

Preprint

**Pertencimento institucional****Resumo****Palavras chave:****Correspondência****Abstract****ORCID****Key words:**

Sensoriamento remoto aplicado ao estudo dos incêndios florestais no Brasil: uma revisão da literatura

Remote sensing applied to the study of forest fires in Brazil: A literature review

Mauricio Alejandro Perea-Ardila, Programa de Pós-Graduação em Geografia Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil. mauricio.perea@alu.ufc.br. <https://orcid.org/0000-0003-4561-0251>

Resumo

Os incêndios florestais no Brasil representam uma crise socioecológica impulsionada na maioria pelo desmatamento. Evidências científicas demonstram que a maioria desses eventos tem origem antropogênica, diretamente correlacionada ao desmatamento para a expansão da fronteira agrícola. O Sensoriamento remoto consolidou-se como uma ferramenta metodológica fundamental para o monitoramento e a análise dos incêndios. No entanto, o rápido crescimento da produção científica gerou um corpo de literatura fragmentado, dificultando uma síntese eficaz. Esta revisão bibliométrica e sistemática analisa a literatura científica sobre o tema para mapear sua estrutura, evolução e lacunas de conhecimento, buscando orientar futuras pesquisas e políticas. Foram examinados 240 artigos da Web of Science e Scopus (1997-2024) por meio de uma abordagem híbrida, combinando análise quantitativa com Bibliometrix de R e uma síntese qualitativa. Os resultados mostram um crescimento exponencial da produção científica desde 2018, com o Brasil como líder e eixo de colaboração internacional, e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) como a instituição mais produtiva. A análise de concorrência de termos revela uma clara dicotomia conceitual no campo, organizada em três clusters. O primeiro se concentra no bioma Cerrado, tratando do fogo sob a perspectiva da ecologia e do Manejo Integrado do Fogo (MIF). Em contrapartida, os outros dois clusters concentram-se na Amazônia, onde o fogo é enquadrado como uma ferramenta de desmatamento e degradação florestal, ligada ao corte seletivo e à expansão agrícola. Metodologicamente, observa-se uma transição do mapeamento reativo de áreas queimadas para a modelagem preditiva e de risco, com um uso crescente de algoritmos de Machine Learning e Deep Learning. Conclui-se que, apesar da maturidade tecnológica do campo, persistem lacunas críticas. Geograficamente, biomas importantes como o Pantanal, a Caatinga e a Pampa são pouco pesquisadas. Tematicamente, há pouca integração das variáveis socioeconômicas que impulsionam os incêndios. Portanto, pesquisas futuras devem adotar uma abordagem mais integradora, interdisciplinar e preditiva. A fusão de dados de múltiplos sensores com variáveis socioeconômicas é essencial para desenvolver políticas de manejo do fogo que sejam eficazes nos diversos e complexos contextos ecológicos do Brasil.

Palavras-chave: Análise bibliométrica, clusters temáticos, geotecnologias, tendências de pesquisa.

Abstract

Wildfires in Brazil represent a socioecological crisis primarily driven by deforestation. Scientific evidence demonstrates that the majority of these events are anthropogenic in origin, directly correlated with forest clearing for the expansion of the agricultural frontier. Remote sensing has emerged as a fundamental methodological tool for monitoring and analyzing wildfires. However, the rapid growth in scientific output has generated a fragmented body of literature, hindering effective synthesis. This bibliometric and systematic review analyzes the scientific literature on the topic to map its structure, evolution, and knowledge gaps, aiming to guide future research and policy. A total of 240 articles from Web of Science and Scopus (1997–2024) were examined using a hybrid approach, combining quantitative analysis via R's Bibliometrix package with qualitative synthesis. Results reveal exponential growth in scientific production since 2018, with Brazil as the leading country and central node of international collaboration, and the National Institute for Space Research (INPE) as the most productive institution. Term co-occurrence analysis reveals a clear conceptual dichotomy in the field, organized into three thematic clusters. The first cluster centers on the Cerrado biome, examining fire through the lens of ecology and Integrated Fire Management (IFM). In contrast, the other two clusters focus on the Amazon, where fire is framed as a tool for deforestation and forest degradation, linked to selective logging and agricultural expansion. Methodologically, the field has transitioned from reactive mapping of burned areas toward predictive and risk modeling, increasingly employing machine learning and deep learning algorithms. We conclude that, despite the field's technological maturity, critical knowledge gaps persist. Geographically, key biomes such as the Pantanal, Caatinga, and Pampa remain understudied. Thematically, there is insufficient integration of socioeconomic drivers underlying fire incidence. Future research must therefore adopt a more integrative, interdisciplinary, and predictive approach. Fusing multisensor remote sensing data with socioeconomic variables is essential to develop effective fire management policies tailored to Brazil's diverse and complex ecological contexts.

Keywords: Bibliometric analysis, thematic clusters, geotechnologies, research trends

Introdução

Os incêndios florestais representam uma grave ameaça para os ecossistemas, sendo cada vez mais frequentes globalmente e causando danos graves, como perda de vegetação, degradação do solo e contaminação ambiental (X. Li et al., 2024). Anualmente, ao nível global, 400 milhões de hectares de vegetação são consumidos pelo fogo, afetando de forma desproporcional os biomas e gerando impactos negativos na economia (FAO, 2023). No entanto, o fogo é um fator natural que contribui para a dinâmica de múltiplos sistemas ecológicos (Junior et al., 2024). Apesar disso, as mudanças climáticas aumentam a extensão, frequência, intensidade e gravidade dos incêndios, colocando em risco serviços ecossistêmicos essenciais para o bem-estar da humanidade (Hanton et al., 2024). No Brasil, os incêndios florestais representam uma crise socioecológica de escala continental, com profundas implicações para a biodiversidade global e a estabilidade climática (Pinto et al., 2021).

Longe de ser um fenômeno exclusivamente natural, as evidências científicas demonstram que a grande maioria dos focos de calor, especialmente na Amazônia e no Cerrado, tem

origem antropogênica (Oliveira-Júnior et al., 2021). Isso está diretamente relacionado às taxas de desmatamento para a expansão da fronteira agrícola, pecuária, incêndios florestais e extração ilegal de madeira (Furtado Lima et al., 2024). No Brasil, estima-se que, de 1985 a 2023, 200 milhões de hectares foram queimados, o que corresponde a 23% da superfície do país. (MapBiomas, 2024). Isso consolida o fogo como uma força dominante na transformação da paisagem brasileira, com um impacto cumulativo e devastador sobre seu patrimônio natural e sua estabilidade ambiental (Oliveira-Júnior et al., 2021). O número crescente e a intensidade dos incêndios florestais no Brasil, especialmente em biomas críticos como a Amazônia, o Cerrado e o Pantanal, têm impulsionado uma expansão significativa na pesquisa científica que utiliza o sensoriamento remoto para seu monitoramento e análise (Aragão et al., 2018; D. B. Ribeiro & Pereira, 2023).

O sensoriamento remoto por satélite, como tecnologia avançada de observação terrestre, oferece uma abundância de dados sobre a superfície do planeta, úteis para identificar mudanças em nível global (X. Li et al., 2024). A disponibilidade de arquivos de dados satelitais de longo prazo e de acesso livre, provenientes de sensores como MODIS, VIIRS e a série Landsat, impulsionou um aumento significativo de estudos que abordam desde a detecção de focos ativos e o mapeamento de áreas queimadas até a estimativa de emissões de carbono e a avaliação da gravidade do incêndio (Szpakowski & Jensen, 2019; Tyukavina et al., 2022). O sensoriamento remoto não é apenas um complemento, mas uma base metodológica fundamental que fornece dados objetivos e sistemáticos em várias escalas, essenciais para modelar riscos, melhorar a resposta operacional e projetar estratégias sustentáveis de gestão de incêndios (Chuvieco et al., 2020).

A produção científica sobre geotecnologias aplicadas a incêndios florestais tem experimentado um crescimento notável, refletindo a expansão geral da literatura científica nas últimas décadas (Chuvieco et al., 2019; X. Li et al., 2024). No entanto, esse rápido crescimento gerou um conjunto de literatura distribuído em várias disciplinas e com uma grande diversidade de abordagens metodológicas e biomas abordados. Essa fragmentação do conhecimento torna complexa a tarefa de pesquisadores e gestores de recursos naturais sintetizarem as evidências disponíveis de maneira eficaz (Tranfield et al., 2003). Nesse contexto, os métodos de revisão da literatura se apresentam como uma ferramenta poderosa para mapear a estrutura intelectual do campo, permitindo identificar tendências consolidadas, clusters temáticos e, crucialmente, as fraquezas e lacunas de conhecimento que ainda persistem (Bornmann & Mutz, 2015; Zupic & Čater, 2015).

Nos últimos anos, foram realizadas várias revisões no campo dos estudos sobre incêndios florestais por meio de sensoriamento remoto. Essas revisões abordaram temas como tendências globais de pesquisa, identificando áreas emergentes, colaborações internacionais e temas prioritários (Dos Santos et al., 2021; X. Li et al., 2024), bem como aplicações específicas, como a teledetecção pós-incêndio (Sun et al., 2025) e os sistemas de detecção precoce baseados na teledetecção óptica (Barmpoutis et al., 2020). Existem também revisões focadas no estudo de incêndios em ecossistemas de savana por meio de sensoriamento remoto (Junior et al., 2024). No entanto, ainda são escassos os estudos regionais que integram essas abordagens em países tropicais com alta incidência de incêndios. Portanto, é evidente a necessidade de sintetizar e estruturar esse campo de conhecimento por meio de uma revisão da literatura que permita mapear o panorama

científico histórico e delinear um roteiro para futuras pesquisas no contexto do uso do sensoriamento remoto no monitoramento de incêndios florestais no Brasil.

A inteligência artificial (IA) revolucionou a análise bibliométrica e sistemática, permitindo processar grandes volumes de dados científicos de forma eficiente e precisa. Ferramentas baseadas em IA, como o “Gemini”, facilitam a identificação de padrões, a categorização automática da literatura e o resumo das principais descobertas, reduzindo significativamente o tempo necessário para realizar revisões sistemáticas (Picalho et al., 2025). Além disso, esses modelos podem ajudar na extração de dados, na detecção de vieses e na avaliação crítica da qualidade metodológica dos estudos incluídos (Collins et al., 2021). A integração da IA nesses processos melhora não apenas a velocidade, mas também a exaustividade e a objetividade da análise, tornando-se uma ferramenta essencial na pesquisa científica moderna.

O objetivo deste estudo é realizar uma análise, por meio de uma revisão da literatura, da produção científica sobre o uso do sensoriamento remoto para o estudo de incêndios florestais no Brasil. Espera-se que os resultados permitam identificar a evolução histórica e as tendências atuais no uso do sensoriamento remoto para o estudo de incêndios florestais no Brasil, destacando os autores e instituições-chave, bem como as redes colaborativas mais ativas. Além disso, busca-se revelar os temas predominantes e emergentes na literatura científica, o que permitirá detectar lacunas de conhecimento e oportunidades futuras de pesquisa. Esta análise busca contribuir para uma melhor compreensão do campo, facilitando a tomada de decisões informadas por parte de gestores ambientais, formuladores de políticas públicas e da comunidade científica interessada no monitoramento e manejo do fogo em um dos países com maior incidência de incêndios ao nível mundial.

