que ingressei na vida acadêmica até o ponto em que me encontro atualmente.

Agradeço a meus pais e minha família pelos bons exemplos, carinho, apoio e pela paciência mesmo nos meus momentos de teimosia, certamente grande parte daquilo que define o meu ‘eu’ não existiria hoje se não fosse pelos valores e educação que me foram dados desde a infância.

Agradeço aqueles poucos amigos que mantive próximo a mim desde antes de iniciar a minha jornada na faculdade, e as amizades especiais que me acompanham neste momento. Hoje nós podemos rir daqueles momentos de frustração, madrugadas viradas e desafios que compartilhamos juntos, e lembrar os momentos de alegria e diversão que experienciamos.

Agradeço aos meus colegas de laboratório, que me receberam de braços abertos e me ajudaram a ter uma visão mais ampla sobre diversos assuntos, incluindo os próximos passos a serem seguidos, sempre incentivando e compartilhando experiências de vida. Finalmente, agradeço aos professores, sempre bem-humorados, que tornam possível essa troca de conhecimento, cada um com a sua própria forma de lecionar, e principalmente as minhas orientadoras, pela paciência, assistência e por terem me guiado até aqui, atuando como exemplos a serem seguidos como pessoa e profissional.

## RESUMO

Os raios nuvem-solo são a principal fonte de ignição natural de fogos em todo o mundo. Nesse sentido, a comunidade científica tem direcionado os seus esforços a investigar a relevância de incêndios induzidos por raios a fim de aperfeiçoar as políticas de prevenção e gerenciamento do fogo em diversas áreas, tipicamente a partir de informações relatadas em campo. Em países como Portugal, que dispõe de um amplo catálogo de ocorrências, cerca de metade dos incêndios catalogados não possuem uma causa atribuída, e particularmente no Brasil, este fenômeno é muito pouco documentado, evidenciando a necessidade de quantificar e melhor entender a relevância das ignições por raio em ambas as regiões. O objetivo deste trabalho é investigar a variabilidade espacial e temporal de incêndios induzidos por raio e quantificar a sua relevância no bioma brasileiro Pantanal e no território de Portugal continental, duas áreas com regime de fogo e características climáticas distintas. Adicionalmente, o potencial dos dados de sensoriamento remoto em atuar como fonte alternativa para identificação e caracterização deste fenômeno foi avaliado. Além dos dados de raios disponibilizados pela STARNET (Brasil) e o IPMA (Portugal), a análise no Pantanal foi baseada exclusivamente em dados de focos de calor e área queimada dos sensores VIIRS e MODIS, enquanto em Portugal também foi utilizado o catálogo de ocorrências de incêndio disponibilizado pelo Instituto da Conservação de Natureza e das Florestas (ICNF). Os resultados indicam que os raios não são a principal fonte de ignição de incêndios no Pantanal, sendo responsáveis por apenas 5% das cicatrizes de incêndio e correspondendo a 16% da área total queimada entre 2012 e 2017. Apesar de ocorrer com maior frequência durante a primavera, ao norte do bioma, eles são mais relevantes para o regime de fogo durante o verão, quando contabilizam por cerca de 50% das cicatrizes de incêndio, situadas principalmente ao oeste do bioma. Por sua vez, em Portugal foi estimado que apenas 1% das ocorrências de incêndio entre 2003 e 2020 sejam induzidas por raios, uma relevância ainda menor em comparação ao indicado em publicações e relatórios anteriores. Eles ocorrem principalmente entre junho e setembro, nas áreas remotas ao norte e na região central de Portugal, onde se localizam as cadeias montanhosas. O emprego de dados de sensoriamento remoto em conjunto com a metodologia utilizada resulta em uma boa precisão ao classificar a causa de ignição de incêndios e focos de calor. No entanto, devido a resolução espacial do produto de satélite utilizado, não foi possível avaliar a contribuição de incêndios de menor dimensão para o regime de fogo no Pantanal.

**Palavras-Chave:** Pantanal, Portugal, Raios, Incêndios, Incêndio natural

## ABSTRACT

Cloud-to-ground lightnings are the main cause of natural ignition around the world, which has led the scientific community to led efforts to investigate the relevance of lightning-ignited fires due to its importance when addressing fire management plans and improvement of prevention policies, typically relying on fire databases providing field information on fire occurrences. However, particularly in Brazil, there is a poor documentation of this phenomenon, and in countries such as Portugal, which has a rich fire database, a large number of fires have unknown causes. This suggests that further investigation is required in order to understand to what extent lightning ignitions are a relevant fire cause in both regions. The objective of this work is to characterize the spatial and temporal variability of lightning-ignited fires and quantify its relevance in the Brazilian Pantanal and Portugal mainland territory, two regions with distinct climate characteristics. Additionally, the potential of remote sensing data to act as an alternative information source in order to identify and characterize this phenomenon was assessed. In addition to the lightning data provided by STARNET (Brazil) and IPMA (Portugal), the analysis in the Brazilian Pantanal was based exclusively on active fire and burned area data from VIIRS and MODIS sensors, while in Portugal the fire database provided by the Institute for Nature Conservation and Forests (ICNF, Portuguese acronym) was also used. The results gathered here shows that lightning isn't the major ignition source in the Brazilian Pantanal, being responsible for only 5% of the fire scars and corresponding to around 16% of the total burned area between 2012 and 2017. Despite occurring more often during the austral Spring (September to November) to the northern areas of the biome, they are more relevant to the fire regime during the austral Summer (December to February), when accounted for 50% of the fire scar during this season, occurring to the western areas. In Portugal, we estimate that only 1% of the fire occurrences in the Portuguese fire database between 2003 and 2020 were ignited by lightning, resulting in a lower relevance of lightning-fires to the fire regime in comparison with estimates in previous studies and fire reports. They occurred mainly between June and September, in the northern and central areas of the country where the mountain ranges are located. The use of remote sensing data along with the methodology adopted in this work results in a good precision when classifying the ignition cause from active fire and fire records. However, due to the spatial resolution of the satellite-derived product, it wasn't possible to assess the contribution of smaller fire events to the fire regime in Pantanal.

**Keywords:** Pantanal, Portugal, Lightning, Wildfire, Lightning fires

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Os quatro tipos de raios que transportam, efetivamente, cargas entre a nuvem e o solo: (a) descendente de polaridade negativa, (b) ascendente de polaridade negativa, (c) descendente de polaridade positiva e (d) ascendente de polaridade positiva. Adaptado de Rakov & Uman (2003). ..... 4
- Figura 2. Mapa de ambientes propensos a incêndios induzidos por raio, calculado como uma correlação temporal entre raios e flamabilidade média mensal. Vermelho indica que as estações de raios e flamabilidade estão em fase, e azul indica que as estações estão fora de fase. Adaptado de Coughlan et al. (2018). ..... 6
- Figura 3. Localização do bioma Pantanal (Em vermelho no painel lateral esquerdo). Informações sobre o uso e cobertura do solo em 2015 foram extraídas do MapBiomas Coleção 8 (SOUZA et al., 2020). ..... 11
- Figura 4. Ciclo diurno da frequência de raios no bioma Pantanal, categorizado por estação do ano. A hora aproximada de visita do sensor VIIRS é indicada pela barra vermelha. O eixo vertical em cada painel possui ordem de grandeza diferente. .... 16
- Figura 5. Proporção relativa de eventos de focos de calor candidatos a serem de origem natural, de acordo com cada combinação de  $D_{max}$  e  $T_{max}$ . As porcentagens são em relação ao total de focos de calor detectados em cada estação. .... 17
- Figura 6. Proporção relativa de eventos de focos de calor classificados como causados por raios, alternando os limiares do índice B (probabilidade de ser causado por raio) e mantendo  $D_{max}$  equivalente a 8 km e  $T_{max}$  equivalente a 72 horas. As porcentagens são em relação ao total de focos de calor detectados em cada estação. .... 18
- Figura 7. (a) Variabilidade interanual e (b) sazonalidade (média anual por mês) da incidência de raios, focos de calor e área queimada no Pantanal, entre 2012 e 2017. As barras no painel (b) denotam o desvio padrão. .... 20
- Figura 8. Sazonalidade da (a) densidade de raios (raios  $km^{-2} ano^{-1}$ ) e (b) densidade de focos de calor (focos  $km^{-2} ano^{-1}$ ) em uma grade regular de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ , e (c) recorrência da área queimada. As densidades de raios e focos de calor foram calculadas como uma média anual de cada estação do ano, considerando a área equivalente a cada célula de grade. .... 21
- Figura 9. Variabilidade sazonal da área queimada acumulada estimada (hectares) para cicatrizes classificadas como de origem natural e origem antropogênica, por categoria de tamanho da cicatriz. Porcentagens no topo de cada barra preta representam a porção de área queimada por incêndios naturais com relação a área total queimada, em sua respectiva categoria e estação. Os

limites e a ordem de grandeza da área queimada no eixo vertical são diferentes em cada painel. .....	24
Figura 10. Distribuição da área queimada por cicatrizes grandes entre 2012 e 2017, por estação do ano e causa (natural ou humana - antropogênica).....	25
Figura 11. Taxa de incêndios investigados por ano em Portugal, entre 2003 e 2020, conforme indicado na base de dados do ICNF.....	32
Figura 12. Ciclo anual do (a) número de ocorrências de incêndio em toda a base de dados do ICNF, (b) correspondente área queimada total e (c) incidência de raios NS em Portugal, entre 2003 e 2020. Linhas laranjas em cada boxplot representam a mediana, enquanto os limites superiores e inferiores denotam o percentil 95 e 5, respectivamente. ....	36
Figura 13. Variabilidade interanual do (a) número total de ocorrência de incêndios de toda a base de dados do ICNF, (b) correspondente área queimada total e (c) incidência de raios NS sobre o território de Portugal continental, entre 2003 e 2020. As linhas pontilhadas e as áreas sombreadas em vermelho indicam a média anual e o desvio padrão. ....	38
Figura 14. Distribuição espacial de (a) raios nuvem-solo e (b) ocorrências de incêndios, dados em total de observações $\text{km}^{-2}$ por ano sobre uma grade regular de $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ , em Portugal. Dados de elevação foram obtidos do <i>Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global</i> , fornecido pelo centro USGS EROS (USGS, 2017). ....	39
Figura 15. Resultados da análise de sensibilidade aplicando $D_{\max} = 10$ km em combinação com diferentes valores de $T_{\max}$ e índice B. Quadros (a) a (d) exibem o número de ocorrências de incêndio classificados como de origem natural do subconjunto ‘causa-desconhecida’, enquanto os quadros (e) a (h) exibem a correspondente área queimada total, para diferentes meses. ....	40
Figura 16. Resultados da verificação da performance da metodologia, aplicando $D_{\max} = 10$ km em combinação com diferentes valores de $T_{\max}$ e índice B a partir das ocorrências de incêndio no subconjunto ‘validação’. A taxa de verdadeiro positivo é exibida nos quadros (a) a (d), taxa de alarme falso nos quadros (e) a (h) e a precisão nos quadros (i) a (l), para diferentes meses. .....	41
Figura 17. Variabilidade interanual do (a) número de incêndios naturais de acordo com o conjunto ICNF-LIF e a união entre os conjuntos ICNF-LIF e ICNF-PCLIF, e (b) correspondente área queimada total. A linha pontilhada azul denota a tendência anual do número de ocorrências no conjunto ICNF-LIF (p-value = 0,012), enquanto a linha pontilhada vermelha denota a tendência para a união ICNF-LIF + ICNF-PCLIF (p-value = 0,343). Os testes de tendência foram conduzidos de acordo com o teste de Mann-Kendall. ....	42

Figura 18. Distribuição espacial de incêndios naturais em uma grade regular de 0,2° x 0,2°, dado em unidades de total de ocorrências por km <sup>2</sup> por ano, em Portugal entre 2003 e 2020. Os valores dos contornos vermelhos estão multiplicados por 10 <sup>4</sup> . A localização de incêndios naturais maiores do que 100 hectares em todo o período de estudo (de acordo com a união ICNF-PCLIF + ICNF-LIF) é destacada na figura.....	43
Figura 19. (a) Sazonalidade e (b) variabilidade interanual da área queimada por incêndios naturais (ICNF-PCLIF e ICNF-LIF) e número total de MODIS-LIAF (painéis inferiores)....	46
Figura 20. Comparação entre a distribuição espacial de (a) ocorrências de incêndio natural (ICNF-PCLIF e ICNF-LIF) maiores que 10 ha, e (b) MODIS-LIAF, para o mês de agosto. MODIS-LIAF não assimilados podem ser interpretados como falso positivos, portanto, a porcentagem dentro da barra inferior verde em (b) denota a precisão, enquanto a barra verde em (a) denota a taxa de verdadeiro positivo para a metodologia, ao utilizar dados do MODIS. .....	48
Figura 21. Idêntica à Figura 20, porém com relação ao mês de julho. ....	49
Figura 22. Idêntica à Figura 20, porém com relação ao mês de junho. ....	49
Figura 23. Idêntica à Figura 20, porém com relação ao mês de setembro. ....	50



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantidade de focos de calor candidatos a terem sido induzidos por raios e classificados como de origem natural ( $B \geq 0,8$ ). Indicada em parênteses é a proporção relativa, ou seja, o número de eventos relacionados a raios sobre a quantidade total observada em cada período.....	22
Tabela 2. Número estimado de cicatrizes causadas por raios e correspondente área queimada. Indicada em parênteses é a proporção relativa, ou seja, o número de eventos relacionados a raios sobre a quantidade total observada em cada período, de acordo com a sua categoria. ...	23
Tabela 3. Número de ocorrências de incêndios na base de dados do ICNF, em Portugal, categorizados por causa atribuída e área queimada (2003 – 2020). Em parênteses está indicada a fração representada por um dado tipo de incêndio em cada categoria de área queimada. ....	31
Tabela 4. Contribuição anual dos incêndios naturais (ICNF-LIF + ICNF-PCLIF) para o número total de ocorrências e área queimada, em comparação a toda a base de dados do ICNF. ....	45

## LISTA DE ACRÔNIMOS

NS	Nuvem-solo
LCC	Long Continuing Current
EUA	Estados Unidos da América
VLf	Very Low Frequency
STARNET	Sferics Timing and Ranging Network
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
SUOMI-NPP	Suomi National Polar-orbiting Partnership
GFA	Global Fire Atlas
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
ICNF-LIF	ICNF lightning-ignited fires
ICNF-PCLIF	ICNF post-classified lightning-ignited fires

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1	RAIOS E INCÊNDIOS FLORESTAIS .....	3
2.1.1	Definições .....	3
2.1.2	Cenário global .....	5
2.1.3	Condições preferenciais .....	7
3	PANTANAL .....	10
3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	10
3.2	ÁREA DE ESTUDO .....	10
3.3	DADOS .....	11
3.3.1	Dados de raios .....	11
3.3.2	Dados de incêndios .....	12
3.4	METODOLOGIA .....	14
3.4.1	Classificação da causa de eventos de fogo .....	14
3.4.2	Estimativa de área queimada .....	18
3.5	RESULTADOS .....	19
3.5.1	Climatologia de raios e regime de fogo .....	19
3.5.2	Fogos ativos causados por raios .....	21
3.5.3	Contribuição para a área queimada .....	22
3.6	DISCUSSÃO .....	26
4	PORTUGAL .....	28
4.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	28
4.2	ÁREA DE ESTUDO .....	29
4.3	DADOS .....	30
4.3.1	Dados de descargas atmosféricas .....	30
4.3.2	Dados de incêndios florestais .....	30
4.4	METODOLOGIA .....	33

4.4.1	Classificação da causa de eventos de fogo.....	33
4.4.2	Relacionando focos de calor com ocorrências naturais in-situ .....	34
4.5	RESULTADOS .....	35
4.5.1	Climatologia de raios e regime de fogo .....	35
4.5.2	Calibração dos limiares.....	39
4.5.3	Climatologia de incêndios naturais.....	41
4.5.4	Desempenho do produto de fogo ativo .....	46
4.6	DISCUSSÃO.....	50
5	CONCLUSÃO .....	53
6	PRODUÇÃO CIENTÍFICA .....	55
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56
	APÊNDICE A – PRIMEIRO ARTIGO PUBLICADO .....	68
	APÊNDICE B – SEGUNDO ARTIGO PUBLICADO .....	69

## 1 INTRODUÇÃO

Os incêndios na vegetação constituem uma parte importante do sistema global terrestre e seus ecossistemas, desempenhando um papel crucial na distribuição da vegetação e propriedades ecológicas nos maiores biomas do mundo (BOND; WOODWARD; MIDGLEY, 2005). Sua origem pode se dar por atividades antropogênicas, considerada a principal fonte de ignição em todo o mundo, ou por causas naturais, como erupção vulcânica e descargas atmosféricas nuvem-solo, sendo este último o meio mais comum de ignição natural (SCOTT et al., 2014). Além da ignição, a manutenção do fogo e seu eventual desenvolvimento em um incêndio florestal depende não só da natureza do material em combustão como também da sua disponibilidade e das condições meteorológicas em vigor (MORIS et al., 2023; PINEDA; RIGO, 2017).

Apesar de serem frequentemente interpretados como distúrbios destrutivos, o regime natural de fogo beneficia a sociedade através da regulação da população de pragas, da regulação de incêndios catastróficos, da manutenção da diversidade e variabilidade genética das plantas através de processos evolucionários e da regulação da disponibilidade de água. No entanto, também é verdade que os incêndios de origem antropogênica possam ser catastróficos (PAUSAS; KEELEY, 2019), sobretudo em um cenário de aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, como secas e ondas de calor (ARIAS et al., 2021). Porém, toda a extensão dos serviços desempenhados pelo regime de fogo dentro dos ecossistemas presentes no globo ainda precisa ser quantificada.

Em diversas regiões do mundo, as descargas atmosféricas constituem uma importante causa de ignição natural de fogos na vegetação, e esforços têm sido realizados com foco em avaliar as suas propriedades e contribuições para o regime de fogo, nomeadamente no sul da Austrália (NAMPAK et al., 2021), América do Norte (ABATZOGLOU et al., 2016), Alpes (MORIS et al., 2020) e mesmo onde tais fenômenos provocam apenas uma pequena parcela dos incêndios florestais, como a Península Ibérica, uma região com clima mediterrâneo (FERNANDES et al., 2021; PINEDA; MONTANYÀ; VAN DER VELDE, 2014). A identificação e caracterização de incêndios e suas causas possui importantes implicações para o aperfeiçoamento das políticas de prevenção de incêndios, para o gerenciamento do fogo e para a melhor compreensão do regime de fogo e de seus principais mecanismos (GANTEAUME et al., 2013), além de ser fundamental para estimativa do risco de incêndio,

emissões de carbono e avaliação de demais impactos relacionados ao fogo (RAMO et al., 2021; RODRIGUES et al., 2020).

Na América do Sul, a relação entre raios e incêndios na vegetação tem sido analisada principalmente na floresta Amazônica (GORA et al., 2020; GORA; YANOVIK, 2020). Particularmente no Brasil, Ramos-Neto & Pivello (2000) estudaram a variabilidade de incêndios naturais no Parque Nacional das Emas, no Cerrado, a partir de 40 ocorrências catalogadas e dados in-situ coletados em um período de cinco anos, enquanto dois outros trabalhos com ênfase na mesma região de estudo empregou também dados coletados por sensoriamento remoto para o mesmo fim (FRANCA et al., 2004; FRANÇA; RAMOS NETO; SETZER, 2007). De acordo com estes autores os incêndios causados por raios são pouco documentados em ecossistemas tropicais, incluindo o Brasil. Por outro lado, na Península Ibérica é bem conhecido que as atividades antropogênicas sejam a principal causa de ignição de incêndios (DIJKSTRA et al., 2022; GANTEAUME et al., 2013), no entanto, particularmente em Portugal, a expressiva quantidade de ocorrências de incêndios sem causa atribuída (ICNF, 2014) nos leva a questionar qual a verdadeira relevância dos raios como fonte de ignição. Isto reforça a necessidade de investigar e quantificar o fenômeno de incêndio natural e o seu impacto no regime de fogo e outras propriedades ecológicas dos ecossistemas presentes em ambos os países.

Este trabalho tem por objetivo identificar e estudar a variabilidade espacial e temporal de incêndios induzidos por descargas atmosféricas em duas regiões com características climáticas distintas. Assim, será feita uma análise focando i) no bioma Pantanal, assim contribuindo para o melhor entendimento dos incêndios naturais em território brasileiro; ii) e no território de Portugal continental, que dispõe de um longo histórico de incêndios catalogados, tornando possível a validação da metodologia empregada. Este trabalho foi organizado da seguinte maneira: a seção seguinte contém uma revisão bibliográfica acerca do fenômeno de incêndio induzido por raio e as condições preferencias para sua ocorrência. A seção 3 foi dedicada para apresentação e discussão dos resultados no bioma Pantanal, o qual deram origem ao estudo descrito em Menezes et al. (2022), enquanto a seção 4 é dedicada as análises no território de Portugal continental. Por fim, uma conclusão geral acerca dos resultados obtidos é descrita na seção 5.

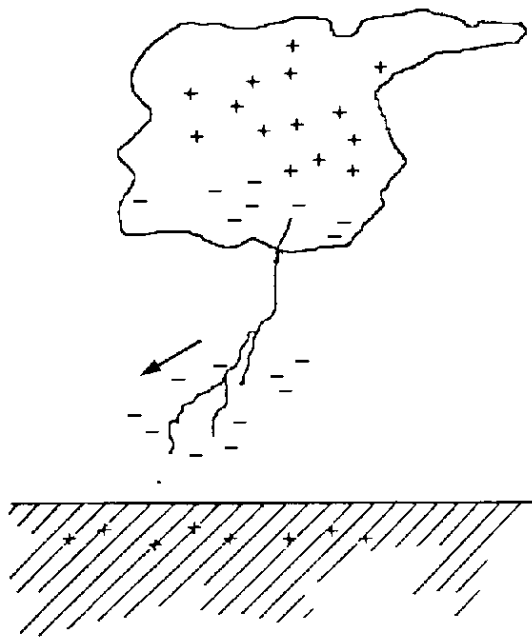
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RAIOS E INCÊNDIOS FLORESTAIS

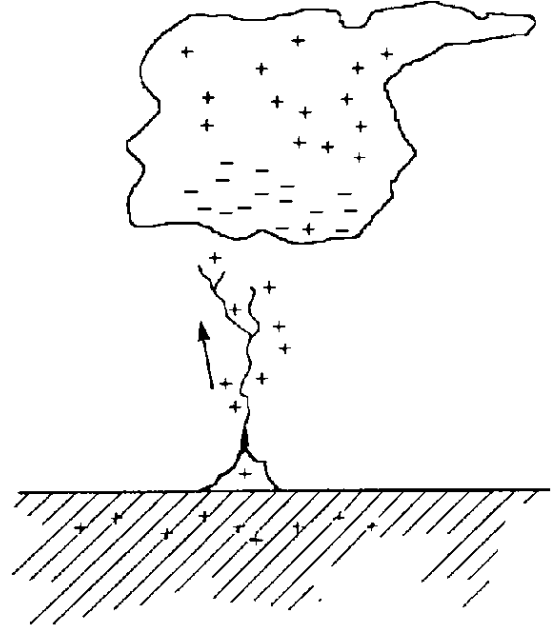
#### 2.1.1 Definições

Os raios são descargas elétricas causadas pela separação de centros de cargas positivas e negativas dentro da tempestade devido a colisão de partículas de gelo nas regiões de fase mista presentes na nuvem, como cristais de gelo, granizo e *graupel* (i.e., granizo mole, pouco denso e menor que 5 mm). Eles podem ser classificados de acordo com a sua polaridade, origem e destino, sendo os raios nuvem-solo (NS) aqueles que possuem um papel ativo na ignição de incêndios (LATHAM; WILLIAMS, 2001).

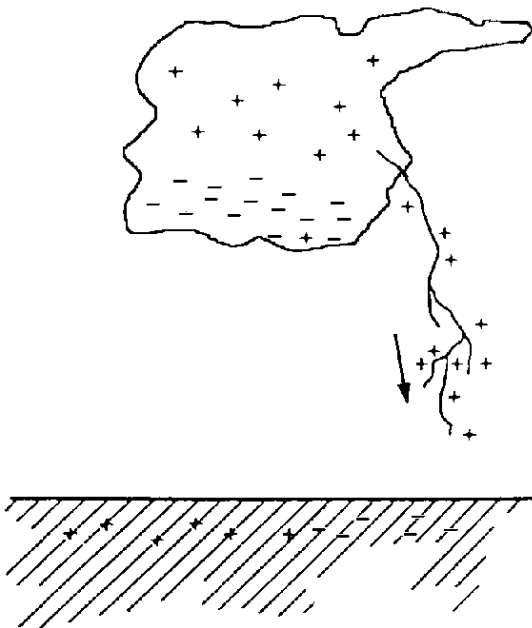
Entre os quatro tipos de raios NS, aqueles descendentes de polaridade negativa somam cerca de 90% ou até mais em todo o mundo, enquanto até 10% são descendentes de polaridade positiva (Figura 1). No caso do primeiro tipo, mais frequente, a primeira descarga, chamada de líder escalonado e originada da fonte de cargas negativas na nuvem, descende e promove o acúmulo de cargas positivas no solo por indução. Em seguida, uma descarga de retorno é originada a partir do solo e se choca com o líder escalonado, fechando um canal condutor por onde o transporte de cargas negativas ocorrerá. Descargas subsequentes podem acontecer no mesmo canal condutor ou em canais adjacentes ramificados próximo ao solo, descritas por sua duração, intensidade (pico da corrente de retorno) e polaridade, e podem apresentar ainda uma corrente contínua (*continuing current*), interpretada como um arco quase estacionário que persiste no canal condutor por um período variando de milissegundos até centenas de milissegundos, transferindo uma quantidade significativa de carga elétrica. Assim, um raio NS consistirá em uma única ou uma série de descargas de retorno (KITAGAWA; BROOK; WORKMAN, 1962; RAKOV; UMAN, 2003).



