

ANÁLISE TEMPORAL E ESPECTRAL DO SENSOR MODIS NO MONITORAMENTO DA REGENERAÇÃO PÓS-INCÊNDIO NO CERRADO

TEMPORAL AND SPECTRAL ANALYSIS OF THE MODIS SENSOR IN MONITORING POST-FIRE REGENERATION IN THE CERRADO

ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPECTRAL DEL SENSOR MODIS EN EL MONITOREO DE LA REGENERACIÓN POST-INCENDIO EN EL CERRADO

Jonathan da Rocha Miranda

Engenharia Agrícola - Instituto Federal de Minas Gerais
jonathan.rocha@ifmg.edu.br

Juliana Terezinha Santos Cruz

Engenharia Florestal - Universidade Federal do Espírito Santos, Campus Alegre
santosjuliana869@gmail.com

Luana Kássia Gomes Linhares

Engenharia Florestal - Universidade Federal do Espírito Santos, Campus Alegre
luanakassia93@gmail.com

Gracielle de Brito Salles

Engenharia Agrícola e Ambiental - Universidade Federal de Minas Gerais
graciellebsales@gmail.com

Bruno Oliveira Lafetá

Engenharia Florestal - Instituto Federal de Minas Gerais, Campus São João Evangelista
bruno.lafeta@ifmg.edu.br

RESUMO: Este estudo aborda a dinâmica de incêndios e a subsequente regeneração da vegetação no bioma Cerrado, focando em como a magnitude das queimas observada pelo tamanho da cicatriz da queima afeta a resiliência e recuperação do ecossistema. Utilizando imagens de satélite do sensor MODIS para um período de 22 anos (2001-2023), avaliamos a extensão das áreas queimadas, a frequência de incêndios e a eficácia dos processos de regeneração da vegetação pós-queima. A análise revela que aproximadamente 60% da área total do Cerrado foi afetada por incêndios, com anos específicos, como 2007, 2010 e 2012, apresentando um número elevado de fragmentos de áreas queimadas. A análise de regeneração, baseada no número de fragmentos e na área total queimada, indica que, embora a resiliência do Cerrado permaneça alta sob um critério de 80% de regeneração, há uma preocupação emergente quanto à capacidade de regeneração completa, especialmente considerando um limiar de 95%. Os resultados sugerem que, apesar dos frequentes incêndios, a capacidade regenerativa do Cerrado pode estar diminuindo, potencialmente devido à perda de nutrientes do solo após sucessivos eventos de queima. Com base neste estudo pode ser utilizado para o desenvolvimento de estratégias de manejo e intervenções destinadas a garantir a preservação e sustentabilidade deste importante bioma, ressaltando a complexidade de enfrentar desastres naturais em meio às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, monitoramento de queimadas, frequência de incêndios

ABSTRACT: This study addresses the dynamics of fires and the subsequent vegetation regeneration in the Cerrado biome, focusing on how the magnitude of burns, observed through the size of burn scars, impacts ecosystem resilience and recovery. Using satellite imagery from the MODIS sensor over a 22-year period (2001-2023), we evaluated the extent of burned areas, fire frequency, and the effectiveness of post-fire vegetation regeneration processes. The analysis reveals that approximately 60% of the total Cerrado area has been affected by fires, with specific years such as 2007, 2010, and 2012 showing a high number of burned area fragments. The regeneration analysis, based on the number of fragments and the total burned area, indicates that while the Cerrado's resilience remains high under an 80% regeneration criterion, there is growing concern about its full regeneration capacity, especially considering a 95% threshold. The results suggest that despite frequent fires, the Cerrado's regenerative capacity may be declining, potentially due to soil nutrient loss after successive burn events. This study can inform the development of management strategies and interventions aimed at ensuring the preservation and sustainability of this critical biome, highlighting the complexity of addressing natural disasters amid climate change.

Keywords: Remote sensing, fire monitoring, fire frequency

RESUMEN: Este estudio aborda la dinámica de los incendios y la posterior regeneración de la vegetación en el bioma Cerrado, centrándose en cómo la magnitud de las quemadas, observada a través del tamaño de las cicatrices de quema, afecta la resiliencia y recuperación del ecosistema. Utilizando imágenes satelitales del sensor MODIS durante un período de 22 años (2001-2023), evaluamos la extensión de las áreas quemadas, la frecuencia de los incendios y la eficacia de los procesos de regeneración de la vegetación post-incendio. El análisis revela que aproximadamente el 60% del área total del Cerrado ha sido afectada por incendios, con años específicos como 2007, 2010 y 2012 que presentan un alto número de fragmentos de áreas quemadas. El análisis de regeneración, basado en el número de fragmentos y el área total quemada, indica que, aunque la resiliencia del Cerrado permanece alta bajo un criterio del 80% de regeneración, existe una preocupación creciente sobre su capacidad de regeneración completa, especialmente considerando un umbral del 95%. Los resultados sugieren que, a pesar de los incendios frecuentes, la capacidad regenerativa del Cerrado podría estar disminuyendo, posiblemente debido a la pérdida de nutrientes del suelo tras eventos consecutivos de quema. Este estudio puede ser utilizado para el desarrollo de estrategias de manejo e intervenciones destinadas a garantizar la preservación y la sostenibilidad de este importante bioma, destacando la complejidad de enfrentar desastres naturales en el contexto del cambio climático.