Materiais e métodos

Aspectos gerais da área de estudo

O Brasil está localizado na parte oriental da América do Sul (Figura 1). Reconhecido como um dos países mais megadiversos do planeta, constitui uma área de estudo prioritária no campo ambiental devido à sua excepcional riqueza biológica e seus vastos ecossistemas tropicais (Abranches, 2020). Abriga aproximadamente 20% da biodiversidade mundial, incluindo espécies endêmicas em regiões como a Amazônia, o Cerrado, a Mata Atlântica, o Pantanal e a Caatinga. O Brasil desempenha um papel crucial na regulação climática global e no ciclo hidrológico (Myers et al., 2000; Ribeiro et al., 2009). A Amazônia brasileira, em particular, é considerada um sumidouro de carbono fundamental em nível mundial (Lovejoy & Nobre, 2018). Em conjunto, esses ecossistemas não apenas sustentam a diversidade biológica, mas também fornecem serviços ambientais essenciais em nível regional e global, como a regulação do clima e a manutenção de bacias hidrográficas críticas (Souza et al., 2024).

Figura 1. Localização da área de estudo



Processo de revisão

A pesquisa dos documentos foi realizada através do Portal Periódico da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (<https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acesso-cafe.html>) por meio do acesso da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), das bases de dados Web of Science (WoS) e Scopus. Utilizou-se a pesquisa com operadores lógicos que integrassem os tópicos “remote sensing*”, “forest fire*”, “wildfire”, “Burned”, “Brazil” e “Brazilian” para maximizar a pesquisa. Além disso, restringiu-se a pesquisa a documentos do tipo artigo ou capítulos de livros em língua inglesa e dentro da região do Brasil e até o ano de 2024. Após a pesquisa, os dados foram baixados no formato CSV.

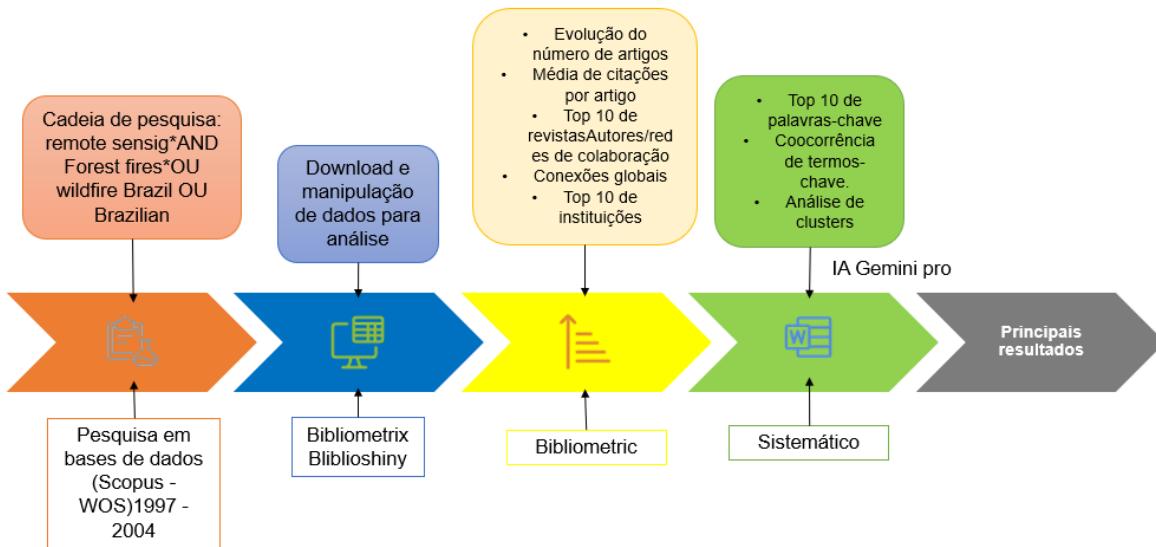
A análise foi realizada sob uma abordagem híbrida, utilizando um enfoque bibliométrico e sistemático para abordar o campo do conhecimento de forma ampla, quantitativa e qualitativa (Junior et al., 2024) (Figura 2). O pacote R “Bibliometrix” foi utilizado como suporte, uma vez que esta ferramenta permite combinar diferentes fontes provenientes de bases de dados científicas com maior precisão. (Aria & Cuccurullo, 2017). Além disso, o “Biblioshiny” foi utilizado como interface web interativa para realizar análises bibliométricas e visuais adicionais.

Os parâmetros selecionados para a análise basearam-se nos propostos por Junior et al., (2024) e Li et al. (2024), onde foi determinada a distribuição temporal das publicações (de 1997 a 2024), que consistiu em analisar a evolução do número de artigos publicados ao

longo do tempo, permitindo identificar períodos de maior ou menor produção científica no tema. Da mesma forma, foi identificada a média total de citações por artigo para o período analisado, visando avaliar o impacto científico médio das publicações e compreender sua relevância dentro do tema.

O seguinte fluxo de trabalho foi realizado para a análise dos dados: na primeira etapa, a cadeia de pesquisa foi introduzida nas bases de dados selecionadas. Na segunda etapa, os dados foram baixados e processados por meio de um script no RStudio, o que permitiu eliminar as pesquisas duplicadas. Posteriormente, na terceira etapa, utilizou-se o Biblioshiny para realizar a análise bibliométrica correspondente. Por outro lado, foi realizada a análise da produtividade das revistas, onde foram determinadas as revistas com maior número de documentos publicados. Foram determinadas as 10 palavras-chave mais importantes, as 10 instituições que mais publicam, as 10 revistas com o índice H mais alto, os 10 autores mais importantes e os países que mais publicam, bem como a rede de colaboração entre países.

Figura 2. Fluxo de trabalho



Além disso, foi realizada uma revisão sistemática das pesquisas com base nos termos mais relevantes, identificados através da coocorrência de termos e da rede de colaboração entre autores. Essa etapa consistiu em obter uma subamostra das publicações que incluísse os autores, o título do documento, o resumo e as palavras-chave.

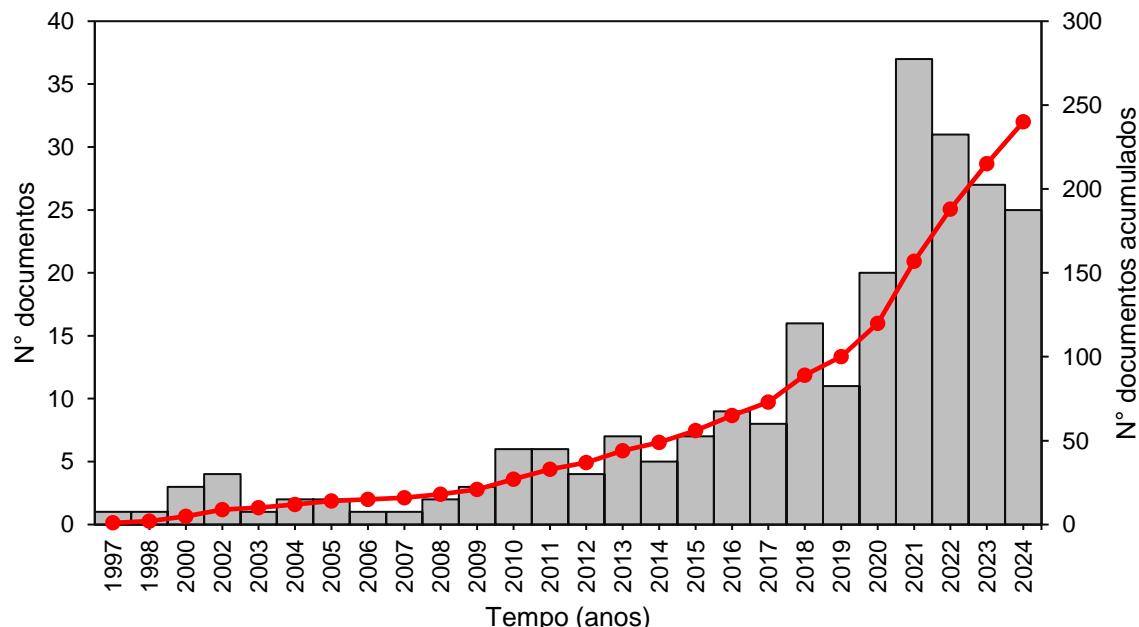
Foram gerados três clusters temáticos a partir das palavras-chave para analisar as publicações por meio de um prompt na IA do Gemini Pro, que incluiu a produção científica e os autores dentro do cluster, os temas abordados, palavras-chave dentro do cluster, evolução temporal, relações temáticas e interseções, aspectos metodológicos e conectividade temática, para identificar tendências emergentes, lacunas de conhecimento e oportunidades de pesquisa futura, bem como compreender a estrutura e a dinâmica do campo estudado a partir de uma perspectiva integral e sistematizada. Da mesma forma, foi feita uma análise geral das publicações fora dos clusters.

