



Sensoriamento Remoto Aplicado à Análise de Fogo em Formações Campestres: Uma Revisão Sistemática

Fire Analysis in Grasslands using Remote Sensing: A Systematic Review

Pâmela Boelter Herrmann¹, Victor Fernandez Nascimento² e Marcos Wellausen Dias de Freitas³

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, Brasil. pamela.herrmann@ufrgs.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9049-3141>

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) Instituto de Ciências Agrárias, Porto Alegre, Brasil. victorfnascimento@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3311-8190>

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Geociências, Porto Alegre, Brasil. mfreitas@ufrgs.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9879-2584>

Recebido: 10.2021 | Aceito: 02.2022

Resumo: Avaliar o impacto do fogo em formações campestres requer uma compreensão das relações ambientais e antrópicas sobre a dinâmica da paisagem. Este estudo faz uma revisão da literatura para entender o comportamento do fogo em formações campestres por meio de técnicas de sensoriamento remoto. Para isso foi utilizada a base de dados da Scopus por meio do método PRISMA com o auxílio de mapeamento de *clusters*. Primeiramente, foram encontrados 7.881 artigos na literatura científica, onde foram aplicados os passos metodológicos, resultando em 67 artigos, os quais foram utilizados na análise. Os resultados apontam uma tendência de crescimento de pesquisas com a temática, sendo o Brasil o segundo país com maior contribuição ao resultado. Grande parte das publicações utilizaram imagens orbitais, porém há um crescimento recente da utilização de imagens obtidas por sensores acoplados a VANT's. Além dos índices espectrais NDVI e EVI, observa-se a recente utilização de outros índices para analisar a severidade das queimadas e o processo de recuperação da vegetação. Estes temas são principalmente relacionados com o manejo integrado de fogo, que deve levar em consideração a conservação da biodiversidade e uso antrópico com o objetivo de reduzir a intensidade e severidade do fogo, para torná-lo mais controlável e reduzir seus impactos negativos. Portanto, o sensoriamento é essencial para entender o comportamento espaço-temporal do fogo e consequentemente servir de subsídio científico para auxiliar a tomada de decisão em casos de prescrição de queimadas levando em consideração a manutenção dos serviços ecossistêmicos e a utilização destas formações campestres.

Palavras-chave: Queimadas. Índices espectrais. Gramíneas. NBR. VOSviewer.

Abstract: Assessing the fire impact on grasslands requires understanding how the environmental and anthropic relationships affect the landscape dynamics. This study carries out a systematic literature review to understand fire behavior in grasslands through remote sensing techniques. To this end, the Scopus data was used employing the PRISMA method with the cluster mapping aid. Initially, 7,881 articles were found in the literature. The methodological steps applied to them resulted in 67 articles, which were used in the analysis. The results indicated increased interest in research in the area, with Brazil having the second-highest number of studies. Several publications utilized orbital images. However, there has been recent growth in the use of images obtained from UAV-mounted sensors. In addition to the NDVI and EVI indices, other indices have been used recently for analyzing burn severity and the vegetation recovery process. These subjects are primarily related to integrated fire management, which must consider conserving biodiversity and human use to reduce the fire's intensity and severity to make them more controllable and reduce their negative impacts. Therefore, remote sensing is essential for understanding the fire spatial-temporal behavior and, consequently, serves as a scientific aid to help decision-making in burn prescription cases, considering the ecosystems maintenance and the better grassland use.

Keywords: Burns. Spectral indices. Grasses. NBR. VOSviewer.

1 INTRODUÇÃO

As formações campestres são um componente importante dos ecossistemas, cobrindo mais de 30% da área terrestre global (SHOKO; MUTANGA; DUBE, 2016) e fornecendo serviços ecossistêmicos essenciais,

como a manutenção da biodiversidade vegetal e animal, controle da erosão do solo e regulação do ciclo do carbono (WANG *et al.*, 2019). Entretanto, esse tipo de formação vegetal é altamente suscetível a fragmentação, e os remanescentes são vulneráveis aos efeitos de uso da terra, regimes de gestão e variabilidade climática (HE; YANG; GUO, 2020).

Além dos fatores listados anteriormente, pode-se dizer que o fogo é um dos principais responsáveis por distúrbios na dinâmica dos processos ecológicos em diversos ecossistemas, inclusive nas formações campestres (HOFFMANN *et al.*, 2012), configurando-se como um importante agente nas transformações do comportamento do sistema terrestre (BOND; WOODWARD; MIDGLEY, 2005).

Embora algumas dessas mudanças nos ecossistemas sejam desejáveis sob uma perspectiva ecológica, as consequências destrutivas e prejudiciais dos incêndios são geralmente consideradas indesejáveis e requerem uma maior observação (SZPAKOWSKI; JENSEN, 2019). Neste contexto, é necessário caracterizar os padrões espaço-temporais de incidência de fogo em formações campestres, para uma melhor compreensão das relações ambientais e da influência dos fatores antrópicos incidentes sobre a dinâmica da paisagem. Para analisar o efeito da incidência de queimadas em múltiplas escalas espaciais, temporais e espectrais, o uso de produtos derivados de sensoriamento remoto se consolida como uma importante fonte de dados (ABDOLLAHI *et al.*, 2018; CHUVIECO *et al.*, 2019; GIGLIO *et al.*, 2010).

À medida que os estudos de aplicações de sensoriamento remoto e fogo são desenvolvidos, surge a necessidade de estudos que apresentem uma revisão abrangente das investigações realizadas, a fim de compreender os padrões de investigação nesta área. Assim, revisões sistemáticas aplicadas à geociência se tornaram mais recorrentes na atualidade, tendo em vista que o sensoriamento remoto vem sendo cada vez mais usado como uma fonte complementar de informação, sendo, em muitos casos, a única fonte viável (SHEFFIELD *et al.*, 2018). Revisões sistemáticas são úteis porque utilizam um método que se baseia na visualização de informações quantitativas sobre um domínio de pesquisa, permitindo ao pesquisador obter *insights* sobre aspectos específicos do tema estudado (SU; LEE, 2010).

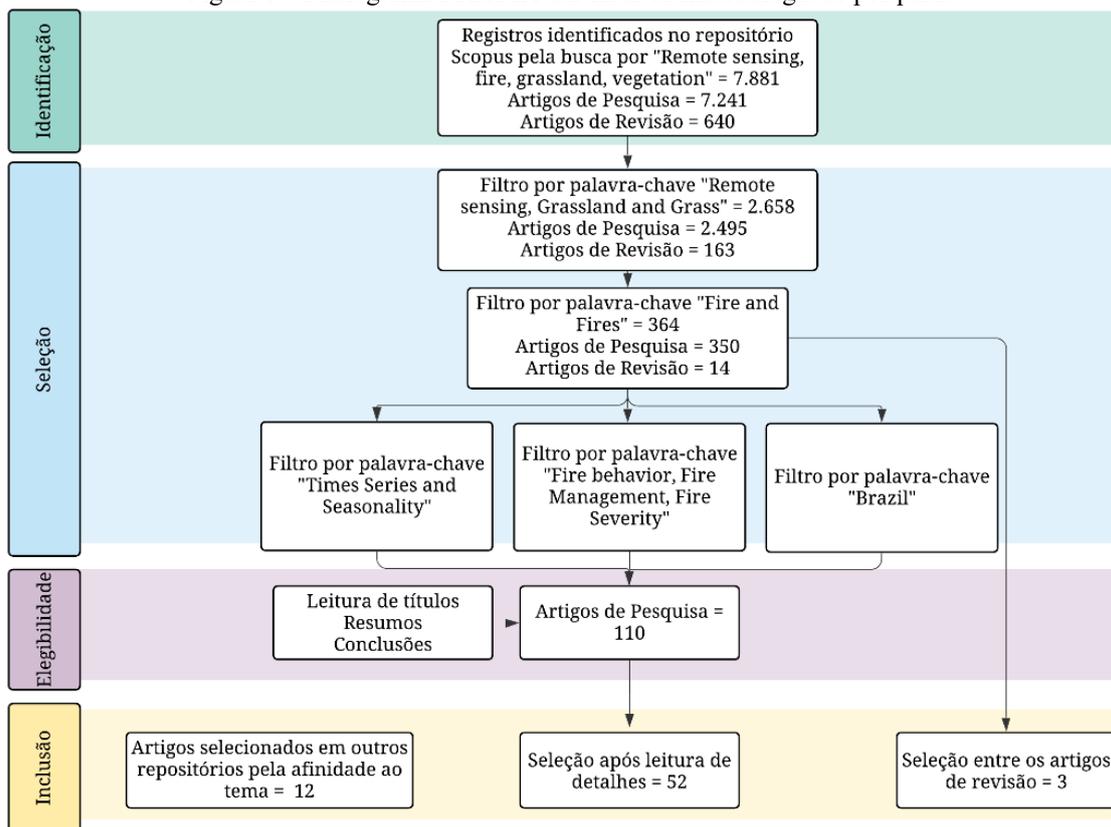
Uma das alternativas metodológicas é denominada Itens de Relatório Preferidos para Revisões Sistemáticas e Meta-Análise (PRISMA), a qual foi atualizada para abordar vários avanços conceituais e práticos na ciência das revisões sistemáticas (MOHER *et al.*, 2009). O método PRISMA foi utilizado anteriormente para revisão de estudos de sensoriamento remoto, analisando conjuntos de dados e monitoramento ambiental em grande escala (TAMIMINIA *et al.*, 2020), simulações de cenários urbanos em modelos de mudança de uso do solo (WANG; MURAYAMA; MORIMOTO, 2021), métodos de aprendizado de máquina (SHEYKHMOUSA *et al.*, 2020) e processamento de dados de Veículos Aéreos não Tripulados (ESKANDARI; MAHDIANPARI; MOHAMMADIMANESH, 2020). Além do método PRISMA, este estudo utilizou também o VOSviewer, um software de mapeamento bibliométrico capaz de oferecer um ponto de vista abrangente da literatura científica, para realizar uma revisão sistemática da literatura científica sobre o estado da arte acerca do comportamento e uso do fogo em formações campestres por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

2 METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, optou-se por uma revisão sistemática, reunindo as principais publicações, os autores influentes, os periódicos, os países e as organizações, e as tendências de pesquisa emergentes a respeito de técnicas e dados de sensoriamento aplicados ao entendimento do uso do fogo em formações campestres publicados até março de 2021.