Palabras clave: Teledetección, monitoreo de incendios, frecuencia de incendios

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui cinco áreas de grande abundância de plantas nativas, estando entre elas o bioma Cerrado (GUARIM NETO; MORAIS, 2003). O cerrado possui grande importância e tem como característica o abrigo de uma grande diversidade. Esse ecossistema ocupa 24% da área total do País (204 milhões de hectares), estando presente em 13 estados brasileiros e no Distrito Federal (RIBEIRO; RODRIGUES, 2006).

O bioma Cerrado, caracterizado pela sua heterogeneidade e reconhecido como uma das savanas mais ricas do mundo, enfrenta desafios significativos relacionados ao fogo (MELO, 2011). Enquanto o fogo natural desempenha um papel crucial no equilíbrio e na manutenção da biodiversidade deste ecossistema, a crescente interferência humana e a expansão demográfica têm intensificado as ocorrências de incêndios (SCHMIDT; ELOY, 2020). Estes não apenas ameaçam a integridade do bioma, mas também reduzem os habitats naturais, colocando em risco a fauna e flora que dependem desse ambiente para sua sobrevivência.

O fogo desempenha um papel fundamental na configuração da vegetação savânica, sendo particularmente crucial para o bioma do Cerrado, onde é considerado essencial para a preservação da diversidade fisionômica (MIRANDA *et al.*, 2009). Ele atua como um mecanismo natural de seleção, eliminando espécies não adaptadas e, conseqüentemente, controlando a proliferação de espécies arbóreas invasoras (LEHMANN *et al.*, 2014). Além disso, o fogo influencia significativamente a estrutura e composição da vegetação do bioma, funcionando como um agente de perturbação que molda o ecossistema (LOPES; VALE; SCHIAVINI, 2009).

Entretanto, as queimadas provocadas por atividades humanas estão se tornando cada vez mais frequentes e tendem a ser mais intensas, principalmente devido à maior disponibilidade de material combustível, resultando em incêndios que se espalham por áreas extensas (PIVELLO, 2011). Além disso, o uso do fogo no manejo de pastagens é uma prática comum, visto como um método econômico para estimular o crescimento de novas forragens, controlar pragas e eliminar resíduos agrícolas (CARVALHO, 2009).

Neste cenário, mesmo com a vegetação do Cerrado sendo adaptada a incêndios naturais, ela pode estar sendo prejudicada pelo avanço da agricultura e pelo crescimento no número de incêndios florestais (PEREIRA *et al.*, 2017). Esta situação exige uma análise detalhada da dinâmica da vegetação, especialmente em relação ao seu processo de regeneração, o que é crucial para a formulação de políticas públicas eficientes voltadas para uma gestão mais sustentável do bioma.

Monitorar *in situ* o fenômeno da regeneração vegetativa no Cerrado é impraticável, dada a extensa área que o bioma abrange. Por isso, o sensoriamento remoto surge como uma solução mais eficiente e econômica para este acompanhamento (FERNANDEZ-MANSO; QUINTANO; ROBERTS, 2019). Este método se tornou particularmente ativo no estudo da classificação multitemporal e detecção de mudanças, impulsionado pela disponibilidade crescente de séries temporais de imagens e pela necessidade de monitorar alterações terrestres em escalas tanto locais quanto globais (PACHECO; DA SILVA JUNIOR, 2021). Além disso, a análise espectral, realizada com o auxílio de sensores orbitais, é fundamental no mapeamento de áreas queimadas, permitindo uma avaliação mais precisa e abrangente dos impactos dos incêndios (PILAR MARTIN; CHUVIECO, 1995).

Na análise multitemporal, uma das técnicas cruciais é a comparação das mudanças observadas em imagens capturadas antes e depois dos eventos de queimada. Neste contexto, o sensor MODIS, conhecido por sua alta resolução temporal, se destaca no mapeamento de incêndios nos diversos biomas brasileiros, incluindo o Cerrado (GIGLIO *et al.*, 2015). A regularidade com que as imagens do MODIS são capturadas é vital para a análise temporal, pois facilita a aplicação de métodos analíticos avançados (VERMOTE, E.; WOLFE, 2015). O objetivo do trabalho foi analisar a dinâmica dos incêndios no bioma Cerrado, considerando a

frequência dos eventos, o processo de regeneração da vegetação e sua relação com o tamanho das cicatrizes de queima. Este estudo baseia-se na premissa de que séries temporais de imagens capturadas pelo sensor MODIS são eficazes no monitoramento do processo de regeneração de áreas afetadas por queimadas

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A escolha do Cerrado (Figura 1) como objeto de estudo se justifica por sua relação intrínseca com o fogo. Enquanto as queimadas fazem parte de seu ciclo ecológico natural, contribuindo para a dinâmica da vegetação, queimadas descontroladas, muitas vezes causadas por ações humanas, resultam em degradação ambiental. A expansão da fronteira agrícola e o conseqüente desmatamento exacerbam esses impactos. Assim, compreender os efeitos das queimadas e a capacidade de regeneração da vegetação pós-eventos torna-se crucial para a conservação do bioma.