Resultados

Perspectiva biométrica

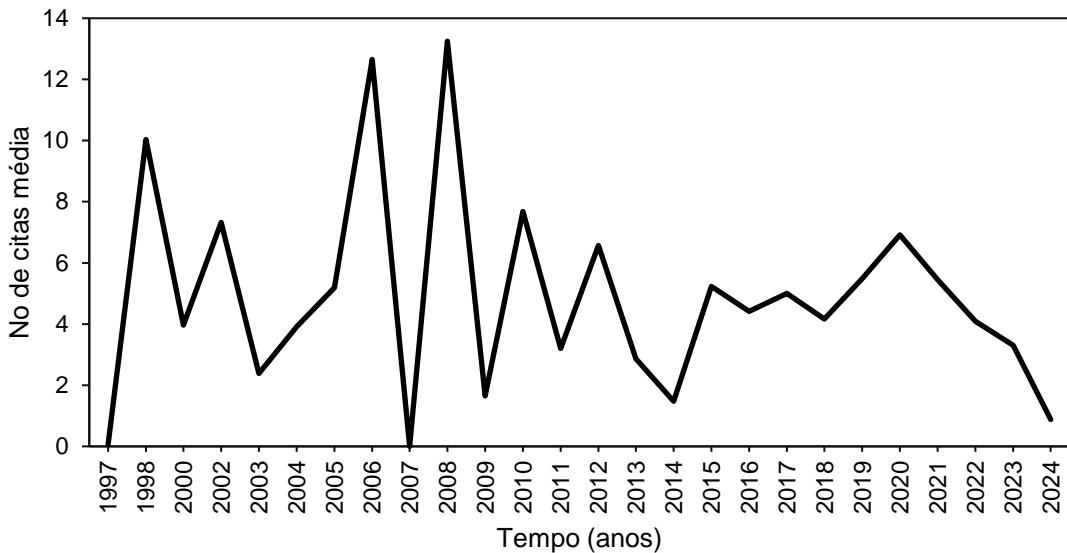
Foram baixadas um total de 278 referências científicas (226 WOS e 57 Scopus) que, após o processamento, resultaram em um total de 240 referências relacionadas ao tema. A figura 3 apresenta a evolução da produção científica sobre o tema de estudo durante o período de 1997 a 2024 (28 anos). A análise da distribuição anual dos documentos revelou três fases distintas de desenvolvimento neste campo de investigação. Uma primeira fase, entre 1997 e 2008, caracterizou-se por uma produção científica inicial e esporádica, com não mais de quatro publicações anuais, o que indicou um interesse emergente e exploratório na área. A partir de 2009, inicia-se uma segunda fase de crescimento sustentado, mas moderado, que se estende até 2017, com a maior produção de documentos no ano de 2016 ($n=9$). Na terceira fase, a partir de 2018, observou-se um crescimento exponencial na publicação de documentos, atingindo um pico máximo de produtividade em 2021 com 37 artigos. Embora em 2022 e 2023 se observe uma ligeira diminuição, os números permanecem significativamente altos, indicando que o tema atingiu uma massa crítica de interesse na comunidade científica. Essa tendência é corroborada pela curva de produção acumulada (linha vermelha), cuja inclinação se acentua drasticamente nos últimos seis anos, refletindo a rápida consolidação e maturidade do campo de pesquisa.

Figura 3. Evolução temporal das publicações científicas



A figura 4 ilustra o impacto da produção científica, medido através do número médio de citações recebidas pelos artigos publicados a cada ano. Foram identificados picos de alto impacto nos anos de 1999, 2006 e, de forma mais predominante, em 2008, ano em que se atingiu uma média superior a 13 citações por documento. Por outro lado, observou-se uma tendência decrescente a partir de 2021.

Figura 4. Evolução da média de citações por ano

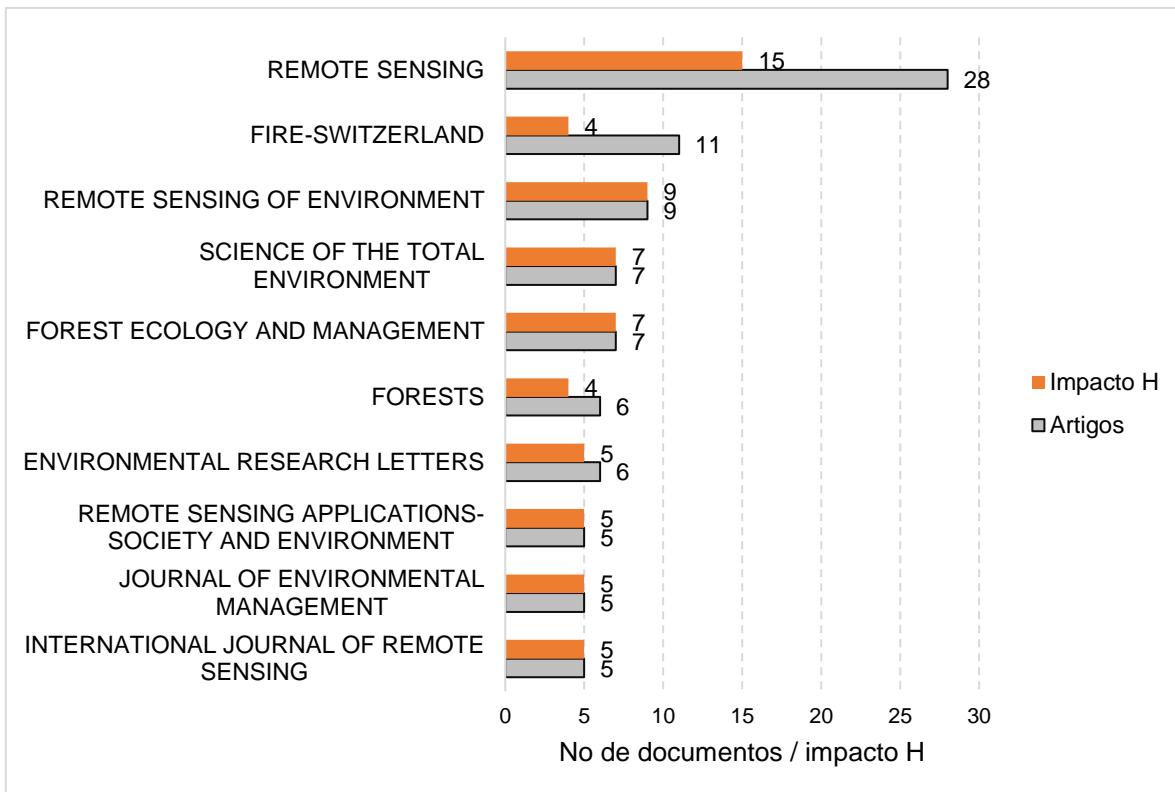


Revistas mais relevantes

Para obter uma visão integral dos canais de comunicação científica mais relevantes neste campo, analisou-se tanto a produtividade (número de documentos) como o impacto (Índice H específico do tema) das revistas (Figuras 5). Os resultados posicionam a revista *REMOTE SENSING* como a mais relevante na pesquisa, liderando de forma destacada em ambas as métricas, sendo a mais produtiva com 28 artigos e também a de maior impacto com um Índice H de 15. Isso indica que ela não é apenas o principal veículo para publicação, mas também divulga os trabalhos mais influentes e consistentemente citados da área. Outras revistas como *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* e *FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT* também demonstraram um equilíbrio entre alta produtividade e um impacto notável nas citações.

É particularmente interessante o caso da *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, que ocupou o terceiro lugar em número de artigos (9), mas ascendeu ao segundo lugar em impacto (H=9), o que destaca a alta qualidade e relevância de suas publicações no tema. Em contrapartida, revistas como *FIRE-SWITZERLAND*, apesar de ser a segunda mais produtiva com 11 artigos, não figura no ranking das de maior impacto. Foi apresentado o ranking das revistas mais produtivas no campo de estudo, identificando os principais canais de divulgação da pesquisa. O perfil temático dessas revistas evidencia a natureza interdisciplinar da área de pesquisa, que convergiria principalmente em três domínios: teledeteção (por exemplo, *Remote Sensing*, *International Journal of Remote Sensing*), ciência do fogo e ecologia florestal (por exemplo, *Fire-Switzerland*, *Forests*) e ciências ambientais e sua gestão (por exemplo, *Science of the Total Environment*, *Journal of Environmental Management*).

Figura 5. Produtividade e impacto das revistas científicas



Os autores e sua rede de colaboração

Entre os pesquisadores mais influentes, foram revelados diferentes perfis de contribuição (Figura 6). A liderança de Libonati R., por exemplo, se consolida por meio de uma produção marcante, concentrada principalmente a partir de 2008, com publicações que também apresentam um alto impacto de citação. Um padrão semelhante de produção recente e influente é observado em autores como Silva C. e Teodoro P., que têm sido atores-chave na fase de crescimento exponencial do campo. Em contraste, autores como Aragao L. e Anderson L. mostram uma trajetória de contribuição mais sustentada e prolongada no tempo, tendo publicado de forma consistente por mais de uma década. O gráfico temporal também permite identificar autores fundadores como Shimabukuro Y. e Keller M., cujas publicações se situam nas etapas mais iniciais do desenvolvimento do campo.

Figura 6. Produção dos autores ao longo do tempo

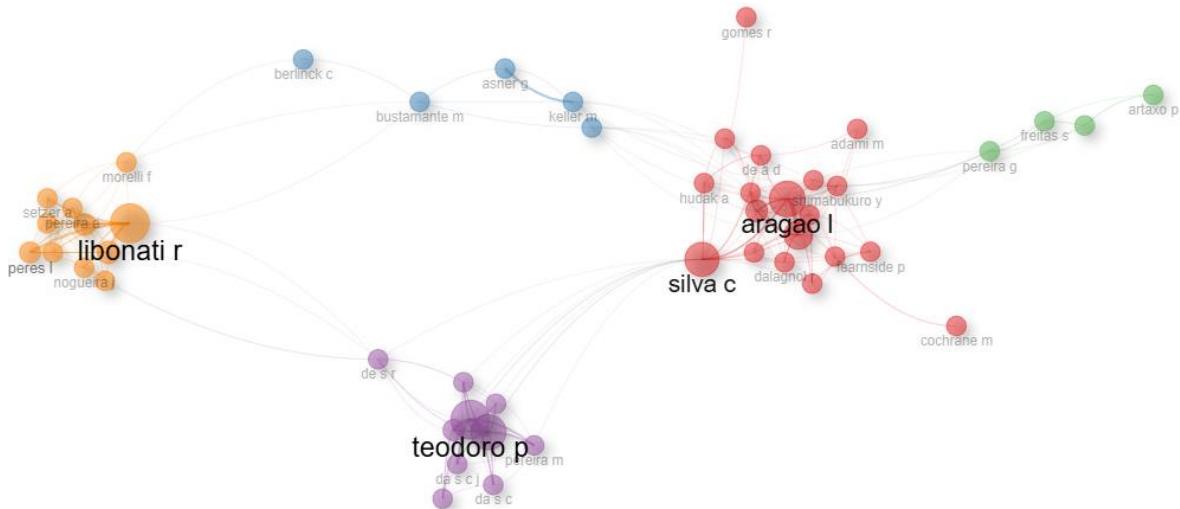


A estrutura social da comunidade científica foi analisada através da rede de colaboração entre autores (Figura 7), onde os nós representam os autores e as ligações indicam coautoria. A topologia da rede revela a existência de vários clusters de colaboração distintos, o que sugere a formação de diferentes grupos de investigação. Identificam-se pelo menos quatro grupos principais, geralmente articulados em torno dos autores mais produtivos da área.

O cluster vermelho, que é o maior e ocupa uma posição central na rede, é claramente liderado por Aragao L. e Silva C., que formam um núcleo de colaboração denso e extenso com outros pesquisadores importantes. Da mesma forma, observam-se outros grupos de pesquisa muito coesos, como o cluster roxo, centrado em Teodoro P., e o cluster laranja, cujo principal nó é Libonati R., confirmando seu papel como autores altamente produtivos e líderes de grupo.