Não foram encontrados na literatura estudos que utilizassem de revisão sistemática para entender como o sensoriamento remoto é aplicado para analisar o fogo em formações campestres, surgindo, assim, uma necessidade de sintetizar este conhecimento sobre o tema. Esta pesquisa utilizou o método PRISMA, que é dividido em quatro fases denominadas: Identificação; Seleção; Elegibilidade; e Inclusão, apresentados na Figura 1 e descritas nos itens a seguir.

Figura 1 – Fluxograma PRISMA das fases da metodologia de pesquisa.



Fonte: Os autores (2021).

2.1 Etapa 1: Identificação

Para retratar o foco deste estudo na fase de identificação, a abordagem adotada para consultar a literatura consistiu em uma busca de palavras que melhor representassem a temática de interesse, sendo elas: “remote sensing”, “fire”, “vegetation” e “grassland”. As palavras-chave foram utilizadas para filtragem na biblioteca Scopus (www.scopus.com), a qual é um dos maiores bancos de dados de resumos e citações do mundo da literatura de pesquisa revisada por pares, composta por mais de 5.000 editoras internacionais (VIANA *et al.*, 2017). Foram selecionados somente documentos publicados no formato artigo de pesquisa e revisão, nos idiomas português, inglês e espanhol. Nesta primeira etapa foram encontrados 7.881 artigos.

2.2 Etapa 2: Seleção

Os artigos identificados na etapa de identificação, foram extraídos para esta etapa de seleção e filtrados utilizando as palavras-chave “remote sensing”, “grassland” e “grass”, para selecionarmos pesquisas com ênfase em sensoriamento remoto aplicado a formações campestres, o que resultou em 2.658 artigos. Posteriormente, eles foram submetidos a um novo filtro, onde optou-se pela utilização das palavras-chave “fire” e “fires”, com o intuito de compreender como vem sendo abordada a ocorrência de fogo nesse tipo de vegetação, resultando em 364 artigos.

Dentre eles, os 14 artigos de revisão encontrados foram diretamente selecionados para a etapa de elegibilidade. Posteriormente, os outros 350 artigos científicos foram direcionados para identificação das palavras-chave e eixos temáticos por meio do software Vosviewer (Figura 2), o qual é utilizado para criar mapas baseados em dados da rede, formando *clusters*. O tamanho do círculo é determinado pelo peso do item e a cor pelo *cluster* a qual o item pertence, as linhas entre os círculos representam os *links*, e a distância entre os círculos indica a força da relação entre as palavras-chave de ocorrência (ECK; WALTMAN, 2020; WALTMAN; VAN ECK, 2013).

revisão sistemática e tiveram algumas de suas informações catalogadas (Tabela 1). Além disso, nesta etapa final o software Vosviewer foi utilizado para identificar a relevância dos artigos, sua contribuição regional e global, além dos satélites, sensores e índices espectrais mais empregados, assim como os principais periódicos e tendências de pesquisa.

Tabela 1 – Parâmetros catalogados durante a revisão sistemática.

Parâmetro	Descrição
Tipo	Definição do tipo de artigo (pesquisa ou revisão)
Citações	Número de citações do artigo em relação ao tempo de publicação
Nome	Nome dos artigos de pesquisa e revisão
Autor	Nome do autor do artigo
Periódico	Nome do periódico onde o artigo foi publicado
Ano de publicação	Ano da publicação do artigo
Satélites e sensores	Nome do satélite e sensor utilizado no artigo
Índices espectrais	Índices utilizados para os alvos do artigo

Fonte: Os autores (2021).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise da produção científica e sua relevância

Das 7.893 publicações encontradas, após a aplicação dos filtros apresentados na Figura 1, restaram 67 artigos, os quais foram analisados mais profundamente nesta revisão sistemática (constam em anexo como material complementar). Os artigos revisados foram publicados entre os anos de 1998 e 2021, sendo considerados para 2021 somente artigos publicados até o primeiro trimestre, data em que a coleta da base de dados foi realizada (Figura 3).

Figura 3 – Distribuição das publicações de janeiro de 1998 a março de 2021.



Fonte: Os autores (2021).

Pode-se perceber em todo período uma tendência de crescimento nas publicações, principalmente a partir de 2010. Os anos de maior destaque foram 2013 e 2020, com 6 e 7 artigos científicos publicados, respectivamente, sendo que o ano de 2021 pode facilmente ultrapassá-los, pois apenas no primeiro trimestre

foram encontrados três artigos na literatura científica utilizando técnicas de sensoriamento remoto para o entendimento do fogo em formações campestres.

Além disso, também foram contabilizados o número de citações de cada artigo, que segundo GARNER et al. (2018) é a medida comumente adotada para avaliar a influência acadêmica das publicações. No entanto, para normalizar o número de citações ao longo do tempo e definir o grau de influência dos artigos revisados, foi utilizada uma equação onde: $\text{Influência} = \text{Citações}/(\text{Ano base} - \text{ano de publicação})$. Os artigos foram classificados da maior para a menor influência e os seis maiores estão apresentados na (Tabela 2).

Tabela 2 – Artigos com maior influência.

Autor	Título	Ano	Revista	Influência
CHUVIECO <i>et al.</i> , 2019	<i>Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation</i>	2019	Remote Sensing of Environment	34,0
STAVIER; ARCHIBALD; LEVIN, 2011	<i>Tree cover in sub-Saharan Africa: Rainfall and fire constrain forest and savanna as alternative stable states</i>	2011	Ecology	29,0
BOWMAN <i>et al.</i> , 2020	<i>Vegetation fires in the Anthropocene</i>	2020	Nature	24,0
(ROY <i>et al.</i> , 2005)	<i>Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data</i>	2005	Remote Sensing of Environment	22,8
YEBRA <i>et al.</i> , 2013	<i>A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products</i>	2014	Remote Sensing of Environment	16,4
ALVARADO <i>et al.</i> , 2017	<i>Drivers of fire occurrence in a mountainous Brazilian cerrado savanna: Tracking long-term fire regimes using remote sensing</i>	2017	Ecological Indicators	11,0

Fonte: Os autores (2021).

Grande parte dos artigos com maior influência são os da modalidade de revisão e foram disponibilizados há menos de 10 anos, sendo que dois deles foram publicados nos últimos três anos. Uma característica em comum entre eles é a escala de abrangência da área de estudo, os quais possuem uma análise mais regional ou global. Como foi observado por ROY et al. (2005), uma das vantagens da utilização do sensoriamento remoto por satélite é exatamente poder monitorar a queima da vegetação em escala mais abrangentes. Além disso, vale destacar o trabalho de Chuvieco (2019), que realiza uma revisão das tendências do sensoriamento remoto aplicado ao fogo nos últimos 40 anos, sintetizando em um único documento a base física para detectar áreas queimadas a partir de observações de satélite, as tendências históricas do uso de sensores de satélite para monitorar áreas queimadas, e ainda identifica potenciais oportunidades futuras para melhorar a detecção de áreas queimadas por satélites de observação da Terra.

3.2 Análise dos satélites e sensores utilizados

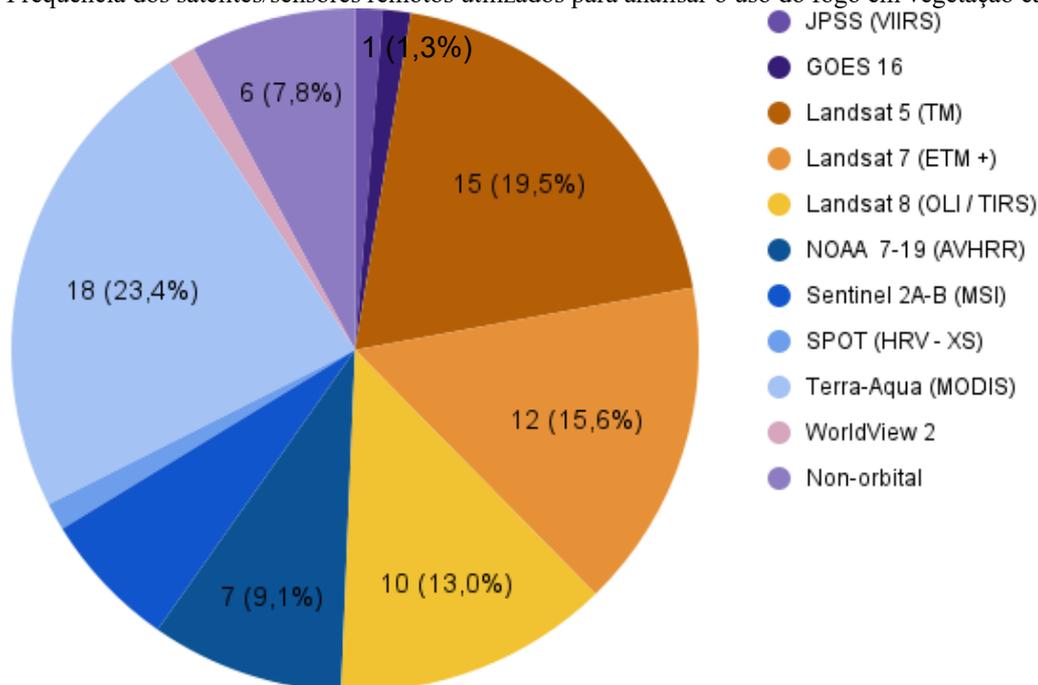
Neste estudo, foi encontrada uma grande variedade de sensores e plataformas utilizados em diferentes estágios para avaliação do comportamento do fogo em formações campestres por meio de dados de sensoriamento remoto. A lista com os nomes dos satélites/sensores, operador, e suas resoluções temporal e espacial estão descritos na Tabela 3, e a frequência com que foram utilizados está apresentado na Figura 4.