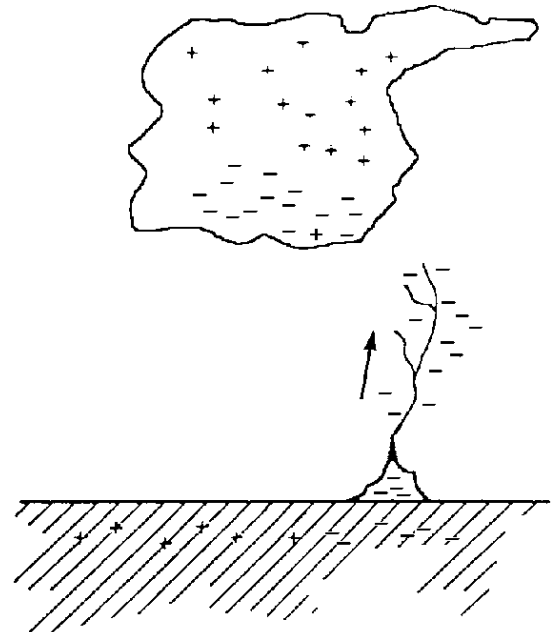
(a) Downward negative lightning



(b) Upward negative lightning



(c) Downward positive lightning



(d) Upward positive lightning

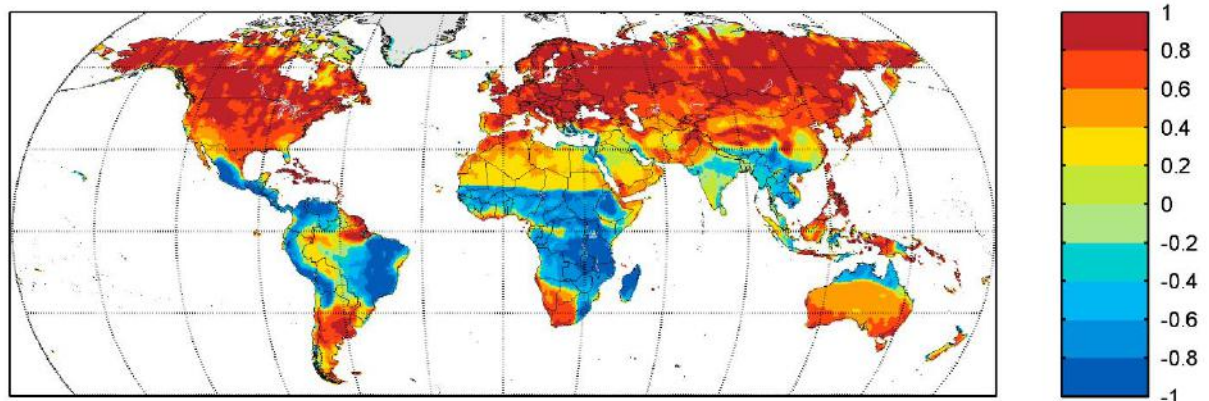
**Figura 1.** Os quatro tipos de raios que transportam, efetivamente, cargas entre a nuvem e o solo: (a) descendente de polaridade negativa, (b) ascendente de polaridade negativa, (c) descendente de polaridade positiva e (d) ascendente de polaridade positiva. Adaptado de Rakov & Uman (2003).



De acordo com Anderson (2002), o processo físico envolvendo uma ocorrência de incêndio induzido por raio pode ser dividido em três estágios distintos: a ignição, sobrevivência e a chegada do incêndio. A ignição é causada por um raio NS, tipicamente apresentando uma corrente contínua longa (Long-Continuing Current, LCC), isto é, uma corrente contínua com duração superior a 40 ms que possui maior probabilidade de provocar fogo em vegetação (PÉREZ-INVERNÓN et al., 2021; PÉREZ-INVERNÓN; HUNTRIESER; MORIS, 2022). Por sua vez, a fase de sobrevivência, que se refere a combustão latente, não ocorre em todos os casos de incêndios naturais pois depende de condições ambientais como estresse hídrico e disponibilidade de matéria orgânica para combustão, desta forma a ignição pode se espalhar imediatamente ou perdurar de dias a semanas até que condições favoráveis a propagação e intensificação do fogo sejam encontradas. A fase de sobrevivência também pode ser denominada como fase remanescente (holdover phase), no entanto, como frequentemente não se tem conhecimento do período que o incêndio permanece neste estado latente, o tempo entre a ignição e a sua detecção é considerado, o qual muitos autores se referem como tempo de espera (holdover time) (DOWDY; MILLS, 2012a; MORIS et al., 2023; SCOTT et al., 2014).

### **2.1.2 Cenário global**

De acordo com Coughlan et al. (2018), sugere-se que nos extratropicais e em ecossistemas situados em latitudes mais elevadas, os meses em que a vegetação se encontra mais inflamável também são aqueles com maior frequência de raios (Figura 2). Esta análise, produzida pela correlação entre a flamabilidade média mensal e a frequência de raios global, fornece uma visão geral dos ambientes mais propensos à ignição por raio, independente se o fogo ocorreu de fato ou não, no entanto, diversos estudos realizados a nível regional e com maior detalhamento temporal, buscaram também investigar e quantificar a relevância dos raios como fonte de ignição em comparação às atividades antropogênicas.



**Figura 2.** Mapa de ambientes propensos a incêndios induzidos por raio, calculado como uma correlação temporal entre raios e flamabilidade média mensal. Vermelho indica que as estações de raios e flamabilidade estão em fase, e azul indica que as estações estão fora de fase. Adaptado de Coughlan et al. (2018).

Nas florestas boreais da América do Norte, ignições por raio ocorrem principalmente entre junho e julho, contabilizando pela maior parte da área queimada total e prevalecendo sobre florestas densas (VERAVERBEKE et al., 2017). No Canadá, principalmente a oeste, o número de incêndios e área queimada total têm aumentado significativamente ao longo dos anos principalmente devido ao aumento na frequência de ignições por raio, enquanto incêndios de origem antropogênica têm estado em declínio (COOGAN et al., 2020; HANES et al., 2019). Considerando todo o território dos Estados Unidos da América (EUA), a atividade antropogênica é a principal causa de incêndios, no entanto nas ecorregiões situadas a oeste os incêndios naturais são responsáveis por aproximadamente dois terços da área queimada, sendo a fonte predominante de incêndios na maioria das áreas montanhosas. No entanto, o regime de fogos antropogênicos possui maior duração em comparação ao regime natural em todo território americano, ocorrendo em áreas com significativamente mais umidade na vegetação e maior velocidade do vento (ABATZOGLOU et al., 2016; CATTAN et al., 2020; NAGY et al., 2018).

Na Europa, incêndios florestais afetam principalmente as regiões mediterrâneas e são em sua maioria causados por fatores humanos, seja por acidente ou ação deliberada (GANTEAUME et al., 2013). Já os incêndios de origem natural são mais relevantes em regiões montanhosas da Península Ibérica, ao Norte da Europa e nos Alpes, concentrados entre junho e agosto, mas correspondem a apenas uma pequena porção da área queimada total (DIJKSTRA et al., 2022). Condições de baixa umidade na vegetação devido a períodos de seca durante o verão boreal podem agravar os potenciais danos de um incêndio natural e aumentar a eficiência

de ignição do raio (CONEDERA et al., 2006; FERNANDES et al., 2021; MÜLLER et al., 2013; VAZQUEZ; MORENO, 1998).

No Sul da Austrália, incêndios induzidos por raios foram responsáveis por aproximadamente 90% da área total queimada entre 2000 e 2009, mas ao desconsiderar os incêndios dos Alpes Vitorianos entre janeiro e março de 2003 a sua relevância é reduzida a 55% da área total queimada. Eles ocorrem em menor número se comparado a incêndios de origem humana e estão concentrados entre novembro e fevereiro, período onde há maior frequência de tempestades e maior inflamabilidade da vegetação (DOWDY; MILLS, 2012a; NAMPAK et al., 2021).

Na América Central, Yanoviak et al. (2020) verificou que as descargas atmosféricas nuvem-solo (NS) têm um papel crucial na mortalidade de árvores da floresta tropical do Panamá, desta forma, qualquer mudança na frequência de raios devido as mudanças climáticas poderá modificar a taxa de mortalidade de árvores nesta floresta. No entanto, todos os impactos provenientes deste fenômeno em florestas tropicais, como a floresta amazônica, ainda precisam ser quantificados (GORA et al., 2020; GORA; YANOVIK, 2020).

No Brasil há uma carência de informações sobre os impactos das descargas atmosféricas NS nas propriedades ecológicas dos ecossistemas, e o fenômeno de incêndio induzido por raio também é muito pouco documentado. Estudos de caso no Parque Nacional das Emas, localizado no Cerrado, revelam que atualmente a principal causa de incêndio no parque é natural, uma consequência das políticas de prevenção adotadas após o grande incêndio em 1994, que reduziram o número de queimadas de origem antrópica (FRANÇA; RAMOS NETO; SETZER, 2007; RAMOS-NETO; PIVELLO, 2000). Recentemente, foi sugerido que incêndios naturais em parte do território nacional tendem a ocorrer sobre condições de pouca precipitação (trovoadas secas), umidade relativa moderada, alta temperatura e baixa velocidade do vento (SCHUMACHER et al., 2022).

### **2.1.3 Condições preferenciais**

Hipóteses têm sido desenvolvidas a respeito das características dos raios que possam influenciar a ignição de incêndios naturais. Larjavaara et al. (2005) introduziu o índice de proximidade (1), que combina a distância entre cada incêndio e cada descarga atmosférica ( $D$ ) com o atraso entre estes fenômenos ( $T$ ) para selecionar os raios NS mais prováveis a terem causado uma ignição, considerando uma janela temporal ( $T_{max}$ ), também chamada de tempo

de espera máximo (maximum holdover time), e uma distância máxima ( $D_{max}$ ). Neste trabalho se concluiu que, na Finlândia, a polaridade de uma descarga atmosférica não influencia a sua probabilidade de ignição.

$$A = \left( \frac{T}{T_{max}} \right) * \left( \frac{D}{D_{max}} \right) \quad (1)$$

Alguns estudos subsequentes basearam-se nesta mesma abordagem para identificar e caracterizar tais descargas atmosféricas em outras regiões do globo. Na Catalunha, a amostra selecionada não apresentou qualquer característica que as diferencie da população geral de raios, seja a respeito da polaridade, multiplicidade (i.e., número de descargas) ou pico da corrente (PINEDA; MONTANYÀ; VAN DER VELDE, 2014). Nos Estados Unidos da América, 90% dos raios mais próximos aos incêndios naturais catalogados apresentaram uma polaridade negativa, o que não é diferente da climatologia global de raios, no entanto, 86% e 46% dos raios com polaridade positiva e negativa, respectivamente, possuíam multiplicidade equivalente a um (SCHULTZ et al., 2019). Em contrapartida, na região alpina da Suíça e na bacia do mediterrâneo, incluindo Portugal, Espanha, Grécia e França, descargas com polaridade positiva são ligeiramente mais propensas a provocar uma ignição (MORIS et al., 2020; PÉREZ-INVERNÓN et al., 2021).

Raios que apresentam uma LCC são considerados um dos principais precursores de incêndios naturais devido a significativa transferência de carga elétrica entre a nuvem e o solo, porém o sinal óptico emitido durante a sua fase LCC não pode ser capturado por redes de detecção de raios convencionais que são desenvolvidas para serem sensíveis a ondas na frequência do rádio (VLF) (PÉREZ-INVERNÓN et al., 2021). Condições meteorológicas que favorecem a ocorrência de LCC não necessariamente são as mesmas que favorecem a ignição por raio, porém, daquelas compartilhadas entre incêndios naturais e LCC, verificou-se uma altura da base da nuvem relativamente alta e uma fraca corrente ascendente entre os níveis de 300 hPa a 450 hPa em tempestades que produziram tais incêndios, temperatura alta em baixos níveis e baixo valor de precipitação acumulada em uma hora, para a bacia do mediterrâneo, Arizona, Novo México e Flórida (PÉREZ-INVERNÓN et al., 2021; PÉREZ-INVERNÓN; HUNTRIESER; MORIS, 2022). Esta última condição está associada ao fenômeno de trovoadas secas (i.e., raios associados a pouca ou nenhuma precipitação), considerado outro precursor de

ignições naturais em todo o globo (DOWDY; MILLS, 2012b; PINEDA; RIGO, 2017; SCHUMACHER et al., 2022).

Estes fatores, em conjunto com a umidade do solo, precipitação e características da vegetação, têm sido levados em consideração no desenvolvimento de modelos probabilísticos para a ocorrência natural de incêndios (ANDERSON, 2002; CLARKE et al., 2019; DÍAZ-AVALOS et al., 2001; NIETO et al., 2012). Além disso, a topografia também desempenha um papel importante devido a formação de tempestades em resposta ao efeito orográfico, no entanto, grandes quantidades de precipitação causados pela chuva convectiva e as menores temperaturas encontradas em regiões com maior elevação podem levar ao aumento do conteúdo de umidade na matéria orgânica, assim ocasionando menor eficiência dos raios em causar uma ignição (RIVAS SORIANO; DE PABLO, 2003; SORIANO; DE PABLO; DÍEZ, 2001).

Existem ainda situações em que um incêndio já existente, independente da sua causa, cria condições meteorológicas favoráveis ao desenvolvimento de uma nuvem pyrocumulunimbus (Pyro-Cb) pelo intenso calor produzido e liberação de aerossóis devido a queima da vegetação que podem servir como núcleos de condensação. Por sua vez, a Pyro-Cb contribui para a intensificação e espalhamento do evento de fogo existente a partir dos fortes movimentos descendentes, enquanto novas frentes de incêndio natural podem ser desencadeadas a partir das descargas atmosféricas produzidas, frequentemente se apresentando com polaridade positiva (DOWDY; FROMM; MCCARTHY, 2017; DOWDY; PEPLER, 2018; LANG et al., 2014; ROSENFELD et al., 2007).

### **3 PANTANAL**

#### **3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO**

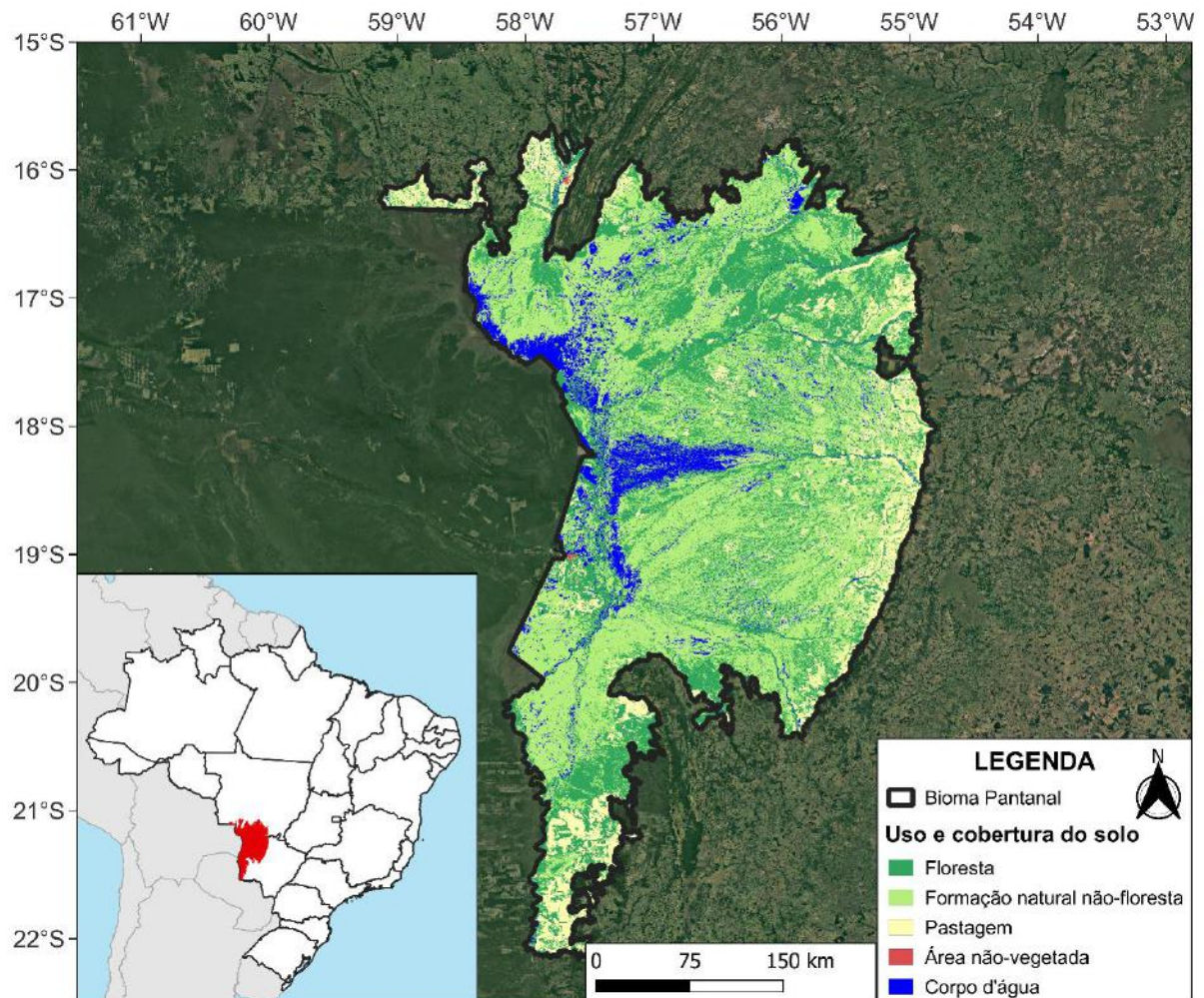
As crescentes mudanças no uso e cobertura do solo, o enfraquecimento das regulamentações ambientais e as condições climáticas agravadas são exemplos de fatores que podem causar um aumento na frequência de eventos de incêndios em larga escala, como aqueles observados em 2020 no Pantanal (LIBONATI et al., 2020; THIELEN et al., 2021). Nesse ano, os eventos de incêndios aumentaram 376% em comparação com a média anual das últimas duas décadas (GARCIA et al., 2021) e mais de 17 milhões de animais vertebrados foram mortos (TOMAS et al., 2021). Desta forma, compreender os mecanismos complexos de feedback envolvendo o fogo, clima, vegetação e atividade antropogênica é crucial, mas isso só pode ser atingido quando há um conhecimento abrangente sobre os padrões destes mecanismos no Pantanal.

Considerando a quase completa ausência de estudos relacionando ocorrências de incêndios e descargas atmosféricas no Brasil, o objetivo desta seção é contribuir para o melhor entendimento sobre os principais mecanismos do fogo na região do Pantanal. Para este fim, foram utilizados conjuntos de dados sobre incêndios e raios, derivados de técnicas de sensoriamento remoto e compreendendo o período entre 2012 e 2017, para o bioma Pantanal. Primeiro, foi investigada a variabilidade temporal e espacial de raios NS e focos de calor no período de 6 anos. Então, foi feita uma associação entre ambos os eventos, considerando suas proximidades temporal e espacial, a fim de estimar a probabilidade de um evento de fogo ter sido causado um evento de raio NS. Finalmente, para aqueles eventos de fogo que foram classificados como causados por raio foi estimada a área queimada associada e avaliados os seus impactos no bioma.

#### **3.2 ÁREA DE ESTUDO**

O Pantanal é uma das maiores terras úmidas contínuas do planeta, localizado na região Centro-Oeste do Brasil. Mais de 474 000 habitantes vivem nas municipalidades que constituem o Pantanal (IBGE, 2022), e a sua principal economia é baseada na produção de gado, turismo, pesca e mineração. A região possui uma biodiversidade rica (TOMAS et al., 2019), sendo uma rota migratória chave de espécies de aves terrestres e, especialmente, aquáticas, metade delas não residentes (NUNES; TOMAS, 2008). Durante o período úmido (novembro a março) há um pulso de inundação lento que viaja do norte para o sul (JUNK; NUNES DA CUNHA, 2012). Processos de retenção de água modulam o movimento da água, portanto inundações nas regiões

sul e central podem ocorrer vários meses depois do pico de precipitação (IVORY et al., 2019; JUNK; BAYLEY; SPARKS, 1989). De acordo com Pivello et al. (2021), a maior parte do bioma é considerado um ecossistema dependendo do fogo, o que significa que o sistema é o resultado de um longo histórico onde o fogo teve um papel fundamental na seleção de espécies e influenciou processos ecológicos.



**Figura 3.** Localização do bioma Pantanal (Em vermelho no painel lateral esquerdo). Informações sobre o uso e cobertura do solo em 2015 foram extraídas do MapBiomias Coleção 8 (SOUZA et al., 2020).

### 3.3 DADOS

#### 3.3.1 Dados de raios

O conjunto de dados de raios NS foi fornecido pela *Sferics Timing and Ranging Network* (STARNET) (MORALES; NEVES; ANSELMO, 2011), que, na época deste trabalho, havia disponibilidade de dados apenas para o período entre 2012 e 2017. Os dados da STARNET

contêm informações sobre a localização geográfica, data e hora de ocorrência e polaridade dos raios detectados. Sua eficiência de detecção é de aproximadamente 70% para o fenômeno de raio, consistido de uma descarga de retorno e das descargas subsequentes, e 35% para descargas atmosféricas individuais (MORALES, 2019; MORALES et al., 2014). A acurácia espacial do raio, ou erro de localização, varia de 2 a 5 km na América do Sul dependendo do número de sensores envolvidos na detecção do fenômeno (MORALES; NEVES; ANSELMO, 2011).

As antenas receptoras que compõem a rede STARNET são sensíveis a ruídos de rádio no intervalo de frequência entre 7 kHz e 15 kHz (VLF) emitidos por descargas atmosféricas, denominados sferics. Para computar a posição de um único raio, a STARNET exige que o fenômeno tenha sido detectado por no mínimo 4 e no máximo 7 antenas receptoras, em seguida é calculada a diferença de tempo de chegada do sinal para cada par de receptores (LEE, 1986; MORALES; NEVES; ANSELMO, 2011). O erro de localização é estimado pelo maior eixo da elipse de confiança que descreve a distribuição do conjunto de pontos da provável localização do raio. As observações da STARNET são classificadas em três níveis de acurácia de localização: ruim, questionável ou boa, de acordo com o erro residual da técnica utilizada.

Entre 2012 e 2017, a STARNET detectou um total de 12 190 378 raios no bioma Pantanal, destes, foram utilizadas somente as observações indicadas com boa acurácia para as análises associando eventos de fogo e raios, que correspondem a cerca de 50% do total, enquanto a climatologia de raios no bioma foi construída a partir de todas as observações disponibilizadas, independente da sua acurácia de localização. Raios com polaridade positiva ou negativa foram avaliados conjuntamente.

### **3.3.2 Dados de incêndios**

Devido a quase ausência de ocorrências confirmadas de incêndio natural em território nacional, foram utilizados principalmente produtos derivados de técnicas de sensoriamento remoto para investigar tais eventos.

#### **3.3.2.1 Fogo ativo**

O primeiro produto consiste em informações diárias de focos de calor, ou fogo ativo, obtidos do sensor *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) a bordo do satélite *Suomi National Polar-orbiting Partnership* (SUOMI-NPP), com resolução espacial de 375 metros (VNP14IMG), para o período entre 2012 e 2017 (FIRMS, 2023). Um fogo ativo é um ‘pixel instantâneo’ de um evento de incêndio, representando a localização da frente do fogo na hora



da observação pelo satélite. Mesmo que a taxa de alarme falso sobre a área de estudo seja desprezível (cerca de 0,12%, de acordo com Schroeder et al. (2014)), a fim de minimizar a quantidade de alarmes falsos, apenas pixels com nível de confiança nominal ou alta, e presumidos como fogo em vegetação, foram considerados.

Produtos de fogo ativo obtidos por satélites de órbita polar, como aqueles do VIIRS, possuem resolução espacial adequada para detectar incêndios em comparação a satélites geoestacionários. No entanto, em alguns casos, eles são incapazes de representar corretamente o ciclo diário da vegetação em combustão devido a sua baixa resolução temporal (uma ou duas imagens por dia) (AMRAOUI; DACAMARA; PEREIRA, 2010). Por outro lado, mesmo que satélites em órbita geoestacionária consigam capturar este ciclo diurno devido a sua alta resolução temporal (uma imagem a cada 10 ou 15 minutos), a detecção de incêndios por eles, especialmente daqueles de menor dimensão espacial, é dificultada devido a sua menor resolução espacial, que, em geral, é maior do que 3 ou 5 km (HALL et al., 2019). O sensor VIIRS observa a área de estudo duas vezes por dia, às 02:30 (órbita descendente) e 14:30 (órbita ascendente) do horário local, aproximadamente, correspondendo ao pico da atividade de fogo na região (GIGLIO et al., 2009). Portanto, as observações de fogo ativo do VIIRS podem ser consideradas representativas do padrão do fogo neste ecossistema.

### 3.3.2.2 Área Queimada

O segundo produto utilizado consiste em cicatrizes individuais de fogo derivadas do *Global Fire Atlas* (GFA) (ANDELA et al., 2019). O GFA permite distinguir eventos de fogo individuais baseados no MCD64A1, um produto de área queimada mensal obtido do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo dos satélites ‘Terra’ e ‘Aqua’, com resolução espacial de 500 metros (GIGLIO et al., 2018). Esta base de dados fornece informação da extensão de área queimada (em hectares – ha) e outras características do evento de incêndio relacionadas ao seu perímetro, como direção de propagação, data de início, ponto estimado de ignição, e data de extinção.

A sobreposição temporal e espacial entre incêndios e raios é crítica para este trabalho. Desta forma, para explorar eventos a nível da ignição do fogo são necessárias uma identificação e datação acuradas de cada evento de fogo. Embora o conjunto de dados do GFA contenha uma panóplia de informação, ele é baseado no produto de área queimada do MCD64, que por sua vez possui limitações a respeito da datação de eventos individuais de incêndio. De acordo com Pinto et al. (2020), o MCD64 possui um viés em relação a data da queima, com um erro médio

positivo de 1,20 dias no Brasil. Além disso, o GFA apenas fornece a data estimada de ignição sem a informação sobre a hora (ANDELA et al., 2019), dificultando a sua associação temporal aos raios. Finalmente, o MCD64 e o GFA não são capazes de identificar incêndios de menor dimensão espacial no Brasil, tipicamente menores que 21 hectares (ANDELA et al., 2019; RODRIGUES et al., 2019). Desta forma, optamos por usar a informação sobre a área queimada do GFA após a identificação de eventos individuais de fogo ativo derivados do VIIRS, ao invés de utilizar diretamente o ponto estimado de ignição do GFA.