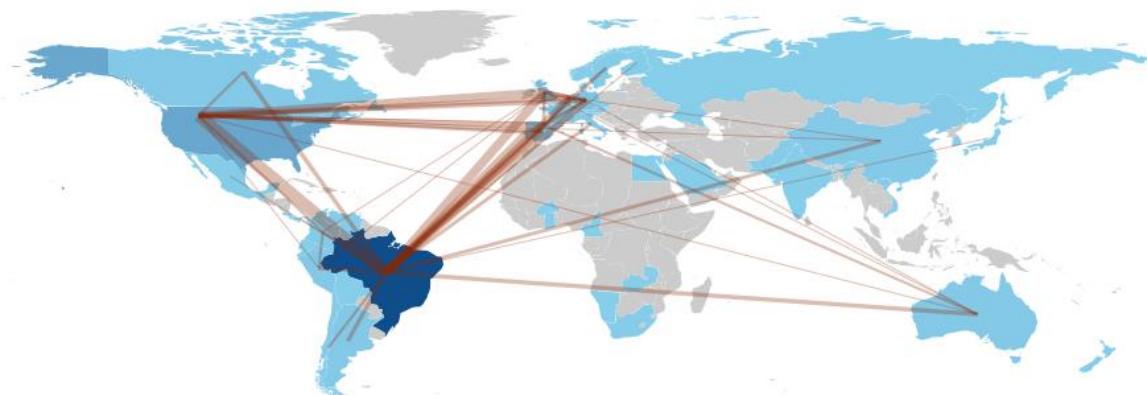
Além da estrutura interna de cada cluster, a análise das interconexões é crucial. Autores como Aragao L. e Silva C. não são apenas centrais em seu próprio grupo, mas também atuam como “pontes” (brokers) que conectam seus clusters a outros nós e grupos da rede.

Figura 7. Rede de colaboração entre autores



A análise da colaboração científica em nível nacional revelou uma estrutura de rede com um centro bem definido e ampla extensão global (Figura 8). O Brasil se consolida como líder em produção científica sobre o tema, conforme indica a intensidade de sua cor no mapa, e funciona como o eixo central (ou hub) de toda a rede de colaboração. A aliança mais forte e significativa é estabelecida com os Estados Unidos, que é o segundo país mais produtivo e o principal parceiro estratégico do Brasil, como evidenciado pela espessura notável das linhas que os conectam. Além desse eixo principal, a pesquisa é caracterizada por um alto grau de internacionalização. O Brasil mantém uma rede diversificada e sólida de colaborações com um bloco de países da Europa Ocidental, com destaque para os fortes laços com o Reino Unido, a Alemanha e a França. Da mesma forma, é relevante o vínculo de colaboração que se estende até a Austrália, o que demonstra o alcance global da pesquisa.

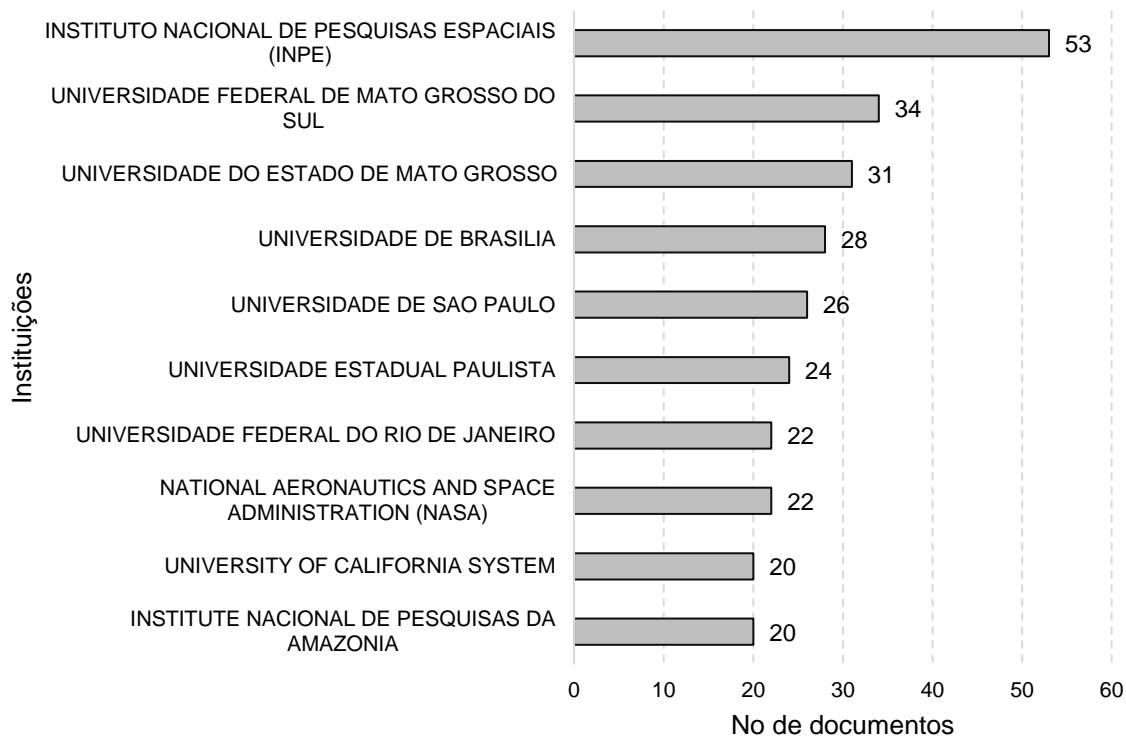
Figura 8. Conexões globais de colaboração acadêmica



Instituições mais relevantes

A figura 10 apresenta o ranking das instituições mais produtivas, identificando os principais centros de conhecimento na área de estudo. A análise revelou a liderança do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que se posiciona como a instituição mais influente, com 53 documentos, quase 60% a mais que a segunda colocada na lista. Essa constatação ressalta o papel central do INPE na geração de pesquisas sobre o tema. Observou-se uma notável concentração geográfica na região Centro-Oeste do Brasil, com a Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (n=34 documentos) e a Universidade Estadual de Mato Grosso (n=31 documentos) se destacando como um importante nicho regional de pesquisa. Além disso, a lista incluiu as mais importantes universidades federais e estaduais do país, como a Universidade de Brasília (n=28), a Universidade de São Paulo (n=26) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (n=22), o que demonstra um interesse nacional consolidado. Um aspecto de grande relevância é a forte presença de instituições internacionais, particularmente dos Estados Unidos, como a National Aeronautics and Space Administration (NASA) (n=22) e o University of California System (n=20).

Figura 10. Top 10 do ranking das instituições mais produtivas



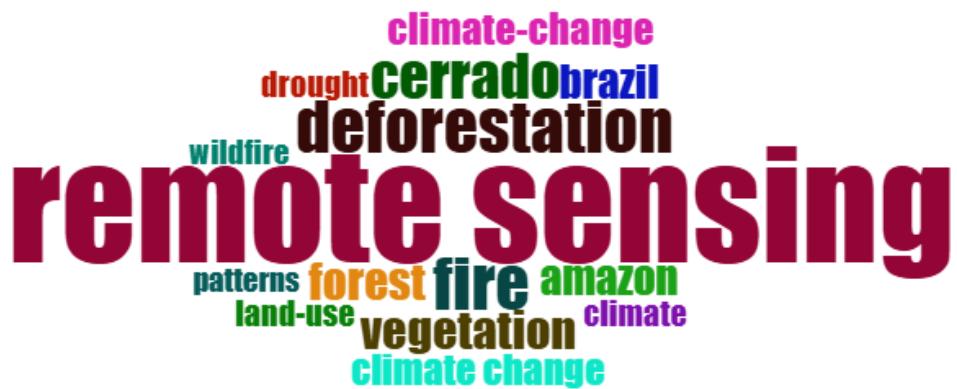
Perspectiva sistemática

Palavras-chave

A estrutura conceitual geral do campo de pesquisa é visualizada na nuvem de palavras-chave, que revela os termos mais frequentes nos documentos analisados (Figura 11). O

termo “remote sensing” (teledetecção) destaca-se com a máxima predominância, confirmando-se como o enfoque metodológico central que unifica a pesquisa nessa área. Em torno desse eixo tecnológico, articulam-se vários domínios temáticos-chave. O primeiro está relacionado aos processos de mudança e degradação ambiental, onde “deforestation” (desmatamento), “fire” (incêndio/fogo), “land-use” (uso do solo) e “vegetation” (vegetação) são predominantes. Um segundo domínio define o contexto geográfico, centrado no “Brazil” (Brasil), com ênfase particular nos biomas “Cerrado” e “Amazon” (Amazônia). Finalmente, um terceiro domínio situa a pesquisa no marco da mudança global, com alta frequência de termos como “climate change” (mudança climática) e “drought” (seca).

Figura 11. As 10 palavras mais representativas



Rede de coocorrência

A arquitetura intelectual e as principais linhas de investigação do campo foram visualizadas por meio de uma rede de coocorrência de termos (Figura 11). A análise revela uma estrutura clara, com o “remote sensing” (teledetecção) atuando como o nó maior e central de toda a rede. Sua posição e a espessura de suas conexões confirmam que é a disciplina metodológica fundamental que estrutura e unifica toda a produção científica analisada. Em torno desse eixo central, a rede foi organizada em três clusters temáticos bem definidos.

O cluster vermelho é o maior e mais denso, centrado inequivocamente no estudo do bioma Cerrado. Os termos associados, como “fire” (fogo/incêndio), “wildfires” (incêndios florestais), “burned” area (área queimada), “savanna” e “fire ecology” (ecologia do fogo), indicam uma frente de pesquisa consolidada na dinâmica do fogo nesse ecossistema. A presença de termos como google earth engine e machine learning indicou o uso de tecnologias avançadas para essas análises.

A análise, baseada em 51 publicações que abrangiam estudos realizados entre 2000 e 2024, a partir de 2011, a produção tornou-se constante e aumentou significativamente, com picos notáveis em 2021 (5 artigos) e 2022 (4 artigos). A análise de autoria neste cluster destacou os pesquisadores Libonati, R (6 publicações), Chuvieco, E. (4 publicações), Schmidt, I. (3 publicações), Delgado, R. (3 publicações) e Da Camara, C. (3 publicações). Da mesma forma, observa-se uma rede de colaboração entre Libonati, R. e Santos, F. Chuvieco, E. também é central, colaborando com autores como Morelli, F. e Pettinari, ML. Vários núcleos-chave foram identificados, por exemplo, a ecologia do fogo no bioma Cerrado. O tema predominante é o estudo dos incêndios no bioma do Cerrado brasileiro.

Foi investigado como o fogo afeta a estrutura da vegetação, a biodiversidade (mamíferos, aves, formigas) e os processos ecossistêmicos, como a recuperação pós-incêndio. Da mesma forma, no manejo e nas políticas de fogo, há um forte enfoque na avaliação de estratégias de manejo, particularmente a transição de políticas de “fogo zero” para o Manejo Integrado do Fogo (MIF). Foi analisada a eficácia das queimadas controladas para mitigar incêndios de grande escala, especialmente em áreas protegidas e terras indígenas. Por fim, estuda-se o impacto socioambiental, abordando as consequências dos incêndios, como a degradação do solo, o impacto nos recursos hídricos e as emissões de gases de efeito estufa.