Tabela 3 – Satélites e sensores encontrados na revisão sistemática.

Satélite (sensor)	Operador	Resolução temporal	Resolução espacial	Publicações
JPSS (VIIRS)	NOAA	1 - 2 dias	375-750 m	1
GOES - 16	NOAA / NASA	Geoestacionário	1 - 4 km	1
Landsat 5 (TM)	NASA / USGS	16 dias	30 - 120 m	15
Landsat 7 (ETM +)	NASA / USGS	16 dias	15 - 30 - 60 m	12
Landsat 8 (OLI/ TIRS)	NASA / USGS	17 dias	OLI: 15/30 m TIRS: 100 m	10
NOAA-7-19 (AVHRR)	NOAA	1 - 2 dias	1100 m	7
Sentinel 2A-B (MSI)	ESA	5 dias	10 - 20 60 m	5
SPOT (HRV - XS)	CNES	26 dias	2,5 -20 m	1
Terra-Aqua (MODIS)	NASA	1 - 2 dias	250 m	18
WorldView 2	Digitalglobe	1,1 - 3,7 dias	0,3 - 2 m	1

Fonte: Os autores (2021).

Figura 4 – Frequência dos satélites/sensores remotos utilizados para analisar o uso do fogo em vegetação campestre.



Fonte: Os autores (2021).

Embora a maioria dos estudos, cerca de 48%, tenha utilizado a série Landsat (ALVARADO; SILVA; ARCHIBALD, 2018; PEREIRA JR. et al., 2014; WILLIAMSON; MURPHY; BOWMAN, 2014), imagens ópticas de resolução espacial mais baixa, como as obtidas pelo MODIS e AVHRR, representaram aproximadamente 23% e 9%, respectivamente. Vale também salientar que apenas um estudo fez uso de imagens orbitais hiperespectrais, utilizando imagens do WorldView (FERNÁNDEZ-GUISURAGA; CALVO; SUÁREZ-SEOANE, 2020). Enquanto, outros satélites com resoluções espaciais medianas, como o Sentinel e o SPOT, foram utilizados em aproximadamente 8% dos artigos revisados.

Em relação as plataformas orbitais, existem diferentes alternativas, tais como as apresentadas pelo programa Landsat, que tem os satélites Landsat 7 e 8 em operação atualmente e no segundo semestre de 2021 lançou o Landsat 9 para dar continuidade a série. Todos os satélites, operados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), cobrem a Terra a cada 16 dias, coletando dados em várias bandas nas faixas de onda do visível (V) infravermelho próximo (NIR) e médio (SWIR), infravermelho termal (TIR), em uma resolução de 30 e 100 m (USGS, 2021). Um dos pontos fortes de satélites como o Landsat são os ciclos consistentes de revisita (ALVARADO; SILVA; ARCHIBALD, 2018; GOODWIN; COLLETT, 2014), que neste momento, com três satélites em operação, deve diminuir para 8 dias, fornecendo dados importantes para a análise de séries temporais.

Por outro lado, o sensor *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo dos satélites Terra e Aqua, também administrados pela NASA, possuem uma resolução espacial mais baixa, porém

possuem uma alta resolução temporal com revisitas entre 1-2 dias. Este sensor fornece alta sensibilidade radiométrica de 12 bits, obtendo dados em 36 bandas espectrais que variam de 0,4 a 14,4 μm , com uma resolução espacial de 250 m a 1 km, desempenhando papel vital no desenvolvimento de modelos de sistemas terrestres interativos, globais e validados, capazes de prever mudanças globais com precisão suficiente para ajudar os formuladores de políticas a tomar decisões acertadas sobre a proteção do meio ambiente (NASA, 2021).

Imagens MODIS e Landsat provavelmente foram utilizadas com mais frequência por causa de sua longa série histórica, além de serem disponibilizadas gratuitamente. Uma taxa de revisita mais frequente dos satélites Aqua e Terra operando em conjunto permite detectar não apenas mudanças drásticas na cobertura, mas qualquer desvio do estado saudável esperado do ecossistema (SLINGSBY *et al.*, 2020), fornecendo consequentemente informações relevantes que servem de apoio para compreensão do uso do fogo (CHEN *et al.*, 2017).

Porém, vale destacar que algumas desvantagens do sensor MODIS estão correlacionadas com a sua baixa resolução espacial, o que o impossibilita detectar incêndios de pequeno porte. Uma opção para solucionar este problema seria a utilização de dados do Sentinel-2, satélite lançado mais recentemente, em 2015, que transporta uma carga útil de instrumento óptico que possui 13 bandas espectrais, com uma resolução espacial de 10 a 60 m e um tempo de revisita de cinco dias com os dois satélites Sentinel 2A e 2B em operação (ESA, 2021).

Em razão da borda vermelha e bandas SWIR e da resolução espacial refinada, os dados ópticos do Sentinel 2 podem apresentar melhor desempenho aplicados a vegetação se comparado a outros sensores. A combinação de bandas isoladas e índices de vegetação das imagens do satélite Sentinel-2 têm potencial e robustez para estimativas de biomassa de pastagens naturais, pois apresentaram desempenhos superiores na discriminação de espécies de gramíneas em relação aos dados do Landsat e Worldview (GUERINI FILHO; KUPPLICH; QUADROS, 2020).

Fontes de dados não orbitais representam aproximadamente 8% da frequência dos sensores remotos utilizados para analisar o uso do fogo em vegetação campestre. Estes dados em sua maioria foram obtidos por meio de veículos aéreos não tripulados (VANT's), e todos foram publicados recentemente, nos últimos cinco anos, apresentando como uma das suas principais vantagens a obtenção de imagens com alta resolução temporal e espacial. Além das possibilidades para aquisição de dados de sensoriamento remoto já existentes, novas fontes de informação estão surgindo, tais como a utilização de sensores multiespectrais e hiperespectrais miniaturizados acopláveis (HAKALA *et al.*, 2018; RAMPANT; ZDUNIC; BURROWS, 2019, CRUSIOL *et al.*, 2020).

3.3 Análise dos Índice Espectrais

Estudos de refletância de áreas de pastagem com diferentes composições fitossociológicas e variações climáticas podem colaborar para a classificação e discriminação das formações campestres (YANG *et al.*, 1998). Utilizando-se técnicas de análise de imagens, é possível identificar características bastante particulares da vegetação, como ciclo anual e variações fenológicas, demonstrando o potencial de estudos deste tipo de formação vegetal por meio de sensoriamento remoto.

O processo de interação entre a radiação eletromagnética referente ao espectro óptico e uma folha depende de fatores químicos como pigmentos fotossintetizantes e água, além de elementos estruturais como organização dos tecidos da folha, podendo ser analisado do ponto de vista da absorção, da transmissão e da reflexão da radiação (FLORENZANO, 2011).

A partir destas informações da assinatura espectral da vegetação, pode-se extrair modelos matemáticos representados por diversos índices, os quais são desenvolvidos para avaliar a cobertura vegetal e são capazes de relacionar a assinatura espectral e os parâmetros mensuráveis no campo tanto quantitativamente quanto qualitativamente (GUERINI FILHO; KUPPLICH; QUADROS, 2020).

Os índices são apontados como indicadores de crescimento e vigor da vegetação e podem ser utilizados para diagnosticar vários parâmetros biofísicos com os quais apresentam altas correlações, incluindo o índice

de área foliar, a biomassa, a porcentagem de cobertura do solo, a atividade fotossintética e a produtividade da vegetação. Nesta revisão sistemática, os índices espectrais mais utilizados nos artigos revisados foram catalogados e estão apresentados na (Tabela 4).

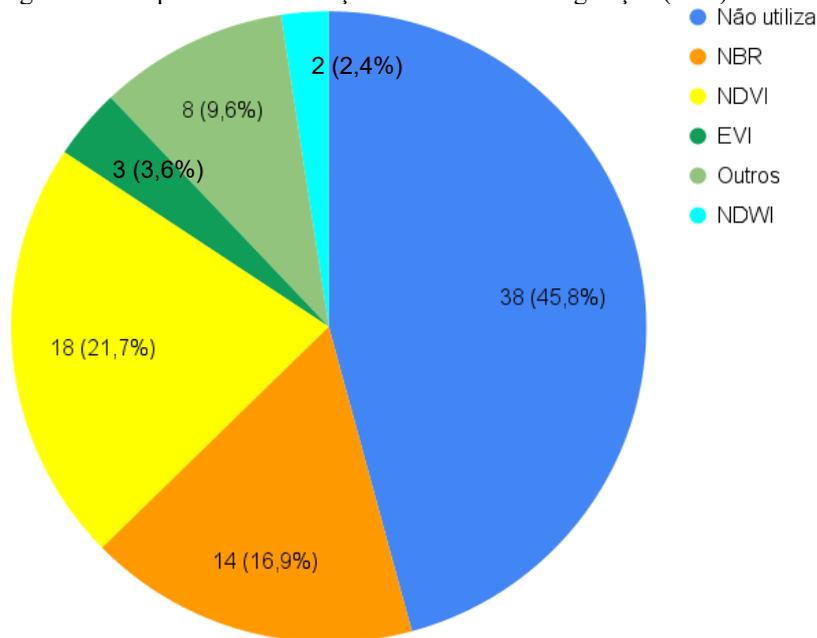
Tabela 4 – Principais índices espectrais utilizados nos estudos de sensoriamento remoto para analisar o uso do fogo em vegetação campestre.