### 3.4 METODOLOGIA

#### 3.4.1 Classificação da causa de eventos de fogo

A associação entre eventos de fogo ativo e raios foi analisada de 2012 a 2017 considerando a proximidade espacial (localização geográfica) e temporal entre estes eventos, a partir da abordagem proposta por (LARJAVAARA; PENNANEN; TUOMI, 2005). Este método considera dois passos: i) calcular o índice de proximidade (A) entre um fogo ativo e cada raio observado em sua vizinhança dentro de uma janela temporal e distância máxima, designados como  $T_{max}$ , e  $D_{max}$ , respectivamente e ii) utilizar estes resultados para estimar a probabilidade de o fogo ativo em questão ter sido causado por um raio (B).

$$B = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - A_i) \quad (2)$$

Onde:

$N$  = Quantidade de raios na vizinhança do evento de fogo

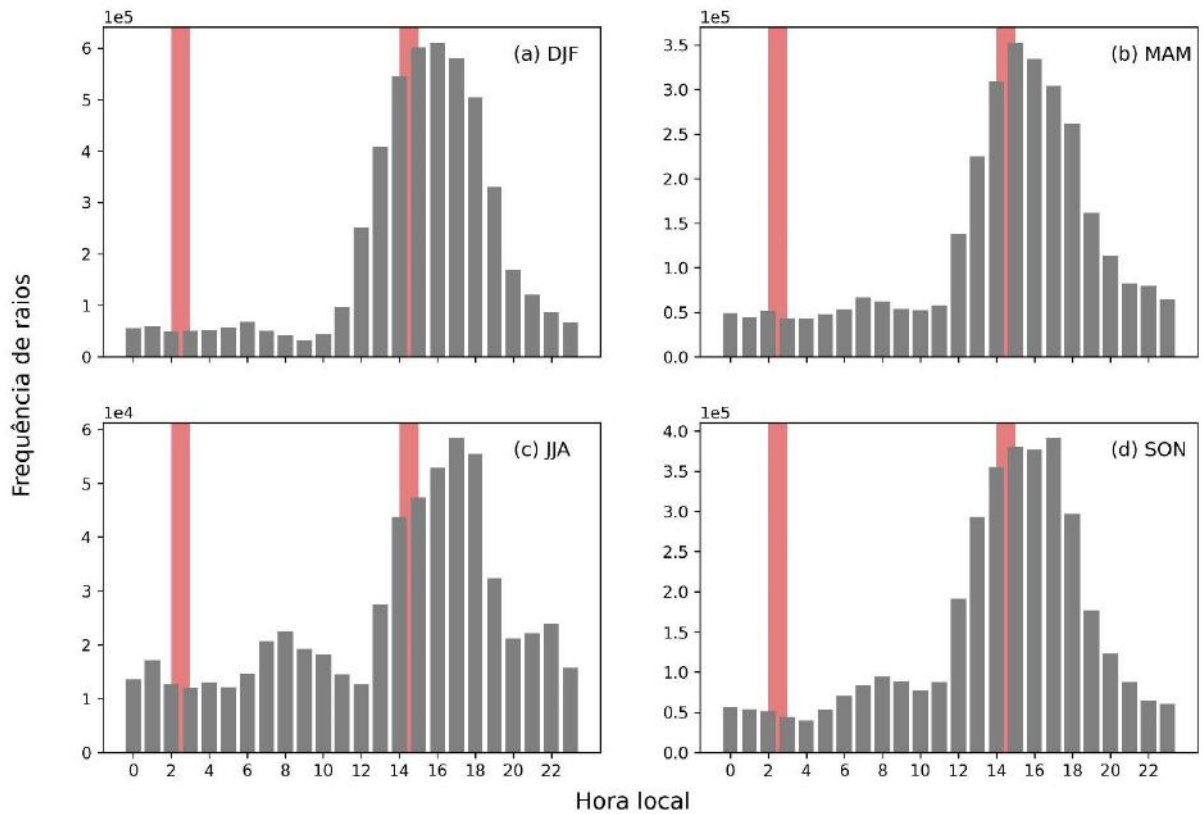
$A$  = índice de proximidade entre o evento de fogo e o raio  $i$  (Eq. 1)

Para um dado evento de fogo, foi descartado como uma fonte de ignição em potencial (i.e, o índice de proximidade é definido como zero) todo raio que possui uma diferença de tempo (*holdover time*) ou distância maior do que  $T_{max}$  e  $D_{max}$ , respectivamente. Portanto, tanto  $A_i$  quanto  $B$  podem assumir valores apenas entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1 o valor de  $B$ , maior é a probabilidade de o evento de fogo em questão ter sido causado por um raio.

Nesta abordagem, é essencial determinar a combinação mais adequada de  $T_{max}$  e  $D_{max}$  para selecionar os eventos de fogo candidatos a serem naturais. Para o Pantanal, esta escolha foi baseada em uma análise de sensibilidade realizada considerando a incerteza espacial dos dados de raios (STARNET), e o tempo entre a detecção do fogo pelo sensor a bordo do satélite

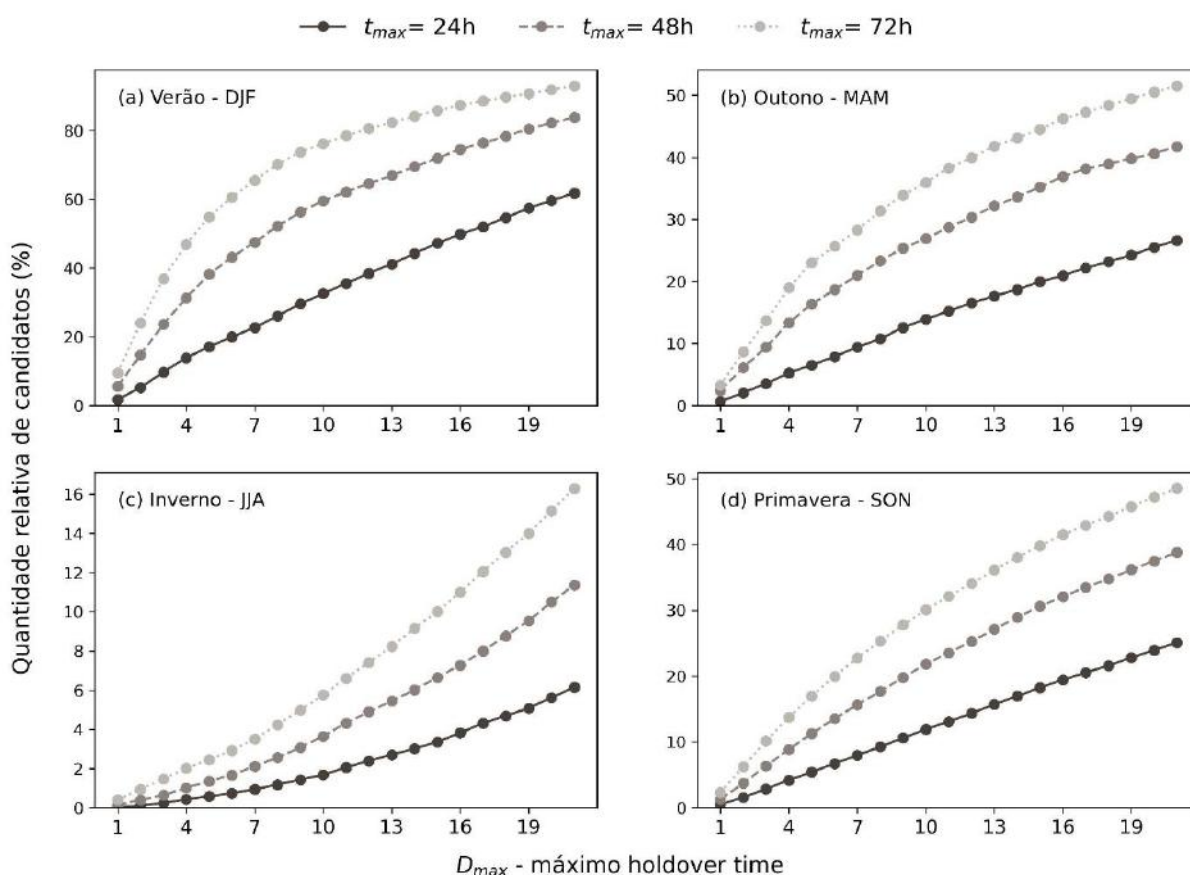
e a detecção do raio. A incerteza efetiva das detecções de fogo ativo do VIIRS varia de 375 metros em um ponto abaixo do satélite até 795 metros em um ângulo de visada máximo de 56,28° (SCHROEDER et al., 2014). Porém fenômenos de rápido movimento podem produzir deslocamentos entre a frente de fogo e a detecção por satélite, introduzindo mais incertezas. Taxas altas de espalhamento do fogo são comuns em pastagens de savana, e o deslocamento máximo varia entre 7 e 21 km durante um intervalo de 12 horas do ciclo de visita do VIIRS (OLIVA; SCHROEDER, 2015). Considerando ambas as incertezas espaciais do STARNET e VIIRS na análise de ocorrência conjunta espacial entre fogo ativo e raios, foi primeiro realizado uma análise de sensibilidade alternando valores de  $D_{\max}$  entre 1 e 21 km, em intervalos iguais de 1 km.

Por sua vez, para definir um  $T_{\max}$  adequado é necessária uma boa compreensão acerca da resolução temporal do produto de fogo ativo e suas principais fontes de erros de omissão no bioma. A Figura 4 indica que o pico da frequência diurna de raios no Pantanal, no final da tarde e começo da noite, ocorre próximo a hora de visita do sensor VIIRS pelo bioma, assim minimizando possíveis omissões entre as observações de raios e fogo ativo. No entanto, há outras disparidades a respeito do tempo entre a descarga atmosférica e a detecção do fogo ativo, por exemplo, eventos de incêndio com vida curta podem ser extintos entre duas passagens consecutivas do satélite e, por consequência, o tempo da passagem do satélite não será o tempo exato da ignição. Neste caso, o ciclo de visita do sensor pode não ser suficiente para capturar o incêndio. No Brasil, este tipo de erro na detecção de fogo ativo pelo VIIRS é desprezível, somando 1.5% do número total de ocorrências de incêndio (SCHROEDER et al., 2014). Além disso, este tipo de erro de omissão diminui com o tamanho do incêndio, consequentemente incêndios de longa duração possuem maior probabilidade de serem detectados. Isto é particularmente relevante para ecossistemas propensos ao fogo, como em grande parte do Pantanal, visto que cicatrizes grandes são responsáveis pela maior parte da área afetada pelo fogo (SILVA et al., 2021). Nuvens persistentes configuram uma outra fonte de omissão na detecção do fogo ativo, por exemplo, estima-se que o obscurecimento por nuvens ocorre em 30% dos dias durante o inverno, e em até 80% dos dias no verão sobre o Pantanal (PRUDENTE et al., 2020). Portanto, para considerar estas incertezas na detecção do fogo ativo, a análise de sensibilidade considera também três passos de tempo para o máximo *holdover time* ( $T_{\max}$ ), são eles: 24, 48 e 72 horas.



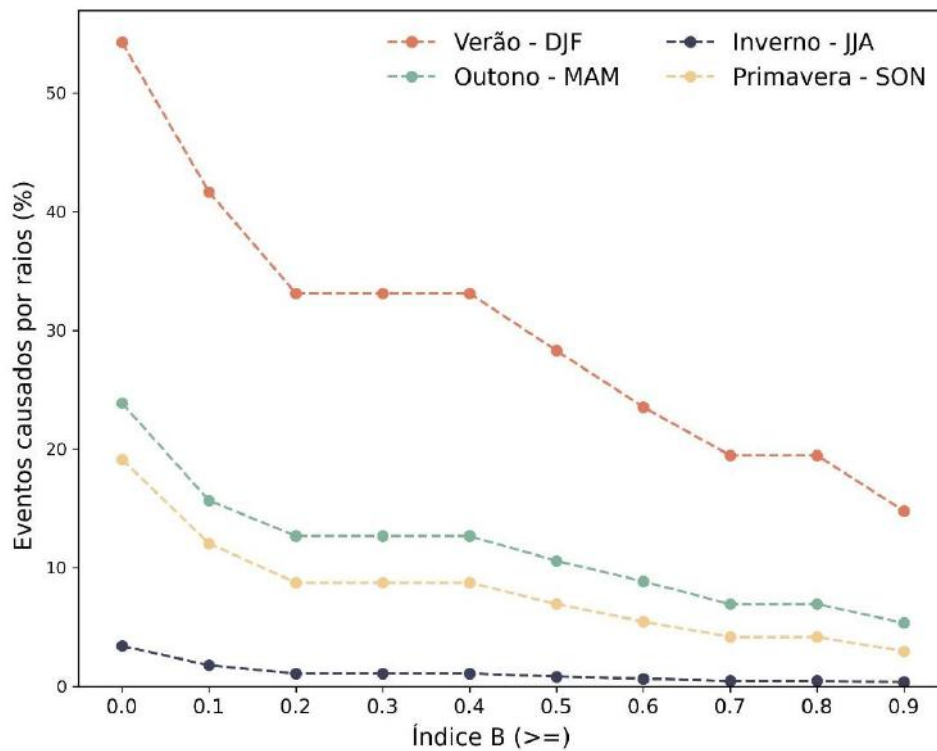
**Figura 4.** Ciclo diurno da frequência de raios no bioma Pantanal, categorizado por estação do ano. A hora aproximada de visita do sensor VIIRS é indicada pela barra vermelha. O eixo vertical em cada painel possui ordem de grandeza diferente.

De forma resumida, a análise de sensibilidade foi conduzida para combinações de  $D_{\max}$  variando de 1 a 21 km, e  $T_{\max}$  variando de 24 a 72 horas. A Figura 5 denota a porcentagem de pixels de focos de calor com pelo menos um raio em sua vizinhança, chamados de candidatos a serem originados por ignição natural ( $B > 0$ ), em relação ao número total de focos de calor em cada estação, para diferentes combinações de  $D_{\max}$  e  $T_{\max}$ . Os resultados desta análise revelam que nas estações do ano onde o número de candidatos supera 20% do total de focos de calor detectados, há uma maior sensibilidade a mudanças dos valores de  $D_{\max}$  até 8 km, ou seja, o coeficiente angular da reta perpendicular às curvas de  $T_{\max}$  constante reduz significativamente com  $D_{\max}$  igual a 8 km ou superior, especialmente no verão, uma estação com mínima ocorrência de incêndios. Portanto, foi escolhida uma combinação conservativa de  $D_{\max}$  equivalente a 8 km e  $T_{\max}$  equivalente a 72 horas para computar os índices de proximidade entre cada raio e um evento de fogo.



**Figura 5.** Proporção relativa de eventos de focos de calor candidatos a serem de origem natural, de acordo com cada combinação de  $D_{max}$  e  $T_{max}$ . As porcentagens são em relação ao total de focos de calor detectados em cada estação.

A base de dados de incêndios utilizada pertence a produtos derivados de satélite que não fornecem a causa da ignição, além disso, ocorrências catalogadas em campo não estão disponíveis na região. Para contornar este problema e descartar a maior quantidade de alarmes falsos quanto possível (i.e., eventos de fogo antropogênico que foram indicados como naturais pela metodologia), os focos de calor que apresentam índice B igual ou superior a 0.8 foram classificados como de origem natural. Esta decisão foi baseada na análise da Figura 6, construída variando-se o limiar para o índice B entre 0 e 0,9. A escolha de um limiar para o índice B entre 0.6 e 0.9 não impacta significativamente o número de focos de calor selecionados, em particular durante o inverno (DJF) e primavera (SON), estações com maior quantidade de ocorrências de incêndio. Apesar desta abordagem possivelmente excluir alguns incêndios verdadeiramente induzidos por raios das análises, ela minimiza a influência de alarmes falsos no resultado final (MORIS et al., 2020).



**Figura 6.** Proporção relativa de eventos de focos de calor classificados como causados por raios, alternando os limiares do índice B (probabilidade de ser causado por raio) e mantendo  $D_{\max}$  equivalente a 8 km e  $T_{\max}$  equivalente a 72 horas. As porcentagens são em relação ao total de focos de calor detectados em cada estação.

### 3.4.2 Estimativa de área queimada

Para aqueles focos de calor indicados como de origem natural, a extensão da área afetada foi analisada a partir do GFA. Cada cicatriz individual de incêndios disponibilizada pelo GFA é também classificada como de origem natural se pelo menos um destes focos de calor foi detectado dentro de seu perímetro e duração (cada cicatriz possui uma data estimada de início e extinção).

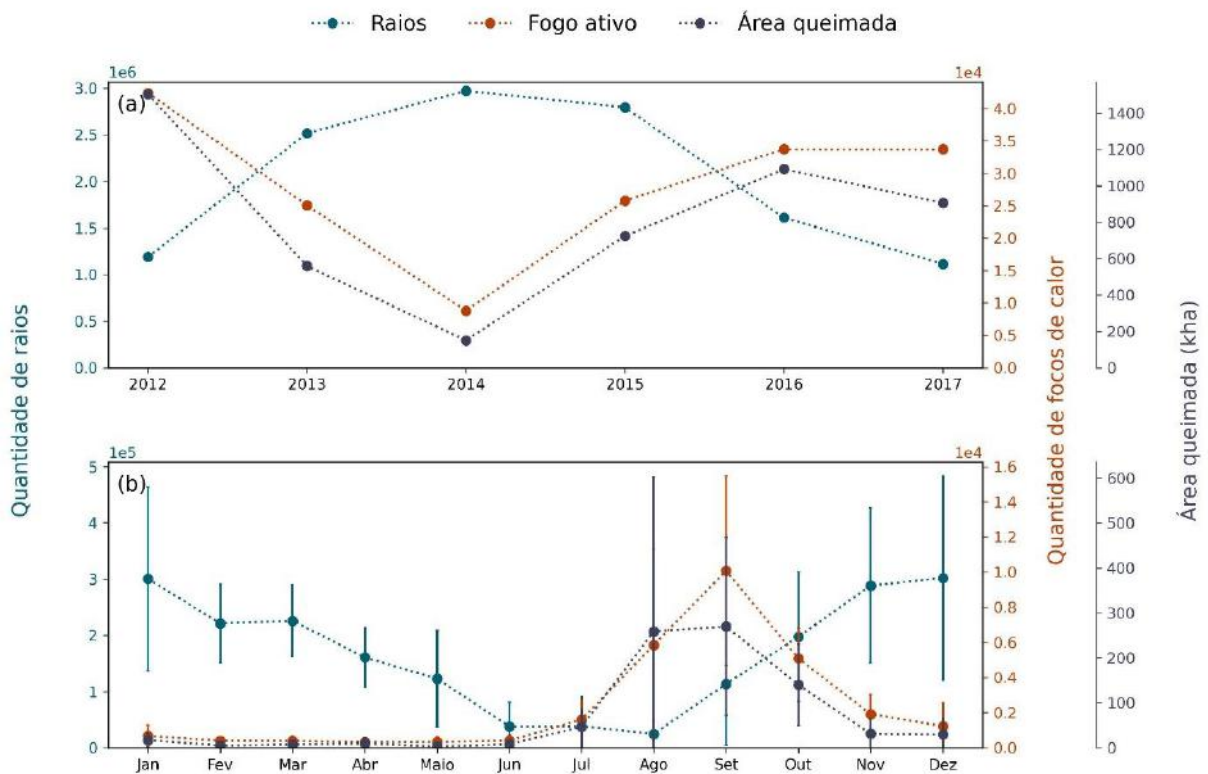
Além disso, baseado em estudos anteriores (RODRIGUES et al., 2019; SANTOS et al., 2020), cicatrizes individuais de incêndio derivados do GFA foram categorizados de acordo com o seu tamanho em três classes: pequena (até 100 ha), média (100 – 1 000 ha) e grande (> 1 000 ha). Para cada classe de cicatriz, calculamos o número total de eventos e área queimada afetada, tanto para os classificados como de origem natural, como os de origem antropogênica.

### 3.5 RESULTADOS

#### 3.5.1 Climatologia de raios e regime de fogo

Analisando a variabilidade interanual e a sazonalidade das observações de raios, fogo ativo e área queimada por incêndios no bioma Pantanal, independente da sua causa (Figura 7), verifica-se que entre 2012 e 2017 uma quantidade total de 12 190 378 raios com foram detectados pela rede STARNET. Destes, a maior parte foi observada nos anos 2014 e 2015, enquanto menor atividade de raios se deu em 2012 e 2017. Acerca da sazonalidade, maior frequência de raios foi observada de novembro a março no período úmido, com um pico em dezembro, enquanto uma quase ausência deste fenômeno é comumente observada durante o inverno (JJA), no início da estação seca.

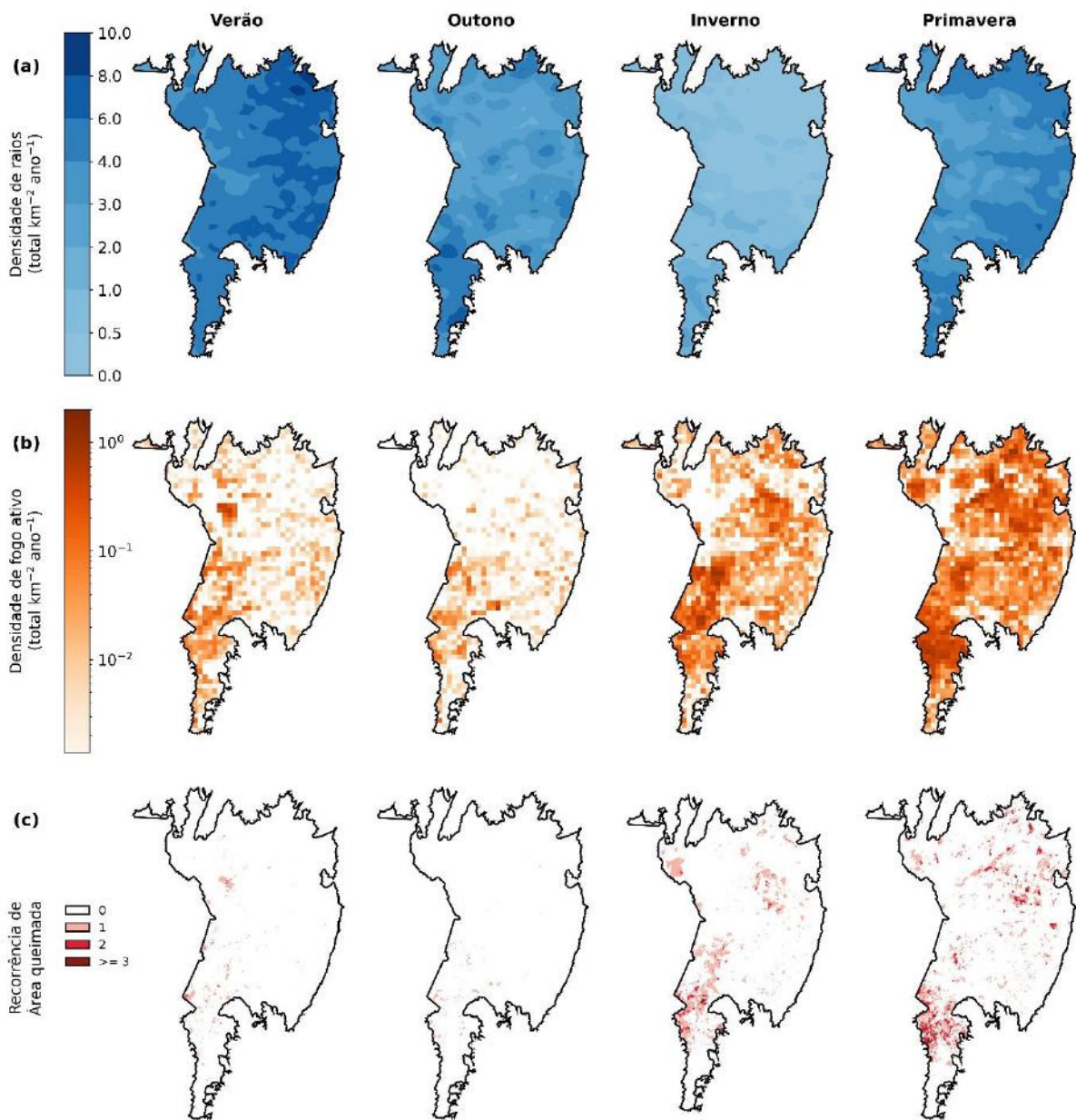
A respeito do regime de fogo, observa-se que os anos com maior incidência de fogo no bioma foram 2012, seguido de 2016 e 2017, registrando de 30 000 a 42 000 hectares de área queimada respectivamente. O regime de fogo tem início em julho e perdura até o final de novembro, com pico da estação seca se apresentando em setembro, enquanto mantém-se mínima de fevereiro a maio. Destaca-se nesta figura que ambos os fenômenos de incêndio e raios apresentam uma defasagem de cerca de 3 meses entre seus picos de maior incidência.



**Figura 7.** (a) Variabilidade interanual e (b) sazonalidade (média anual por mês) da incidência de raios, focos de calor e área queimada no Pantanal, entre 2012 e 2017. As barras no painel (b) denotam o desvio padrão.

A Figura 8 apresenta a variabilidade espacial da incidência de raios e fogo ativo como uma média anual da densidade de raios ou focos de calor em cada estação do ano, em uma grade regular de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ , e a recorrência de área queimada sobre o bioma também categorizada por estação do ano. Acerca da densidade de raios (Fig. 8a), durante o verão (estação úmida) maiores incidências de raios são verificadas a leste, norte e sudeste do bioma, alcançando até 10 raios por  $\text{km}^2$  por ano somente nesta estação. Em contraste, durante o inverno valores de até 2 raios por  $\text{km}^2$  por ano são encontrados em todo o bioma, mais concentrados a sul. Nas estações de transição, isto é, primavera e outono, magnitudes semelhantes são encontradas em toda a área de estudo, mas com distribuição distinta, sendo os máximos encontrados a leste e nordeste na primavera e a sul no outono. As áreas mais afetadas pelo fogo no bioma localizam-se a sudoeste e nordeste, mais evidenciadas durante o inverno e primavera, pico da atividade do fogo (Figuras 8b e 8c). Em geral, em regiões onde há relativamente maior densidade de raios verifica-se também pouca recorrência de área queimada e menos observações de fogo ativo, com exceção na primavera, quando observa-se maior recorrência de área queimada mesmo que a incidência de raios seja significativamente alta por todo o bioma.





**Figura 8.** Sazonalidade da (a) densidade de raios (raios  $\text{km}^{-2} \text{ano}^{-1}$ ) e (b) densidade de focos de calor (focos  $\text{km}^{-2} \text{ano}^{-1}$ ) em uma grade regular de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ , e (c) recorrência da área queimada. As densidades de raios e focos de calor foram calculadas como uma média anual de cada estação do ano, considerando a área equivalente a cada célula de grade.

### 3.5.2 Fogos ativos causados por raios

Os resultados da análise conjunta, espacial e temporal, das observações de fogo ativo e raios identificaram 39 464 focos de calor como potenciais candidatos a terem sido induzidos por raio (índice B maior que zero). Destes, apenas 7 570 apresentaram índice B superior ou

igual a 0,8 e, portanto, foram classificados como de origem natural (Tabela 1), correspondendo a 4,47% de todos os focos detectados no período de seis anos considerado. Dos focos de calor de origem natural, a maior frequência (4 252) se deu durante a primavera, enquanto a maior frequência relativa a cada estação foi observada no verão (19.4% dos focos). Apesar da primavera e outono compartilharem a mesma proporção relativa de fogo ativo de origem natural, uma quantidade mínima é observada durante o outono e inverno. O inverno caracteriza o início da temporada seca, com maior queima de biomassa no Pantanal, no entanto, esses resultados sugerem que apenas 0,5% dos focos de calor detectados durante esta estação possam estar associados a causas naturais.

**Tabela 1.** Quantidade de focos de calor candidatos a terem sido induzidos por raios e classificados como de origem natural ( $B \geq 0,8$ ). Indicada em parênteses é a proporção relativa, ou seja, o número de eventos relacionados a raios sobre a quantidade total observada em cada período.