Foi identificado um domínio de sensores satelitais de resolução moderada para monitorar grandes extensões com frequência. Por exemplo, o MODIS (12 documentos) foi o sensor mais influente e utilizado neste cluster para monitoramento em escala regional, utilizado para obter dados de áreas queimadas (por exemplo, MCD64A1) e focos de calor. Por outro lado, o Landsat desempenha um papel fundamental na validação de produtos de menor resolução e em estudos detalhados das cicatrizes dos incêndios e da dinâmica da vegetação (11 documentos). Observou-se a incorporação de sensores mais recentes, como o VIIRS (2 documentos), para melhorar a detecção de incêndios, e o uso do Lidar (por meio de UAV e GEDI, 3 documentos) para a caracterização do combustível e da biomassa. Por outro lado, o CBERS é mencionado em 1 documento como fonte de dados para a validação de mapas de áreas queimadas em nível continental. O uso de métodos tem se concentrado em questões relacionadas à análise de séries temporais, uma abordagem crucial para compreender a dinâmica da vegetação e os regimes de incêndio ao longo do tempo. Isso é mencionado explicitamente em pelo menos 11 documentos. A validação e avaliação da precisão denotam um alto rigor científico e são parte fundamental de muitos estudos. Isso é mencionado em pelo menos.

11 documentos. O manejo do fogo, mais do que uma metodologia, é um campo de aplicação central no cluster, aparecendo em pelo menos 9 documentos. No campo da inteligência artificial e do aprendizado de máquina, são utilizados diversos algoritmos para a classificação de imagens e modelagem. Aprendizado de máquina (abordagem geral): técnicas de aprendizado automático foram aplicadas e mencionadas de forma geral ou específica em pelo menos 9 documentos. Random Forest foi o algoritmo de aprendizado de máquina mais popular dentro do cluster, mencionado em 5 documentos. Foi usado principalmente para a classificação de áreas queimadas e a estimativa da carga de combustível. Por sua vez, o Deep Learning e as Redes Neuronais representaram uma abordagem de vanguarda no cluster, usada para o mapeamento de alta precisão (4 documentos). O NDVI é o índice mais usado para avaliar a saúde e a fenologia da vegetação. Foi mencionado em pelo menos 8 documentos. Além disso, é o índice mais utilizado para detectar e mapear áreas queimadas. Seu uso, incluindo sua variante diferencial (dNBR), é fundamental em pelo menos 7 documentos. O EVI foi mencionado (4 documentos) como uma alternativa ao NDVI para monitorar a vegetação, especialmente em áreas de alta densidade.

O cluster azul concentrou-se no bioma “Amazonas” (Amazônia) e no processo de “deflorestação” (desmatamento). As palavras-chave relacionadas incluíram “floresta tropical”, “exploração madeireira”, “cobertura do solo”, “ciclo do carbono” e “seca”. Este cluster é composto por 80 publicações científicas, com um intervalo temporal que vai de

1997 a 2024. A produção científica do cluster mostrou interesse ao longo das duas últimas décadas, com um pico de pesquisa notável no ano de 2021, que concentrou 10 publicações. Este cluster analisou o fogo como uma perturbação secundária que agrava o impacto humano nas florestas úmidas. Foi abordado o impacto das atividades humanas, como o corte seletivo e o desmatamento, no aumento da vulnerabilidade das florestas aos incêndios. O corte, mesmo aquele de baixo impacto, além da fragmentação e dos efeitos de borda em florestas previamente degradadas, aumenta a frequência e a gravidade dos incêndios, especialmente em condições extremas, como as secas associadas ao El Niño. Da mesma forma, destacou-se a importância de quantificar as emissões de carbono e a perda de biomassa decorrentes desses processos.

A análise revelou um núcleo de autores com alta produtividade, o que sugere liderança nessa linha de pesquisa. Por exemplo, Asner, G. é o autor mais prolífico, aparecendo em 8 documentos, seguido por Keller, M. e Souza, C., cada um com 5 publicações, e outros autores importantes incluem Aragão, L. e Cochrane, M., com 4 publicações cada. A coautoria mais frequente é entre Asner, G. e Keller, M., que colaboraram em pelo menos 3 dos documentos identificados.

A estratégia mais comum é a análise espacial, que correlaciona dados de desmatamento com dados de focos de calor ou áreas queimadas. O Landsat é o sensor mais importante e utilizado, identificado em 26 documentos. Sua longa série temporal é indispensável para analisar o desmatamento, a degradação e a recorrência de incêndios ao longo de décadas. O MODIS foi o segundo sensor mais relevante, mencionado em 11 documentos. Ele foi usado para monitorar focos de calor, mapear áreas queimadas em escala regional e analisar a fenologia da vegetação. Os sensores de radar foram usados para mapear a cobertura florestal e a estrutura, sendo uma ferramenta complementar aos sensores ópticos, especialmente em regiões com alta nebulosidade (1 documento), e o Lidar (aéreo e espacial) foi utilizado em estudos mais recentes para obter medições diretas da estrutura 3D da floresta e quantificar com precisão a biomassa e os danos ao dossel (4 documentos).

Entre as técnicas mais utilizadas, a Análise de Mistura Espectral foi uma técnica fundamental mencionada em vários estudos (3 documentos) para separar o sinal do satélite em frações de vegetação, solo e sombra, permitindo detectar mudanças sutis associadas ao desmatamento e aos incêndios. Da mesma forma, índices como o NDVI e o NBR foram amplamente utilizados para avaliar a saúde da vegetação e a gravidade dos incêndios (16 documentos). Nos estudos mais recentes, observa-se o uso de algoritmos como o Random Forest para classificar a cobertura do solo e prever a degradação (2 documentos).

Nos estudos, menciona-se o uso de produtos de satélite, como os do PRODES (Programa de Cálculo do Desmatamento da Amazônia), utilizado como fonte oficial e de referência sobre as taxas e a extensão do desmatamento na Amazônia brasileira (4 documentos). A quantificação das emissões de carbono e GEE, bem como a avaliação da perda das florestas como sumidouros de carbono, são temas centrais e uma das principais justificativas da pesquisa realizada dentro deste cluster (18 documentos).

Dentro do cluster 3 verde, existe uma sobreposição com o Cluster 2 “Azul”. A maioria dos documentos do cluster “Verde” também pertence ao “Azul”, o que indicou que este cluster representa um subconjunto temático altamente especializado dentro do campo mais amplo da degradação florestal, com foco na “degradação florestal” e na “exploração madeireira”.

seletiva”, especificamente na “Amazônia brasileira”. (Amazônia brasileira). Ele agrupou 16 publicações que abrangem um período de 22 anos, de 2002 a 2024. Sua produção científica tem sido constante na última década. Cinquenta por cento dos documentos (8) foram publicados entre 2017 e 2024, o que demonstra a crescente relevância e atualidade de seu enfoque. Os autores mais produtivos são Asner, G. e Alencar, A., cada um com 3 documentos. Seguem-se Matricardi, E., Skole, D., Cochrane, M., Fearnside, P. e Aragão, L., cada um com 2 publicações. As colaborações são fortes entre os principais autores, como a de Asner e Alencar, o que aponta para uma comunidade científica focada nos mecanismos específicos da degradação florestal.

O tema central e diferenciador deste cluster é a quantificação e o monitoramento da degradação florestal na Amazônia, com ênfase especial no impacto da exploração madeireira seletiva (selective logging) e sua interação com os incêndios. Um aspecto crucial é como a exploração madeireira aumenta a suscetibilidade da floresta aos incêndios. A abertura do dossel, os detritos de madeira e as redes de caminhos criadas pelo corte aumentam a carga de combustível e a dessecação do sub-bosque, facilitando a ignição e a propagação do fogo. Da mesma forma, estuda-se o impacto da degradação na biodiversidade e quantificam-se as emissões de carbono resultantes, que são uma fonte significativa e muitas vezes não relatada de gases de efeito estufa.

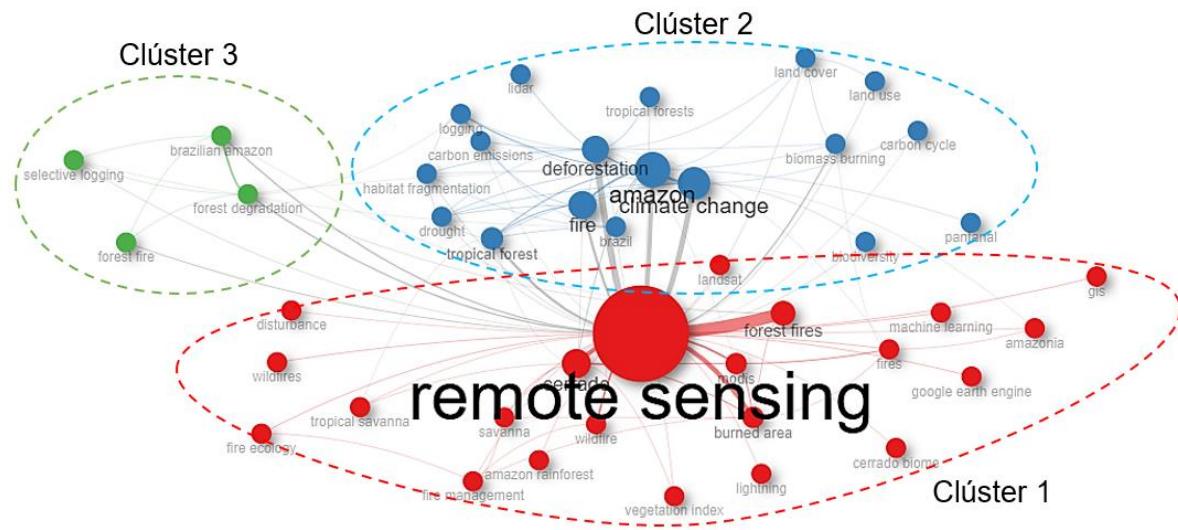
Para capturar as mudanças sutis da degradação, este cluster utiliza metodologias avançadas. Por exemplo, o Landsat é a ferramenta por excelência, mencionada em 5 documentos. Seu arquivo histórico é vital para a análise da degradação ao longo de décadas. A Análise de Mistura Espectral (SMA), técnica fundamental mencionada em quatro documentos para detectar mudanças subpixel na cobertura do solo, permite identificar áreas sutilmente degradadas pelo desmatamento. O cluster mostra um avanço no uso de tecnologias mais detalhadas, como UAVs (drones) e sensores hiperespectrais (como Hyperion), permitindo analisar a estrutura 3D da floresta e mudanças na fisiologia da vegetação com precisão.