Índice	Equação	Autor
<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI)	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	ROUSE et al., 1973
<i>Enhanced Vegetation Index</i> (EVI)	$EVI = G * \frac{(NIR - Red)}{(NIR + C1 * Red - C2 * Blue + 1)}$	HUETE et al., 1997
<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i> (SAVI)	$SAVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red + L) * (1 + L)}$	HUETE, 1988
<i>Normalized Difference Water Index</i> (NDWI)	$NDWI = \frac{\rho(0.86\mu m) - \rho(1.24 \mu m)}{\rho(0.86\mu m) + \rho(1.24 \mu m)}$	GAO, 1996
<i>Normalized Burn Ratio</i> (NBR)	$NBR = \frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR}$ $dNBR = NBR_{pre-fire} - NBR_{pos-fire}$	KEY; BENSON, 2006

Fonte: Os autores (2021).

Ao longo do estudo, identificamos que mais da metade dos artigos utilizaram Índices de Vegetação (IV) como forma de investigar o fogo e suas interações com a vegetação (Figura 5). Uma característica geral dos IV's é a redução do volume de dados a serem analisados por meio das estimativas das variáveis biofísicas estruturais e fisiológicas que podem ser extraídas da vegetação.

Figura 5 – Frequência de utilização dos Índices de Vegetação (IV's).



Fonte: Os autores (2021).

Entre os índices mais conhecidos, aplicado pela equação proposta por Rouse et al. (1973), o NDVI é obtido através da normalização das reflectâncias nas bandas do NIR e Vermelho (R), com valores que variam de -1 a +1, entretanto, no que diz respeito a vegetação, está entre os valores que variam de 0 a +1. O NDVI foi o IV com mais destaque, sendo utilizado em aproximadamente 22% dos artigos revisados e aplicado em áreas de estudo distribuídas por todos os continentes. Por exemplo, YANG et al., (1998) demonstrou que a série temporal de dados de NDVI é uma métrica viável para medir desempenho de pastagens com influências climáticas sazonais.

Um dos desafios de se trabalhar com formações campestres são os efeitos causados pelo solo, efeito atmosférico e variação na densidade de vegetação. Para suavizar as limitações do NDVI em relação aos efeitos de fundo, utilizar índices espectrais que levam em consideração essas interferências, como o SAVI e o EVI, é uma solução (ALVARADO, S.T. *et al.*, 2017).

Assim, um índice de vegetação como o SAVI envolve apenas a adição de uma constante, L , ao denominador da equação NDVI, considerando três fatores de ajuste variando de acordo com a densidade da vegetação: muito baixas ($L = 1$), intermediárias ($L = 0,5$) ou mais altas ($L = 0,25$) (HUETE, 1988). Para o EVI, além da constante do solo do SAVI, temos as constantes $C1$ e $C2$ que são funções que usam a faixa azul para corrigir as influências do aerossol na faixa vermelha, sendo mais usual adotar os valores $G = 2,5$, $C1 = 6,0$ e $C2 = 7,5$ (HUETE *et al.*, 1997). O EVI correspondeu a cerca de 4% dos IV. O índice tem uma versão de disponibilização por meio de uma série temporal do MOD13Q1 - produto de dados MODIS. O produto EVI MODIS sintetiza dados de vegetação para cada período de 16 dias e está disponível desde fevereiro 2000, com 250 m de resolução espacial (ALVARADO, S.T. *et al.*, 2017).

Portanto, os índices espectrais têm sido aplicados em vários aspectos da ciência do fogo e gestão, incluindo estimativa de combustível, mapeamento de risco de incêndio, avaliação de gravidade de queima, detecção de incêndio e estimativa de taxa de propagação de incêndio (DÍAZ-DELGADO; LLORET; PONS, 2003; WANG, J. *et al.*, 2019; WULDER *et al.*, 2020). Dentre eles um dos mais utilizados recentemente é o NBR que é uma razão entre o infravermelho próximo NIR e a região do SWIR. E foi desenvolvido para identificar áreas queimadas após o fogo e fornecer uma medida quantitativa de sua severidade (KEY; BENSON, 2006).

O NBR é sensível principalmente à clorofila e ao conteúdo de água nos solos e na vegetação, sendo que características associadas de uso da terra, histórico de incêndios, topografia, clima e dados de campo, precisam ser todos avaliados em conjunto para estabelecer estratégias eficazes de gestão de áreas protegidas e prescrever queimadas no caso do manejo do fogo (FRANKE *et al.*, 2018). O NBR correspondeu a cerca de 17% dos IV's utilizados, porém nota-se que ele é utilizado em conjunto com outros índices na maior parte dos estudos em que é mencionado, e são notoriamente aplicados para modelar a capacidade de resposta da vegetação após eventos de perturbação com fogo (ADAGBASA; ADELABU; OKELLO, 2020a).

Ainda considerando a região do SWIR, o NDWI correspondeu a aproximadamente 2% dos IV's utilizados. Por utilizar faixas de resposta da água na vegetação, pode minimizar a confusão entre áreas queimadas de áreas úmidas ou áreas de solo exposto para plantio, além de se poder estimar a biomassa seca (XU *et al.*, 2014). Todos esses efeitos implicam em uma resposta da vegetação altamente variável que também depende das diferentes estratégias de regeneração da planta após o fogo, como por exemplo a produção massiva de sementes, rebrota, dentre outros (ADAGBASA; ADELABU; OKELLO, 2020).

Outros IV's foram utilizados em cerca de 9% dos artigos. Foram apresentados em conjunto com NDVI ou NBR, ou ainda com índices meteorológicos e de solo. Além disso, vale ressaltar que dados geomorfométricos combinados à resposta da vegetação podem fornecer informações sobre a severidade das áreas queimadas (EVANGELIDES; NOBAJAS, 2020), e as interações entre a severidade do fogo e a regeneração das plantas, bem como aquelas entre os fatores topográficos, climáticos e de vegetação, são ainda pouco conhecidas.

3.4 Contribuição regional e global

Dentre os países de origem das instituições dos autores dos artigos revisados e a sua rede de colaboração (Figura 6), cerca de dez países se destacaram (Tabela 5). Pode-se perceber que a maior contribuição foi a dos Estados Unidos, com aproximadamente 25% dos artigos e 34% das citações, seguido pelo Brasil, com 16% e 7% dos artigos e citações, respectivamente. Ainda que o Brasil tenha um pouco mais da metade do número de artigos que os Estados Unidos, pode-se perceber que a sua força é quase a metade, isto se deve, provavelmente pelo fato das conexões entre os autores estadunidense. A Espanha se encontra com quatro publicações a menos que o Brasil, porém possui uma força quase equivalente, que pode se dar pelo fato de ter mais de 300 citações a mais que o Brasil.

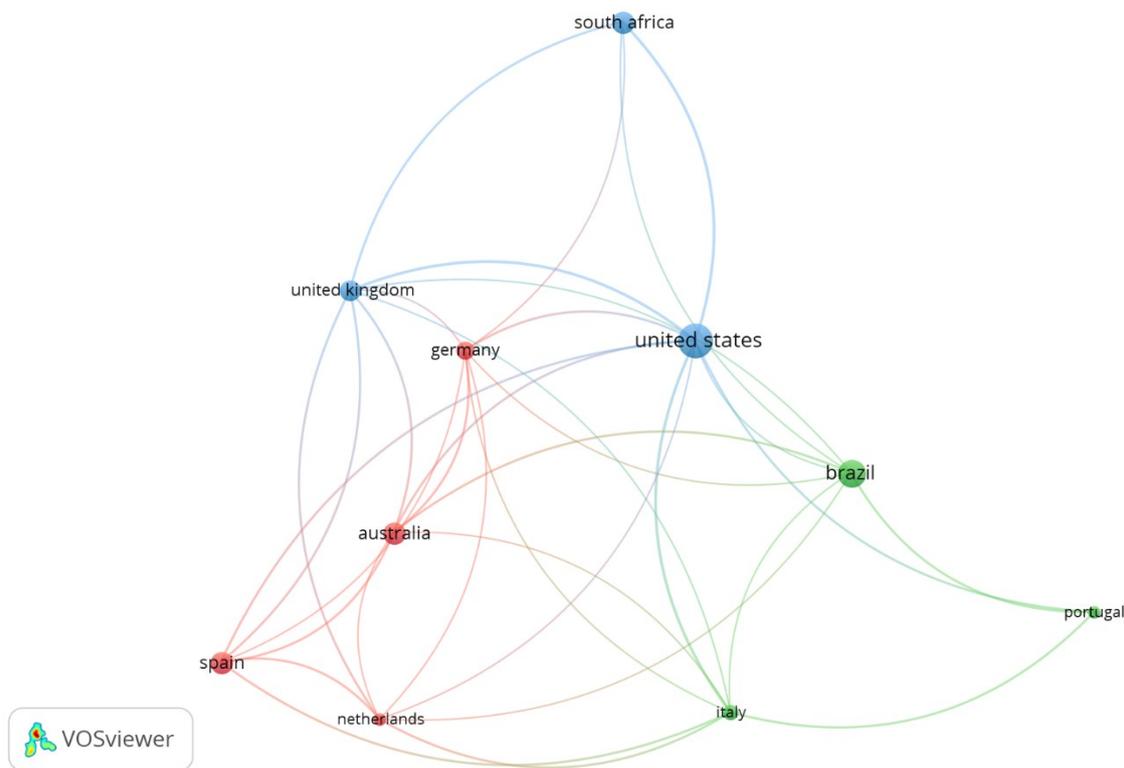
Tabela 5 – Países de origem das instituições dos autores dos artigos revisados.

País	Artigos	Citações	Força
Estados Unidos	22	1567	19
Brasil	14	319	10
Espanha	10	620	11
África do Sul	9	500	7
Australia	9	358	12
Reino Unido	8	686	14
Alemanha	6	149	10
Itália	5	246	13
Holanda	3	139	10
Portugal	3	64	6

Fonte: Os autores (2021).