<b>Período</b>	<b>Candidatos (<math>B &gt; 0</math>)</b>		<b>Mais prováveis (<math>B \geq 0,8</math>)</b>	
Verão	9 630	<b>(70 %)</b>	2 669	<b>(19,4 %)</b>
Outono	1 947	<b>(31,4 %)</b>	428	<b>(6,9 %)</b>
Inverno	1 991	<b>(4,2 %)</b>	221	<b>(0,5 %)</b>
Primavera	25 896	<b>(25,3 %)</b>	4 252	<b>(4,2 %)</b>
<b>Total</b>	<b>39 464</b>	<b>(23,3 %)</b>	<b>7 570</b>	<b>(4,5 %)</b>

### 3.5.3 Contribuição para a área queimada

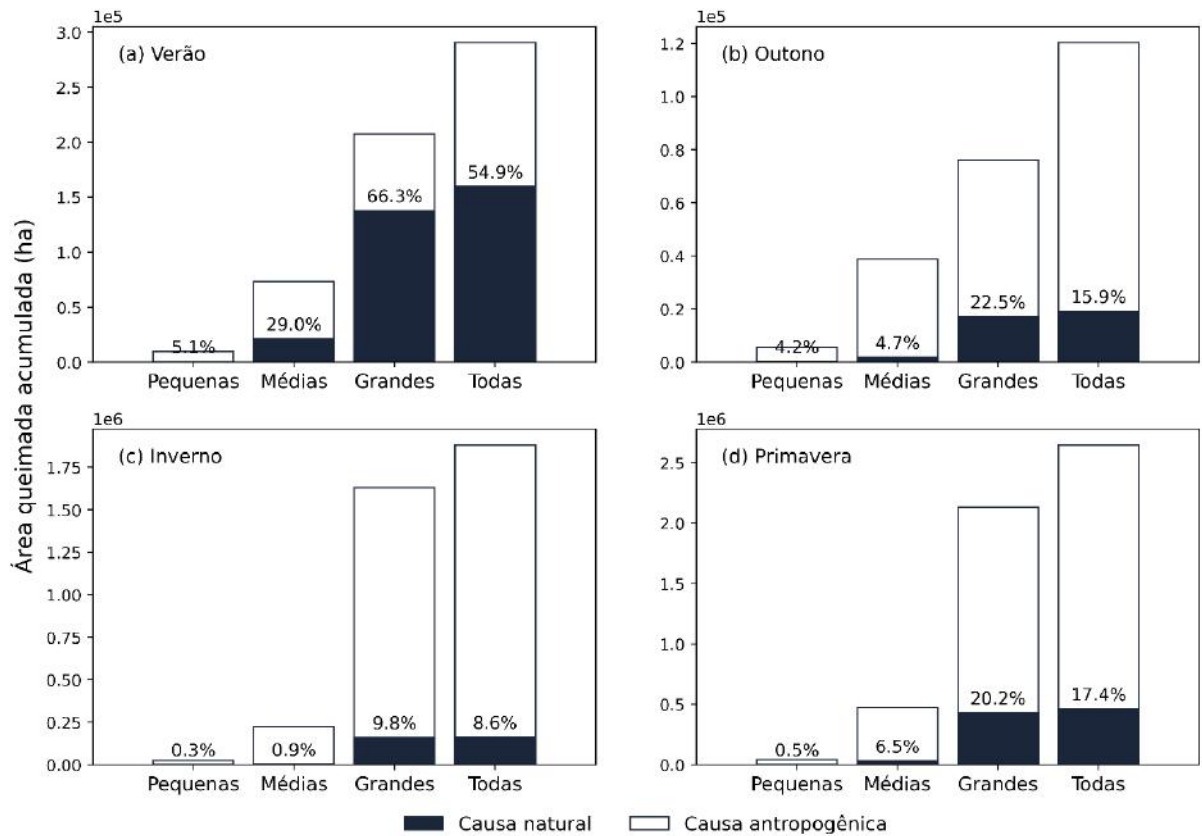
De acordo com a base de dados GFA, 5 044 cicatrizes de incêndios individuais foram identificadas entre 2012 e 2017 no bioma Pantanal, totalizando cerca de 5 milhões de hectares de área queimada. Destas cicatrizes, 1 948 (38,6%) foram classificadas como pequenas, 2 305 (45,7%) como médias e 791 (15,7%) como grandes. Conforme as cicatrizes foram relacionadas aos focos de calor de origem natural, foram identificadas 16 cicatrizes pequenas, 128 médias e 121 grandes como causadas por raios, totalizando 265 que correspondem a somente 5% de todas as cicatrizes no período de seis anos (Tabela 2). Elas ocorreram principalmente durante a primavera (150 cicatrizes), seguido do verão (83), inverno (20) e outono (12). Um número aproximadamente semelhante de cicatrizes médias e grandes associadas a raios foi verificado em todas as estações, porém, as cicatrizes grandes são as que apresentam maior frequência

relativa nesta base de dados. Desta forma, incêndios induzidos por raios contabilizam por 43,9% das cicatrizes grandes que ocorreram durante o verão, mas somente 5,2% durante o inverno.

**Tabela 2.** Número estimado de cicatrizes causadas por raios e correspondente área queimada. Indicada em parênteses é a proporção relativa, ou seja, o número de eventos relacionados a raios sobre a quantidade total observada em cada período, de acordo com a sua categoria.

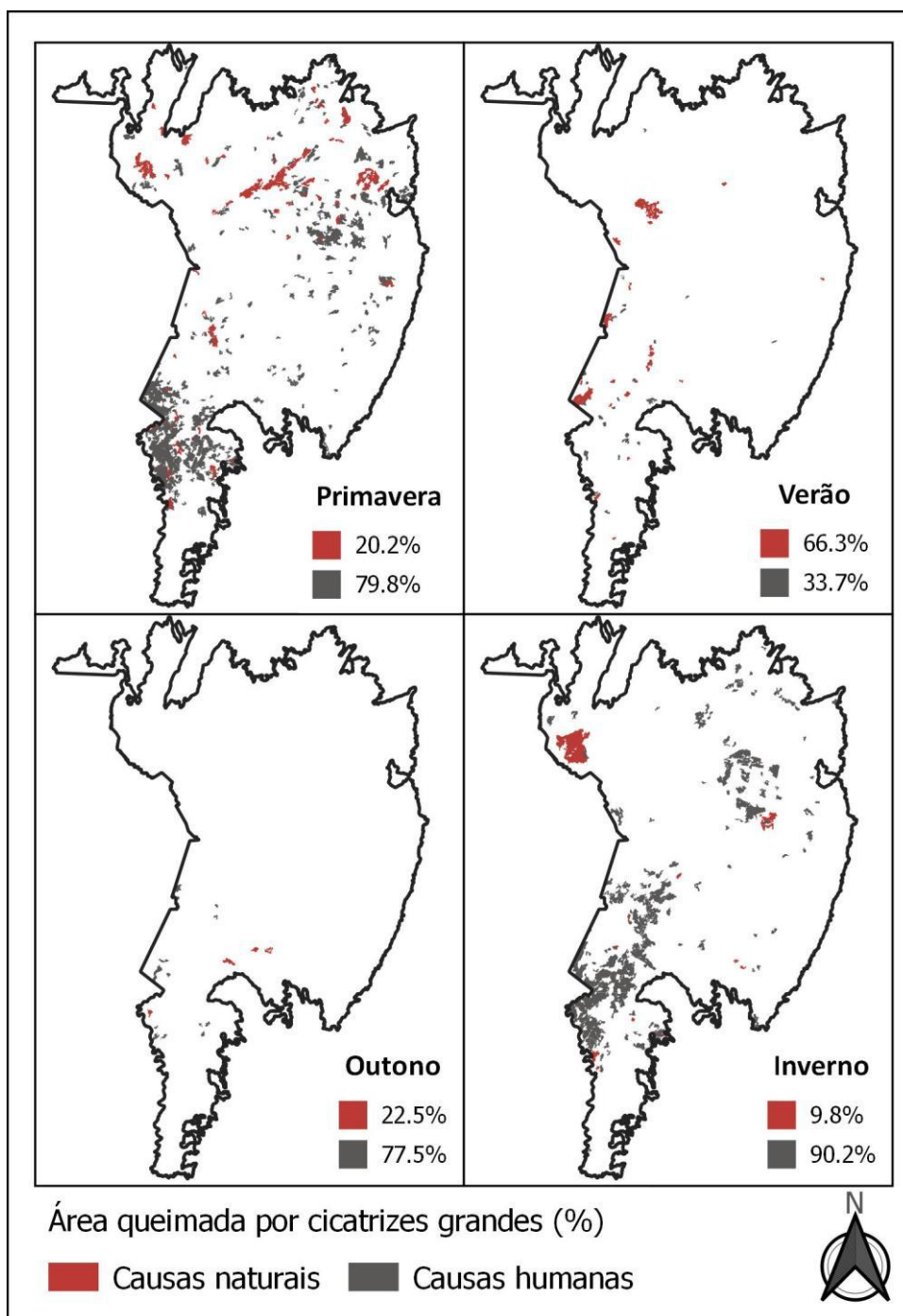
Período	Pequenas		Médias		Grandes		Todas		Área Queimada [x10 <sup>3</sup> ha]	
	Nº	(%)	Nº	(%)	Nº	(%)	Nº	(%)	Área	(%)
Verão	7	(3,1 %)	47	(22,2 %)	29	(43,9 %)	83	(16,5 %)	159,4	(54,9 %)
Outono	3	(2,2 %)	4	(3,5 %)	5	(22,7 %)	12	(4,4 %)	19,2	(15,9 %)
Inverno	2	(0,3 %)	6	(0,9 %)	12	(5,2 %)	20	(1,3 %)	161,7	(8,6 %)
Primavera	4	(0,4 %)	71	(5,4 %)	75	(15,9 %)	150	(5,4 %)	461,3	(17,4 %)
Total	16	(0,8 %)	128	(6 %)	121	(20 %)	265	(5 %)	801,7	(16,2 %)

A extensão total de área queimada por cicatrizes causadas por raios no período de seis anos considerado foi estimada em cerca de 801 700 hectares, que corresponde a 16,2% da área total consumida pelo fogo no bioma. Ao longo de todas as estações, a área queimada relacionada a atividade de raios totaliza 159 447 ha, 19 185 ha, 161 676 ha e 461 344 ha durante o verão, outono, inverno e primavera, respectivamente. Estes valores correspondem a cerca de 55%, 16%, 9% e 17% da área total queimada em cada uma das estações mencionadas. Cicatrizes pequenas relacionadas a raios no bioma não são frequentes, enquanto o restante é dividido quase que igualmente entre médias ou grandes, variando de acordo com a estação do ano. Somente durante o verão verifica-se um maior número de cicatrizes médias naturais em relação a grandes ou pequenas, isto é, 47 de 83 cicatrizes naturais nesta estação são de tamanho médio. Apesar desta distribuição, as cicatrizes grandes são aquelas responsáveis pela maior parte da área queimada acumulada tanto por causas naturais quanto por causas antropogênicas durante todo o período considerado (Figura 9).



**Figura 9.** Variabilidade sazonal da área queimada acumulada estimada (hectares) para cicatrizes classificadas como de origem natural e origem antropogênica, por categoria de tamanho da cicatriz. Porcentagens no topo de cada barra preta representam a porção de área queimada por incêndios naturais com relação a área total queimada, em sua respectiva categoria e estação. Os limites e a ordem de grandeza da área queimada no eixo vertical são diferentes em cada painel.

A maioria das cicatrizes naturais grandes que foram detectadas durante o verão ocorreram na área oeste do bioma Pantanal. Em contraste, durante a primavera a área ao norte do Pantanal foi mais afetada por incêndios naturais. Durante o inverno, verifica-se que as duas regiões a sudoeste e nordeste do Pantanal, que apresentam uma grande concentração de cicatrizes grandes, em geral não está relacionada a ignição por raios, sendo principalmente causada por atividades antropogênicas (Figura 10). Estas se deram durante os anos de 2012 e 2017, que apresentaram valores relativamente altos de quantidade de focos de calor e baixos de incidência de raios (Figura 7a), e, portanto, a maioria dos incêndios nestes anos não foram associados a ignição por raio. Durante o inverno e primavera, períodos com maior frequência de incêndios e área queimada no Pantanal, estima-se que cerca de 80% e 90% das cicatrizes grandes, respectivamente, estejam relacionadas a atividades antropogênicas.



**Figura 10.** Distribuição da área queimada por cicatrizes grandes entre 2012 e 2017, por estação do ano e causa (natural ou humana - antropogênica).

### 3.6 DISCUSSÃO

A incidência de raios no Pantanal entre 2012 e 2017 apresentou grandes variabilidades interanual e sazonal. Anos com maior e menor incidência de raios podem refletir, entre outros fatores, a influência dos fenômenos de El Niño/La Niña como observado anteriormente (SÁTORI; WILLIAMS; LEMPERGER, 2009). Durante anos de El Niño, a alteração do padrão de circulação afeta a precipitação e reduz a convecção em regiões tropicais, conseqüentemente, atividade de raios é menor. Em contraste, durante anos de La Niña, a atividade de raios é maior. Grande parte dos raios na área de estudo foram observados durante o verão austral (dezembro a fevereiro), enquanto a menor incidência foi registrada no inverno austral (junho a agosto), corroborando com os resultados de outros estudos no Brasil (PAULUCCI et al., 2019; RASMUSSEN; ZULUAGA; HOUZE, 2014). Na América do Sul, a atividade convectiva durante estes meses é o principal determinante do aumento na atividade elétrica. Além disso, a presença de sistemas frontais intensos sobre o Sudeste do Brasil pode modular o posicionamento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) ao longo da região Centro-Oeste e contribuir para o máximo de densidade de raios observado nesta região, especialmente ao nordeste do Pantanal durante o verão (GAN; KOUSKY; ROPELEWSKI, 2004), favorecido pelo efeito orográfico ou topográfico (VALERIANO; SALVI; ARAGÃO, 2012).

A sazonalidade do regime de fogo, por sua vez, apresentou maior frequência durante o inverno e primavera. Estes resultados estão de acordo com resultados anteriores que mostram que a maioria dos incêndios ocorre de julho a outubro (correspondendo a estação seca) no Cerrado, Amazônia e Pantanal (PIVELLO et al., 2021; SILVA et al., 2021). No Pantanal, especificamente, a estação seca ocorre de maio a outubro. Mesmo que a estação seca seja regionalmente síncrona, é importante destacar que, durante anos com grandes inundações, o secamento da vegetação, e, conseqüentemente, a quantidade de biomassa disponível para combustão, difere baseado na posição relativa as áreas inundadas. Isto pode levar a respostas da precipitação, do pulso de inundação e da vegetação fora de fase em algumas partes do Pantanal, ou seja, em anos com grandes inundações, amplas áreas de planícies ao sul e oeste do Pantanal podem ser inundadas durante o início da estação seca, conseqüentemente tornando-as menos suscetíveis a incêndios. Da mesma forma, incêndios no Pantanal normalmente perduram até setembro, uma vez que a estação úmida começa em outubro (PIVELLO et al., 2021). Enquanto a densidade de incêndios é maior a oeste do Pantanal, a maior densidade de raios é localizada a leste, nordeste e sul. Estas diferenças entre a localização dos raios e a densidade de incêndios foi observada ao longo de todas as estações, com exceção da primavera. Estes

resultados estão de acordo com um estudo global que sugere que a temporada de raios e incêndios em grande parte do Brasil estejam fora de fase (COUGHLAN; MAGI; DERR, 2018).

Mesmo que apenas um período de seis anos foi analisado, é sugerido que incêndios induzidos por raios sejam um elemento importante no regime de fogo durante o verão do Pantanal, dado que foi estimado que cerca da metade da área queimada nesta estação seja resultante da ignição por raios. De modo contrário, no restante do ano os incêndios naturais representam uma pequena porcentagem da atividade de incêndios. Cicatrizes de incêndios detectadas durante o inverno e relacionadas a raios afetaram aproximadamente a mesma extensão de área queimada que aquelas durante o verão, apesar de uma quantidade muito inferior de cicatrizes ter sido classificada como natural, evidenciando o quanto a estação seca favorece a propagação do fogo. Na primavera, principalmente em outubro, a atividade de incêndios naturais atinge o seu pico anual, e mais da metade da área queimada atribuída a raios foi registrada nesta estação, enquanto um mínimo foi observado durante o outono. Em geral, estima-se que incêndios naturais no Pantanal totalizem somente 5% das cicatrizes de incêndios e 16% da área total queimada no período de seis anos considerado, que foram em sua maior parte resultantes de cicatrizes grandes (i.e., incêndios com extensão superior a 1000 hectares).

A quantidade de cicatrizes causadas pela atividade antropogênica e área total queimada foram muito superiores as causadas pela ignição natural de raios. Isto reforça a conclusão que raios não contribuem para uma grande proporção de área queimada no Pantanal. A ocorrência de incêndios causados por raios tem forte relação com padrões de circulação meteorológicos (VERAVERBEKE et al., 2017). Ignições causadas por raios são limitadas no tempo, e exigem condições atmosféricas específicas como a presença de tempestades (CATTAU et al., 2020). Na bacia de La Plata, onde o Pantanal está localizado, sistemas convectivos de mesoescala são responsáveis pela geração de profunda convecção com altos valores de precipitação e descargas atmosféricas associadas (RASMUSSEN et al., 2016). Desta forma, raios geralmente ocorrem durante o período úmido, e são seguidos ou precedidos por episódios de chuva. Estas condições limitam a propagação de incêndios de origem natural nos trópicos (PIVELLO et al., 2021), visto que o conteúdo de umidade na vegetação deve ser pequeno o suficiente para que o raio seja capaz de causar uma ignição, e para que a combustão latente sobreviva até desenvolver um incêndio (LIBONATI et al., 2020).

## 4 PORTUGAL

### 4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Incêndios no sul da Europa causam extensivas perdas econômicas e ecológicas, e até mesmo casualidades humanas (BOWMAN et al., 2017; TURCO et al., 2018, 2019). De acordo com os relatórios anuais de áreas ardidas e ocorrências em Portugal (ICNF, 2023a), elaborados pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), os anos 2003 e 2017 foram particularmente extremos, apresentando área queimada total anual equivalentes a cerca de 420 000 ha em 2003, e 470 000 ha em 2017 (NEVES et al., 2023). Estas temporadas de incêndio excepcionais foram causadas pela combinação de diversos fatores, incluindo ondas de calor severas (BASTOS et al., 2014; SÁNCHEZ-BENÍTEZ et al., 2018), condições de seca (ERMITÃO et al., 2022; FINK et al., 2004; GARCÍA-HERRERA et al., 2007; TURCO et al., 2019) e a influência do ciclone tropical Ophelia em 2017 (RAMOS et al., 2023). Em particular, a temporada de incêndios em 2017 perdurou de junho a outubro e foi extremamente intensa sobre uma ampla região do sul da Europa, com grandes incêndios observados também no sul da França, Itália e Espanha (RAMOS et al., 2023; TURCO et al., 2018). Considerando as últimas projeções climáticas, que apontam para um aumento na frequência e severidade de ondas de calor de verão e secas (ARIAS et al., 2021), é favorável que um aumento no número e extensão de incêndios ocorre na bacia do Mediterrâneo (CALHEIROS; PEREIRA; NUNES, 2021; DUPUY et al., 2020; RUFFAULT et al., 2020; TURCO et al., 2018).

Uma das mais recentes análises realizadas na Europa a respeito das causas de incêndio mostra que a vasta maioria dos incêndios possuem uma causa antropogênica, enquanto as descargas atmosféricas têm um papel significante somente nas regiões remotas ao norte da Escandinávia (DIJKSTRA et al., 2022). Ainda assim, mesmo que as áreas do tipo Mediterrâneas sejam dominadas por incêndios de origem antropogênica, os raios também podem causar grandes eventos (CASTEDO-DORADO et al., 2011; COUTO et al., 2020; FERNANDES et al., 2021; GANTEAUME et al., 2013; NIETO et al., 2012). Na Espanha, por exemplo, incêndios causados por raios totalizam 3,9% de todos os incêndios reportados entre 1991 e 2004, e eles tendem a queimar áreas relativamente grande em comparação a incêndios de origem antropogênica, visto que normalmente ocorrem em área remotas. A ocorrência em áreas remotas envolve dois fatores que contribuem para que o incêndio seja grande em dimensão: i) a supressão inicial do fogo pode demorar; ii) alertas sobre o incêndio podem atrasar pois eles são, em sua maioria, notificados por residentes, e a densidade populacional é baixa em tais áreas (FERNANDES et al., 2021). Em Portugal, dois grandes incêndios em particular



foram causados de forma direta ou indireta por tempestades, são eles os incêndios de Góis, em junho de 2017, que consumiu 17 521 hectares de área queimada, e o amplamente reportado incêndio de Pedrogão Grande, responsável por 64 fatalidades, provocado momentos antes por um acidente envolvendo uma descarga elétrica de uma linha de transmissão de energia (COUTO et al., 2020; CTI, 2022; FERNANDES et al., 2021). Ambos ocorreram durante a mais intensa onda de calor já reportada sobre a Iberia, para o mês de junho.(SÁNCHEZ-BENÍTEZ et al., 2018).

Em Portugal, estudos anteriores foram publicados sobre relação entre incêndios e raios, baseando-se principalmente em ocorrências de incêndios existentes (FERNANDES et al., 2021) ou em abordagens de modelagem (COUTO et al., 2020; DIJKSTRA et al., 2022). Esta seção propõe dar continuidade à abordagem proposta para o Pantanal, introduzindo as áreas ardidadas registradas no catálogo do ICNF como informação complementar, e, adicionalmente, avaliar o potencial de satélites em fornecer dados alternativos sobre este fenômeno. Assim, seguiu-se a seguinte linha de raciocínio: i) investigação das variabilidades espacial e temporal de raios NS e incêndios ao longo do período entre 2003 e 2020; ii) estimativa da probabilidade de um incêndio ter sido causado por um raio; iii) para aqueles incêndios com maior probabilidade, estimação da área queimada associada; iv) comparação entre os incêndios naturais derivados do sensoriamento remoto com a informação disponível no catálogo de ocorrências in-situ.

## 4.2 ÁREA DE ESTUDO

Portugal, a nação mais ao sul da Europa, é caracterizada por uma densidade populacional assimétrica entre a região costeira e o interior, o que influencia o uso do solo e, conseqüentemente, a ignição e propagação do fogo (MOREIRA et al., 2010). Comparativamente a outros países na bacia do Mediterrâneo, Portugal apresenta a maior área queimada e número de incêndios por unidade de área terrestre das últimas cinco décadas (BASTOS et al., 2011; MARQUES et al., 2011; PEREIRA et al., 2011). Os anos de 2003, 2005 e 2017 foram particularmente extremos em Portugal, registrando valores de área queimada total equivalente a cerca de 430 000 ha, 340 000 ha e 470 000 ha, respectivamente (NEVES et al., 2023). Este trabalho apenas considera o território de Portugal continental, no período entre 2003 e 2020.

## 4.3 DADOS

### 4.3.1 Dados de descargas atmosféricas

O sistema de localização de raios português tem estado em operação desde junho de 2002, é operado pelo serviço meteorológico nacional, o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), e é composto por quatro detectores IMPACT 141T-ESP. Desde 2005, o IPMA também recebe dados adquiridos por cinco sensores do sistema de detecção espanhol, operado pela Agência Estatal de Meteorologia (AEMET), próximos a borda entre os dois países, o que aperfeiçoou a eficiência de detecção e a acurácia da rede. Apesar da eficiência de detecção variar sobre a área continental de Portugal, estima-se que ela exceda 90% para descargas atmosféricas com pico de corrente superior a 5 kA (RODRIGUES et al., 2008). Dados de raios, incluindo a localização e data/hora de ocorrência, foram obtidos para a área de estudo compreendendo o período entre 2003 e 2020. Neste trabalho, foram somente utilizados dados de descargas atmosféricas NS com erro de localização inferior a 10 km. Durante este período, um total de 382 522 descargas NS foram detectadas, fornecendo informações da localização geográfica e sua polaridade estimada.

### 4.3.2 Dados de incêndios florestais

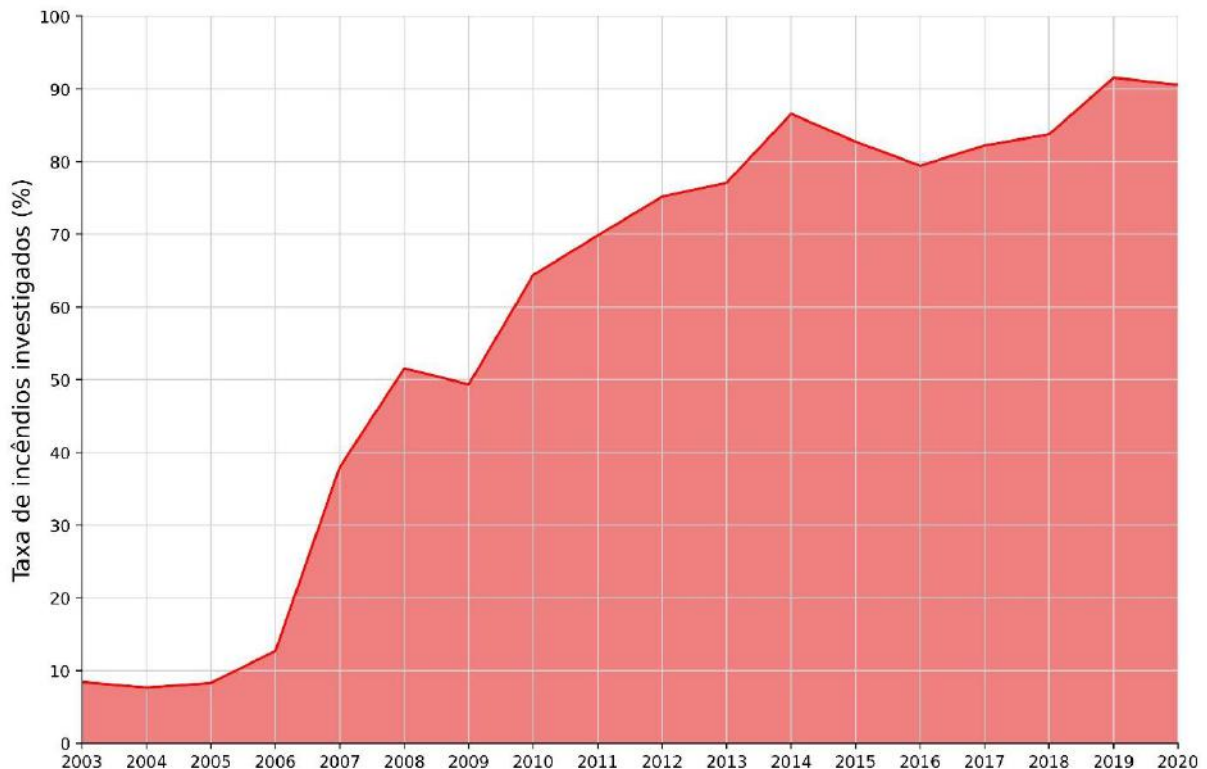
#### 4.3.2.1 Base de dados do ICNF

O ICNF fornece um conjunto de dados sobre incêndios individuais reportados, possuindo informação a respeito de diversos atributos de cada incêndio, como a área queimada, data de ignição e supressão, localização da ignição, causa atribuída, entre outros (ICNF, 2023b). Esta base de dados têm muitas ressalvas, nomeadamente incertezas sobre a localização do ponto de ignição e área queimada (PEREIRA et al., 2011). O primeiro é uma consequência da incerteza associada a identificação do local de ignição. A base de dados possui dois tipos de coordenadas de início do fogo: i) quando a investigação da causa de incêndio realizado pelas brigadas foi capaz de localizar o início do incêndio, as coordenadas representam o ponto de ignição verdadeiro; ii) quando a investigação falha em identificar o ponto de ignição, as coordenadas do lugar nomeado mais próximo a área queimada são declaradas como ponto de ignição do incêndio. Por outro lado, há incertezas importantes na estimativa da área queimada associada a cada ocorrência, frequentemente apresentando discrepâncias relevantes quando comparadas às estimativas derivadas de dados de sensoriamento remoto pós-fogo. Isto pode ser particularmente pronunciado para incêndios grandes com múltiplas ignições coalescendo em um único perímetro de fogo. Além das incertezas espaciais e erros mencionados acima, a base

de dados do ICNF também possui incertezas temporais associadas ao intervalo de tempo entre o verdadeiro tempo da ignição, que é tipicamente desconhecido, e o tempo do primeiro alerta, ou primeira supressão do fogo. No entanto, um importante aspecto da base de dados do ICNF é que ela inclui uma causa atribuída a cada incêndio, permitindo a sua classificação em causas naturais por raio, negligência resultante de acidentes ou manuseio descuidado do fogo, intencional, reignição e causas indeterminadas (ICNF, 2014). Contudo, a causa do incêndio frequentemente se encontra ausente na base de dados. Por exemplo, 65% de todas as 398 964 ocorrências catalogadas não possuem uma causa atribuída (i.e., não foram investigados ou possuem causa indeterminada), correspondendo a 35% dos incêndios com extensão superior a 20 ha, e 33,8% da área total queimada entre 2003 e 2020 (Tabela 3). Apesar disso, a proporção de incêndios investigados tem aumentado significativamente desde 2006, alcançando um máximo de 92% nos anos mais recentes (Figura 11).