Além disso, foi apresentada uma análise das publicações que não foram agrupadas em um cluster, correspondentes a 121 registros, de 1997 a 2024. Desde 2017, o número de publicações anuais cresceu exponencialmente. Mais 79 documentos foram publicados nos últimos seis anos (2019-2024), com um pico de 23 publicações em 2022. Os autores desse grupo eram mais diversos e menos concentrados do que nos clusters temáticos, indicando uma maior variedade. O mais produtivo foi Teodoro, P., o autor mais frequente (8 documentos), seguido por Delgado, R. e Da Silva, J., com 7 publicações cada. Outros autores com múltiplas contribuições incluem Torres, F. (5 documentos) e Pereira, M. e Lima, M. (4 documentos cada).

Ao contrário dos clusters especializados, este grupo é tematicamente heterogêneo. No entanto, foi possível identificar várias linhas de investigação relacionadas com a modelização preditiva e de risco de incêndios, o impacto dos incêndios na biodiversidade, o impacto na qualidade do ar e na saúde pública, as relações clima-fogo-vegetação e o desenvolvimento e avaliação de metodologias de teledeteção. Este grupo apresenta a maior diversidade metodológica, continuando a ser mencionados o Landsat e o MODIS. No entanto, há uma maior exploração de outros sensores, como Sentinel-2, CBERS e dados de alta resolução, como PlanetScope e UAVs (drones). Este grupo apresenta o uso mais intensivo e variado de Machine Learning e Deep Learning (9 documentos), além de redes

neurais convolucionais (CNN), U-Net, Optimum-Path Forest, SVM e árvores de decisão. Também são utilizados modelos climáticos e estatísticos como ARIMA para fazer projeções futuras. Da mesma forma, é empregada uma ampla gama de índices, sendo os mais comuns NDVI, NBR, EVI e SAVI.

Figura 11. Rede de coocorrência de termos-chave



Além disso, foi apresentada uma análise das publicações que não foram agrupadas em um cluster, correspondentes a 121 registros, de 1997 a 2024. Desde 2017, o número de publicações anuais cresceu exponencialmente. Mais 79 documentos foram publicados nos últimos seis anos (2019-2024), com um pico de 23 publicações em 2022. Os autores desse grupo eram mais diversos e menos concentrados do que nos clusters temáticos, indicando uma maior variedade. O mais produtivo foi Teodoro, P., o autor mais frequente (8 documentos), seguido por Delgado, R. e Da Silva, J., com 7 publicações cada. Outros autores com múltiplas contribuições incluem Torres, F. (5 documentos) e Pereira, M. e Lima, M. (4 documentos cada).

Ao contrário dos clusters especializados, este grupo é tematicamente heterogêneo. No entanto, foi possível identificar várias linhas de investigação relacionadas com a modelização preditiva e de risco de incêndios, o impacto dos incêndios na biodiversidade, o impacto na qualidade do ar e na saúde pública, as relações clima-fogo-vegetação e o desenvolvimento e avaliação de metodologias de sensoriamento remoto. Este grupo apresenta a maior diversidade metodológica, continuando a ser mencionados o Landsat e o MODIS. No entanto, há uma maior exploração de outros sensores, como Sentinel-2, CBERS e dados de alta resolução, como PlanetScope e UAVs (drones). Este grupo apresenta o uso mais intenso e variado de Machine Learning e Deep Learning (9 documentos), além de redes neurais convolucionais (CNN), U-Net, Optimum-Path Forest, SVM e árvores de decisão. Também são utilizados modelos climáticos e estatísticos como ARIMA para fazer projeções futuras. Da mesma forma, é empregada uma ampla gama de índices, sendo os mais comuns NDVI, NBR, EVI e SAVI.

Discussão

Crescimento exponencial da pesquisa

O presente estudo analisou a estrutura e a evolução do conhecimento científico sobre o uso do sensoriamento remoto no estudo de incêndios florestais no Brasil, revelando um campo de pesquisa em evolução. Nossas descobertas não apenas quantificam um crescimento exponencial na produção científica, mas também revelam a arquitetura intelectual subjacente, que está ligada tanto aos avanços tecnológicos na observação da Terra quanto à intensificação dos incêndios como uma crise socioecológica no Brasil (Aragão et al., 2018).

O crescimento exponencial das publicações a partir de 2018 pode estar relacionado com a intensificação da crise dos incêndios nos diferentes biomas brasileiros, que captou a atenção mundial (Béllo Carvalho et al., 2025; Silveira et al., 2020). Esse período coincide com um contexto sociopolítico que favoreceu o aumento das taxas de desmatamento (M. C. Oliveira & Siqueira, 2022; Pereira et al., 2024) e, por outro lado, a disponibilidade de dados abertos e acessíveis de observação da Terra para monitoramento ambiental (Gomes et al., 2020; Turner et al., 2015). Isso, juntamente com plataformas de processamento em nuvem como o Google Earth Engine, reduziu as barreiras computacionais e permitiu à comunidade científica analisar dados de forma rápida e eficaz em diferentes escalas (Gorelick et al., 2017; Pérez-Cutillas et al., 2023).

A dicotomia do fogo no Brasil

A descoberta mais significativa deste estudo é a clara dicotomia temática que emerge da rede de coocorrência. Os clusters revelaram que a comunidade científica não aborda o “fogo no Brasil” como um fenômeno monolítico, mas como dois problemas fundamentalmente distintos. A pesquisa no Cerrado concentrou-se na “ecologia do fogo” (fire ecology), no manejo (fire management) e na dinâmica de um ecossistema adaptado e modelado pelo fogo recorrente. O debate implícito nessa literatura, sobre a transição de políticas de supressão total (“fogo zero”) para o Manejo Integrado do Fogo (MIF), reflete um paradigma de convivência e gestão (Welch & Coimbra, 2021) (Schmidt et al., 2018). Essa abordagem está em consonância com a compreensão moderna dos ecossistemas de savana ao nível mundial, onde o fogo é uma perturbação vital para manter a estrutura e a biodiversidade (Pivello, 2011).

Em contrapartida, as pesquisas na Amazônia enquadram o fogo como uma patologia, uma ferramenta diretamente associada ao “desmatamento” (deforestation) e à “exploração madeireira” (logging). Este cluster fornece uma base empírica sólida para os mecanismos que, segundo se expõe, estão levando o ecossistema amazônico a um ponto de inflexão ou “tipping point” (Flores et al., 2024; Lapola et al., 2023; Lovejoy & Nobre, 2018). Nossa análise vai um passo além ao diferenciar um subcampo altamente especializado (Cluster 3) focado na “degradação florestal” (forest degradation) e na “exploração madeireira seletiva” (selective logging). Isso é de extrema importância, pois demonstra uma maturidade no campo, que vai além da detecção do desmatamento em grande escala, um problema já bem monitorado por sistemas como o PRODES, para abordar as mudanças mais sutis e críticas que aumentam a inflamabilidade da floresta a partir de dentro (Almeida et al., 2025). A utilização de técnicas avançadas como a Análise de Mistura Espectral (SMA) neste cluster é uma resposta direta à necessidade de quantificar essa degradação gradual, uma

fonte de emissões de carbono frequentemente subestimada (Costa et al., 2019; Pinheiro et al., 2016).

O conjunto de publicações não agrupadas em clusters definidos reflete as tendências emergentes. Esse grupo mostra uma clara mudança do mapeamento reativo de áreas queimadas para a modelagem preditiva e de risco. O uso intensivo e diversificado de Machine Learning e Deep Learning (por exemplo, CNNs, U-Net) dentro deste grupo não é uma mera preferência metodológica, mas uma mudança fundamental de objetivo. O objetivo já não é apenas documentar o passado, mas antecipar o futuro. Essa tendência está em sintonia com o estado da arte global das geotecnologias, onde a inteligência artificial está se tornando a pedra angular para a criação de sistemas de alerta precoce e avaliação da vulnerabilidade a incêndios (Li et al., 2023; Li et al., 2024), além do uso de imagens de alta resolução (Dalagnol et al., 2023).

Tendências emergentes e lacunas para a agenda futura

Apesar do rápido amadurecimento do campo, nossa análise revelou algumas lacunas que devem compor a agenda de pesquisa futura. Uma delas está relacionada à superação dos pontos cegos biogeográficos, pois o foco na Amazônia e no Cerrado deixou de lado outros biomas de importância crítica, como o Pantanal e a Caatinga. Esse desequilíbrio geográfico limita a capacidade de compreender o fenômeno do fogo em diferentes ecossistemas e pode levar a decisões mal informadas sobre gestão ambiental. Há evidências do papel do fogo na Caatinga, onde a temperatura e as precipitações influenciam o surgimento de incêndios durante a estação seca e a vegetação é independente do fogo (Franca Rocha et al., 2024; Pivello et al., 2021). Além disso, recentemente também foram registrados incêndios em áreas de conservação que afetaram a biodiversidade presente nelas (Perea-Ardila et al., 2024; Perea-Ardila & Muñoz, 2024).

Por sua vez, o Pantanal sofreu incêndios florestais catastróficos em 2020, queimando quase 30% do bioma (Correa et al., 2022; D. B. Ribeiro & Pereira, 2023) e, mais recentemente, com os incêndios de 2024 que afetaram esse ecossistema (Béllo Carvalho et al., 2025). Além disso, o bioma da Mata Atlântica e a Pampa também foram historicamente afetados por incêndios florestais (Oliveira et al., 2022). Embora a literatura científica sobre incêndios no Brasil tenha avançado significativamente em aspectos tecnológicos, ecológicos e de modelagem espacial, nossa análise revelou uma marcante predominância de termos e abordagens biofísicas, o que revela uma baixa integração com as dimensões socioeconômicas que impulsionam grande parte da ocorrência de incêndios (Park et al., 2023).

Estudos futuros devem ir além da correlação entre incêndios e desmatamento para incorporar variáveis como posse da terra, flutuação dos preços das commodities, governança local e eficácia das moratórias e políticas públicas (Nepstad et al., 2006). A fusão de dados de teledeteção com dados socioeconômicos em escala municipal é um passo essencial para uma compreensão causal e preditiva. Esse tipo de abordagem integradora está ganhando força na literatura recente, especialmente em estudos que buscam modelar não apenas “onde” ocorre o fogo, mas “por que” e “para quê” (Pivello et al., 2021).

Por outro lado, é necessário operacionalizar a IA para a fusão de dados multissensores, uma vez que a fronteira atual não está apenas no uso de algoritmos sofisticados, mas na

sua implementação em sistemas integrados e escaláveis (Belgiu & Drăgu, 2016). O desafio imediato reside em combinar dados provenientes de múltiplas fontes de sensores remotos ópticos passivos e ativos, por exemplo, a alta resolução espacial do Sentinel-2, a consistência histórica do Landsat, os dados do CBERS e as novas gerações, a sensibilidade térmica do VIIRS/MODIS e os dados de radar como os do próximo satélite Sentinel-1C/Biomass, Lidar como o GEDI ou hiperespectrais como o PACE/PRISMA, cuja capacidade é essencial para o monitoramento eficaz das mudanças climáticas e ambientais. MODIS e dados de radar como os do próximo satélite Sentinel-1C/Biomass, Lidar como GEDI ou hiperespectrais como PACE/PRISMA, cuja capacidade é essencial para o monitoramento eficaz dos biomas (Dubayah et al., 2020; Quintano et al., 2023). O desenvolvimento de modelos de IA que integrem esses fluxos de dados díspares representa um passo fundamental para sistemas de alerta precoce verdadeiramente eficazes. Somente através da combinação de tecnologia satelital avançada, algoritmos de aprendizado profundo e plataformas de processamento escaláveis será possível antecipar e responder aos incêndios com maior precisão e oportunidade (Deng et al., 2023).