Se considerarmos as publicações originárias da Europa, em conjunto, elas representam cerca de 36% dos artigos publicados e 40% das citações, enquanto as publicações americanas representam 40% dos artigos publicados e 41% das citações. Por fim, publicações de origem de países no continente africano e na Oceania tiveram somente um representante cada, sendo eles a África do Sul, com 10% dos artigos e 11% das citações, e a Austrália, com 10% artigos, e 8% citações. Neste caso, ainda que os dois países tenham o mesmo número de artigos, eles apresentaram número de citações diferentes, apresentando a Austrália quase o dobro da África do Sul, além de serem agrupados em diferentes *clusters* (Figura 6).

Figura 6 – Análise da rede de *clusters* das principais conexões entre países dos artigos revisados.



Fonte: Os autores (2021).

A rede de conexão entre os autores possui 10 nós, 3 *clusters* e 34 *links*. Cada *link* tem uma força, representada por um valor numérico positivo. Quanto mais alto esse valor, mais forte será. A força dele pode, por exemplo, indicar o número de referências citadas que duas publicações têm em comum, no caso de *links* de acoplamento bibliográfico, o número de publicações em que os pesquisadores são coautores, ou o número de publicações em que dois termos ocorrem juntos (ECK; WALTMAN, 2020).

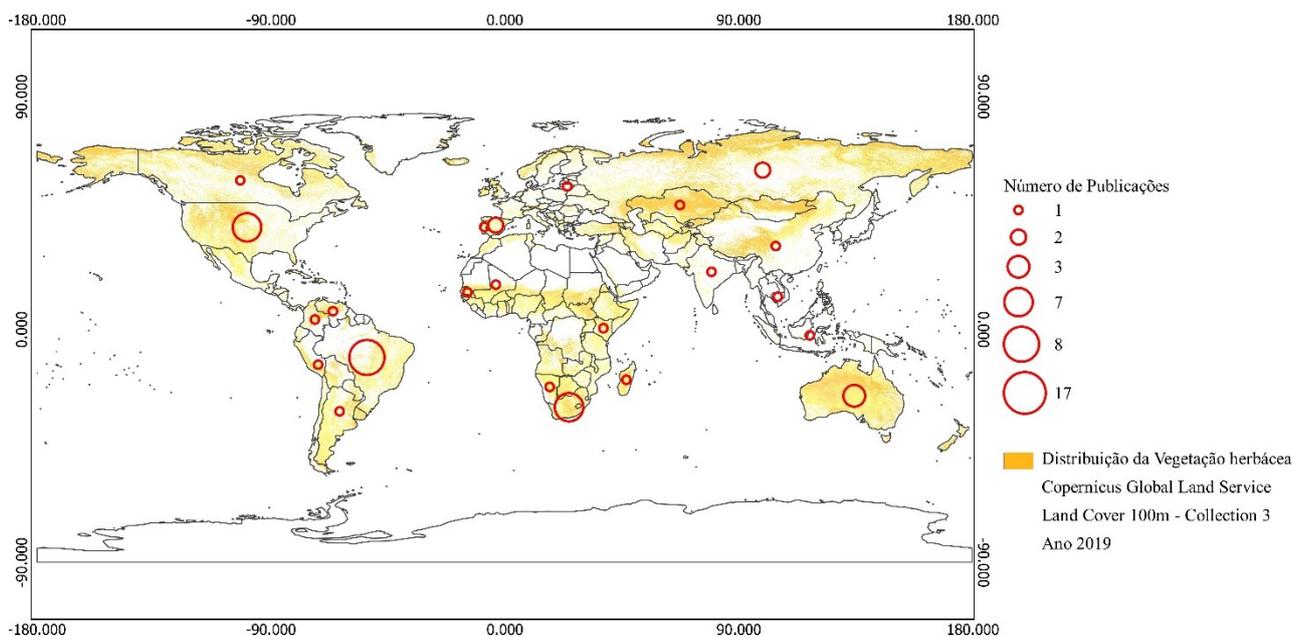
Ao analisarmos os países de origem das publicações, observamos que as áreas de estudo muitas vezes não correspondiam aos mesmos países. Sendo assim, para analisarmos a distribuição da vegetação campestre

e do fogo no mundo, utilizamos a base de dados *Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3 -2019*, (BUCHHORN *et al.*, 2020) e os focos de calor obtidos pelo sensor MODIS, coleção 6.1, também para o ano de 2019 (NASA, 2022) A combinação da distribuição da classe de vegetação herbácea com as áreas de estudo dos artigos analisados estão demonstradas na Figura 7 e Tabela 6.

Tabela 6 – Países onde estão localizadas as áreas de estudos e relação de artigos.

Área de estudo	Nº de artigos
Brazil	17
South Africa	8
United States	8
Australia	7
Spain	3
Russia	3
Argentina	2
Cambodia	2
Canada	2
Colombia	2
India	2
China	1
Indonesia	1
Kazakhstan	1
Lithuania	1
Mali	1
Namibia	1
Peru	1
Kenya	1
Senegal	1
Sub-Saharan Africa	1
Venezuela	1
Madagascar	1
Portugal	1

Figura 7 – Distribuição geográfica das formações campestres no mundo e concentração dos artigos revisados por país.

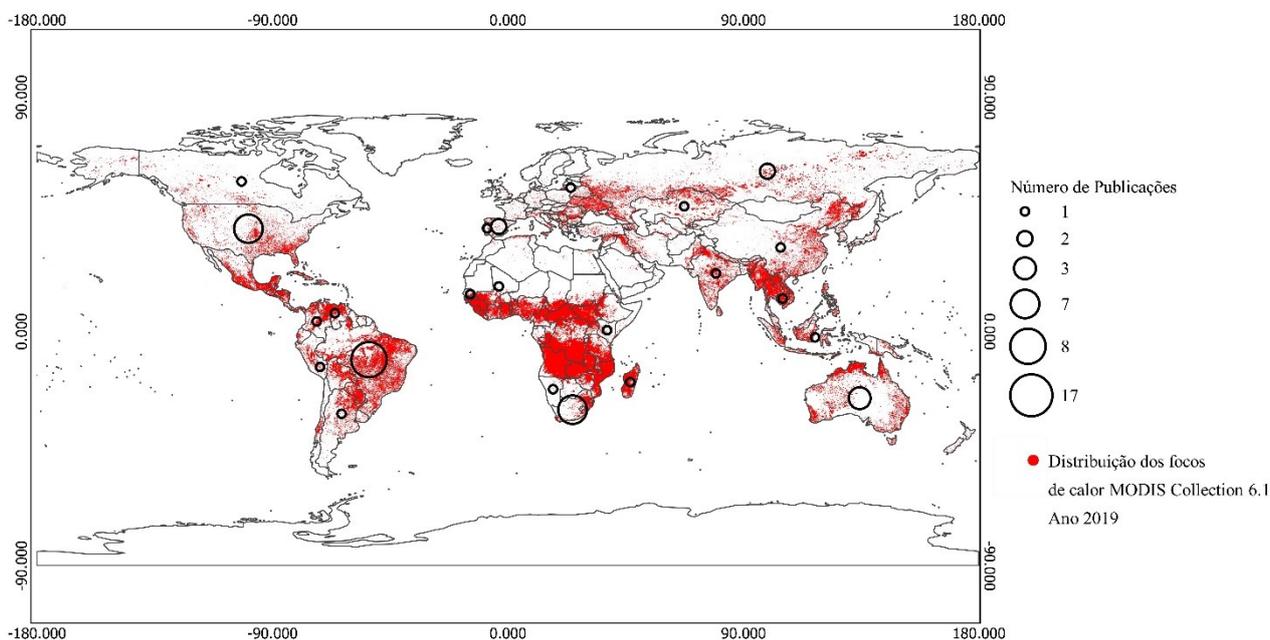


Fonte: Os autores (2021).

Ecosistemas como a savana/cerrado e estepe/pradarias/pampa são os tipos de vegetação campestre mais comuns entre a maioria dos países dos estudos analisados. Em regiões como o cerrado brasileiro, estudos para estimativas de probabilidade de incêndio são recorrentes, pois podem ajudar a prevenir incêndios

frequentes (ALVARADO et al., 2017; FRANKE et al., 2018; PEREIRA et al., 2014; SANTOS et al., 2020). Destacando que regiões com níveis intermediários de produtividade primária, como savanas tropicais, queimam com maior frequência, devido principalmente à abundante quantidade de combustível, o que consequentemente pode elevar o nível de interesse pela temática (BOWMAN *et al.*, 2020).

Figura 8 – Distribuição geográfica dos focos de calor em 2019 e concentração dos artigos revisados por país.



Na região amazônica encontram-se remanescentes de vegetação campestre com predominância de fitofisionomias de savana (DIPAOLLO, 2020). Por ser um remanescente descentralizado do bioma cerrado, o monitoramento da atividade do fogo se torna essencial à compreensão dos processos ecológicos e dos impactos humanos, assim como dos aspectos ligados à sazonalidade e padrões de incidência de fogo (ALVES; PÉREZ-CABELLO, 2017).

Ao sul do Brasil, encontra-se outra realidade, com formações de mosaicos de floresta de Araucária e Campos, onde se levanta a hipótese de a manutenção da vegetação campestre ser de origem antrópica, uma vez que a dinâmica da paisagem mostra a expansão inicial da floresta de Araucária sobre as pastagens de Campos após o pastejo e exclusão da utilização do fogo (OLIVEIRA; PILLAR, 2004).

3.5 Análise dos Periódicos

A análise de cocitação de periódicos das publicações visa olhar em quais contextos de pesquisas o tema sensoriamento remoto aplicado ao entendimento do uso do fogo em vegetação campestre vem sendo abordado. Neste estudo foram revisados artigos científicos publicados em 32 periódicos científicos, os quais foram classificados e ordenados em ordem decrescente da quantidade de artigos publicados e estão apresentados na (Tabela 7).