**Tabela 3.** Número de ocorrências de incêndios na base de dados do ICNF, em Portugal, categorizados por causa atribuída e área queimada (2003 – 2020). Em parênteses está indicada a fração representada por um dado tipo de incêndio em cada categoria de área queimada.

Área Queimada (hectares)	Causa do incêndio					
	Natural	Intencional	Negligência	Reignição	Indeterminada	Não investigada
[0 - 1]	1 206 (0,4%)	27 689 (8,5%)	49 882 (15,3%)	21 228 (6,5%)	58 610 (17,8%)	167 723 (51,4%)
[1 - 10]	217 (0,4%)	8 150 (13,5%)	13 605 (22,5%)	2 589 (4,3%)	9 741 (16,1%)	26 244 (43,4%)
[10 - 20]	30 (0,7%)	80 (19,6%)	1 283 (31,2%)	253 (6,2%)	835 (20,3%)	903 (22%)
[20 - 50]	27 (0,8%)	809 (22,5%)	1 190 (33,1%)	233 (6,5%)	745 (20,7%)	592 (16,5%)
[50 - 100]	12 (0,7%)	429 (25%)	533 (31,0%)	96 (5,6%)	379 (22,1%)	268 (15,6%)
[100 - 500]	36 (1,9%)	543 (28,9%)	541 (28,8%)	15 (8,2%)	386 (20,6%)	218 (11,6%)
[500 - 1000]	7 (1,8%)	121 (30,7%)	107 (27,16%)	32 (8,1%)	63 (16%)	64 (16,2%)
> 1000	17 (4,4%)	140 (36,4%)	77 (20%)	31 (8,1%)	62 (16,1%)	58 (15,1%)
<b>Total</b>	1 552	38 688	67 218	24 615	70 821	196 070



**Figura 11.** Taxa de incêndios investigados por ano em Portugal, entre 2003 e 2020, conforme indicado na base de dados do ICNF.

#### 4.3.2.2 Dados de satélite

A base de dados utilizada proveniente de um produto de sensoriamento remoto (MCD14ML) consiste em pixels de focos de calor detectados pelo sensor MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua, com resolução espacial de aproximadamente 1 km no Nadir, compreendendo o período entre 2003 e 2020 (FIRMS, 2023). Os satélites Aqua e Terra passam por Portugal continental duas vezes ao dia cada, nos horários locais de 13:30 e 02:30, e 10:30 e 22:30, respectivamente.

Foi considerado somente os pixels de fogo ativo com tipo inferido 0, isto é, presumidos como fogo em vegetação, e confiança de detecção estimada em 30% ou superior, correspondendo a pixels de eventos de fogo com confiança nominal e alta (GIGLIO, 2015). Ao excluir pixels com baixa confiança da amostra, a taxa de alarme falso é reduzida e os efeitos na taxa de detecção de incêndios são desprezíveis, visto que estes tendem a ocorrer na periferia dos pixels com alta confiança (HAWBAKER et al., 2008). O erro de comissão do algoritmo de detecção de fogo ativo do MODIS aumenta quanto maior a cobertura da área florestada, no entanto, sobre a Europa ele é considerado desprezível (menor que 1%), enquanto a taxa de

detecção corresponde a aproximadamente 9% para um incêndio típico de 5 hectares de extensão, aumentando quanto maior o tamanho do incêndio (GIGLIO; SCHROEDER; JUSTICE, 2016)

#### 4.4 METODOLOGIA

##### 4.4.1 Classificação da causa de eventos de fogo

O relacionamento entre eventos de fogo e descargas atmosféricas foi analisado de 2003 a 2020, baseando-se nas proximidades espacial e temporal entre os dois fenômenos, seguindo a abordagem proposta por (LARJAVAARA; PENNANEN; TUOMI, 2005) e descrita também na seção 3.4.1.

A escolha do parâmetro de distância máxima ( $D_{max}$ ) empregado para uso desta abordagem em Portugal continental foi baseada no erro de localização máximo do sistema de detecção de raios, equivalente a 10 km. Por sua vez, além da consideração das incertezas temporais na detecção do evento de fogo ao definir um valor adequado para o parâmetro de máximo *holdover time* ( $T_{max}$ ), também deve-se considerar o fenômeno *holdover fire*, isto é, uma ignição que experimenta uma fase de combustão latente por dias ou semanas até se desenvolver em um incêndio e ser reportado, que são comumente observados nos Alpes (MORIS et al., 2020). No entanto, ao redor do mundo os incêndios induzidos por raios que possuem *holdover times* curtos ocorrem com maior frequência, e aqueles com menores valores são encontrados, entre outros tipos de vegetação, nas florestas Mediterrâneas (MORIS et al., 2023).

A fim de determinar a combinação mais adequada de  $D_{max}$  e  $T_{max}$  para uso em Portugal continental, as ocorrências individuais de incêndios disponibilizadas pelo ICNF foram agrupadas em dois subconjuntos:

- i) conjunto de eventos para validação, composto de incêndios com causa atribuída conhecida;
- ii) conjunto de eventos de causa-desconhecida, composto em ocorrências que não tiveram sua causa investigada ou possuem causa indeterminada (i.e., quando houve uma investigação, mas não foram recolhidas evidências suficientes para indicar a causa).

Então, duas análises independentes uma da outra foram conduzidas fazendo variar o  $T_{max}$  entre 1 e 5 dias. A primeira análise é uma análise de sensibilidade usando o subconjunto

causas-desconhecida, como descrito na seção 3.4.1, sendo que a segunda análise avalia a performance desta metodologia usando o subconjunto validação.

A avaliação da performance foi conduzida calculando as métricas da taxa de verdadeiro positivo, a taxa de alarme falso e precisão (WILKS, 2019): i) a taxa de verdadeiro positivo foi calculada como a razão entre o número de ocorrências corretamente classificadas como de origem natural e o número de incêndios naturais no subconjunto validação; ii) a taxa de alarme falso como a razão entre o número de ocorrências erroneamente classificadas como de origem natural e o número de incêndios antropogênicos no subconjunto validação; iii) a precisão foi dada pela razão entre o número de incêndios corretamente classificados como de origem natural e o número total de incêndios classificados como tal no subconjunto validação.

Finalmente, baseado nestas duas análises independentes, uma combinação de  $D_{max}$  e  $T_{max}$  foi definida, assim como o limiar do índice B (Equação 2) a ser considerado (ver seção 4.5.2). Estes parâmetros foram então utilizados para classificar a causa de incêndio no subconjunto causa-desconhecida, utilizando a data/hora de alerta de cada ocorrência como referência. Desta forma, as ocorrências de incêndios naturais já classificadas pelo ICNF serão referidas daqui em diante como ICNF-LIF (*ICNF lightning-ignited fires*), enquanto aquelas do subconjunto causa-desconhecida que foram classificadas como naturais são referidas como ICNF-PCLIF (*ICNF post-classified lightning-ignited fires*). Portanto, estes dois novos conjuntos são disjuntos, de modo que todas as ocorrências de incêndio incluídas no ICNF-PCLIF não fazem parte do catálogo original ICNF-LIF.

#### **4.4.2 Relacionando focos de calor com ocorrências naturais in-situ**

Para avaliar a capacidade desta metodologia em corretamente classificar eventos de fogo como originados por descargas atmosféricas ao utilizar dados de sensoriamento remoto, os focos de calor detectados pelo sensor MODIS também foram submetidos a esta abordagem. Somente aqueles classificados como naturais, referidos daqui em diante como MODIS-LIAF (*MODIS Lightning-ignited active fires*), foram comparados com ocorrências ICNF-LIF e ICNF-PCLIF.

A base de dados do ICNF contém somente dados pontuais do incêndio, fornecendo informações como a localização do ponto de ignição e sua área queimada, contudo, ela não informa a direção de propagação do fogo. Portanto, a assimilação espacial entre o MODIS-LIAF e o ICNF-PCLIF ou ICNF-LIF foi conduzida considerando um raio em torno da

ocorrência do ICNF, cuja área é equivalente à sua área queimada. Além disso, um valor de 2 km foi adicionado a este raio para considerar as incertezas espaciais do produto de fogo ativo do MODIS, de acordo com Benali et al. (2016).

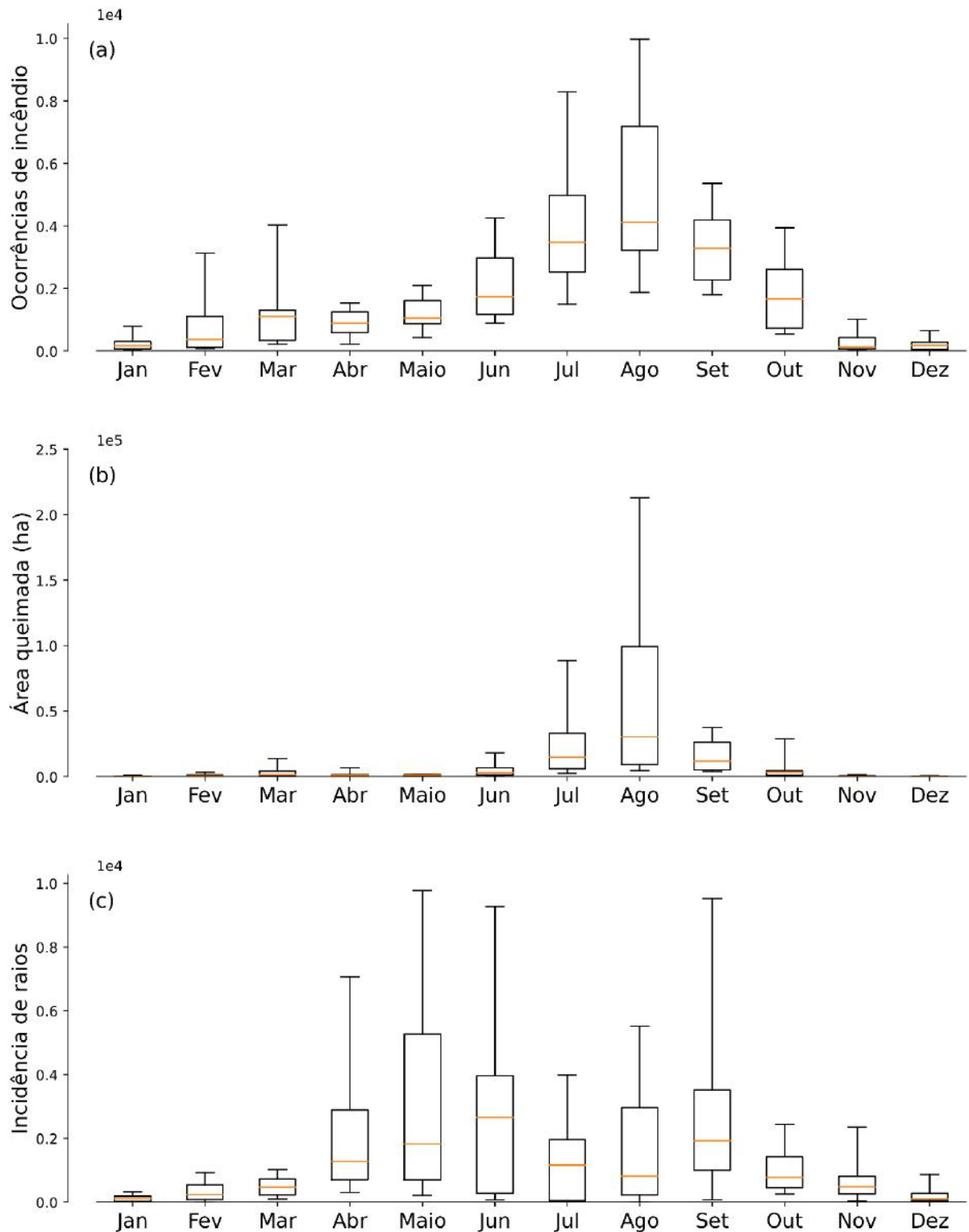
O intervalo temporal entre os incêndios catalogados e a sua detecção pelo sensor MODIS é menor do que 12 horas para a maioria das ocorrências. Adicionalmente, as incertezas temporais de um fogo ativo aumentam quanto maior a área queimada, alcançando 48 horas para incêndios da ordem de  $10^4$  ha ou maiores (BENALI et al., 2016). Considerando este fator, em adição ao critério de assimilação espacial, nós consideramos que um MODIS-LIAF está associado a um ICNF-LIF ou ICNF-PCLIF se ele foi também detectado entre a data e hora de alerta da ocorrência e dois dias anteriores.

Finalmente, outros MODIS-LIAF na vizinhança de um já associado a uma ocorrência natural também são indicados como tal baseados nos mesmos critérios de assimilação espacial e temporal, isto é, se eles se encontram a até 2 km de distância um do outro e possuem uma diferença de tempo na detecção menor do que dois dias.

## 4.5 RESULTADOS

### 4.5.1 Climatologia de raios e regime de fogo

A sazonalidade do fogo inferida da base de dados do ICNF mostra que o regime de fogo em Portugal ocorre principalmente de junho a outubro, com um pico em agosto, quando a área queimada atinge valores médios anuais da ordem de  $10^4$  ha ou superior (Figura 12a, b). Um pico secundário em março pode ser notado em ambas as séries temporais de ocorrências de incêndio e área queimada total, frequentemente apresentando valores superiores a 1 000 ha por ano, que podem estar associados exclusivamente a queima em pastagens e incêndios por negligência (Ganteaume et al., 2013). Por outro lado, um número mínimo de ocorrências de incêndio também é observado de novembro a janeiro, correspondendo ao inverno boreal. A frequência de raios também é mínima nestes meses, e mesmo que durante os meses do verão boreal (junho a agosto) haja uma frequência significativa de raios NS, os maiores valores são observados ao final da primavera (abril a maio) e outono boreais (setembro a novembro), particularmente em setembro (Figura 12c).

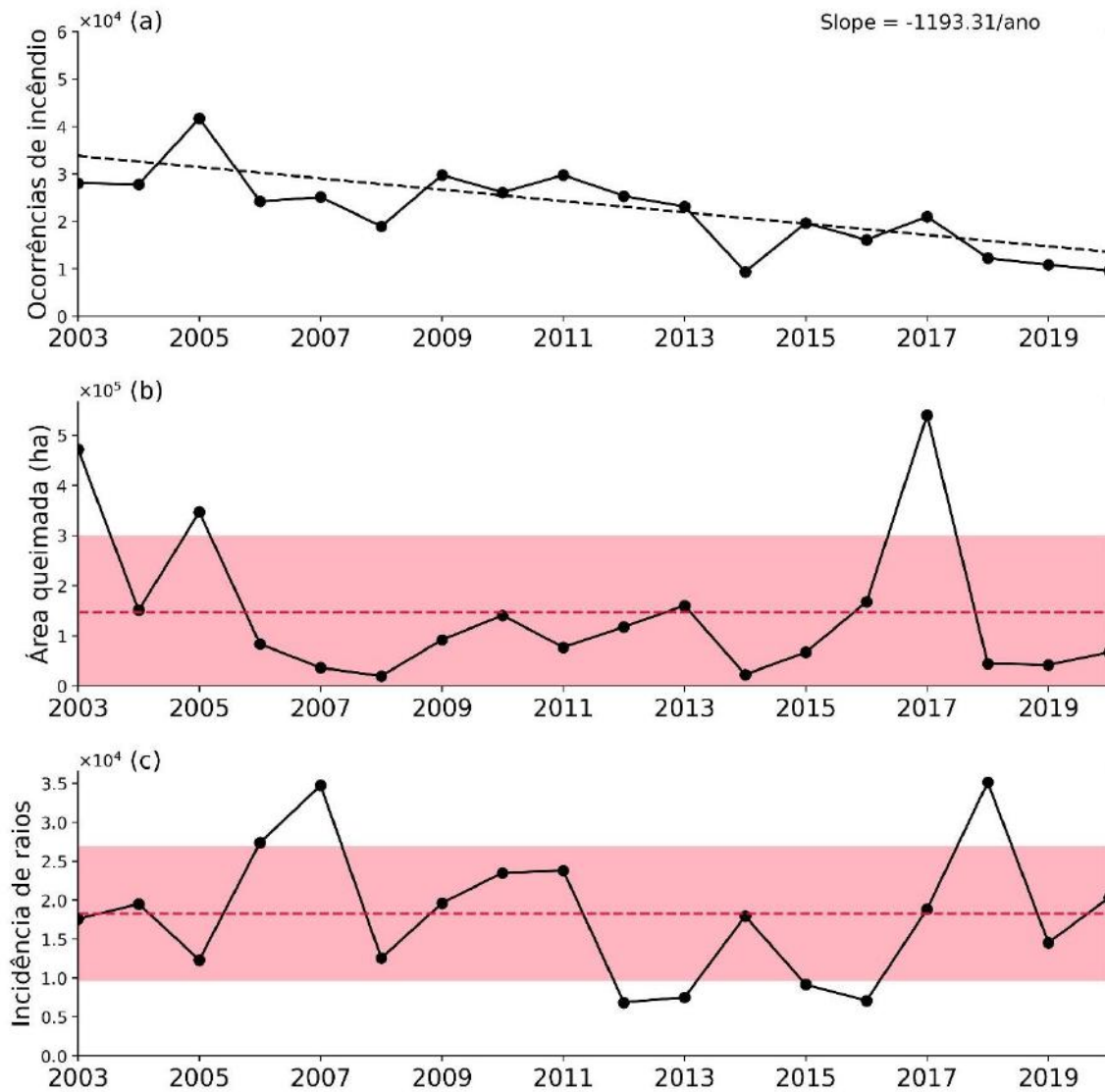


**Figura 12.** Ciclo anual do (a) número de ocorrências de incêndio em toda a base de dados do ICNF, (b) correspondente área queimada total e (c) incidência de raios NS em Portugal, entre 2003 e 2020. Linhas laranjas em cada boxplot representam a mediana, enquanto os limites superiores e inferiores denotam o percentil 95 e 5, respectivamente.



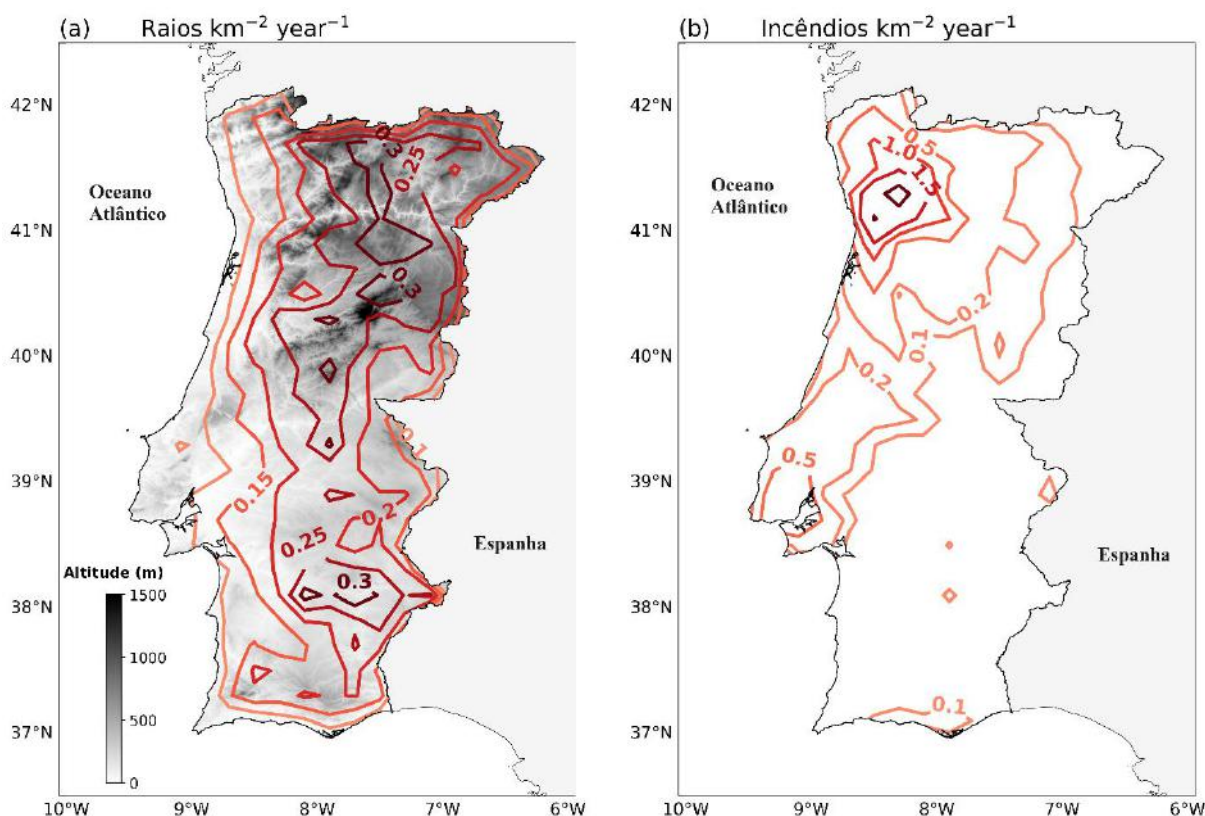
A Figura 13a denota a variabilidade interanual do número de ocorrências de incêndio em Portugal. Mesmo que um período relativamente pequeno de 18 anos esteja sendo considerado, a série temporal do número de ocorrências exibe uma tendência negativa de 1 193 incêndios por ano em Portugal, de acordo com o teste de Mann-Kendall (p-value  $\ll 0,001$ ). A área queimada total manteve-se próximo ou abaixo da média anual (147 000 ha) na maioria dos anos, exceto nas temporadas de incêndio atípicas de 2003, 2005 e 2017 (Figura 13b).

A variabilidade interanual de raios é mostrada na Figura 13c. A média anual de descargas atmosféricas NS entre 2003 e 2020 em todo o território foi de  $18\,251 \pm 8\,551$  raios por ano. Anos com anomalia positiva de incidência de raios foram 2006, 2007 e 2018, enquanto os anos com anomalia negativa foram 2012, 2013, 2015 e 2016. Nota-se que os anos 2005 e 2017, que apresentam anomalias positivas de área queimada, foram sucedidos por um ou mais anos com valores significativamente reduzidos de área queimada total e anomalias positivas de incidência de raios.



**Figura 13.** Variabilidade interanual do (a) número total de ocorrência de incêndios de toda a base de dados do ICNF, (b) correspondente área queimada total e (c) incidência de raios NS sobre o território de Portugal continental, entre 2003 e 2020. As linhas pontilhadas e as áreas sombreadas em vermelho indicam a média anual e o desvio padrão.

A densidade anual de raios NS (raios km<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>) varia de 0,4 na região central (ao longo de 38°N) e ao norte de Portugal, que caracterizam dois máximos de densidade de raios associados a cadeias de montanhas (RODRIGUES; MENDES; CATALAO, 2010), a uma quase ausência de raios nas costas sul e oeste de Portugal, valores mínimos também são encontrados em 39°N e 9°W (Figura 14). A respeito da distribuição dos incêndios, independente da sua causa, grande parte deles foram reportados a noroeste de Portugal, e um número significativo também pode ser observado ao longo da costa oeste, ao norte de 38.5°N, áreas com baixa altitude e alta densidade populacional (MOREIRA et al., 2010).