Limitações do estudo

Apesar da abordagem híbrida empregada neste estudo, é imperativo reconhecer as limitações. Uma primeira limitação decorre da seleção das bases de dados. Embora o WoS e o Scopus sejam considerados as plataformas mais prestigiadas e abrangentes para a literatura científica global, sua cobertura não é universal. Eles apresentam um conhecido viés geográfico e linguístico, com uma sobrerepresentação de revistas publicadas em inglês (Mongeon & Paul-Hus, 2016). Ao nos concentrarmos exclusivamente nessas bases de dados, é provável que tenhamos omitido pesquisas relevantes publicadas em revistas nacionais brasileiras ou latino-americanas que não estão indexadas nelas. Isso poderia subestimar a contribuição de outros autores, instituições locais ou pesquisas sobre temas de relevância regional que não alcançam um público internacional de primeiro nível.

Além disso, a restrição da pesquisa a documentos em inglês constitui a limitação mais significativa deste estudo. No campo da ecologia e das ciências ambientais, ficou demonstrado que o viés do idioma inglês pode distorcer as conclusões das revisões da literatura, levando a uma “perda de conhecimento” ao ignorar sistematicamente as evidências científicas publicadas em outros idiomas (Amano et al., 2016). No contexto do Brasil, onde a comunidade científica publica extensivamente em português, essa exclusão significa que nossa análise, embora representativa da pesquisa com orientação internacional, não captura a totalidade do panorama científico nacional. Foi omitido um conjunto de conhecimentos que pode conter perspectivas e dados cruciais, especialmente aqueles direcionados a gestores e políticos brasileiros.

Em terceiro lugar, o estudo limitou-se a artigos e capítulos de livros, excluindo a “literatura cinzenta”. Essa categoria inclui teses de doutorado, dissertações de mestrado, relatórios técnicos governamentais (por exemplo, de agências como ICMBio ou IBAMA) e atas de congressos. A exclusão da literatura cinzenta pode introduzir um viés de publicação, uma vez que estudos com resultados estatisticamente significativos ou “positivos” têm mais chances de serem publicados como artigos de revista do que aqueles com resultados nulos ou inconclusivos (Haddaway et al., 2015). Essa literatura contém geralmente dados mais recentes, metodologias detalhadas e descobertas preliminares vitais para compreender a vanguarda de um campo de pesquisa e evitar a duplicação de esforços.

Por fim, embora a cadeia de pesquisa tenha sido concebida para ser abrangente, a análise baseada em palavras-chave está sempre sujeita à omissão de artigos relevantes que utilizam uma terminologia diferente. A dinâmica da linguagem científica significa que temas emergentes podem não ter um vocabulário consolidado, o que os torna difíceis de capturar com uma consulta predefinida (Leydesdorff & Rafols, 2009). Portanto, nossa análise de clusters temáticos, embora revele as principais correntes de pesquisa, pode não ter capturado completamente os nichos de pesquisa mais inovadores ou interdisciplinares que ainda não atingiram uma massa crítica.

Em conjunto, essas limitações definem os contornos de nossas descobertas. Este estudo apresenta um mapa detalhado e preciso da pesquisa sobre sensoriamento remoto de incêndios no Brasil que alcançou visibilidade internacional, mas não deve ser interpretado como um censo exaustivo de toda a produção de conhecimento sobre o tema. Revisões futuras poderiam complementar nosso trabalho, focando especificamente na literatura em português, na produção local e na síntese da literatura cinzenta para obter uma visão ainda mais completa e combinada.

Conclusões

Este estudo traçou o mapa da evolução, estrutura intelectual e tendências da pesquisa sobre incêndios florestais no Brasil utilizando sensoriamento remoto. Foi demonstrado um crescimento exponencial e recente na produção científica, que se consolidou em frentes temáticas que refletem a dualidade do problema do fogo no país: por um lado, um enfoque na ecologia e no manejo do fogo no bioma do Cerrado e, por outro, sua análise como um fenômeno intrinsecamente ligado ao desmatamento e à degradação na Amazônia. Ao identificar os autores e instituições-chave, as redes de colaboração global com o Brasil como eixo central e as fronteiras metodológicas emergentes impulsionadas pela inteligência artificial, este trabalho oferece um roteiro integral para a comunidade científica, gestores ambientais e formuladores de políticas. Em última análise, a estruturação desse campo de conhecimento é fundamental para direcionar pesquisas futuras para as lacunas identificadas e fortalecer estratégias de manejo do fogo baseadas em evidências em uma das regiões mais importantes para a biodiversidade e a estabilidade climática do planeta.

DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSE: Os autores declaram que não há conflito de interesses a mencionar.

DECLARAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DE DADOS DA PESQUISA: O conjunto de dados de apoio aos resultados deste estudo não está disponível ao público.

Referências

Abrances, S. (2020). Biological Megadiversity as a Tool of Soft Power and Development for Brazil. *Brazilian Political Science Review*, 14(2), 1–18. <https://doi.org/10.1590/1981-3821202000020006>

Almeida, C. A. de, Perez, L. P., Reis, M. S., Camilotti, V. L., Messias, C. G., Monteiro, E. C. dos S., Pinheiro, T. F., Sobrinho Kneipp Cerqueira Pinto, J. F., Soler, L. D. S., Vinhas,

- L., Maurano, L. E. P., Adami, M., Kuplich, T. M., Narvaes, I. da S., Arcoverde, G. F. B., & Amaral, S. (2025). Monitoramento oficial da vegetação nativa brasileira por imagens de satélite: o programa BiomasBR e os sistemas Prodes, Deter e TerraClass. *Cadernos de Astronomia*, 6(1), 23–38. <https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47411>
- Amano, T., González-Varo, J. P., & Sutherland, W. J. (2016). Languages Are Still a Major Barrier to Global Science. *PLoS Biology*, 14(12), 1–8. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2000933>
- Aragão, L. E. O. C., Anderson, L. O., Fonseca, M. G., Rosan, T. M., Vedovato, L. B., Wagner, F. H., Silva, C. V. J., Silva Junior, C. H. L., Arai, E., Aguiar, A. P., Barlow, J., Berenguer, E., Deeter, M. N., Domingues, L. G., Gatti, L., Gloor, M., Malhi, Y., Marengo, J. A., Miller, J. B., ... Saatchi, S. (2018). 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Bampoutis, P., Papaioannou, P., Dimitropoulos, K., & Grammalidis, N. (2020). A review on early forest fire detection systems using optical remote sensing. *Sensors (Switzerland)*, 20(22), 1–26. <https://doi.org/10.3390/s20226442>
- Belgiu, M., & Drăgu, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Béllo Carvalho, R., Oliveras Menor, I., Schmidt, I. B., Berlinck, C. N., Genes, L., & Dirzo, R. (2025). Brazil on fire: Igniting awareness of the 2024 wildfire crisis. *Journal of Environmental Management*, 389, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126190>
- Bornmann, L., & Mutz, R. (2015). Growth rates of modern science: A bibliometric analysis based on the number of publications and cited references. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 66(11), 2215–2222. <https://doi.org/10.1002/asi.23329>
- Chuvieco, E., Aguado, I., Salas, J., García, M., Yebra, M., & Oliva, P. (2020). Satellite Remote Sensing Contributions to Wildland Fire Science and Management. *Current Forestry Reports*, 6(2), 81–96. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00116-5>
- Chuvieco, E., Mouillot, F., van der Werf, G. R., San Miguel, J., Tanasse, M., Koutsias, N., García, M., Yebra, M., Padilla, M., Gitas, I., Heil, A., Hawbaker, T. J., & Giglio, L. (2019). Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 225(November 2018), 45–64. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.013>
- Collins, C., Dennehy, D., Conboy, K., & Mikalef, P. (2021). Artificial intelligence in information systems research: A systematic literature review and research agenda. *International Journal of Information Management*, 60, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102383>

- Correa, D. B., Alcantara, E., Libonati, R., Massi, K. G., & Park, E. (2022). Increased burned area in the Pantanal over the past two decades. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*, 835. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155386>
- Costa, O. B. da, Matricardi, E. A. T., Pedlowski, M. A., Miguel, E. P., & Gaspar, R. de O. (2019). Selective Logging Detection in the Brazilian Amazon. *Floresta e Ambiente*, 26(2), 1–10. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.063417>
- Dalagnol, R., Wagner, F. H., Galva, L. S., Braga, D., Osborn, F., Sagang, L., Bispo, P. D., Payne, M., Silva, C. J., Favrichon, S., Silgueiro, V., Anderson, L. O., de Aragao, L., Fensholt, R., Brandt, M., Ciais, P., & Saatchi, S. (2023). Mapping tropical forest degradation with deep learning and Planet NICFI data. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113798>
- Deng, J., Wang, W., Gu, G., Chen, Z., Liu, J., Xie, G., Weng, S., Ding, L., & Li, C. (2023). Wildfire susceptibility prediction using a multisource and spatiotemporal cooperative approach. *Earth Science Informatics*, 16(4), 3511–3529. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01104-6>
- Dos Santos, S. M. B., Bento-Gonçalves, A., & Vieira, A. (2021). Research on wildfires and remote sensing in the last three decades: A bibliometric analysis. *Forests*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/f12050604>
- Dubayah, R., Blair, J. B., Goetz, S., Fatoyinbo, L., Hansen, M., Healey, S., Hofton, M., Hurt, G., Kellner, J., Luthcke, S., Armston, J., Tang, H., Duncanson, L., Hancock, S., Jantz, P., Marselis, S., Patterson, P. L., Qi, W., & Silva, C. (2020). The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing*, 1(September 2019), 100002. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100002>
- FAO. (2023). NUESTROS BOSQUES SIGUEN QUEMÁNDOSE. <https://www.fao.org/3/cc6237es/cc6237es.pdf>
- Flores, B. M., Montoya, E., Sakschewski, B., Nascimento, N., Staal, A., Betts, R. A., Levis, C., Lapola, D. M., Esquivel-Muelbert, A., Jakovac, C., Nobre, C. A., Oliveira, R. S., Borma, L. S., Nian, D., Boers, N., Hecht, S. B., ter Steege, H., Arieira, J., Lucas, I. L., ... Hirota, M. (2024). Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, 626(7999), 555–564. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0>
- Franca Rocha, W. J. S., Vasconcelos, R. N., Duverger, S. G., Costa, D. P., Santos, N. A., Franca Rocha, R. O., de Santana, M. M. M., Alencar, A. A. C., Arruda, V. L. S., Silva, W. V. da, Ferreira-Ferreira, J., Oliveira, M., Barbosa, L. da S., & Cordeiro, C. L. (2024). Mapping burned area in the Caatinga biome: Employing deep learning techniques. *Fire*, 7(437), 1–24. <https://doi.org/10.3390/fire7120437>
- Furtado Lima, C., Pereira Torres, F. T., Minette, L. J., Araujo Lima, F., Andrade Lima, R. C., Keisuke Sato, M., Araújo Silva, A., Leão Said Schettini, B., Costa Ferreira, F. de A., & Lima Machado, M. X. (2024). Is there a relationship between forest fires and deforestation in the Brazilian Amazon? *PLOS ONE*, 19(6), 1–12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306238>