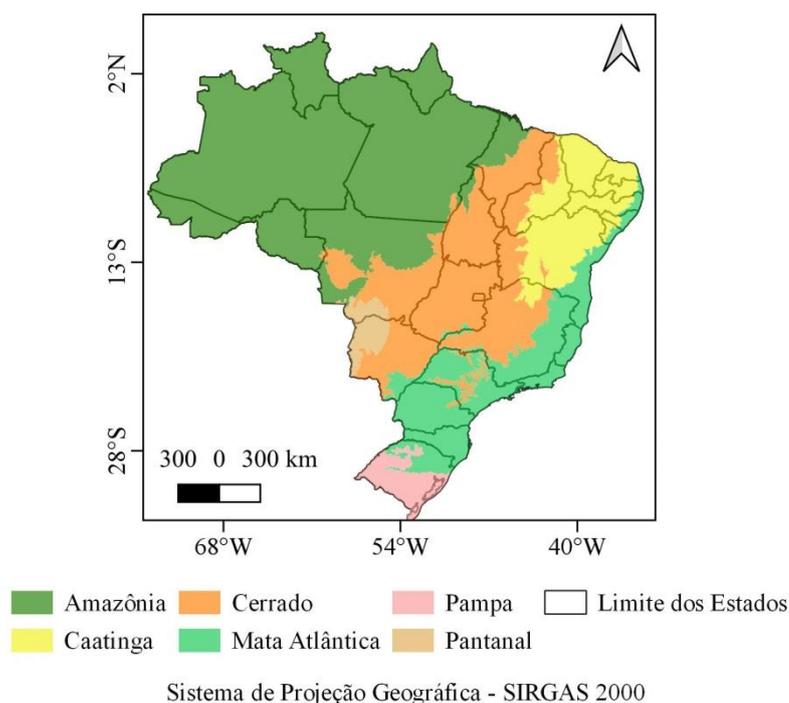


Figura 1 - Delimitação dos biomas brasileiros.

Fonte – Dos autores (2024).

Climaticamente, o Cerrado se caracteriza por um regime tropical com duas estações distintas: a úmida e quente, de outubro a abril, e a seca e fria, de maio a setembro. Essa sazonalidade tem uma influência direta nos padrões de fauna, flora e nos ciclos de queimadas da região (MARINHO-FILHO; JUAREZ, 2016).

2.2 Dados Utilizados

Para este estudo, foram empregados produtos derivados do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), integrante dos satélites Terra e Aqua da NASA. Foram

utilizados os produtos área queimada (MC64A1) e o índice de vegetação por diferença normalizada NDVI (MOD13Q1).

O conjunto de dados MCD64A1 refere-se ao produto de queimadas mensal, oriundo da fusão dos satélites Terra e Aqua. Este produto fornece informações sobre a data e localização de áreas queimadas, oferecendo uma resolução espacial de 500 metros (GIGLIO *et al.*, 2015).

O produto MOD13Q1, originado do sensor MODIS do satélite Terra, é essencialmente um compêndio de índices de vegetação com uma resolução temporal de 16 dias sendo o valor do pixel derivado da média das melhores condições observacionais dentro desse período (DIDAN, 2015). O produto oferece um conjunto de índices de vegetação, sendo o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) um dos mais proeminentes (LOPRESTI; DI BELLA; DEGIOANNI, 2015).

O NDVI é um indicador que quantifica a vitalidade e densidade da vegetação em uma área específica. Seus valores variam de -1 a 1, onde valores mais próximos de 1 indicam vegetação saudável e densa, enquanto valores próximos a 0 ou negativos podem indicar ausência de vegetação (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009). Para os propósitos deste estudo, os conjuntos de dados mencionados foram adquiridos para o período de 2001 a 2023, permitindo uma análise temporal abrangente das dinâmicas de queimadas e da condição da vegetação no Cerrado.

2.3 Pré-processamento e aquisição dos dados

As imagens NDVI são sensíveis às variações temporais, em especial às interferências atmosféricas que podem alterar as reflectâncias detectadas pelo sensor. Para atenuar os efeitos destas interferências e obter uma série temporal mais suave e representativa das condições vegetativas, aplicou-se um filtro de médias móveis.

Esse é um dos filtros mais simples de entender e aplicar, no qual consiste em uma técnica de suavização usada para correção atmosférica, baseada na eliminação dos valores baixos causados por efeitos (MARIANO, 2015). Assim, cada valor de NDVI em um ponto específico no qual constava com valor de QA maior que 0 (indicativo de ruído no pixel) foi substituído pela média dos valores correspondentes da imagem anterior, da própria imagem e da imagem subsequente. Este procedimento ajudou a mitigar as flutuações de curto prazo, proporcionando um perfil NDVI mais contínuo e representativo da vegetação real.

As imagens originais das cicatrizes de queima, fornecidas pelo produto MCD64A1, apresentam valores de pixel que correspondem ao dia juliano da ocorrência da queima. Contudo, para a finalidade de nossa análise, foi necessário simplificar essa informação para uma categorização binária de presença ou ausência de queima. Assim, foi realizado um processo de reclassificação. Todos os pixels com valores representando o dia juliano (indicando uma ocorrência de queima) foram convertidos para o valor 1, simbolizando a presença de uma cicatriz de queima. Os demais pixels, que não apresentavam indícios de queima, foram atribuídos o valor 0.