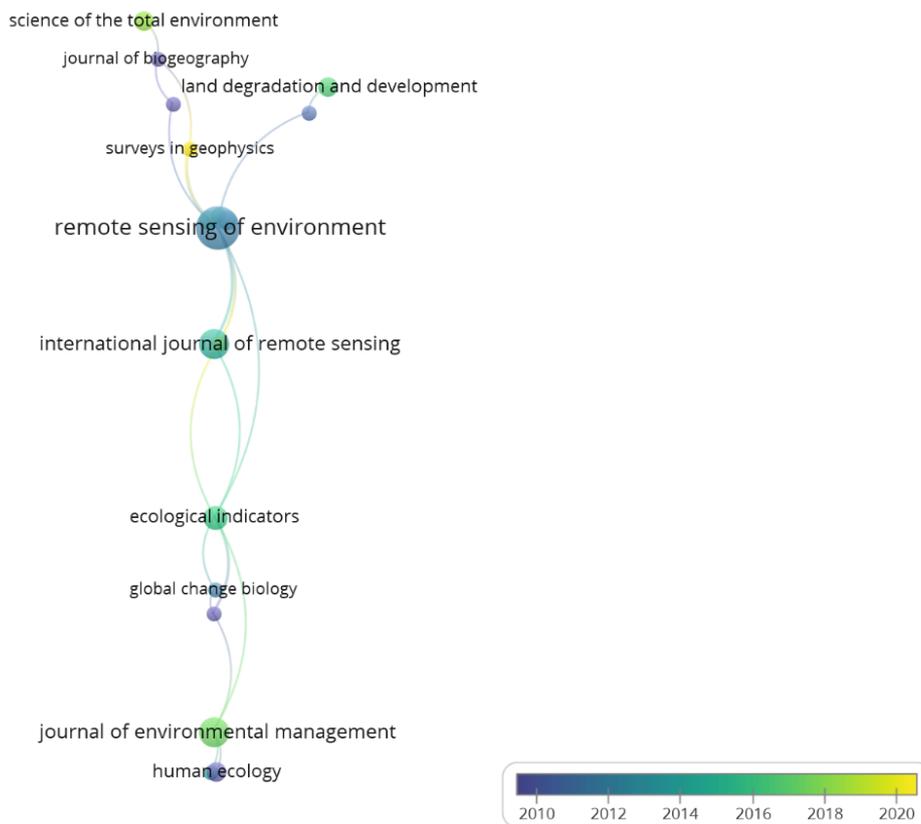
Tabela 7 – Contribuição dos periódicos.

Periódico	Artigos	Citações	Força
<i>Remote Sensing of Environment</i>	13	1124	13
<i>Journal of Environment Management</i>	5	65	4
<i>International Journal of Remote Sensing</i>	5	206	3
<i>ISPRS – Journal of Photogrammetry and Remote Sensing</i>	4	40	0
<i>Ecological Indicators</i>	3	70	7
<i>Fire Ecology</i>	2	17	1
<i>Forest Ecology and Management</i>	2	13	1
<i>Human Ecology</i>	2	193	1
<i>Land degradation and development</i>	2	55	1
<i>Science of the total Environment</i>	2	17	1
<i>Ecological Applications</i>	2	112	0
<i>Ecology</i>	2	325	0
<i>Global Ecology and Biogeography</i>	1	82	4
<i>Surveys in Geophysics</i>	1	2	4
<i>Ecosystems</i>	1	8	3
<i>Journal of Biogeography</i>	1	109	3
<i>Agricultural and Forest Meteorology</i>	1	51	2
<i>Environmental Management</i>	1	14	2
<i>Global Change Biology</i>	1	38	2
<i>New phytologist</i>	1	34	1
<i>Plos One</i>	1	34	1
<i>Applied Geography</i>	1	29	0
<i>Austral Ecology</i>	1	10	0
<i>Community Ecology</i>	1	98	0
<i>Earth Interactions</i>	1	25	0
<i>Global biogeochemical cycles</i>	1	32	0
<i>Holocene</i>	1	19	0
<i>Perspectives in plant ecology, evolution and systematics</i>	1	27	0
<i>Photogrammetric Engineering and Remote Sensing</i>	1	13	0
<i>Remote Sensing Applications society and environment</i>	1	3	0
<i>Sensors (Switzerland)</i>	1	23	0
<i>Nature Reviews Earth & Environment</i>	1	24	0
<i>Sustainability (Switzerland)</i>	1	0	0
<i>Revista Eletrônica Científica da UERGS</i>	1	0	0
<i>Revista Brasileira de Meio Ambiente</i>	1	0	0

Fonte: Os autores (2021).

A Figura 9 mostra a relação de colaboração entre os periódicos, sendo que apenas 18 periódicos tiveram algum tipo de *link*. Além disso, pode-se observar que os periódicos da área de sensoriamento remoto têm as publicações acerca do uso do fogo com maior frequência entre os anos de 2010 e 2020, no entanto, os periódicos voltados para a área da ecologia tem maior concentração em anos mais recentes e próximos de 2020.

Figura 9 – Análise da rede de clusters das conexões entre as periódicos e análise temporais de sua distribuição ao longo dos anos.

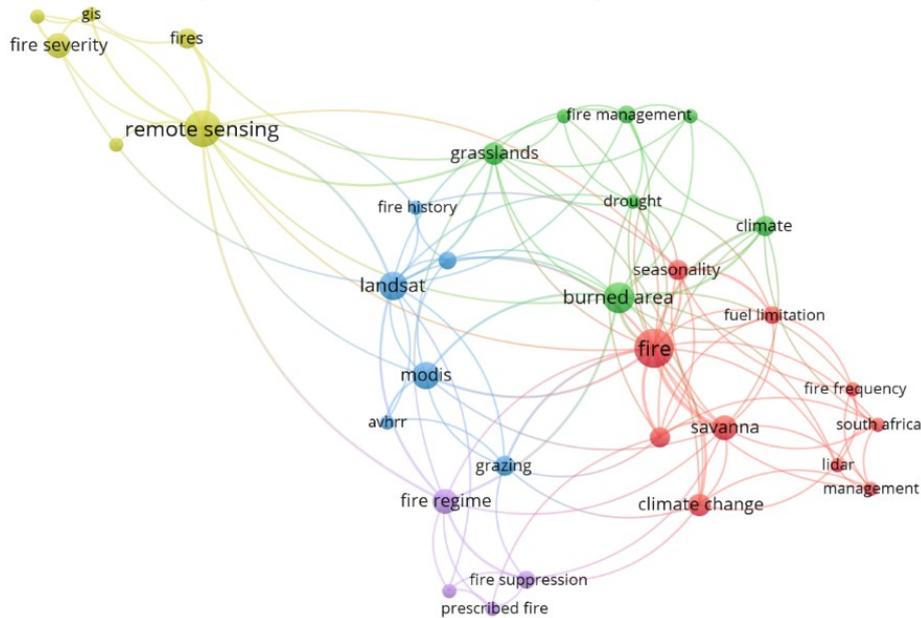


Fonte: Os autores (2021).

3.6 Temas principais e tendências

Nesta etapa foi elaborado um mapa de *clusters* das palavras-chave utilizadas pelos artigos revisados, tanto para entender a sua frequência e co-ocorrência (Figura 10), quanto para compreender a tendência temporal (Figura 11). Vale salientar que para realizar um agrupamento mais realista e com pouco ruído, palavras-chave que apareceram apenas uma vez não foram utilizadas.

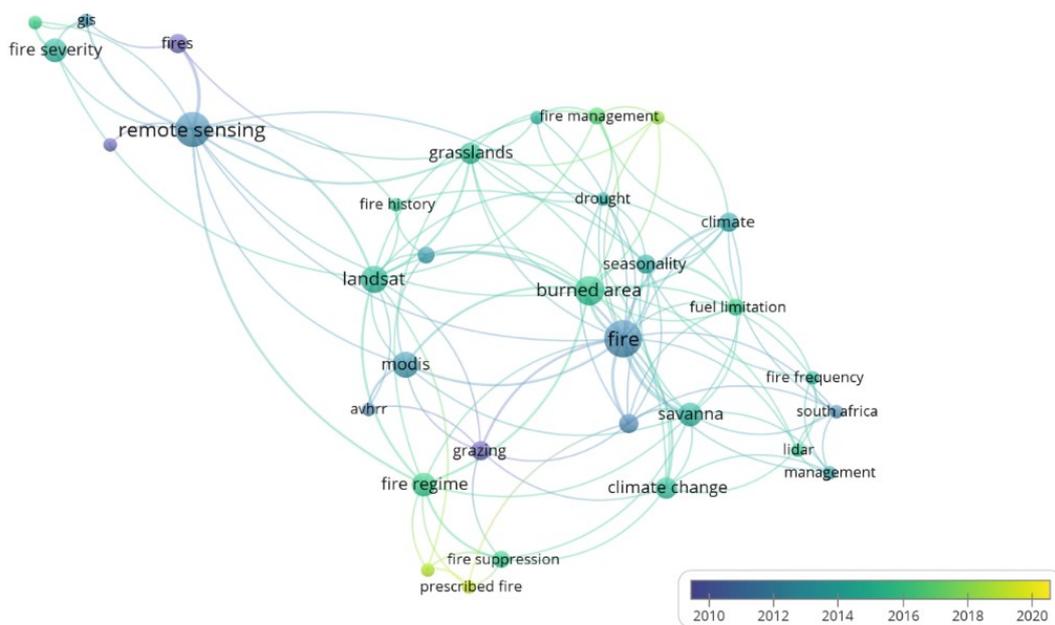
Figura 10 - Análise da rede *clusters* de palavras-chave.



Fonte: Os autores (2021).

A distribuição deste conjunto de palavras-chave revela certa consolidação de alguns tópicos de pesquisa, especificamente aqueles relacionados ao uso de séries temporais como o Landsat e MODIS, bem como o surgimento de outros tópicos relacionados à aplicação de índices espectrais para a análise da severidade de incêndios e da recuperação da vegetação.

Figura 11 - Análise da rede de *clusters* da tendência temporal dos usos das palavras-chave.



Fonte: Os autores (2021).