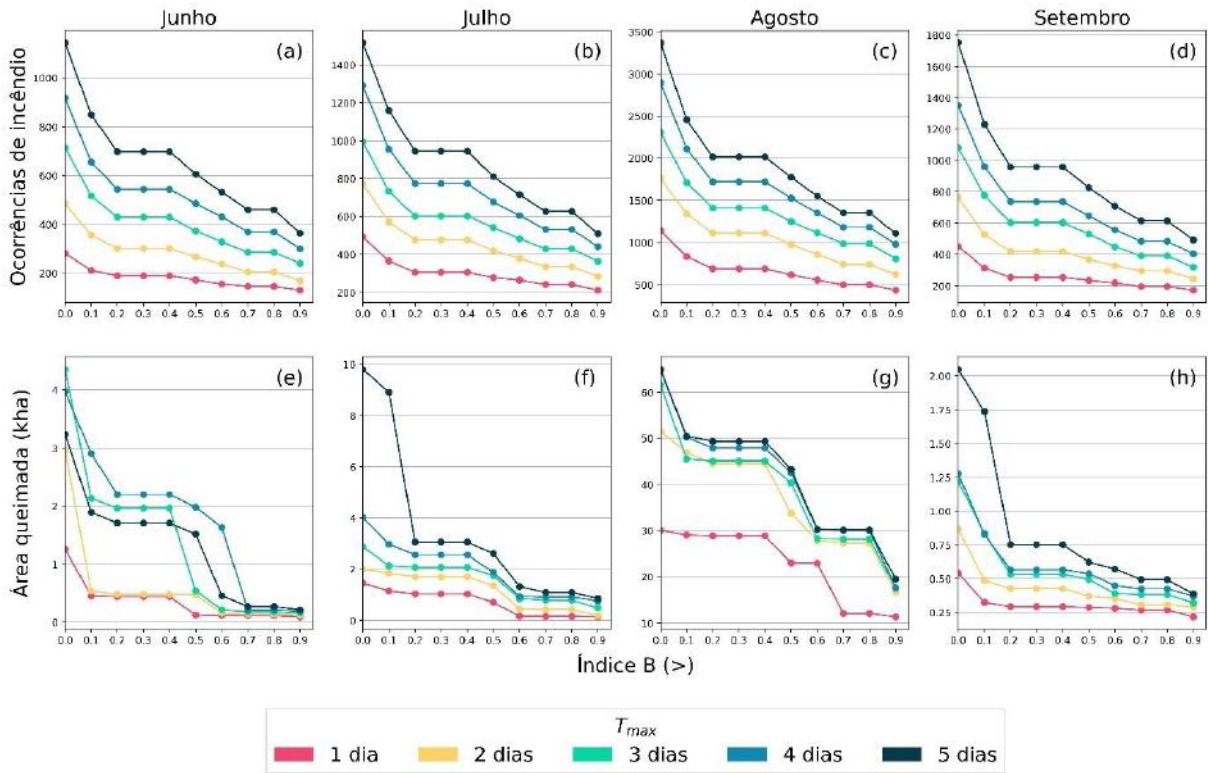
**Figura 14.** Distribuição espacial de (a) raios nuvem-solo e (b) ocorrências de incêndios, dados em total de observações  $\text{km}^{-2}$  por ano sobre uma grade regular de  $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ , em Portugal. Dados de elevação foram obtidos do *Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global*, fornecido pelo centro USGS EROS (USGS, 2017).

#### 4.5.2 Calibração dos limiares

A análise de sensibilidade e a avaliação da performance da metodologia foi conduzida considerando apenas os meses de junho a setembro, que compreendem 99,3% da área ardida por causas naturais conforme verificado a partir do subconjunto ‘validação’. O valor do parâmetro  $T_{\max}$  foi alternado de 1 dia para cinco dias, e os resultados aplicando diversas combinações dos limiares  $D_{\max}$ ,  $T_{\max}$  e índice B foram avaliados.

Na análise de sensibilidade (Figura 15), o comportamento geral das curvas permanece o mesmo em diferentes meses. Contudo, o número de ocorrências de incêndio do subconjunto ‘causa-desconhecida’ classificados como de origem natural tende a convergir em direção a um valor em comum ao considerar índices B superiores a 0.7 para diferentes combinações de  $T_{\max}$ . A área queimada total destas ocorrências foi mais sensível a mudanças nos limiares durante o mês de agosto, variando de 30 000 ha ( $B > 0,6$ ) para cerca de 18 000 ha ( $B > 0,9$ ). Variando-se

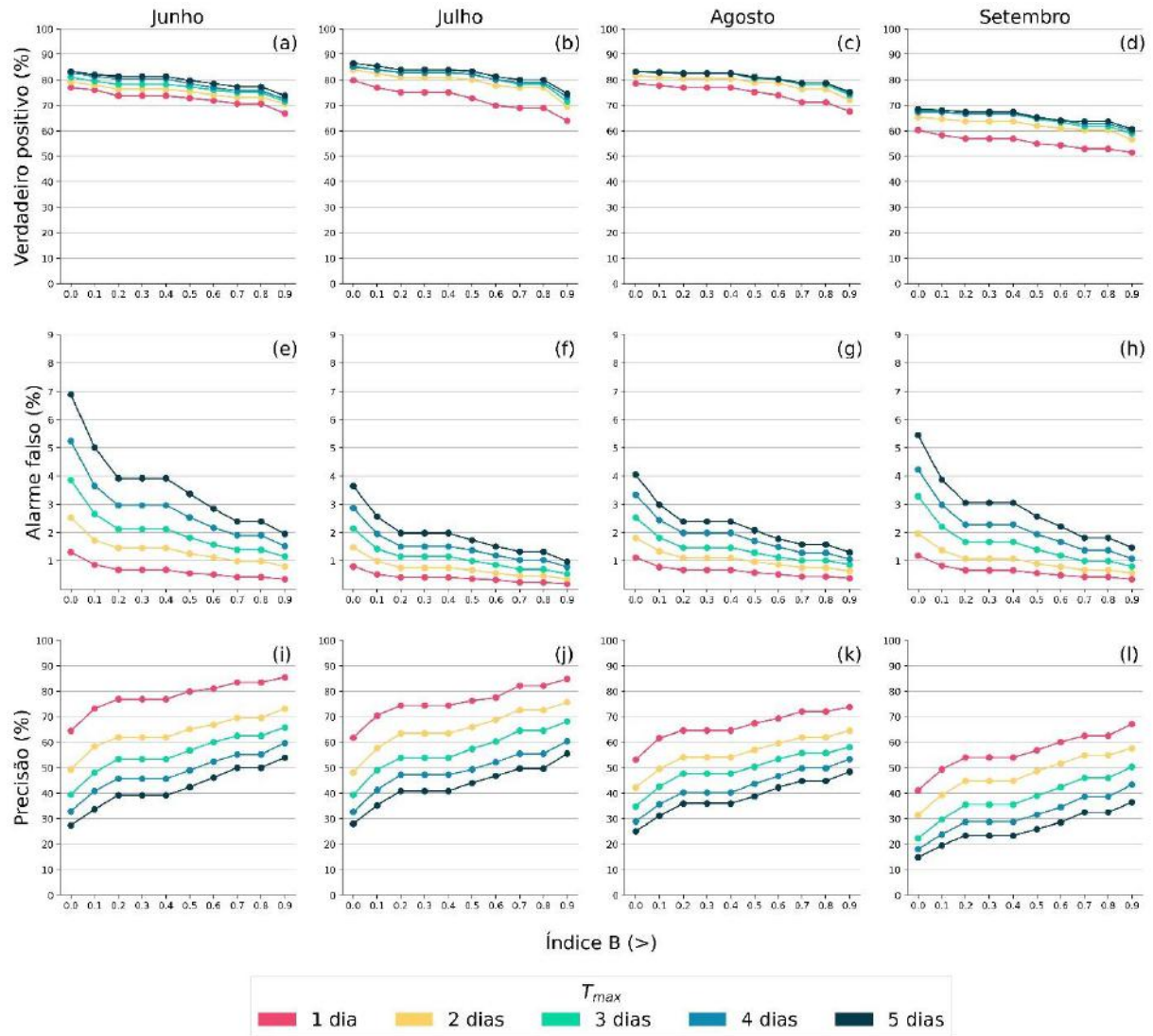
$T_{max}$  entre três e cinco dias produz efeitos desprezíveis na área queimada por causas naturais, em contraste com o uso de um ou dois dias como limiar temporal.



**Figura 15.** Resultados da análise de sensibilidade aplicando  $D_{max} = 10$  km em combinação com diferentes valores de  $T_{max}$  e índice B. Quadros (a) a (d) exibem o número de ocorrências de incêndio classificados como de origem natural do subconjunto ‘causa-desconhecida’, enquanto os quadros (e) a (h) exibem a correspondente área queimada total, para diferentes meses.

Com relação a avaliação da performance (Figura 16), até 85% das ocorrências de incêndios naturais no subconjunto ‘validação’ apresentaram pelo menos uma descarga atmosférica em sua vizinhança, dado um  $T_{max}$  de até três dias. No entanto, aumentar este limiar temporal ainda mais produz um pequeno aumento na taxa de verdadeiro positivo as custas da precisão, resultando em um considerável número de incêndios de origem antropogênica sendo classificados erroneamente como causados por raio. A taxa de alarme falso variou entre 0,5% a 3% ao considerar combinações de índices B superior a 0.6, sendo maior em junho e setembro. Os resultados desta avaliação, aplicando 0,7 ou 0,8 como índice B, não produzem mudanças significativas, enquanto aumentar este valor para 0,9 fornece um aumento de aproximadamente 3% na precisão e reduz a taxa de alarme falso em 0,4%, mas também reduz a taxa de verdadeiro positivo em cerca de 5% durante julho, e 3% nos outros meses.

Desta forma, optou-se por utilizar nas análises subsequentes uma combinação de  $D_{\max} = 10$  km,  $T_{\max} = 3$  dias e índice B superior a 0,9 para identificar os eventos de fogo causado mais prováveis a terem sido causados por raio.

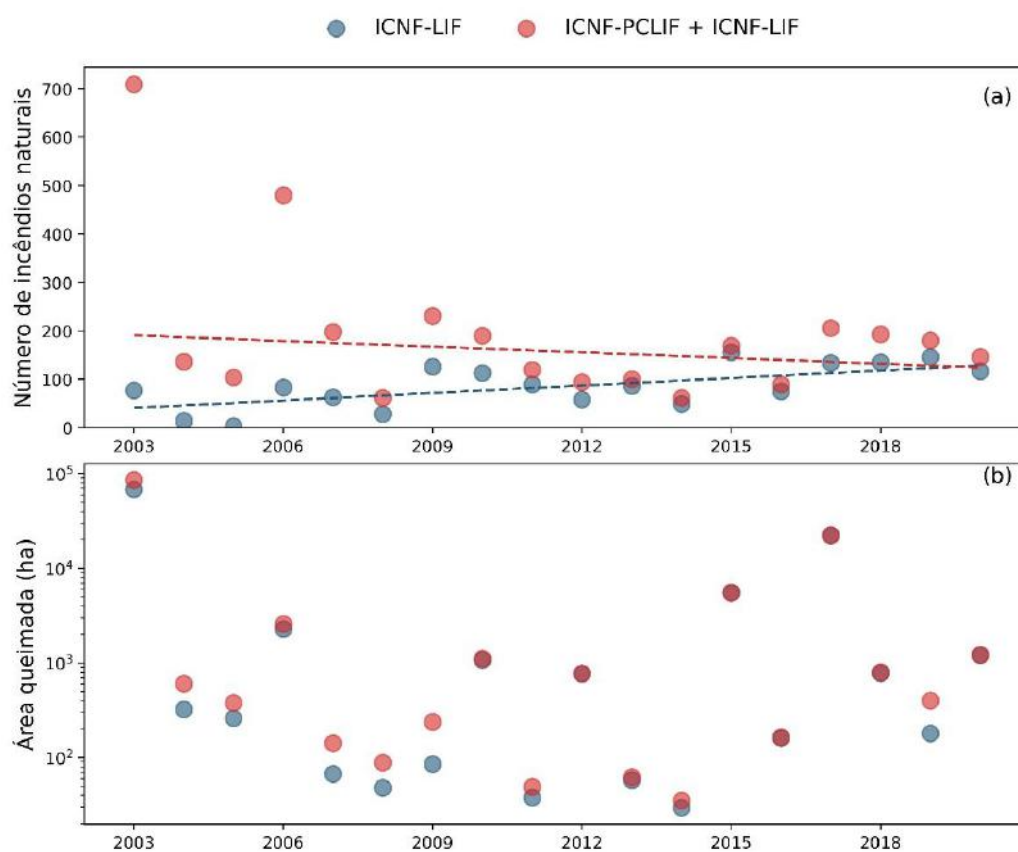


**Figura 16.** Resultados da verificação da performance da metodologia, aplicando  $D_{\max} = 10$  km em combinação com diferentes valores de  $T_{\max}$  e índice B a partir das ocorrências de incêndio no subconjunto ‘validação’. A taxa de verdadeiro positivo é exibida nos quadros (a) a (d), taxa de alarme falso nos quadros (e) a (h) e a precisão nos quadros (i) a (l), para diferentes meses.

#### 4.5.3 Climatologia de incêndios naturais

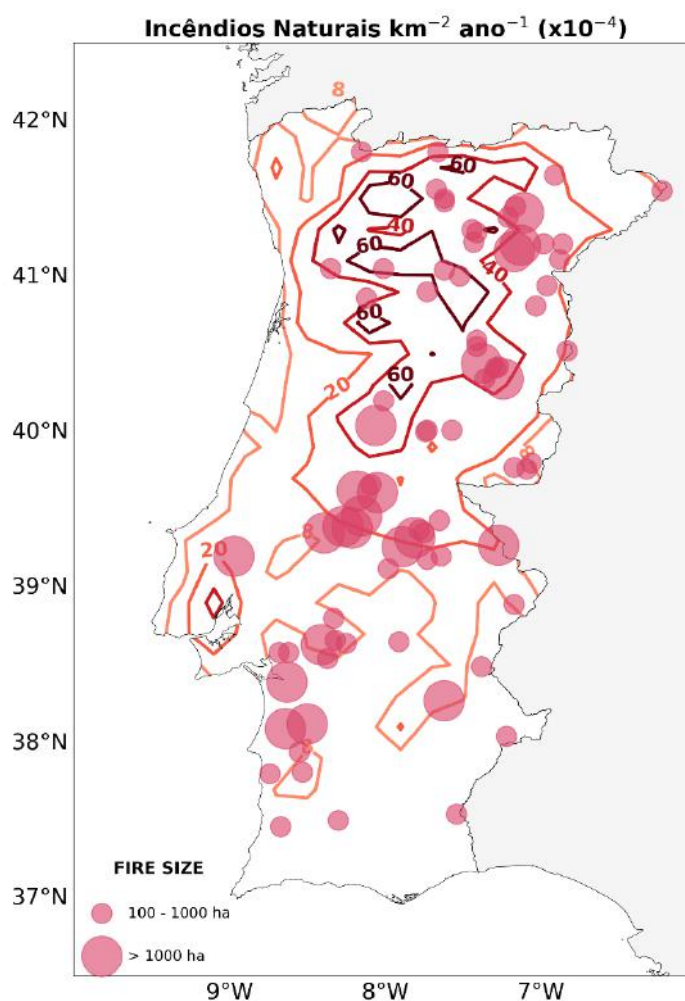
No total, 1 552 ocorrências de incêndio foram identificadas como causadas por raio pelo ICNF em sua base de dados oficial, correspondendo ao ICNF-LIF, enquanto aquelas classificadas como natural por esta metodologia (ICNF-PCLIF) totalizam 1 917 ocorrências. Assim como mencionado anteriormente, a maioria das ocorrências de incêndio no início do

século XXI na base de dados do ICNF não possuem uma causa atribuída, por consequência, até 2009 houve um número maior de ICNF-PCLIF em comparação com ICNF-LIF, principalmente nos anos 2003, 2005 e 2006 (Figura 17a). Esta questão também foi abordada em Fernandes et al. (2021), que declarou que a verdadeira área consumida por incêndios induzidos por raios na temporada de incêndios de 2003 pode ser consideravelmente superior àquela reportada pelo ICNF (ICNF, 2014), devido ao grande número de ocorrências de incêndio sem causa atribuída. Além disso, o conjunto original ICNF-LIF apresenta um crescente número de incêndios naturais ao longo dos anos, enquanto nenhuma tendência significativa foi encontrada ao considerar a união entre os conjuntos ICNF-LIF e ICNF-PCLIF, sugerindo que a tendência positiva no conjunto original seja em razão do crescente número de incêndios investigados (Figura 11).



**Figura 17.** Variabilidade interanual do (a) número de incêndios naturais de acordo com o conjunto ICNF-LIF e a união entre os conjuntos ICNF-LIF e ICNF-PCLIF, e (b) correspondente área queimada total. A linha pontilhada azul denota a tendência anual do número de ocorrências no conjunto ICNF-LIF (p-value = 0,012), enquanto a linha pontilhada vermelha denota a tendência para a união ICNF-LIF + ICNF-PCLIF (p-value = 0,343). Os testes de tendência foram conduzidos de acordo com o teste de Mann-Kendall.

A área queimada total do conjunto ICNF-LIF é muito próxima da área total queimada considerando a união entre ICNF-LIF e ICNF-PCLIF (Figura 17b), sugerindo que as ocorrências de incêndio classificadas como naturais no conjunto ICNF-PCLIF são, em sua maioria, incêndios pequenos. A Figura 18 denota a distribuição espacial de incêndios naturais em uma grade regular de  $0,2^\circ$  por  $0,2^\circ$ , de acordo com a união entre os conjuntos ICNF-PCLIF e ICNF-LIF. Incêndios induzidos por raios ocorrem com maior frequência nas regiões montanhosas, ao norte de Portugal, no entanto as ocorrências com maior área queimada foram reportadas nas regiões central e nordeste, enquanto as ocorrências destacadas a sudoeste ocorreram exclusivamente durante a temporada de incêndios em 2003.



**Figura 18.** Distribuição espacial de incêndios naturais em uma grade regular de  $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ , dado em unidades de total de ocorrências por  $\text{km}^2$  por ano, em Portugal entre 2003 e 2020. Os valores dos contornos vermelhos estão multiplicados por  $10^4$ . A localização de incêndios naturais maiores do que 100 hectares em todo o período de estudo (de acordo com a união ICNF-PCLIF + ICNF-LIF) é destacada na figura.

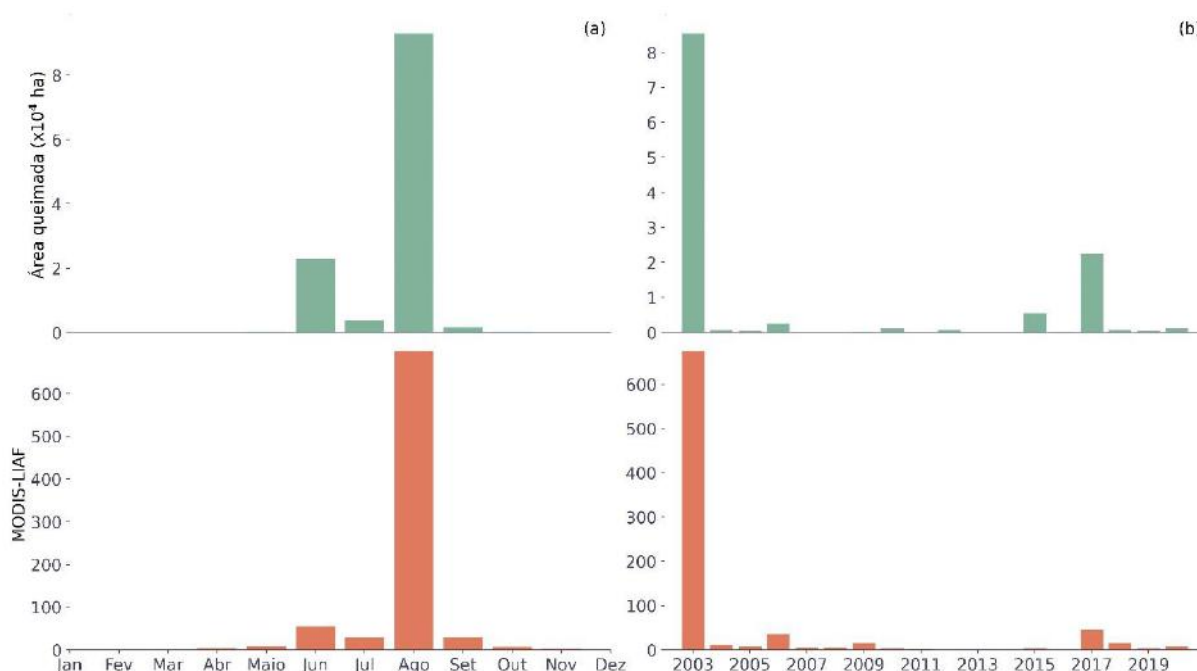
Mesmo quando a união entre os dois conjuntos (ICNF-LIF e ICNF-PCLIF) é considerada, eles apenas representam 1% de todas as ocorrências de incêndio reportadas durante o período de 18 anos (Tabela 4), correspondendo a metade do valor estimado pelo ICNF e publicado no último relatório sobre causas de incêndio em Portugal (ICNF, 2014). A respeito da área queimada total devido a incêndios naturais, também foi estimado uma porcentagem menor, correspondendo a 4,6 da área total queimada no período considerado, em comparação ao apresentado no relatório sobre causas de incêndio, equivalente a 5,6%. Visto que este relatório somente considera os incêndios com causa conhecida e reportados até 2013, os resultados deste trabalho, apesar de serem menores em porcentagem, devem refletir a verdadeira relevância de incêndios naturais no país. Apesar disso, os raios desempenharam um papel significativo como fonte de ignição em 2015, um ano com anomalias negativas de incidência de raios e área queimada, em 2017 e especialmente em 2003, sendo responsável por aproximadamente 8,3%, 4,2% e 18,1% da área total queimada nestes anos, respectivamente. Além disso, entre a fração de incêndios com causa conhecida, a ignição natural por raios parece ter maior relevância conforme a categoria do tamanho do incêndio aumenta (Tabela 3).



**Tabela 4.** Contribuição anual dos incêndios naturais (ICNF-LIF + ICNF-PCLIF) para o número total de ocorrências e área queimada, em comparação a toda a base de dados do ICNF.

Ano	Porcentagem relativa a cada ano (%)	
	Ocorrências	Área Queimada
<b>2003</b>	2,52	18,12
<b>2004</b>	0,49	0,40
<b>2005</b>	0,25	0,10
<b>2006</b>	1,98	3,08
<b>2007</b>	0,79	0,40
<b>2008</b>	0,33	0,44
<b>2009</b>	0,77	0,26
<b>2010</b>	0,72	0,79
<b>2011</b>	0,40	0,06
<b>2012</b>	0,37	0,65
<b>2013</b>	0,43	0,04
<b>2014</b>	0,66	0,16
<b>2015</b>	0,86	8,25
<b>2016</b>	0,56	0,10
<b>2017</b>	0,98	4,15
<b>2018</b>	1,57	1,78
<b>2019</b>	1,66	0,95
<b>2020</b>	1,52	1,82
<b>TOTAL</b>	<b>0,87</b>	<b>4,6</b>

Em Portugal, incêndios naturais ocorrem principalmente entre junho e setembro, sendo agosto o mês mais crucial uma vez que ele contabiliza por 75% da área total queimada por causas naturais. Os fogos ativos presentes no conjunto MODIS-LIAF possuem uma sazonalidade semelhante a observada no conjunto de ocorrências de incêndios naturais, e, portanto, foram capazes de reproduzi-la com bom desempenho, com exceção a subestimação observada em junho.



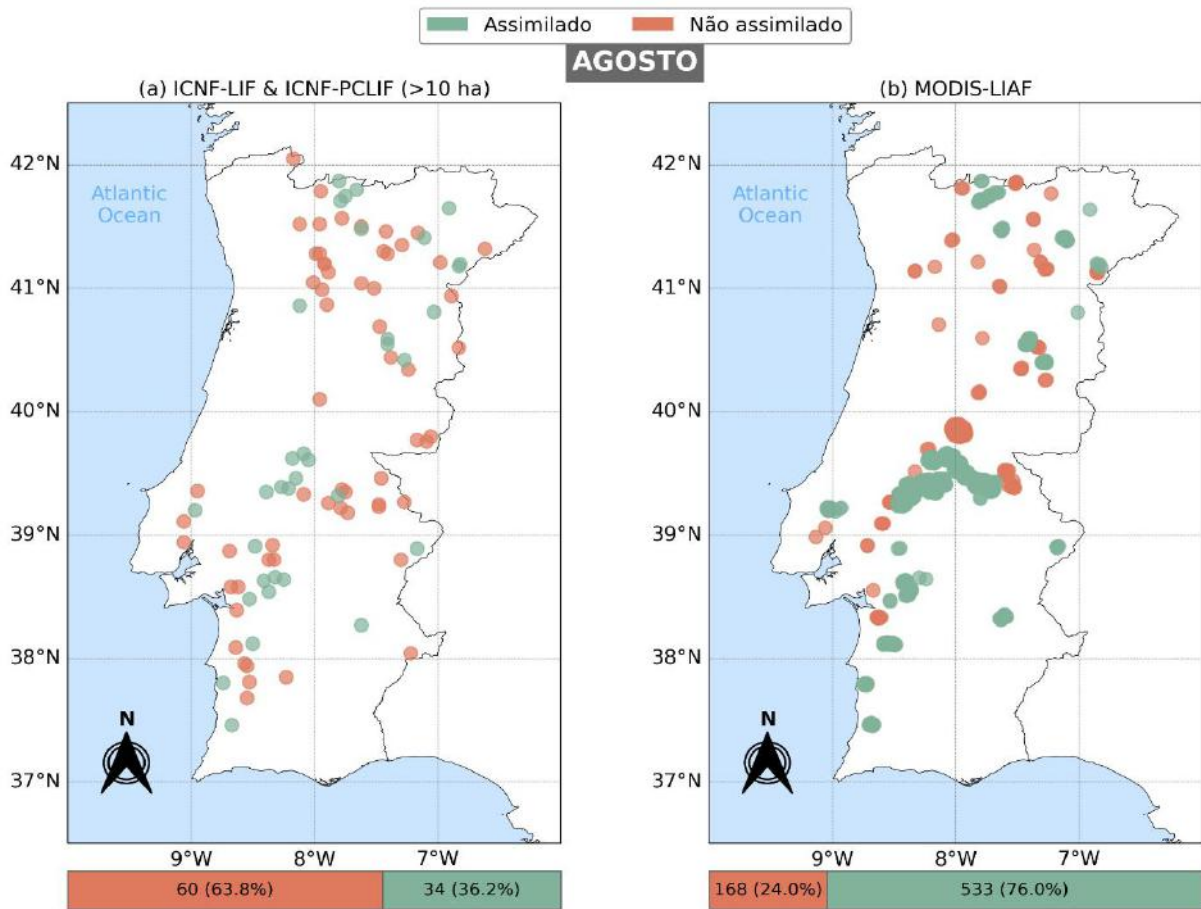
**Figura 19.** (a) Sazonalidade e (b) variabilidade interanual da área queimada por incêndios naturais (ICNF-PCLIF e ICNF-LIF) e número total de MODIS-LIAF (painéis inferiores).