Após a reclassificação das imagens das cicatrizes de queima, passou-se à etapa de agregação temporal. Originalmente em uma estrutura mensal, as cicatrizes de queima foram convertidas para uma frequência anual. Isso foi realizado somando-se os valores (indicando presença ou ausência de queima) de todos os meses dentro de um determinado ano.

Para permitir uma análise espacial mais detalhada e para facilitar a interação com outros conjuntos de dados, as cicatrizes de queima anualizadas foram transformadas em polígonos, ou seja, conversão da dimensão raster para camada vetorial.

De posse dos vetores foi integrado a sua tabela de atributo o NDVI cujo valor se encontrava contido no interior destes polígonos. O foco da análise estava em entender o vigor vegetativo antes e após os eventos de queima. Para tal, foi considerado o valor máximo de NDVI

no ano em que a queima ocorreu, representando o pico de vigor da vegetação antes do evento de queima. Adicionalmente, para monitorar a recuperação da vegetação, foram calculados os valores máximos de NDVI para um e dois anos após a ocorrência da queima.

2.4 Análise de Regeneração

A regeneração da vegetação após eventos de queima foi analisada considerando duas proporções distintas de recuperação do NDVI em comparação ao seu valor anterior à queima. No primeiro cenário, a regeneração é reconhecida quando o NDVI recupera mais de 80% de seu valor pré-queima, enquanto no segundo, a regeneração é estabelecida quando atinge mais de 95%. Em relação a esses critérios, as métricas principais adotadas foram a porcentagem de fragmentos que se regeneraram e a porcentagem total da área que se recuperou.

Os fragmentos de vegetação, por sua vez, foram categorizados em quatro grupos distintos: aqueles que mostraram uma regeneração sustentada; os que apresentaram uma regeneração tardia; os que, após regeneração, sofreram degradação subsequente; e os que, não mostraram sinais de regeneração.

Outra dimensão importante da análise foi o tamanho das áreas impactadas pelo fogo. As marcas das queimadas foram agrupadas em classes de tamanho, variando de áreas menores até 25 hectares, passando por faixas intermediárias entre 25 e 200 hectares, até áreas vastas que excedem 200 hectares.

2.5 Análises Realizadas

Avaliação Temporal: A frequência das queimadas foi avaliada para o período de 2001 a 2023. Para isso, utilizou-se a soma das imagens reclassificadas, o que proporcionou uma visão quantitativa das áreas que experimentaram eventos de queima ao longo desse intervalo de tempo.

Categorização da Regeneração: Com base nas classificações de regeneração definidas anteriormente (Não Regenerado, Regenerou e Manteve, Regenerou e Perdeu, e Regenerou no Segundo Ano), avaliou-se a porcentagem de cada categoria tanto em relação à área total queimada quanto ao número de cicatrizes de queima. Essa análise permite entender a proporção de áreas que conseguem se regenerar após um evento de queima e as áreas que enfrentam desafios em sua recuperação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Cerrado, caracterizado por ser um dos biomas mais ricos e simultaneamente um dos mais vulneráveis do Brasil, enfrentou uma considerável perturbação devido a incêndios nos últimos 20 anos. Os resultados indicam que cerca de 60% da extensão total desse bioma foram impactados por incêndios durante este período (Figura 2). Schmidt e Eloy (2020) revelaram que aproximadamente metade da vegetação original do Cerrado já foi perdida, atribuindo este declínio em grande parte ao avanço da agricultura na região.

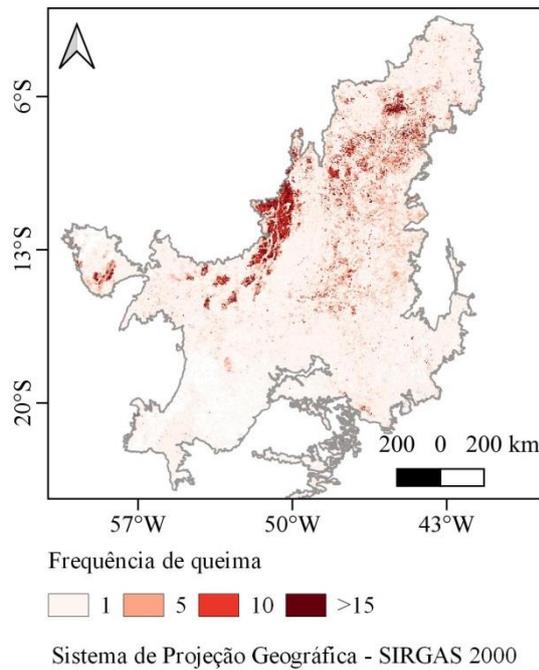


Figura 2- Distribuição espacial das queimadas no cerrado para o período de 2001 a 2023
 Fonte – Dos autores (2024).

Além da extensa área queimada, uma característica preocupante é a recorrência desses incêndios. Cerca de 15% da área do cerrado foi submetida a múltiplos eventos de incêndio, tendo sido queimada mais de cinco vezes nos últimos 20 anos (Figura 3).