Ao analisarmos as concentrações das palavras-chave e sua distribuição ao longo do tempo (Figura 11), percebe-se que incêndios “wildfire” e pastagem “grazing” aparecem com maior concentração a partir de 2010. Essa tendência pode estar relacionada ao crescente uso de séries temporais para estimativas de áreas queimadas para as pastagens. Outro motivo pode estar ligado à necessidade de avaliar como as mudanças socioeconômicas contribuem para as alterações de uso e cobertura da terra, bem como avaliar se há agentes de perturbação específicos. Em áreas áridas, o declínio do pastoreio pode resultar na transição do ecossistema para um estado

diferente. No entanto, as mudanças na vegetação devido ao pastoreio reduzido provavelmente levam à substituição da prática, sendo o fogo o novo agente principal de perturbação (DUBININ *et al.*, 2010).

Sendo assim, a propagação de incêndios requer informações quanto à sua ocorrência, perigo e influência. As condições do fogo variam muito no tempo e no espaço: os combustíveis requerem tempo para se acumular, e a topografia e o microclima influenciam as condições dos combustíveis. As medições de sensoriamento remoto atendem a esses requisitos e são particularmente úteis para investigações do histórico de incêndios (ELMORE; ASNER; HUGHES, 2005).

Entre os anos de 2012 e 2016, nota-se o aumento de publicações abordando o tema de mudança climática “*climate change*” e seca “*drought*”. Sabe-se que a seca sazonal prolongada atrelada ao regime hídrico está fortemente ligada ao regime de fogo (NELSON *et al.*, 2012). Portanto, as mudanças climáticas podem influenciar essas condições, comprometendo a biomassa acima do solo das formações campestres, com efeitos adversos na saúde das pastagens, apresentando desafios significativos não apenas para a conservação da biodiversidade, mas também para os agricultores e a subsistência das comunidades em geral (SHOKO; MUTANGA; DUBE, 2016).

Por último, vale ressaltar que em anos mais recentes, entre 2018 e 2020, os temas queima prescrita “*prescribed burning*”, recuperação pós fogo “*post-fire recovery*”, manejo integrado de fogo “*integrated fire management*” apontam a tendência atual em estudos de sensoriamento remoto aplicado ao uso do fogo em vegetações campestres, as quais visam a integração entre manejo e conservação, no intuito de reduzir a intensidade e severidade do fogo, visando tornar os seus eventos mais controláveis e reduzir impactos negativos.

O fogo continua a ser usado em todo o mundo pela sociedade para vários fins, incluindo a agricultura, estimulação de floração/frutificação e rebrota de plantas, redução da carga de combustível, prevenção e seleção de espécies, eliminação de pragas, dentre outros usos. O sensoriamento remoto de áreas queimadas mudou nossa visão dos padrões de queima e a compreensão das causas e impactos dos incêndios em escalas regional, continental e global (CHUVIECO *et al.*, 2019). A observação da Terra pode apoiar significativamente as queimadas prescritas em formações campestres, servindo de subsídio à identificação de fatores essenciais para essas decisões.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão sistemática realizada neste trabalho por meio do método PRISMA identificou primeiramente 7.881 artigos na literatura científica, os quais foram selecionados e, posteriormente, ao passarem pela etapa de elegibilidade, resultaram em 67 artigos, os quais foram utilizados na meta-análise, sendo suas informações catalogadas por meio de tabelas e mapas de análise de *clusters*.

O principal objetivo desta revisão sistemática foi avaliar o estado da arte sobre o comportamento e uso do fogo em formações campestres por meio de técnicas de sensoriamento remoto. Os resultados mostram que o número de publicações sobre o tema vem aumentando ao longo dos anos e apresenta uma tendência de crescimento, comprovando o interesse da comunidade científica, sendo os Estados Unidos e o Brasil os países que mais tiveram autores trabalhando nesta temática. O Brasil apresentou contribuição de aproximadamente 16% dos artigos e 7% das citações, com estudos realizados em diferentes biomas, confirmando a importância da temática no território nacional.

Do total de publicações analisadas, a maioria delas, mais de 71%, utilizaram algum integrante da série Landsat ou do sensor MODIS. Atualmente, com o lançamento de satélites como o Sentinel, houve uma melhora nas resoluções espaciais, espectrais e temporais das imagens orbitais utilizadas para estimativas de biomassa de pastagens naturais e discriminação de espécies de gramíneas. Além disso, apenas 8% das publicações utilizaram dados não orbitais, sendo mais da metade publicadas nos últimos cinco anos, demonstrando o crescimento da obtenção de imagens obtidas por sensores acoplados a VANT's.

Em relação aos índices espectrais, pode-se dizer que sua utilização é uma importante ferramenta na análise do uso do fogo, pois fornece detalhes sobre sua influência nas mudanças da paisagem e na dinâmica da vegetação. Muitos destes índices, como o NDVI, NDWI e EVI, vêm sendo utilizados há bastante tempo,

enquanto o NBR passou a ser mais utilizado nos últimos anos, quando passou a ser aplicado relacionando os conceitos de severidade de queima presentes na ecologia voltados ao sensoriamento remoto.

As análises de *clusters* utilizando palavras-chave indicam uma tendência recente do uso de índices espectrais para a análise da severidade de incêndios e da recuperação da vegetação, levando-se em conta a integração de conservação de biodiversidade e uso antrópico, uma vez que os estudos do fogo objetivam a redução de sua intensidade e severidade, para torná-lo mais controlável e reduzir seus impactos negativos.

As mudanças climáticas vêm influenciando a biomassa acima do solo em formações campestres e, conseqüentemente, causando impactos ambientais e sociais. Ao mesmo tempo, algumas questões como a queima prescrita, recuperação da vegetação pós fogo e o manejo integrado de fogo são temas cada vez mais estudados por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

Por último, é importante ressaltar que este estudo apresenta algumas limitações, dentre elas o método de escolha dos artigos e a base de dados utilizada. Por exemplo, a revisão sistemática também pode ser desenvolvida usando outros métodos quantitativos ou qualitativos, ou até mesmo outros bancos de dados de artigos científicos, como o *Web of Science* ou *Google Scholar*, o que pode apresentar algumas diferenças nos resultados, principalmente no que diz respeito às citações. Porém, ao acrescentarmos alguns artigos chaves que não se encontravam na biblioteca Scopus, tentamos amenizar este possível problema e demonstrar o estado da arte sobre o comportamento e uso do fogo em formações campestres por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Contribuição dos Autores

A primeira autora (Pâmela Boelter Herrmann) foi responsável pela Conceptualização, Curadoria dos dados, Análise formal, Investigação, Metodologia, Visualização, Redação - minuta inicial e Redação - revisão e edição. O segundo autor (Victor Fernandez Nascimento) foi responsável pela Metodologia, Supervisão, Validação e Redação - revisão e edição. O terceiro autor (Marcos Wellausen Dias de Freitas) foi responsável pela Supervisão e Redação - revisão e edição.

Conflitos de Interesse

Os autores atestam que não há conflitos de interesse.

Referências

- ABDOLLAHI, M. *et al.* An advanced forest fire danger forecasting system: Integration of remote sensing and historical sources of ignition data. **Remote Sensing**, vol. 10, n. 6, 2018. DOI:10.3390/rs10060923.
- ADAGBASA, E. G.; ADELABU, S. A.; OKELLO, T. W. Development of post-fire vegetation response-ability model in grassland mountainous ecosystem using GIS and remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 164, n. September 2019, p. 173–183, 2020. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2020.04.006.
- ALVARADO, S.T. *et al.* Drivers of fire occurrence in a mountainous Brazilian cerrado savanna: Tracking long-term fire regimes using remote sensing. **Ecological Indicators**, vol. 78, p. 270–281, 2017. DOI:10.1016/j.ecolind.2017.02.037.
- ALVARADO, S.T.; SILVA, T.S.F.; ARCHIBALD, S. Management impacts on fire occurrence: A comparison of fire regimes of African and South American tropical savannas in different protected areas. **Journal of**

- Environmental Management**, vol. 218, p. 79–87, 2018. DOI:10.1016/j.jenvman.2018.04.004.
- BOND, W J; WOODWARD, F I; MIDGLEY, G F. The global distribution of ecosystems in a world without fire. **New Phytologist**, vol. 165, n. 2, p. 525–538, 2005. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2004.01252.x.
- BOWMAN, D. M. J. S. *et al.* Vegetation fires in the Anthropocene. **Nature Reviews Earth & Environment**, vol. 1, n. 10, p. 500–515, 2020. DOI: 10.1038/s43017-020-0085-3.
- BUCHHORN, M. *et al.* **Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe. 2020.** DOI:10.5281/ZENODO.3939050.
- CHEN, D. *et al.* Mapping fire regimes in China using MODIS active fire and burned area data. **Applied Geography**, vol. 85, p. 14–26, 2017. DOI: 10.1016/j.apgeog.2017.05.013.
- CHUVIECO, E. *et al.* Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. **Remote Sensing of Environment**, vol. 225, n. February, p. 45–64, 2019. DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.013.
- CRUSIOL, L.G. *et al.* Reflectance calibration of UAV-based visible and near-infrared digital images acquired under variant altitude and illumination conditions. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, vol. 18, 2020. DOI: 10.1016/j.rsase.2020.100312.
- DÍAZ-DELGADO, R.; LLORET, F.; PONS, X. Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 24, n. 8, p. 1751–1763, 2003. DOI: 10.1080/01431160210144732.
- DIPAOLLO, D. A. Grassland and Shrublands - An Overview. **Native Ecosystems**, vol. 3, n. 2016, p. 414–423, 2020. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.12456-X.
- DUBININ, M. *et al.* Reconstructing long time series of burned areas in arid grasslands of southern Russia by satellite remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, vol. 114, n. 8, p. 1638–1648, 2010. DOI: 10.1016/j.rse.2010.02.010.
- ECK, N. J. V.; WALTMAN, Ludo. VOSviewer Manual. **Manual for VOSviewer version 1.6.16**, n. November, 2020.
- ELMORE, A.J.; ASNER, G.P.; HUGHES, R.F. Satellite monitoring of vegetation phenology and fire fuel conditions in Hawaiian drylands. **Earth Interactions**, vol. 9, n. 1, 2005.
- ESKANDARI, R.; MAHDIANPARI, M.; MOHAMMADIMANESH, F. Meta-analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for Agro-environmental Monitoring Using Machine Learning and Statistical Models. **Remote Sensing**, vol. 12, n. 3511, p. 1–30, 2020. DOI: 10.3390/rs12213511.
- EVANGELIDES, C.; NOBAJAS, A. Red-Edge Normalised Difference Vegetation Index (NDVI705) from Sentinel-2 imagery to assess post-fire regeneration. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, vol. 17, n. July 2019, p. 100283, 2020. DOI: 10.1016/j.rsase.2019.100283.
- FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J. M.; CALVO, L.; SUÁREZ-SEOANE, S. Comparison of pixel unmixing models in the evaluation of post-fire forest resilience based on temporal series of satellite imagery at moderate and very high spatial resolution. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 164, n. February, p. 217–228, 2020. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.004.
- FRANKE, J. *et al.* Fuel load mapping in the Brazilian Cerrado in support of integrated fire management. **Remote Sensing of Environment**, vol. 217, n. January, p. 221–232, 2018. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.018.
- GAO, B. NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. **Remote Sensing of Environment**, vol. 58, n. 3, p. 257–266, 1996. DOI: 10.24059/olj.v23i3.1546.
- GARNER, R. M. *et al.* Bibliometric indices : Defining academic productivity and citation rates of researchers, departments and journals. **Journal of NeuroInterventional Surgery**, vol. 10, n. 2, p. 102–106, 2018. DOI:10.1073/pnas.0507655102.
- GIGLIO, L. *et al.* Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. **biogeosciences**, n. 2008, p. 1171–1186, 2010. DOI: 10.5194/bg-7-1171-2010.