#### 4.5.4 Desempenho do produto de fogo ativo

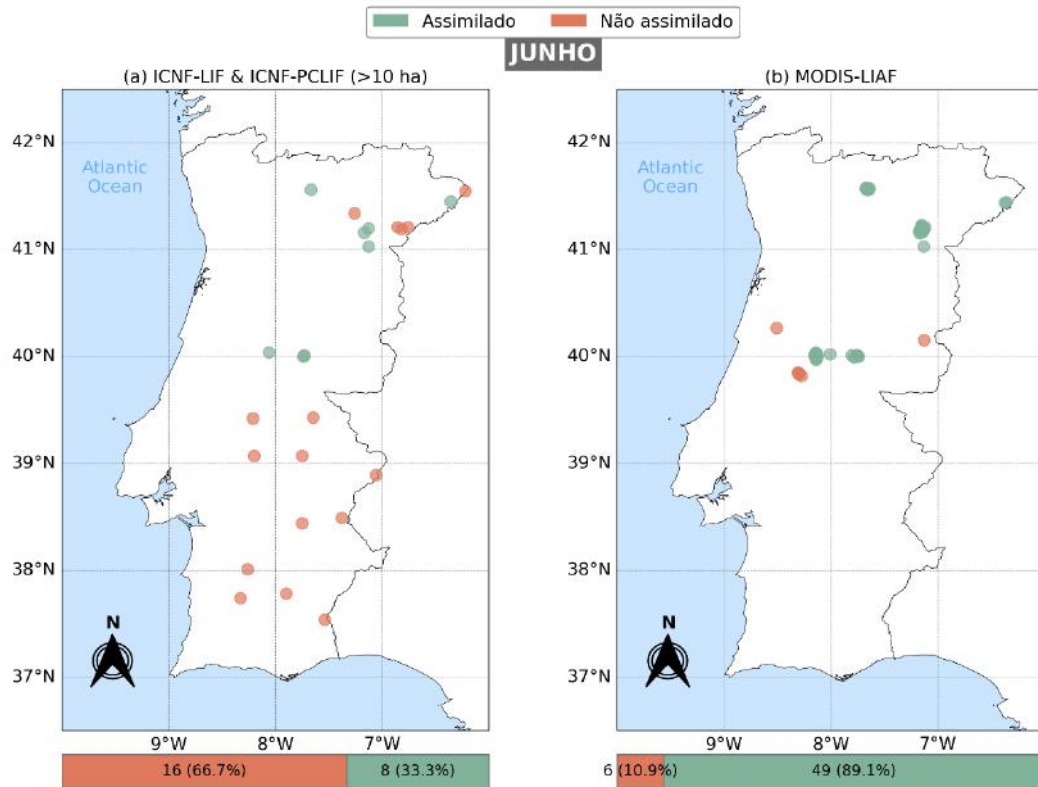
Um dos fatores que mais afetam o erro de omissão relacionado a detecção de focos de calor a partir do produto do sensor MODIS (MCD14ML) é o tamanho do incêndio. Em particular sobre Portugal, isto se torna desafiador pois a maioria dos incêndios, independente da sua causa, queimam uma área inferior a 10 ha (Tabela 3). Levando isso em consideração, a avaliação da habilidade do produto de fogo ativo do MODIS em fornecer dados alternativos para identificação de incêndios naturais foi conduzida considerando apenas os incêndios induzidos por raios (ICNF-PCLIF e ICNF-LIF) com área queimada superior a 10 ha. A comparação entre os eventos de fogo ativo e ocorrências de incêndio natural assimiladas ou não, é descrita a seguir.

Durante agosto, um número relativamente alto de incêndios naturais pode ser observado a sudoeste, nordeste e na região central de Portugal. A maioria deles ocorreram durante a temporada de incêndios em 2003, que foi caracterizada por grandes anomalias de variáveis meteorológicas em superfície, favorecendo a ignição e propagação de incêndios e resultando em ocorrências com grande área queimada (TRIGO et al., 2006). De acordo com a Figura 20, 34 de 94 incêndios naturais foram assignados a um ou mais MODIS-LIAF, enquanto 76% dos focos de calor no conjunto MODIS-LIAF foram classificados corretamente como de origem natural. Esta porcentagem pode ser interpretada como a precisão da metodologia de classificação da causa de eventos de fogo, ao usar dados do MODIS. Desconsiderar os incêndios de 2003 resulta em uma performance menor, uma vez que somente 5 de 17 incêndios naturais restantes foram assignados, destacando o impacto do tamanho do incêndio na taxa de detecção do MODIS, e posteriormente na identificação de focos de calor relacionados a raios.

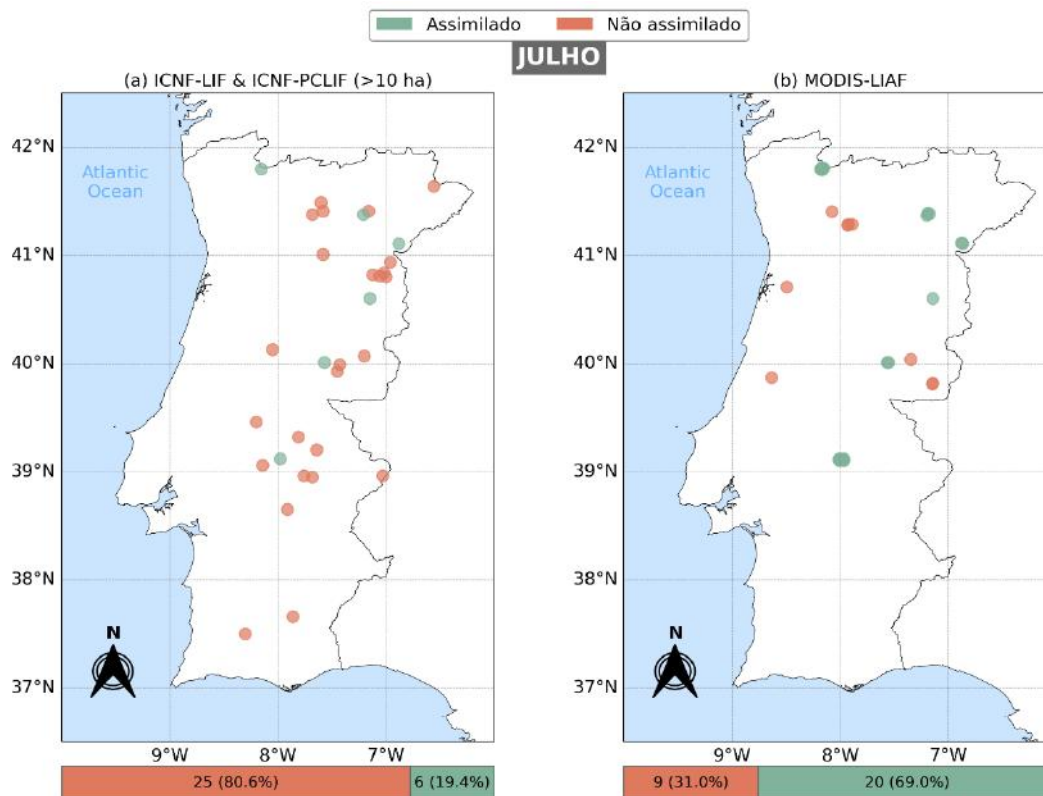
Durante os meses de junho, 55 MODIS-LIAF foram detectados ao longo da latitude 40°N e na região nordeste de Portugal (Figura 21), a maioria deles assignados a uma ocorrência de incêndio natural e, portanto, resultando em cerca de 89% de precisão. Mesmo assim, uma quantidade significativa de incêndios naturais não foi identificada, especialmente ao sul de 40°N. A precisão é reduzida a 69% e 59% nos meses de julho (Figura 22) e setembro (Figura 23), respectivamente, quando valores mínimos de área queimada devido a incêndios naturais são observados. A maioria dos incêndios naturais maiores que 10 ha reportados nos meses analisados não foi assignada a qualquer MODIS-LIAF.



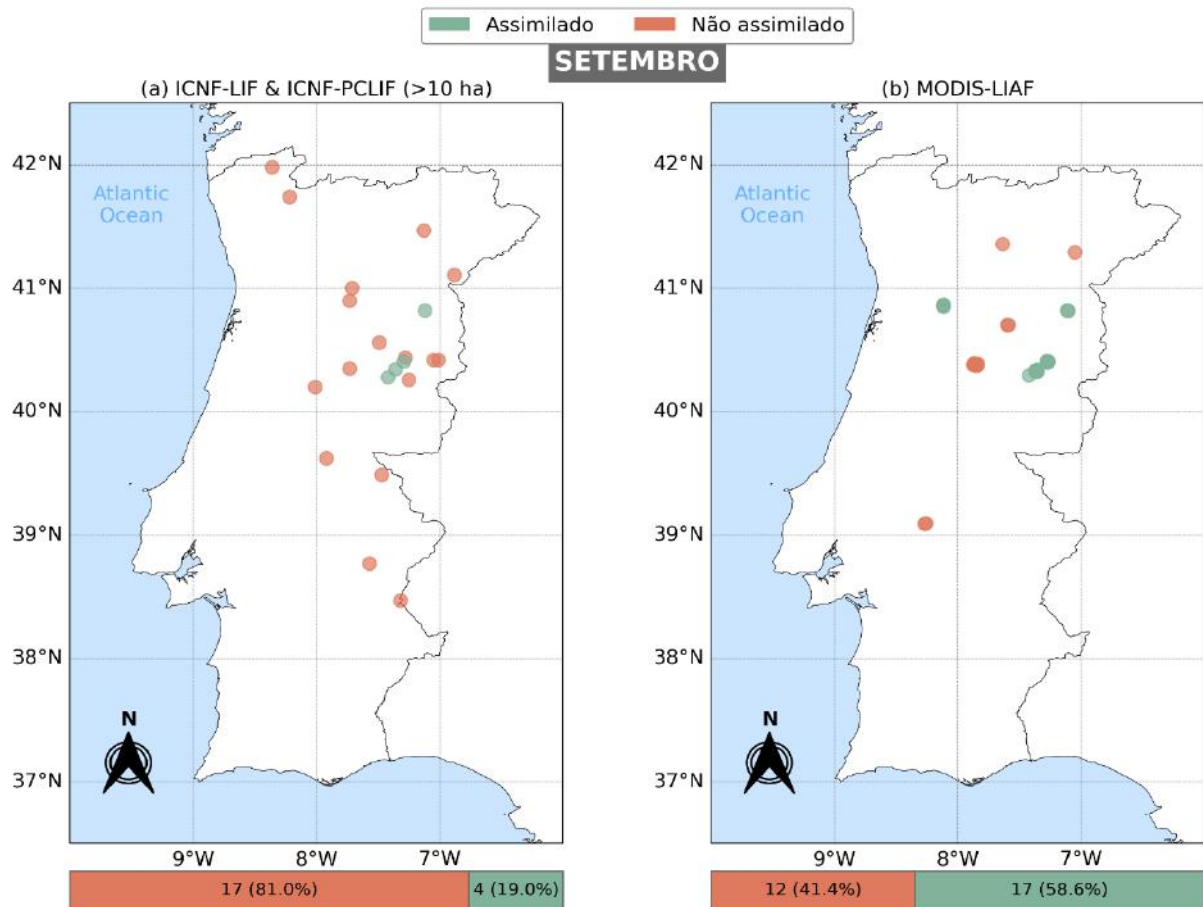
**Figura 20.** Comparação entre a distribuição espacial de (a) ocorrências de incêndio natural (ICNF-PCLIF e ICNF-LIF) maiores que 10 ha, e (b) MODIS-LIAF, para o mês de agosto. MODIS-LIAF não assimilados podem ser interpretados como falso positivos, portanto, a porcentagem dentro da barra inferior verde em (b) denota a precisão, enquanto a barra verde em (a) denota a taxa de verdadeiro positivo para a metodologia, ao utilizar dados do MODIS.



**Figura 21.** Idêntica à Figura 20, porém com relação ao mês de julho.



**Figura 22.** Idêntica à Figura 20, porém com relação ao mês de junho.



**Figura 23.** Idêntica à Figura 20, porém com relação ao mês de setembro.

#### 4.6 DISCUSSÃO

Portugal situa-se em uma região de clima Mediterrâneo, caracterizado por um inverno e primavera amenos e chuvosos que favorecem o crescimento da vegetação, enquanto verões quentes e secos promovem estresse térmico e hídrico na matéria orgânica (CALHEIROS et al., 2022). Além disso, as tempestades de verão não são frequentes em Portugal, ocorrendo ocasionalmente como um resultado do aquecimento diurno associado com baixas térmicas e geração de correntes ascendentes por efeito orográfico ao nordeste de Portugal onde estão localizadas cadeias montanhosas. Contudo, durante a primavera e outono, em adição a estes fatores, outros padrões de circulação podem contribuir para maior incidência de raios observada (RAMOS et al., 2011).

De acordo com o último relatório publicado pelo ICNF, apenas 1,5% dos incêndios relatados em Portugal são induzidos por raios (ICNF, 2014). No entanto, mesmo que apenas uma pequena fração dos incêndios tenham origem natural, a grande quantidade de ocorrências com causa desconhecida no início do século XXI sugere que maiores investigações são

necessárias a fim de entender a real relevância das descargas atmosféricas para a ignição de incêndios no país.

Os resultados apresentados nesta seção estão de acordo com valores identificados para outras áreas mediterrâneas (CASTEDO-DORADO et al., 2011; GANTEAUME et al., 2013; VAZQUEZ; MORENO, 1998), mas são consideravelmente menores do que aqueles identificados em outras áreas da Europa (LARJAVAARA; PENNANEN; TUOMI, 2005; MÜLLER et al., 2013) e América do Norte (ABATZOGLOU et al., 2016). Foi estimado que, em geral, as ignições por raio são responsáveis por cerca de 1% de todas as ocorrências de incêndio em Portugal, similar aos resultados de Fernandes et al. (2021). Com relação a área queimada estimada devido a incêndios naturais, neste trabalho foi estimado um valor equivalente a 4,6% do total entre 2003 e 2020. Apesar deste ser um valor menor do que o encontrado na última publicação do ICNF sobre causas de incêndio e do que o citado em Fernandes et al. (2021), é importante destacar que cerca de metades das ocorrências de incêndio entre 2003 e 2013 não possuem uma causa atribuída, portanto estes resultados devem fornecer um olhar mais atualizado e preciso sobre a verdadeira relevância de incêndios naturais para o regime de fogo no país. Além disso, destaca-se também a significativa contribuição dos raios para a temporada de incêndio em 2015, e especialmente em 2003 e 2017, sugerindo que, quando em conjunto com outros eventos compostos como condições de seca e ondas de calor, descargas atmosféricas podem causar grandes eventos de fogo.

A maioria dos incêndios naturais ocorreram nas cadeias montanhosas de Portugal, localizadas ao norte, similar ao encontrado por Müller et al. (2013) e Conedera et al. (2006) em outras regiões da Europa, que por sua vez está relacionado ao desenvolvimento de nuvens convectivas devido a processos orográficos (DIJKSTRA et al., 2022; RODRIGUES; MENDES; CATALAO, 2010). Além disso, entre as ocorrências com causa conhecida, a relevância dos incêndios naturais em comparação a outras causas aumenta quanto maior a categoria da área queimada. Como consequência de sua maior frequência em áreas remotas, a supressão inicial do incêndio pode ser mais lenta, assim contribuindo para a sua maior extensão (FERNANDES et al., 2021).

As ignições por raio, em Portugal, ocorreram principalmente entre os meses de junho a setembro, sendo mais cruciais os meses julho e agosto, responsáveis por 76% e 18% da área queimada por causas naturais, respectivamente. Os dados de sensoriamento remoto utilizados foram capazes de reproduzir bem essa sazonalidade e a sua variação interanual, também foi

possível confirmar que a maioria dos focos de calor aqui classificados como de origem natural eram, de fato, relacionados a incêndios naturais. Contudo, eles representam apenas 20% a 35% dos incêndios naturais maiores que 10 hectares. Portanto, uma caracterização espacial desse fenômeno considerando apenas os focos de calor detectados pelo sensor MODIS não seria bem representativa da verdadeira distribuição espacial dos incêndios naturais, especialmente em regiões onde ocorrências individuais de incêndio frequentemente não atingem uma vasta extensão da área queimada, como o caso de Portugal. Para contornar esta limitação, deve se recorrer a produtos com resolução espacial mais refinada a fim de contabilizar o impacto de incêndios menores.

No contexto de mudanças climáticas, estudos recentes com foco nas regiões a oeste e sudeste dos EUA têm mostrado um aumento na severidade e no potencial de ignição dos raios, sob um clima mais quente e seco (FILL; DAVIS; CRANDALL, 2019; LI; MICKLEY; KAPLAN, 2021). No sudeste da Austrália, Canadell et al. (2021) destacou a tendência positiva na frequência de condições meteorológicas que favorecem a ocorrência e propagação do fogo, e também de outros fatores que beneficiam processos pyroconvectivos, em conjunto com um aumento na frequência de trovoadas secas em um período de 32 anos. Em Portugal, ao considerar apenas o número anual de incêndios naturais classificados pelo ICNF (ICNF-LIF), foi possível identificar uma tendência positiva no número de ocorrências, similar ao encontrado em Fernandes et al. (2021). No entanto, ao considerarmos também os incêndios classificados como naturais pela metodologia aplicada (ICNF-PCLIF), essa tendência desaparece, sugerindo que ela pode ser resultante da crescente taxa de incêndios investigados. De todo modo, ainda é necessário entender melhor os mecanismos locais que levam à ignição natural por raio em Portugal continental e ao redor do mundo a fim de avaliar os impactos das mudanças climáticas na frequência de incêndios naturais (PÉREZ-INVERNÓN et al., 2023).



## 5 CONCLUSÃO

A sazonalidade e a distribuição espacial dos incêndios naturais, assim como a sua contribuição para o regime de fogo, foram avaliadas em duas áreas de interesse, o Pantanal e Portugal continental. Em ambas as regiões, verificou-se que as porcentagens de casos de incêndios causados por raios são muito inferiores às causadas de forma antropogênica, seja com relação a área queimada total ou ao número de ocorrências.

No bioma brasileiro Pantanal, apesar deste fenômeno ser observado com maior frequência durante a primavera ao norte do bioma, ele é mais relevante para o regime de fogo durante o verão (dezembro a fevereiro), no pico da estação úmida, sendo responsável por metade das cicatrizes de incêndio detectadas e ocorrendo principalmente ao oeste do bioma. Por outro lado, durante o inverno do hemisfério sul, quando têm início o período seco, a contribuição da ignição por raio para o regime de fogo é desprezível. A análise neste bioma foi baseada exclusivamente em dados de sensoriamento remoto, e, portanto, deve ser interpretada como a contribuição da ignição natural para eventos de fogo com extensão de área queimada na ordem de 10 hectares ou superior, de acordo com a resolução espacial do produto utilizado. Desta forma, ainda se faz necessário avaliar o impacto de incêndios naturais de menor dimensão espacial para o regime de fogo no Pantanal.

Em Portugal continental, foi estimado que os incêndios induzidos por raios têm uma pequena relevância para o regime de fogo no período de 18 anos estudado, apresentando porcentagens inferiores as indicadas por estudos e relatórios publicados anteriormente, que consideram apenas a sua relevância dentre o grupo de ocorrências com causa conhecida. Tais eventos ocorrem com maior frequência entre os meses de julho a setembro, correspondendo ao verão do hemisfério norte, na região central e ao norte de Portugal onde se localizam as cadeias montanhosas. A sua maior frequência em áreas consideradas remotas contribui para detecção tardia e demora até a supressão inicial do fogo, que por sua vez resulta em uma crescente relevância da ignição natural como causa dentre os incêndios com maior área queimada. Além disso, sugere-se que eventos conjuntos de secas e ondas de calor, como os observados em 2003 e 2017, possam agravar os impactos de um incêndio natural.

Um valor adequado para o índice B, utilizado para filtrar os eventos de fogo mais prováveis a terem sido causados por raio, pode minimizar erros de omissão ao incluir tantos eventos de incêndios verdadeiramente causados por raio quanto possível, e minimizar erros de comissão ao reduzir o número de incêndios antropogênicos indicados erroneamente como

naturais. Idealmente, ele pode ser definido a partir de uma amostra de validação consistida de ocorrências catalogadas em campo, conforme foi feito para o caso de Portugal. No entanto, deve-se recorrer a outras metodologias quando esta informação se encontra ausente, como foi o caso do Pantanal, dificultando a definição de um limiar apropriado.

Os parâmetros  $T_{max}$  e  $D_{max}$ , por sua vez, podem ser definidos desde que haja uma boa compreensão sobre as incertezas espacial e temporal dos produtos utilizados, e um amplo conhecimento sobre a fase de sobrevivência do fogo na região de interesse. Por exemplo, é conhecido que ao redor do mundo os incêndios induzidos por raios que possuem *holdover times* curtos ocorrem com maior frequência, o que pode resultar em um  $T_{max}$  pequeno em conformidade com a resolução temporal dos produtos empregados. Além disso, os erros de omissão dependem tanto da taxa de detecção do produto de sensoriamento remoto, quanto da eficiência de detecção da rede de descargas atmosféricas, uma vez que se nenhum raio for detectado na vizinhança do evento de fogo, ele é descartado como candidato a ser de origem natural.

Apesar destes fatores, utilizando a vasta base de dados de ocorrências de incêndio catalogadas em Portugal, foi possível confirmar que a metodologia aplicada possui boa precisão ao classificar a causa de eventos de fogo em antropogênicas ou natural por raio, e que esta precisão é mantida mesmo utilizando dados de sensoriamento remoto, considerados uma fonte alternativa de informação em áreas onde dados in-situ são insuficientes ou indisponíveis. Além disso, esta metodologia pode vir a se beneficiar no futuro pela inclusão de novas variáveis no cálculo da probabilidade, como a precipitação, umidade do solo e outros fatores relacionados à eficiência de ignição do raio, em conjunto a pesquisas que visam uma melhor compreensão acerca dos mecanismos que regem a ignição por raio, principalmente em território brasileiro.

## 6 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

A pesquisa descrita nesse trabalho de conclusão de curso deu origem a outras publicações e atividades realizadas ao longo do seu desenvolvimento, são eles:

1. Artigo intitulado “Lightning patterns in the Pantanal: Untangling natural and anthropogenic-induced wildfires” (MENEZES et al., 2022), que descreve exclusivamente o caso de estudo no bioma Pantanal (apêndice A);
2. Artigo intitulado “A global database on holdover time of lightning-ignited wildfires” (MORIS et al., 2023), feito em colaboração com o pesquisador Jose V. Moris, da Universidade de Turin, na Itália (apêndice B).;
3. Atuação como palestrante no curso de “Capacitação em Monitoramento de Fogo por Satélite no Cerrado” realizado nos dias 22 e 23 de novembro de 2022 e no “Curso de Capacitação em Monitoramento de Fogo por Satélite no Pantanal” realizado entre 04 e 05 de novembro de 2021, ambos organizados pelo Laboratório de Aplicações em Satélite Ambientais;
4. Apresentação oral do trabalho intitulado “Identificação e caracterização de incêndios naturais no Pantanal” no XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, realizado no período entre 02 e 05 de abril de 2023, em Florianópolis, SC;
5. Apresentação em E-Poster do trabalho intitulado “Identification of lightning ignited wildfires in Brazil and Portugal, based on satellite data and catalog information”, durante a conferência “8th International Wildland Fire Conference” em Porto, Portugal, no período entre 16 e 19 de maio de 2023.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABATZOGLOU, J. T. et al. Controls on interannual variability in lightning-caused fire activity in the western US. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 4, p. 045005, 1 abr. 2016.

AMRAOUI, M.; DACAMARA, C. C.; PEREIRA, J. M. C. Detection and monitoring of African vegetation fires using MSG-SEVIRI imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 5, p. 1038–1052, maio 2010.

ANDELA, N. et al. **The Global Fire Atlas of individual fire size, duration, speed, and direction**. [s.l.] Biosphere – Biogeosciences, 5 set. 2018. Disponível em: <<https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2018-89/essd-2018-89.pdf>>. Acesso em: 4 set. 2023.

ANDERSON, K. A model to predict lightning-caused fire occurrences. **International Journal of Wildland Fire**, v. 11, n. 4, p. 163, 2002.

ARIAS, P. A. et al. Technical Summary. Em: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. 1. ed. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. p. 33–144.

BASTOS, A. et al. Modelling post-fire vegetation recovery in Portugal. **Biogeosciences**, v. 8, n. 12, p. 3593–3607, 12 dez. 2011.

BASTOS, A. et al. Analysing the spatio-temporal impacts of the 2003 and 2010 extreme heatwaves on plant productivity in Europe. **Biogeosciences**, v. 11, n. 13, p. 3421–3435, 1 jul. 2014.

BENALI, A. et al. Determining Fire Dates and Locating Ignition Points With Satellite Data. **Remote Sensing**, v. 8, n. 4, p. 326, 13 abr. 2016.

BOND, W. J.; WOODWARD, F. I.; MIDGLEY, G. F. The global distribution of ecosystems in a world without fire. **New Phytologist**, v. 165, n. 2, p. 525–538, fev. 2005.

BOWMAN, D. M. J. S. et al. Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 3, p. 1–6, 6 fev. 2017.

CALHEIROS, T. et al. Drivers of extreme burnt area in Portugal: fire weather and vegetation. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 22, n. 12, p. 4019–4037, 19 dez. 2022.

CALHEIROS, T.; PEREIRA, M. G.; NUNES, J. P. Assessing impacts of future climate change on extreme fire weather and pyro-regions in Iberian Peninsula. **Science of The Total Environment**, v. 754, p. 142233, 1 fev. 2021.

CANADELL, J. G. et al. Multi-decadal increase of forest burned area in Australia is linked to climate change. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 6921, 26 nov. 2021.

CASTEDO-DORADO, F. et al. Modelling the probability of lightning-induced forest fire occurrence in the province of León (NW Spain). **Forest Systems**, v. 20, n. 1, p. 95, 1 abr. 2011.

CATTAU, M. E. et al. Anthropogenic and lightning-started fires are becoming larger and more frequent over a longer season length in the U.S.A. **Global Ecology and Biogeography**, v. 29, n. 4, p. 668–681, abr. 2020.

CLARKE, H. et al. Developing and testing models of the drivers of anthropogenic and lightning-caused wildfire ignitions in south-eastern Australia. **Journal of Environmental Management**, v. 235, p. 34–41, abr. 2019.

CONEDERA, M. et al. Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problem. **Forest Ecology and Management**, v. 234, p. S68, nov. 2006.

COOGAN, S. C. P. et al. Seasonality and trends in human- and lightning-caused wildfires  $\geq 2$  ha in Canada, 1959–2018. **International Journal of Wildland Fire**, v. 29, n. 6, p. 473, 2020.

COUGHLAN, M.; MAGI, B.; DERR, K. A Global Analysis of Hunter-Gatherers, Broadcast Fire Use, and Lightning-Fire-Prone Landscapes. **Fire**, v. 1, n. 3, p. 41, 25 out. 2018.

COUTO, F. T. et al. Lightning modelling for the research of forest fire ignition in Portugal. **Atmospheric Research**, v. 242, p. 104993, 15 set. 2020.

CTI, C. T. I. **Análise e apuramento dos factos relativos aos incêndios que ocorreram em Pedrógão Grande, Castanheira de Pera, Ansião, Alvaiázere, Figueiró dos Vinhos, Arganil,**

**Góis, Penela, Pampilhosa da Serra, Oleiros e Sertã, entre 17 e 24 de junho de 2017 – Relatório final.** Assembléia da República, Lisboa: Assembléia da República, 2022.

DÍAZ-AVALOS, C. et al. Space–time modelling of lightning-caused ignitions in the Blue Mountains, Oregon. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 9, p. 1579–1593, 2001.

DIJKSTRA, J. et al. Anthropogenic and Lightning Fire Incidence and Burned Area in Europe. **Land**, v. 11, n. 5, p. 651, 28 abr. 2022.

DOWDY, A. J.; FROMM, M. D.; MCCARTHY, N. Pyrocumulonimbus lightning and fire ignition on Black Saturday in southeast Australia. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 14, p. 7342–7354, 27 jul. 2017.