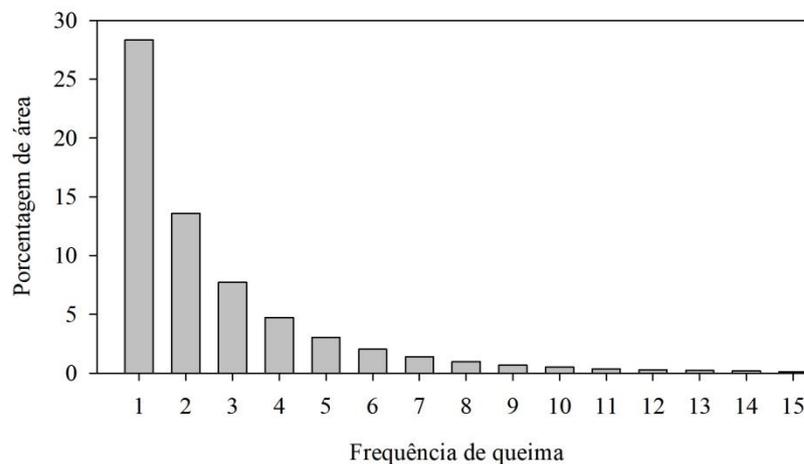


Figura 3- Porcentagem de frequência de queimada no cerrado ao longo dos anos de 2001 a 2023
 Fonte – Dos autores (2024).

A alta frequência de queimadas observada no Cerrado tem potencial para afetar significativamente a resiliência do bioma e sua capacidade de regeneração natural. Incêndios repetidos podem enfraquecer a habilidade das plantas de se recuperarem, provocando mudanças na composição vegetal e afetando negativamente a fauna local (MIRANDA; JUVANHOL; DA SILVA, 2023). Os ciclos frequentes de queimadas, especialmente aqueles relacionados a práticas agrícolas, podem esgotar os nutrientes do solo e resultar em uma drástica redução da diversidade de espécies florestais (BATISTA *et al.*, 2018). A longo prazo, estes fatores podem comprometer a qualidade da vegetação, prejudicando os processos naturais de regeneração

(MIRANDA; SILVA; JUVANHOL, 2022). Isso pode impedir ou retardar a recuperação da floresta, causando danos substanciais e desequilíbrios ecológicos no ambiente (ARRUDA, 2021).

A recorrência destes incêndios sugere uma combinação de fatores antropogênicos e naturais. Enquanto alguns incêndios no cerrado são resultado de processos naturais e desempenham um papel ecológico, o alto índice de recorrência sugere a influência de atividades humanas, seja através da conversão de terras para agricultura, práticas de manejo inadequadas ou incêndios intencionais (SCHMIDT; ELOY, 2020).

Nos últimos 20 anos, a média anual de áreas queimadas no cerrado foi de aproximadamente 13×10^6 hectares. Estas áreas queimadas estão distribuídas em uma média de 33 mil fragmentos por ano (Figura 4). Esta distribuição fragmentada dos incêndios sugere uma combinação de pequenos e grandes eventos de queimadas ocorrendo simultaneamente em diferentes locais do bioma.

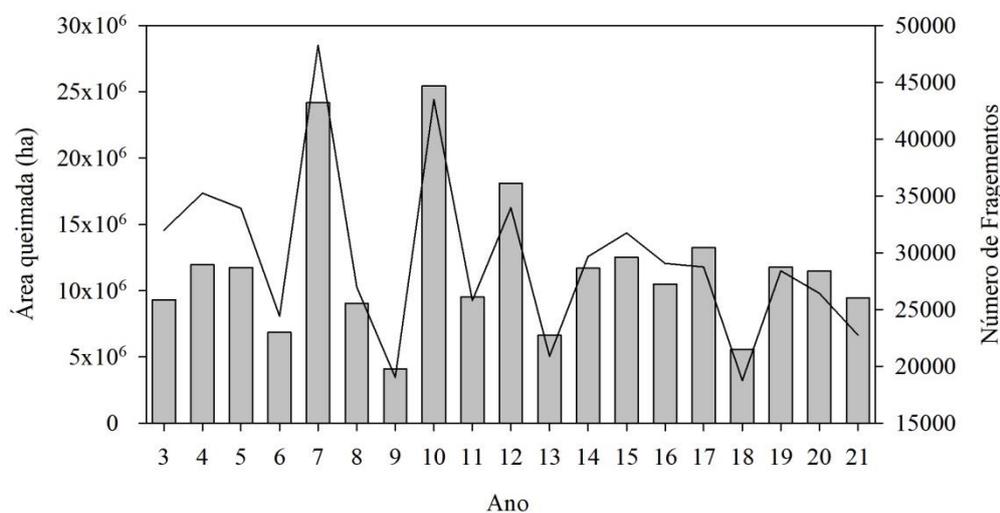


Figura 4 – Número de fragmentos de queima e área queimada no cerrado para o período de 2001 a 2021. Fonte – Dos autores (2024).