- GOODWIN, N.R.; COLLETT, L.J. Development of an automated method for mapping fire history captured in Landsat TM and ETM+ time series across Queensland, Australia. **Remote Sensing of Environment**, vol. 148, p. 206–221, 2014. DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.021.
- GUERINI FILHO, M.; KUPLICH, T. M.; QUADROS, F. L. F. Estimating natural grassland biomass by vegetation indices using Sentinel 2 remote sensing data. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 41, n. 8, p. 2861–2876, 2020. DOI: 10.1080/01431161.2019.1697004.
- HAKALA, T. *et al.* Direct reflectance measurements from drones: Sensor absolute radiometric calibration and system tests for forest reflectance characterization. **Sensors (Switzerland)**, vol. 18, n. 5, 2018. DOI: 10.3390/s18051417.
- HE, Y.; YANG, J.; GUO, X. Green Vegetation Cover Dynamics in a Heterogeneous Grassland: Spectral Unmixing of Landsat Time Series from 1999 to 2014. **Remote Sensing**, vol. 12, n. 22, p. 3826, 2020. DOI: 10.3390/rs12223826.
- HOFFMANN, W. A. *et al.* Ecological thresholds at the savanna-forest boundary : how plant traits, resources and fire govern the distribution of tropical biomes. **Ecology Letters**, vol. 15, p. 759–768, 2012. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2012.01789.x.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, vol. 25, n. 3, p. 295–309, 1988. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
- HUETE, A. R.; *et al.* A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, vol. 59, p. 440–451, 1997. DOI: 10.1016/S0020-1693(00)85959-9
- KEELEY, J.E.; BRENNAN, T.; PFAFF, A.H. Fire severity and ecosystem responses following crown fires in California shrublands. **Ecological Applications**, vol. 18, n. 6, p. 1530–1546, 2008. DOI: 10.1890/07-0836.1.
- KEY, C. H.; BENSON, N. C. Landscape Assessment (LA) sampling and analysis methods. **USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR**, no. 164 RMRS-GTR, 2006.
- MOHER, D. *et al.* Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. **PLoS Medicine**, vol. 6, n. 7, 2009. DOI: 10.1371/journal.pmed.1000097.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Disponível em: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>>. Acesso em: 05 mar. 2021.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). FIRMS: Fire Information for Resource Management System. Disponível em: <<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>>. Acesso em: 15 jan. 2022.
- NELSON, D.M. *et al.* Long-term variability and rainfall control of savanna fire regimes in equatorial East Africa. **Global Change Biology**, vol. 18, n. 10, p. 3160–3170, 2012. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02766.x.
- OLIVEIRA, J. M.; PILLAR, V. D. Vegetation dynamics on mosaics of Campos and Araucaria forest between 1974 and 1999 in Southern Brazil. **Community Ecology**, vol. 5, n. 2, p. 197–202, 2004. DOI: 10.1556/ComEc.5.2004.2.8.
- PEREIRA, A. C. J. *et al.* Modelling fire frequency in a Cerrado savanna protected area. **PLoS ONE**, vol. 9, n. 7, 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.0102380.
- RAMPANT, P.; ZDUNIC, K.; BURROWS, N. UAS and Landsat imagery to determine fuel condition for fire behavior prediction on spinifex hummock grasslands of arid Australia. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 40, n. 24, p. 9126–9139, 2019. DOI: 10.1080/01431161.2019.1651950.
- ROUSE, J.W; HASS, j. a.; SCHELL, j. A. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. **Oxford University**, vol. 1, n. NASA-Earth Resources Technology Satellite Symposium, p. 309–317, 1973.

- ROY, D.P. *et al.* Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. **Remote Sensing of Environment**, vol. 97, n. 2, p. 137–162, 2005. DOI: 10.1016/j.rse.2005.04.007.
- SANTOS, F.L.M. *et al.* Assessing VIIRS capabilities to improve burned area mapping over the Brazilian Cerrado. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 41, no. 21, p. 8300–8327, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1771791>.
- SHEFFIELD, J. *et al.* Satellite Remote Sensing for Water Resources Management : Potential for Supporting Sustainable Development in Data-Poor Regions. **Water Resources Research**, vol. 54, p. 9724–9758, 2018. DOI: 10.1029/2017WR022437.
- SHEYKHOUSA, M. *et al.* Support Vector Machine Versus Random Forest for Remote Sensing Image Classification: A Meta-Analysis and Systematic Review. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, vol. 13, p. 6308–6325, 2020. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3026724.
- SHOKO, C.; MUTANGA, O.; DUBE, T. Progress in the remote sensing of C3 and C4 grass species aboveground biomass over time and space. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 120, p. 13–24, 2016. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.08.001.
- SLINGSBY, J. A. *et al.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Near-real time forecasting and change detection for an open ecosystem with complex natural dynamics. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 166, n. December 2019, p. 15–25, 2020. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2020.05.017.
- STAVER, A.C.; ARCHIBALD, S.; LEVIN, S. Tree cover in sub-Saharan Africa: Rainfall and fire constrain forest and savanna as alternative stable states. **Ecology**, vol. 92, n. 5, p. 1063–1072, 2011. DOI:10.1890/10-1684.1.
- SU, H.; LEE, P. C. Mapping knowledge structure by keyword co-occurrence: a first look at journal papers in Technology Foresight. **Scientometrics**, vol. 85, p. 65–79, 2010. DOI: 10.1007/s11192-010-0259-8.
- SZPAKOWSKI, David; JENSEN, Jennifer. A Review of the Applications of Remote Sensing in Fire Ecology. **Remote Sensing**, Cham, vol. 11, n. 22, p. 2638, 2019. DOI: 10.3390/rs11222638.
- TAMIMINIA, H. *et al.* Google Earth Engine for geo-big data applications : A meta-analysis and systematic review ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Google Earth Engine for geo-big data applications : A meta-analysis and systematic review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 164, n. May, p. 152–170, 2020. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001.
- VIANA, J. *et al.* Remote Sensing in Human Health : A 10-Year Bibliometric Analysis. **Remote Sensing**, vol. 9, no. 12, p. 1225, 2017. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs9121225>.
- WALTMAN, L.; VAN ECK, N. J. A smart local moving algorithm for large-scale modularity-based community detection. **European Physical Journal B**, vol. 86, n. 11, 2013. DOI: 10.1140/epjb/e2013-40829-0.
- WANG, J. *et al.* Estimating leaf area index and aboveground biomass of grazing pastures using Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat images. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 154, n. January, p. 189–201, 2019. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2019.06.007.
- WANG, R.; MURAYAMA, Y.; MORIMOTO, T. Scenario simulation studies of urban development using remote sensing and GIS : review. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, vol. 22, n. January, p. 100474, 2021. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100474.
- WILLIAMSON, G.J.; MURPHY, B.P.; BOWMAN, D.M.J.S. Cattle grazing does not reduce fire severity in eucalypt forests and woodlands of the Australian Alps. **Austral Ecology**, vol. 39, n. 4, p. 462–468, 2014. DOI: 10.1111/aec.12104.
- WULDER, M. A. *et al.* Biomass status and dynamics over Canada’s forests: Disentangling disturbed area from associated aboveground biomass consequences. **Environmental Research Letters**, vol. 15, n. 9, 2020. DOI: 10.1088/1748-9326/ab8b11.

- XU, D. *et al.* Measuring the dead component of mixed grassland with Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, vol. 142, p. 33–43, 2014. DOI: 10.1016/j.rse.2013.11.017.
- YANG, L. *et al.* An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U.S. northern and central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, vol. 65, n. 1, p. 25–37, 1998. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00012-1.
- YEBRA, M. *et al.* A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products. **Remote Sensing of Environment**, vol. 136, p. 455–468, 2013. DOI: 10.1016/j.rse.2013.05.029.

Biografia do autor principal



Pâmela Boelter Herrmann, nasceu em 1994 na cidade de Canela/RS. Bacharel em Gestão Ambiental pela Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS) e Especialista em Informações Espaciais Georreferenciadas pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Atualmente é mestranda no Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atua principalmente nas áreas de análise ambiental do comportamento do fogo em vegetações campestres e uso de VANT's,



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.