DOWDY, A. J.; MILLS, G. A. Characteristics of lightning-attributed wildland fires in south-east Australia. **International Journal of Wildland Fire**, v. 21, n. 5, p. 521, 2012a.

DOWDY, A. J.; MILLS, G. A. Atmospheric and Fuel Moisture Characteristics Associated with Lightning-Attributed Fires. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 51, n. 11, p. 2025–2037, nov. 2012b.

DOWDY, A. J.; PEPLER, A. Pyroconvection Risk in Australia: Climatological Changes in Atmospheric Stability and Surface Fire Weather Conditions. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 4, p. 2005–2013, 28 fev. 2018.

DUPUY, J. et al. Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: a review. **Annals of Forest Science**, v. 77, n. 2, p. 1–24, jun. 2020.

EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (EROS) CENTER. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global**. U.S. Geological Survey, , 2017. Disponível em: <[https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)>. Acesso em: 14 set. 2023

ERMITÃO, T. et al. Interactions between hot and dry fuel conditions and vegetation dynamics in the 2017 fire season in Portugal. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 9, p. 095009, set. 2022.

FERNANDES, P. M. et al. Fire from the Sky in the Anthropocene. **Fire**, v. 4, n. 1, p. 13, 12 mar. 2021.

FILL, J. M.; DAVIS, C. N.; CRANDALL, R. M. Climate change lengthens southeastern USA lightning-ignited fire seasons. **Global Change Biology**, v. 25, n. 10, p. 3562–3569, 2019.

FINK, A. H. et al. The 2003 European summer heatwaves and drought –synoptic diagnosis and impacts. **Weather**, v. 59, n. 8, p. 209–216, 2004.

FIRMS. **FIRMS: Fire Information for Resource Management System**. Disponível em: <<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>>. Acesso em: 4 set. 2023.

FRANCA, H. et al. **Natural fires occurrences in the Cerrado (Brazilian Savanna): case study in the Emas National Park, Goiás State, Brazil**. . Em: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING (GROUND), 1. 2004. Disponível em: <[http://mtc-m12.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/sergio/2005/02.16.14.43?ibiurl.backgroundlanguage=pt-BR&searchinputvalue=\\$searchInputValue&parentidentifiertitle=\\$childIdentifierList&forceRecentFlag=\\$forceRecentFlag&forcehistorybackflag=1&linktype=relative](http://mtc-m12.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/sergio/2005/02.16.14.43?ibiurl.backgroundlanguage=pt-BR&searchinputvalue=$searchInputValue&parentidentifiertitle=$childIdentifierList&forceRecentFlag=$forceRecentFlag&forcehistorybackflag=1&linktype=relative)>. Acesso em: 22 ago. 2023

FRANÇA, H.; RAMOS NETO, M. B.; SETZER, A. W. **O fogo no Parque Nacional das Emas**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2007.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROPELEWSKI, C. F. The South America Monsoon Circulation and Its Relationship to Rainfall over West-Central Brazil. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 47–66, 1 jan. 2004.

GANTEAUME, A. et al. A Review of the Main Driving Factors of Forest Fire Ignition Over Europe. **Environmental Management**, v. 51, n. 3, p. 651–662, mar. 2013.

GARCIA, L. C. et al. Record-breaking wildfires in the world’s largest continuous tropical wetland: Integrative fire management is urgently needed for both biodiversity and humans. **Journal of Environmental Management**, v. 293, p. 112870, set. 2021.

GARCÍA-HERRERA, R. et al. The Outstanding 2004/05 Drought in the Iberian Peninsula: Associated Atmospheric Circulation. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 3, p. 483–498, 1 jun. 2007.

GIGLIO, L. et al. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 2, p. 408–420, fev. 2009.

GIGLIO, L. **MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide**. Department of Geographical Sciences, University of Maryland, , 18 mar. 2015. Disponível em: <[https://www.earthdata.nasa.gov/s3fs-public/imported/MODIS\\_C6\\_Fire\\_User\\_Guide\\_A.pdf](https://www.earthdata.nasa.gov/s3fs-public/imported/MODIS_C6_Fire_User_Guide_A.pdf)>

GIGLIO, L. et al. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. **Remote Sensing of Environment**, v. 217, p. 72–85, nov. 2018.

GIGLIO, L.; SCHROEDER, W.; JUSTICE, C. O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 178, p. 31–41, 1 jun. 2016.

GORA, E. M. et al. Pantropical geography of lightning-caused disturbance and its implications for tropical forests. **Global Change Biology**, v. 26, n. 9, p. 5017–5026, set. 2020.

GORA, E. M.; YANOVIK, S. P. Lightning-caused disturbance in the Peruvian Amazon. **Biotropica**, v. 52, n. 5, p. 813–817, set. 2020.

HALL, J. V. et al. Validation of GOES-16 ABI and MSG SEVIRI active fire products. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 83, p. 101928, nov. 2019.

HANES, C. C. et al. Fire-regime changes in Canada over the last half century. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 49, n. 3, p. 256–269, mar. 2019.

HAWBAKER, T. J. et al. Detection rates of the MODIS active fire product in the United States. **Remote Sensing of Environment**, Earth Observations for Terrestrial Biodiversity and Ecosystems Special Issue. v. 112, n. 5, p. 2656–2664, 15 maio 2008.

IBGE. **Censo 2022: População e Domicílios - Primeiros Resultados**. Disponível em: <<https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>>.

ICNF. **Relatórios provisórios de incêndios rurais**. Disponível em: <<https://www.icnf.pt/florestas/gfr/gfrgestaoinformacao/grfrelatorios/areasardidaseocorrencias>>. Acesso em: 12 set. 2023a.

ICNF. **Gestão de Fogos Rurais | Estatísticas**. Disponível em: <<https://www.icnf.pt/florestas/gfr/gfrgestaoinformacao/estatisticas>>. Acesso em: 12 set. 2023b.



ICNF, I. DA C. DA N. E DAS F. **ANÁLISE DAS CAUSAS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS - 2003 - 2013**. [s.l.] Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, 20 ago. 2014. Disponível em: <<https://www.icnf.pt/api/file/doc/9d4b6f4d6d6ec74d>>. Acesso em: 12 set. 2023.

IVORY, S. J. et al. Vegetation, rainfall, and pulsing hydrology in the Pantanal, the world's largest tropical wetland. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 12, p. 124017, 1 dez. 2019.

JUNK, W. J.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. **Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.**, v. 106, n. 1, p. 110–127, 1989.

JUNK, W. J.; NUNES DA CUNHA, C. Pasture clearing from invasive woody plants in the Pantanal: a tool for sustainable management or environmental destruction? **Wetlands Ecology and Management**, v. 20, n. 2, p. 111–122, abr. 2012.

KITAGAWA, N.; BROOK, M.; WORKMAN, E. J. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, n. 2, p. 637–647, fev. 1962.

LANG, T. J. et al. Lightning in Wildfire Smoke Plumes Observed in Colorado during Summer 2012. **Monthly Weather Review**, v. 142, n. 2, p. 489–507, 1 fev. 2014.

LARJAVAARA, M.; PENNANEN, J.; TUOMI, T. J. Lightning that ignites forest fires in Finland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 132, n. 3–4, p. 171–180, out. 2005.

LATHAM, D.; WILLIAMS, E. Lightning and Forest Fires. Em: **Forest Fires**. [s.l.] Elsevier, 2001. p. 375–418.

LEE, A. C. L. An Operational System for the Remote Location of Lightning Flashes Using a VLF Arrival Time Difference Technique. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 3, n. 4, p. 630–642, 1 dez. 1986.

LI, Y.; MICKLEY, L. J.; KAPLAN, J. O. Response of dust emissions in southwestern North America to 21st century trends in climate, CO<sub>2</sub> fertilization, and land use: implications for air quality. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 21, n. 1, p. 57–68, 4 jan. 2021.

LIBONATI, R. et al. Rescue Brazil's burning Pantanal wetlands. **Nature**, v. 588, n. 7837, p. 217–219, 10 dez. 2020.

- MARQUES, S. et al. Characterization of wildfires in Portugal. **European Journal of Forest Research**, v. 130, n. 5, p. 775–784, 1 set. 2011.
- MENEZES, L. S. et al. Lightning patterns in the Pantanal: Untangling natural and anthropogenic-induced wildfires. **Science of The Total Environment**, v. 820, p. 153021, maio 2022.
- MORALES, C. A. et al. **Sferics timing and ranging NETWORK–STARNET: 8 years of measurements in South America**. . Em: XV INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY. Norman, Oklahoma, EUA: 15 jun. 2014.
- MORALES, C. A. Thunderstorm Efficiency Regimes in South America as Observed by STARNET and TRMM. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 21, p. 11428–11451, 16 nov. 2019.
- MORALES, C. A.; NEVES, J. R.; ANSELMO, E. **Sferics timing and ranging network-starnet: Evaluation over south america**. . Em: PROCEEDINGS OF THE 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY-ICAE. Rio de Janeiro, Brasil: 2011.
- MOREIRA, F. et al. Size-dependent pattern of wildfire ignitions in Portugal: when do ignitions turn into big fires? **Landscape Ecology**, v. 25, n. 9, p. 1405–1417, 1 nov. 2010.
- MORIS, J. V. et al. Lightning-caused fires in the Alps: Identifying the igniting strokes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 290, p. 107990, 15 ago. 2020.
- MORIS, J. V. et al. A global database on holdover time of lightning-ignited wildfires. **Earth System Science Data**, v. 15, n. 3, p. 1151–1163, 16 mar. 2023.
- MÜLLER, M. M. et al. Analysis of lightning-induced forest fires in Austria. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 111, n. 1–2, p. 183–193, jan. 2013.
- NAGY, R. C. et al. Human-Related Ignitions Increase the Number of Large Wildfires across U.S. Ecoregions. **Fire**, v. 1, n. 1, p. 4, 27 jan. 2018.
- NAMPAK, H. et al. Characterizing Spatial and Temporal Variability of Lightning Activity Associated with Wildfire over Tasmania, Australia. **Fire**, v. 4, n. 1, p. 10, 2 mar. 2021.

NEVES, A. K. et al. A Landsat-based atlas of monthly burned area for Portugal, 1984–2021. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 119, p. 103321, 1 maio 2023.

NIETO, H. et al. Lightning-caused fires in Central Spain: Development of a probability model of occurrence for two Spanish regions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 162–163, p. 35–43, set. 2012.

NUNES, A. P.; TOMAS, W. M. **Aves migratórias e nômades ocorrentes no Pantanal**. 1. ed. Embrapa Pantanal, Corumbá, MS, Brasil: Embrapa, 2008.

OLIVA, P.; SCHROEDER, W. Assessment of VIIRS 375m active fire detection product for direct burned area mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 160, p. 144–155, abr. 2015.

PAULUCCI, T. B. et al. Long-Term Spatial–Temporal Characterization of Cloud-to-Ground Lightning in the Metropolitan Region of Rio de Janeiro. **Pure and Applied Geophysics**, v. 176, n. 11, p. 5161–5175, nov. 2019.

PAUSAS, J. G.; KEELEY, J. E. Wildfires as an ecosystem service. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 17, n. 5, p. 289–295, jun. 2019.

PEREIRA, M. G. et al. The history and characteristics of the 1980–2005 Portuguese rural fire database. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 11, n. 12, p. 3343–3358, 21 dez. 2011.

PÉREZ-INVERNÓN, F. J. et al. **Lightning-ignited wildfires and long-continuing-current lightning in the Mediterranean Basin: Preferential meteorological conditions**. [s.l.] Dynamics/Atmospheric Modelling/Troposphere/Physics (physical properties and processes), 17 mar. 2021. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/preprints/acp-2021-125/acp-2021-125.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2023.

PÉREZ-INVERNÓN, F. J. et al. Variation of lightning-ignited wildfire patterns under climate change. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, p. 739, 10 fev. 2023.

PÉREZ-INVERNÓN, F. J.; HUNTRIESER, H.; MORIS, J. V. Meteorological Conditions Associated with Lightning Ignited Fires and Long-Continuing-Current Lightning in Arizona, New Mexico and Florida. **Fire**, v. 5, n. 4, p. 96, ago. 2022.

- PINEDA, N.; MONTANYÀ, J.; VAN DER VELDE, O. A. Characteristics of lightning related to wildfire ignitions in Catalonia. **Atmospheric Research**, v. 135–136, p. 380–387, 1 jan. 2014.
- PINEDA, N.; RIGO, T. The rainfall factor in lightning-ignited wildfires in Catalonia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 239, p. 249–263, maio 2017.
- PINTO, M. M. et al. A deep learning approach for mapping and dating burned areas using temporal sequences of satellite images. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 160, p. 260–274, fev. 2020.
- PIVELLO, V. R. et al. Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 3, p. 233–255, jul. 2021.
- PRUDENTE, V. H. R. et al. Limitations of cloud cover for optical remote sensing of agricultural areas across South America. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, p. 100414, nov. 2020.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. 1. ed. [s.l.] Cambridge University Press, 2003.
- RAMO, R. et al. African burned area and fire carbon emissions are strongly impacted by small fires undetected by coarse resolution satellite data. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 118, n. 9, p. e2011160118, 2 mar. 2021.
- RAMOS, A. M. et al. Cloud to ground lightning activity over Portugal and its association with circulation weather types. **Atmospheric Research**, v. 101, n. 1, p. 84–101, 1 jul. 2011.
- RAMOS, A. M. et al. The compound event that triggered the destructive fires of October 2017 in Portugal. **iScience**, v. 26, n. 3, p. 106141, 17 mar. 2023.
- RAMOS-NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. Lightning Fires in a Brazilian Savanna National Park: Rethinking Management Strategies. **Environmental Management**, v. 26, n. 6, p. 675–684, 1 dez. 2000.
- RASMUSSEN, K. L. et al. Contribution of Extreme Convective Storms to Rainfall in South America. **Journal of Hydrometeorology**, v. 17, n. 1, p. 353–367, 1 fev. 2016.

RASMUSSEN, K. L.; ZULUAGA, M. D.; HOUZE, R. A. Severe convection and lightning in subtropical South America. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 20, p. 7359–7366, 28 out. 2014.

RIVAS SORIANO, L.; DE PABLO, F. Analysis of convective precipitation in the western Mediterranean Sea through the use of cloud-to-ground lightning. **Atmospheric Research**, v. 66, n. 3, p. 189–202, abr. 2003.

RODRIGUES, J. A. et al. How well do global burned area products represent fire patterns in the Brazilian Savannas biome? An accuracy assessment of the MCD64 collections. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 78, p. 318–331, jun. 2019.

RODRIGUES, M. et al. Identifying large fire weather typologies in the Iberian Peninsula. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 280, p. 107789, jan. 2020.

RODRIGUES, R. B. et al. **An investigation over the lightning location system in Portugal for wind turbine protection development**. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. **Anais...** Em: 2008 IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING - CONVERSION AND DELIVERY OF ELECTRICAL ENERGY IN THE 21ST CENTURY. jul. 2008.

RODRIGUES, R. B.; MENDES, V. M. F.; CATALAO, J. P. S. Lightning Data Observed With Lightning Location System in Portugal. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 2, p. 870–875, abr. 2010.

ROSENFELD, D. et al. The Chisholm firestorm: observed microstructure, precipitation and lightning activity of a pyro-cumulonimbus. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 7, n. 3, p. 645–659, 9 fev. 2007.

RUFFAULT, J. et al. Increased likelihood of heat-induced large wildfires in the Mediterranean Basin. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 13790, 14 ago. 2020.

SÁNCHEZ-BENÍTEZ, A. et al. June 2017: The Earliest European Summer Mega-heatwave of Reanalysis Period. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 4, p. 1955–1962, 2018.

- SANTOS, F. L. M. et al. Assessing VIIRS capabilities to improve burned area mapping over the Brazilian Cerrado. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 21, p. 8300–8327, 1 nov. 2020.
- SÁTORI, G.; WILLIAMS, E.; LEMPERGER, I. Variability of global lightning activity on the ENSO time scale. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2–4, p. 500–507, fev. 2009.
- SCHROEDER, W. et al. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 143, p. 85–96, mar. 2014.
- SCHULTZ, C. J. et al. Spatial, Temporal and Electrical Characteristics of Lightning in Reported Lightning-Initiated Wildfire Events. **Fire**, v. 2, n. 2, p. 18, 3 abr. 2019.
- SCHUMACHER, V. et al. Characteristics of lightning-caused wildfires in central Brazil in relation to cloud-ground and dry lightning. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 312, p. 108723, jan. 2022.
- SCOTT, A. C. et al. **Fire on earth: an introduction**. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Inc, 2014.
- SILVA, P. S. et al. Putting fire on the map of Brazilian savanna ecoregions. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113098, out. 2021.
- SORIANO, L. R.; DE PABLO, F.; DÍEZ, E. G. Relationship between Convective Precipitation and Cloud-to-Ground Lightning in the Iberian Peninsula. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 12, p. 2998–3003, dez. 2001.
- SOUZA, C. M. et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 25 ago. 2020.
- THIELEN, D. et al. The Pantanal under Siege—On the Origin, Dynamics and Forecast of the Megadrought Severely Affecting the Largest Wetland in the World. **Water**, v. 13, n. 21, p. 3034, 29 out. 2021.
- TOMAS, W. M. et al. Sustainability Agenda for the Pantanal Wetland: Perspectives on a Collaborative Interface for Science, Policy, and Decision-Making. **Tropical Conservation Science**, v. 12, p. 194008291987263, jan. 2019.

TOMAS, W. M. et al. Distance sampling surveys reveal 17 million vertebrates directly killed by the 2020's wildfires in the Pantanal, Brazil. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 23547, 16 dez. 2021.

TRIGO, R. M. et al. Atmospheric conditions associated with the exceptional fire season of 2003 in Portugal. **International Journal of Climatology**, v. 26, n. 13, p. 1741–1757, 15 nov. 2006.

TURCO, M. et al. Exacerbated fires in Mediterranean Europe due to anthropogenic warming projected with non-stationary climate-fire models. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 3821, 2 out. 2018.

TURCO, M. et al. Climate drivers of the 2017 devastating fires in Portugal. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 13886, 10 out. 2019.

VALERIANO, M. DE M.; SALVI, L. L.; ARAGÃO, J. R. L. DE. **Relações entre a distribuição da precipitação e o relevo da bacia do alto Paraguai**. Anais do 4º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. **Anais...** Em: 4º SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL. Bonito, MS: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 20 out. 2012. Disponível em:

<<http://plutao.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/plutao/2012/11.28.14.44.06?ibiurl.backgroundlanguage=pt->

[BR&searchinputvalue=\\$searchInputValue&parentidentifiercitedby=\\$childIdentifierList&forceRecentflag=\\$forceRecentFlag&forcehistorybackflag=1&linktype=relative](http://plutao.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/plutao/2012/11.28.14.44.06?ibiurl.backgroundlanguage=pt-)>

VAZQUEZ, A.; MORENO, J. Patterns of Lightning-, and People-Caused Fires in Peninsular Spain. **International Journal of Wildland Fire**, v. 8, n. 2, p. 103, 1998.

VERAVERBEKE, S. et al. Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 7, p. 529–534, jul. 2017.

WILKS, D. S. Forecast Verification. Em: **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 4. ed. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 369–483.

YANOVIK, S. P. et al. Lightning is a major cause of large tree mortality in a lowland neotropical forest. **New Phytologist**, v. 225, n. 5, p. 1936–1944, mar. 2020.

# APÊNDICE A – PRIMEIRO ARTIGO PUBLICADO

Science of the Total Environment 820 (2022) 153021



Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv)



## Lightning patterns in the Pantanal: Untangling natural and anthropogenic-induced wildfires



Lucas S. Menezes<sup>a</sup>, Aline M. de Oliveira<sup>a</sup>, Filippe L.M. Santos<sup>a,c</sup>, Ana Russo<sup>b</sup>, Rodrigo A.F. de Souza<sup>c,d</sup>, Fabio O. Roque<sup>e,f</sup>, Renata Libonati<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

<sup>b</sup> Instituto Dom Luís (IDL), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal

<sup>c</sup> Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (CLIAMB), Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA) and Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Manaus, AM, Brazil

<sup>d</sup> Universidade do Estado do Amazonas, Escola Superior de Tecnologia, 69050-020 Manaus, AM, Brazil

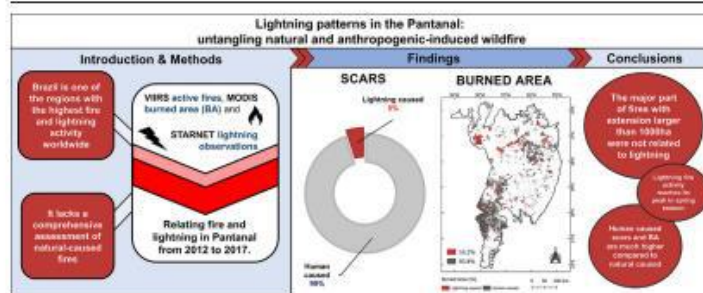
<sup>e</sup> Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Caixa Postal 549, Campo Grande, Mato Grosso do Sul CEP 79070-900, Brazil

<sup>f</sup> Centre for Tropical Environmental and Sustainability Science (TESS) and College of Science and Engineering, James Cook University, Cairns, QLD 4878, Australia

### HIGHLIGHTS

- Globally, Brazil is one of the regions with the highest lightning and fire activity.
- We use 6-year remote sensing data to relate lightning and fire in the Pantanal.
- Human activity is the main source of ignition accounting for 84% of the burnt area.
- Natural-caused fires account for only 5% of the total scars.
- Most of the fires with extension larger than 1000 ha were not related to lightning.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 20 August 2021

Received in revised form 4 January 2022

Accepted 6 January 2022

Available online 11 January 2022

Editor: Paulo Pereira

#### Keywords:

Pantanal  
Fires  
Burned area  
Lightning  
VIIRS  
STARNET

### ABSTRACT

The identification of fire causes and characteristics is of fundamental importance to better understand fire regimes and drivers. Particularly for Brazil, there is a gap in the quantification of lightning-caused fires. Accordingly, this work is a novel probabilistic assessment of the spatial-temporal patterns of lightning-ignited wildfires in the Pantanal wetland. Here, remote sensing information such as VIIRS active fires, MODIS burned area (BA) and STARNET lightning observations from 2012 to 2017, were combined to estimate the location, number of scars and amount of BA associated with atmospheric discharges on a seasonal basis. The highest lightning activity occurs during summer (December–February), and the lowest during winter (June–August). Conversely, the highest fire activity occurred during spring (September–November) and the lowest during autumn (March–May). Our analysis revealed low evidence of an association between fires and lightning, suggesting that human-related activities are the main source of ignitions. Weak evidence of natural-caused fire occurrence is conveyed by the low spatial-temporal match of lightning and fire throughout the studied period. Natural-caused fires accounted for only 5% of the annual total scars and 83.8% of the BA was human-caused. Most of the fires with extension larger than 1000 ha were not related to lightning. Lightning-fires seem an important element of the summer fire regime given that around half of the total BA during this season may be originated by lightning. By contrast, in the rest of the year the lightning-fires represent a minor percentage of the fire activity in the region. The density of lightning-ignited fires varies considerably, being higher in the

\* Corresponding author at: Departamento de Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.  
E-mail address: [renata.libonati@igeo.ufrj.br](mailto:renata.libonati@igeo.ufrj.br) (R. Libonati).



## APÉNDICE B – SEGUNDO ARTIGO PUBLICADO

Earth Syst. Sci. Data, 15, 1151–1163, 2023  
<https://doi.org/10.5194/essd-15-1151-2023>  
© Author(s) 2023. This work is distributed under  
the Creative Commons Attribution 4.0 License.



Open Access  
Earth System  
Science  
Data

### A global database on holdover time of lightning-ignited wildfires

Jose V. Moris<sup>1</sup>, Pedro Álvarez-Álvarez<sup>2</sup>, Marco Conedera<sup>3</sup>, Annalie Dorph<sup>4</sup>, Thomas D. Hessilt<sup>5</sup>,  
Hugh G. P. Hunt<sup>6</sup>, Renata Libonati<sup>7</sup>, Lucas S. Menezes<sup>7</sup>, Mortimer M. Müller<sup>8</sup>,  
Francisco J. Pérez-Invernón<sup>9</sup>, Gianni B. Pezzatti<sup>3</sup>, Nicolau Pineda<sup>10</sup>, Rebecca C. Scholten<sup>5</sup>,  
Sander Veraverbeke<sup>5</sup>, B. Mike Wotton<sup>11</sup>, and Davide Ascoli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Agricultural, Forest and Food Sciences (DISAFA), University of Turin, Grugliasco, Italy

<sup>2</sup>Department of Organisms and Systems Biology, University of Oviedo, Mieres, Spain

<sup>3</sup>Insubric Ecosystems Research Group, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Cadenazzo, Switzerland

<sup>4</sup>FLARE Wildfire Research, University of Melbourne, Creswick, Australia

<sup>5</sup>Faculty of Science, Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam, the Netherlands

<sup>6</sup>Johannesburg Lightning Research Laboratory, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa

<sup>7</sup>Department of Meteorology, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

<sup>8</sup>Institute of Silviculture, University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Vienna, Austria

<sup>9</sup>Institute of Astrophysics of Andalusia (IAA-CSIC), Granada, Spain

<sup>10</sup>Meteorological Service of Catalonia, Barcelona, Spain

<sup>11</sup>Canadian Forest Service, Sault Ste. Marie, Canada

**Correspondence:** Jose V. Moris ([moris.josev@gmail.com](mailto:moris.josev@gmail.com))

Received: 25 November 2022 – Discussion started: 6 December 2022

Revised: 13 February 2023 – Accepted: 25 February 2023 – Published: 16 March 2023

**Abstract.** Holdover fires are usually associated with lightning-ignited wildfires (LIWs), which can experience a smoldering phase or go undetected for several hours, days or even weeks before being reported. Since the existence and duration of the smoldering combustion in LIWs is usually unknown, holdover time is conventionally defined as the time between the lightning event that ignited the fire and the time the fire is detected. Therefore, all LIWs have an associated holdover time, which may range from a few minutes to several days. However, we lack a comprehensive understanding of holdover times. Here, we introduce a global database on holdover times of LIWs. We have collected holdover time data from 29 different studies across the world through a literature review and datasets assembled by authors of the original studies. The database is composed of three data files (censored data, non-censored data, ancillary data) and three metadata files (description of database variables, list of references, reproducible examples). Censored data are the core of the database and consist of different frequency distributions reporting the number or relative frequency of LIWs per interval of holdover time. In addition, ancillary data provide further information to understand the methods and contexts in which the data were generated in the original studies. The first version of the database contains 42 frequency distributions of holdover time built with data on more than 152 375 LIWs from 13 countries in five continents covering a time span from 1921 to 2020. This database is the first freely available, harmonized and ready-to-use global source of holdover time data, which may be used in different ways to investigate LIWs and model the holdover phenomenon. The complete database can be downloaded at <https://doi.org/10.5281/zenodo.7352172> (Moris et al., 2022).