Na tentativa de prevenir incêndios nas Unidades de Conservação (UCs) do Cerrado, gestores têm implementado estratégias como a criação de aceiros, que são faixas de terra limpa de vegetação, tanto no perímetro quanto internamente às UCs, além de restringirem o uso do fogo. Essas medidas, apesar de bem-intencionadas, podem inadvertidamente contribuir para o acúmulo de material combustível fino o que pode ocasionar mais frequentes de incêndios florestais (PIVELLO, 2011). Fidelis *et al.* (2018) ressaltam a gravidade desta situação, observando que megaincêndios, capazes de consumir mais de 50.000 hectares em poucos dias, ocorrem com uma frequência de 2 a 5 anos no Cerrado. Assim, fica evidente a complexidade na gestão de incêndios nas áreas protegidas, onde estratégias de prevenção podem paradoxalmente aumentar o risco de grandes incêndios.

Uma constatação importante é a correlação direta entre o número de fragmentos e a área total atingida por incêndios em um ano específico. Isso sugere que anos com maiores áreas afetadas por incêndios também tendem a apresentar um número elevado de eventos de fogo, independentemente da dimensão de cada ocorrência. Esses picos de queimadas podem estar ligados a uma combinação de fatores, incluindo condições climáticas específicas, métodos de manejo do solo e outras variáveis externas que facilitam a propagação de incêndios. Flutuações climáticas desse tipo, embora periódicas, estão se tornando mais frequentes e extremas em

virtude das mudanças climáticas (JOLLY *et al.*, 2015).

Entender a relação entre a extensão das áreas queimadas e a fragmentação é fundamental para efetivamente gerenciar e controlar incêndios. Fragmentos maiores podem indicar incêndios mais intensos e destrutivos, enquanto uma quantidade significativa de pequenos fragmentos pode sinalizar incêndios frequentes em locais específicos, muitas vezes relacionados às atividades humanas naquelas áreas. Incêndios naturais de grande escala são relativamente raros em vegetações florestais sensíveis ao fogo, especialmente na ausência de uma camada contínua de gramíneas (LEHMANN *et al.*, 2014).

Ao avaliar a regeneração das áreas queimadas com base no número de fragmentos, observou-se um contraste significativo dependendo dos critérios de regeneração considerados (Figura 5). Quando adotamos um critério de 80% de regeneração, os resultados mostram um panorama otimista. Apenas uma pequena proporção dos fragmentos, cerca de 5%, não exibiram regeneração. A maioria dos fragmentos, aproximadamente 65%, não apenas regenerou, mas manteve essa regeneração ao longo do tempo.

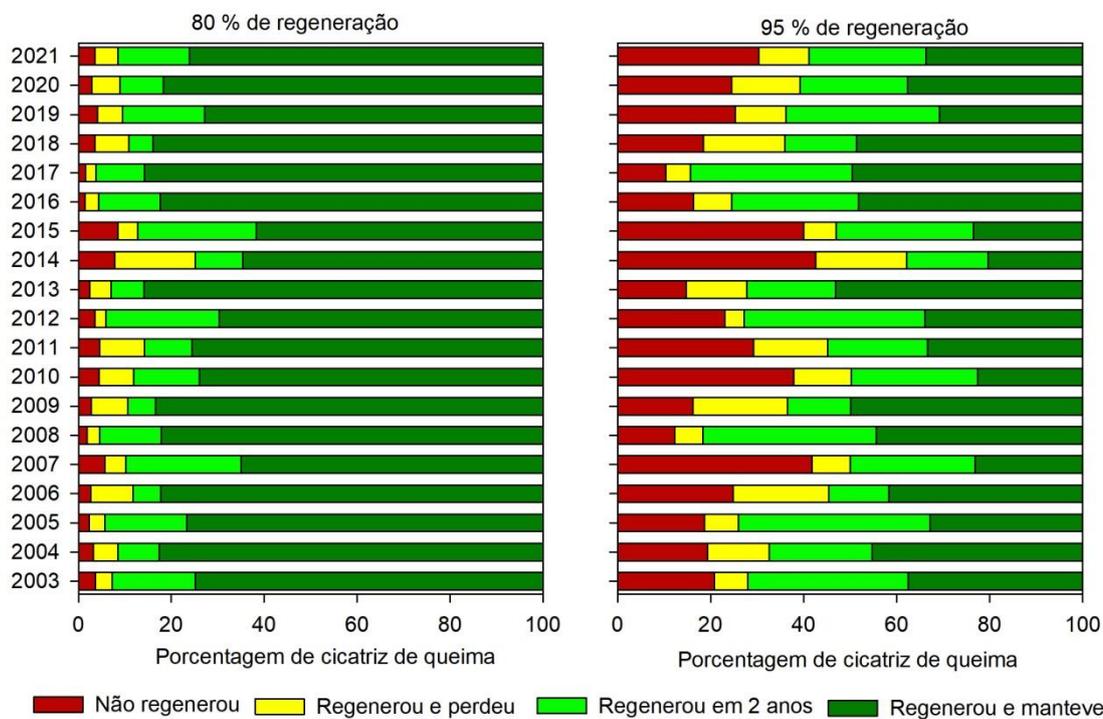


Figura 5 – Regeneração dos fragmentos de queima para os anos de 2001 a 2023 considerando o retomada do valor do NDVI a 80 e 95% antes da queima. Fonte – Dos autores (2024).