Gomes, V. C. F., Queiroz, G. R., & Ferreira, K. R. (2020). An overview of platforms for big earth observation data management and analysis. *Remote Sensing*, 12(8), 1–25. <https://doi.org/10.3390/RS12081253>

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Haddaway, N. R., Collins, A. M., Coughlin, D., & Kirk, S. (2015). The role of google scholar in evidence reviews and its applicability to grey literature searching. *PLoS ONE*, 10(9), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138237>

Hantson, S., Hamilton, D. S., & Burton, C. (2024). Changing fire regimes: Ecosystem impacts in a shifting climate. *One Earth*, 7(6), 942–945. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.05.021>

Junior, F. R. F., dos Santos, A. M., Alvarado, S. T., da Silva, C. F. A., & Nunes, F. G. (2024). Remote sensing applied to the study of fire in savannas: A literature review. *Ecological Informatics*, 79(October 2023). <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102448>

Lapola, D. M., Pinho, P., Barlow, J., Aragão, L. E. O. C., Berenguer, E., Carmenta, R., Liddy, H. M., Seixas, H., Silva, C. V. J., Silva, C. H. L., Alencar, A. A. C., Anderson, L. O., Armenteras, D., Brovkin, V., Calders, K., Chambers, J., Chini, L., Costa, M. H., Faria, B. L., ... Walker, W. S. (2023). The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, 379, 1–11. <https://doi.org/10.1126/science.abp8622>

Leydesdorff, L., & Rafols, I. (2009). A global map of science based on the ISI subject categories. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 60(2), 348–362. <https://doi.org/10.1002/asi.20967>

Li, T., Cui, L., Liu, L., Chen, Y., Liu, H., Song, X., & Xu, Z. (2023). Advances in the study of global forest wildfires. *Journal of Soils and Sediments*, 23(7), 2654–2668. <https://doi.org/10.1007/s11368-023-03533-8>

Li, X., Li, J., & Haghani, M. (2024). Application of Remote Sensing Technology in Wildfire Research: Bibliometric Perspective. *Fire Technology*, 60(1), 579–616. <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01531-3>

Lovejoy, T. E., & Nobre, C. (2018). Amazon tipping point. *Science Advances*, 4(2), 1–1. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2340>

MapBiomass. (2024). Coleção [4] mapeamento das cicatrizes de fogo do Brasil (1985-2023). <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/fogo>

Mongeon, P., & Paul-Hus, A. (2016). The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. *Scientometrics*, 106(1), 213–228. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>

Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>

- Nepstad, D., Schwartzman, S., Bamberger, B., Santilli, M., Ray, D., Schlesinger, P., Lefebvre, P., Alencar, A., Prinz, E., Fiske, G., & Rolla, A. (2006). Inhibition of Amazon deforestation and fire by parks and indigenous lands. *Conservation Biology*, 20(1), 65–73. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00351.x>
- Oliveira-Júnior, J. F. de, Mendes, D., Correia Filho, W. L. F., Silva Junior, C. A. da, Gois, G. de, Jardim, A. M. da R. F., Silva, M. V. da, Lyra, G. B., Teodoro, P. E., Pimentel, L. C. G., Lima, M., Santiago, D. de B., Rogério, J. P., & Marinho, A. A. R. (2021). Fire foci in South America: Impact and causes, fire hazard and future scenarios. *Journal of South American Earth Sciences*, 112, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103623>
- Oliveira, M. C., & Siqueira, L. (2022). Digitalization between environmental activism and counter-activism: The case of satellite data on deforestation in the Brazilian Amazon. *Earth System Governance*, 12(March), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.esg.2022.100135>
- Oliveira, U., Soares-Filho, B., Bustamante, M., Gomes, L., Ometto, J. P., & Rajão, R. (2022). Determinants of Fire Impact in the Brazilian Biomes. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.735017>
- Park, C. Y., Takahashi, K., Li, F., Takakura, J., Fujimori, S., Hasegawa, T., Ito, A., Lee, D. K., & Thiery, W. (2023). Impact of climate and socioeconomic changes on fire carbon emissions in the future: Sustainable economic development might decrease future emissions. *Global Environmental Change*, 80, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102667>
- Perea-Ardila, M. A., & Muñoz, S. I. (2024). Caracterização de uma nova queimada utilizando sensoriamento remoto do Parque Estadual do Cocó , Região Metropolitana de Fortaleza/CE, Brasil. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 14(1), 858–869. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v14i1.261692>
- Perea-Ardila, M. A., Muñoz, S. I., & Sopchaki, C. H. (2024). Caracterização de Áreas Queimadas Usando Sensoriamento Remoto no Refúgio Pedra da Andorinha, Sobral/CE. *Revista GeoUECE*, 13(24), 137–157. <https://doi.org/10.59040/GeoUECE.2317-028X.v13.n24.e202407>
- Pereira, A. K., Morais, L. de, Salomon, M., Oliveira, M. S. de, Lacerda, L., Corso, J. V., & Maior, M. S. (2024). Populism and the Dismantling of Brazil's Deforestation Oversight Policy. In *Brazilian Political Science Review* (Vol. 18, Issue 1). <https://doi.org/10.1590/1981-3821202400010003>
- Pérez-Cutillas, P., Pérez-Navarro, A., Conesa-García, C., Zema, D. A., & Amado-Álvarez, J. P. (2023). What is going on within google earth engine? A systematic review and meta-analysis. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 29(December 2022), 100907. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100907>
- Picalho, A. C., Oliveira, G. R. De, & Cattivelli, A. S. (2025). Inteligência artificial no levantamento bibliográfico em bases de dados científicos. *RDBCi: Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência Da Informação*, 23, 1–20. <https://doi.org/10.20396/rdbc.i.v23i00.8678378>

- Pinheiro, T. F., Escada, M. I. S., Valeriano, D. M., Hostert, P., Gollnow, F., & Müller, H. (2016). Forest Degradation Associated with Logging Frontier Expansion in the Amazon: The BR-163 Region in Southwestern Pará, Brazil. *Earth Interactions*, 20(17), 1–26. <https://doi.org/10.1175/EI-D-15-0016.1>
- Pinto, D. L., Spletozer, A. G., Barbosa, S. G., Lima, G. S., Torres, C. M. M. E., & Torres, F. T. P. (2021). Periods of Highest Occurrence of Forest Fires in Brazil. *Floresta*, 51(2), 484–491. <https://doi.org/10.5380/rf.v51i2.70286>
- Pivello, V. R. (2011). THE USE OF FIRE IN THE CERRADO AND AMAZONIAN RAINFORESTS OF BRAZIL: PAST AND PRESENT. *FIRE ECOLOGY*, 7(1), 24–39. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0701024> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)
- Pivello, V. R., Vieira, I., Christianini, A. V., Ribeiro, D. B., da Silva Menezes, L., Berlinck, C. N., Melo, F. P. L., Marengo, J. A., Tornquist, C. G., Tomas, W. M., & Overbeck, G. E. (2021). Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 19(3), 233–255. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.06.005>
- Quintano, C., Calvo, L., Fernández-Manso, A., Suárez-Seoane, S., Fernandes, P. M., & Fernández-Guisuraga, J. M. (2023). First evaluation of fire severity retrieval from PRISMA hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 295, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113670>
- Ribeiro, D. B., & Pereira, A. M. M. (2023). Solving the problem of wildfires in the Pantanal Wetlands. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 21(4), 271–273. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2023.10.004>
- Ribeiro, M. C., Metzger, J. P., Martensen, A. C., Ponzoni, F. J., & Hirota, M. M. (2009). The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, 142(6), 1141–1153. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.021>
- Schmidt, I. B., Moura, L. C., Ferreira, M. C., Eloy, L., Sampaio, A. B., Dias, P. A., & Berlinck, C. N. (2018). Fire management in the Brazilian savanna: First steps and the way forward. *Journal of Applied Ecology*, 55(5), 2094–2101. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13118> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)
- Silveira, M. V. F., Petri, C. A., Broggio, I. S., Chagas, G. O., Macul, M. S., Leite, C. C. S. S., Ferrari, E. M. M., Amim, C. G. V., Freitas, A. L. R., Motta, A. Z. V., Carvalho, L. M. E., Silva Junior, C. H. L., Anderson, L. O., & Aragão, L. E. O. C. (2020). Drivers of fire anomalies in the Brazilian Amazon: Lessons learned from the 2019 fire crisis. *Land*, 9(12), 1–24. <https://doi.org/10.3390/land9120516>
- Souza, C. de A., Junior, E. S. O., & Hacon, S. de S. (2024). Ecosystem services in the Brazilian Amazon. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(1), 178–198. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p178-198>

Sun, M., Zhang, X., & Jin, R. (2025). Visualization of Post-Fire Remote Sensing Using CiteSpace: A Bibliometric Analysis. *Forests*, 16(4), 1–25.
<https://doi.org/10.3390/f16040592>

Szpakowski, D., & Jensen, J. (2019). A review of the applications of remote sensing in fire ecology. *Remote Sensing*, 11(22), 1–31. <https://doi.org/10.3390/rs11222638>

Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>

Turner, W., Rondinini, C., Pettorelli, N., Mora, B., Leidner, A. K., Szantoi, Z., Buchanan, G., Dech, S., Dwyer, J., Herold, M., Koh, L. P., Leimgruber, P., Taubenboeck, H., Wegmann, M., Wikelski, M., & Woodcock, C. (2015). Free and open-access satellite data are key to biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 182, 173–176.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.11.048>

Tyukavina, A., Potapov, P., Hansen, M. C., Pickens, A. H., Stehman, S. V., Turubanova, S., Parker, D., Zalles, V., Lima, A., Kommareddy, I., Song, X.-P., Wang, L., & Harris, N. (2022). Global trends of forest loss due to fire from 2001 to 2019. *Frontiers in Remote Sensing*, 3, 1–20. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.825190>

Welch, J. R., & Coimbra, C. E. A. (2021). Indigenous fire ecologies, restoration, and territorial sovereignty in the Brazilian Cerrado: The case of two Xavante reserves. *Land Use Policy*, 104, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104055>

Zupic, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429–472.
<https://doi.org/10.1177/1094428114562629>