Este dado sugere que, apesar dos frequentes incêndios, a resiliência do cerrado permanece relativamente alta sob este critério. No entanto, a situação muda quando elevamos o limiar para 95% de regeneração. Neste cenário, a proporção de áreas não regeneradas aumenta consideravelmente, atingindo uma média de 22% dos fragmentos. Adicionalmente, a porcentagem de fragmentos que regenerou e manteve essa condição cai para 37%. Este contraste ressalta a importância do critério escolhido para avaliar a regeneração e, por consequência, a saúde geral do bioma.

Os resultados deste estudo indicam nuances sobre a capacidade regenerativa do cerrado após eventos de queima. Embora uma proporção significativa do bioma demonstre resiliência, regenerando-se acima de 80% após incêndios, os dados apontam para uma preocupação

emergente quando se observa a capacidade de regeneração completa, especialmente ao considerar o limiar de 95%.

Essa diferença na capacidade de regeneração pode estar ligada a fatores subestimados anteriormente, como a perda gradual de nutrientes do solo após sucessivos eventos de queima. Se inicialmente a vegetação parece recuperar-se de forma satisfatória, em análises mais detalhadas e criteriosas, percebe-se que ela pode não estar retornando ao seu vigor inicial (SCHMIDT; ELOY, 2020). Ou seja, mesmo que haja regeneração, ela não alcança o estado pré-queima, indicando uma regeneração incompleta.

Devido à ocorrência de fogo no Cerrado e à sazonalidade climática, as plantas lenhosas desenvolveram algumas adaptações morfológicas. Porém os danos sofridos variam conforme a frequência e época de queima. Quanto menor o intervalo de queima e maior a área queimada, maior será o dano ambiental (PEREIRA *et al.*, 2017). Com isso, dados anuais de área queimada no Cerrado são essenciais para avaliar os danos causados pelo fogo, além de subsidiar atividades de manejo, monitoramento, prevenção e combate ao fogo (ARRUDA, 2021).

A longo prazo, esse fenômeno pode ter implicações significativas. A diminuição contínua da capacidade regenerativa, potencialmente devido à perda de nutrientes, pode tornar o cerrado mais vulnerável a mudanças ambientais e estresses futuros. Isso sugere a necessidade de estratégias de manejo mais eficazes e intervenções para garantir a preservação e sustentabilidade deste importante bioma. Os incêndios florestais são considerados um dos mais perigosos. Suas frequências estão aumentando dia após dia, especialmente devido às mudanças climáticas locais e globais que tornam esses tipos de desastres naturais um fenômeno complexo de se enfrentar (HAMADEH *et al.*, 2017). De maneira análoga à regeneração baseada no número de fragmentos, observa-se uma tendência similar ao avaliar a regeneração em função da área (Figura 6).

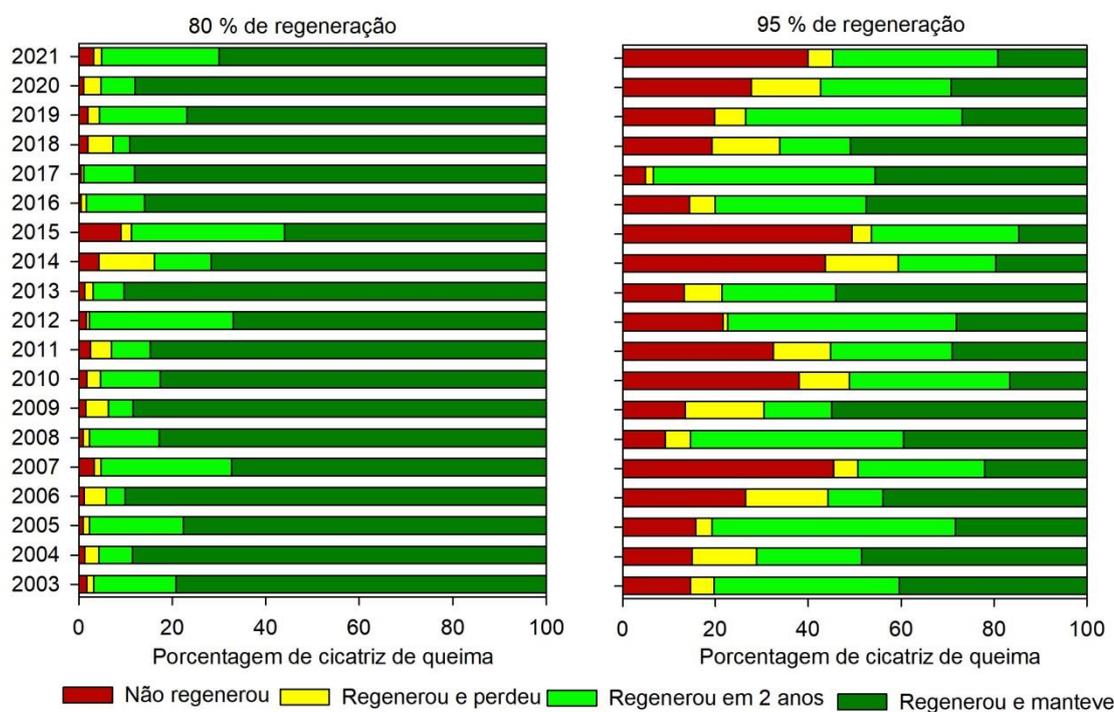


Figura 6 – Regeneração das áreas queimadas para os anos de 2001 a 2023 considerando o retomada do valor do NDVI a 80 e 95% antes da queima. Fonte – Dos autores (2024).

Um aspecto crítico na dinâmica de recuperação da vegetação em áreas afetadas por queimadas é a composição específica das espécies presentes e o porte da vegetação antes do incêndio (LENTILE *et al.*, 2007; VIANA-SOTO; AGUADO; MARTÍNEZ, 2017). Além disso, a recuperação depende de uma série de variáveis, incluindo a condição do solo no momento do incêndio, a severidade do evento, a diversidade de espécies vegetais afetadas, a disponibilidade de um banco de sementes viável, e as condições meteorológicas ou características climáticas predominantes na região. (MENESES, 2021). Esses elementos juntos formam um quadro complexo que influencia a rapidez e eficácia com que um ecossistema pode se regenerar após ser impactado por incêndios.

Ao analisar a relação entre o tamanho da cicatriz de queima e sua subsequente regeneração, observou-se que não há uma correlação clara em relação ao tempo necessário para uma recuperação completa (Figura 7). Isso sugere que, independentemente da extensão da área queimada, o tempo necessário para a regeneração completa parece ser constante.

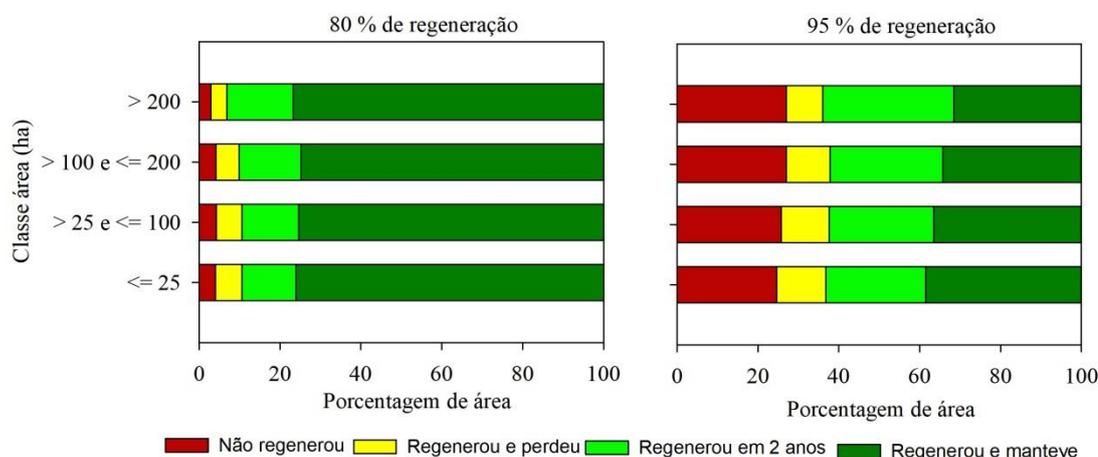


Figura 7 – Regeneração estratificada por tamanho dos fragmentos de queima para os anos de 2001 a 2023 considerando o retomada do valor do NDVI a 80 e 95% antes da queima
 Fonte – Dos autores (2024).

Vale destacar uma peculiaridade dos dados analisados: não existem cicatrizes registradas inferiores a 25 ha. Isso implica que o menor tamanho de área queimada já representa uma extensão considerável. A partir deste ponto inicial de 25 ha, os resultados sugerem que o tempo de regeneração torna-se independente do tamanho da cicatriz. No entanto, o cenário torna-se mais complexo ao avaliar a regeneração em 95% em comparação com a de 80%. O índice mais elevado de regeneração no primeiro ano, seguido de declínio no segundo ano, pode ser interpretado como um indício de que as queimadas, em um primeiro momento, podem oferecer resultados benéficos aparentes para o bioma. No entanto, em longo prazo, revelam-se prejudiciais, especialmente aquelas resultantes de ações humanas, que tendem a ser mais severas e devastadoras para o cerrado.

Portanto, identificar as tendências de aumento da regeneração da vegetação após eventos de fogo é um passo fundamental para a implementação de estratégias que garantam a recuperação desse ecossistema. Essas análises espaciais de regeneração, sobretudo, para o bioma caatinga, são escassas e necessárias para o desenvolvimento de políticas e ações públicas (MAILLARD, 2023).

4. CONCLUSÕES

A metodologia empregada demonstrou que a dinâmica de regeneração das queimadas no cerrado pode parecer de rápida recuperação, mas, ao se empregar critérios rigorosos sobre a análise de regeneração, podemos perceber que o cerrado se regenera, mas não ao ponto inicial; ou seja, as queimadas tendem a levar a um processo de degradação. Esta informação é um alerta sobre a preservação do bioma, principalmente quando há recorrência de queimadas, pois, sabendo que sua capacidade regenerativa é limitada, tende a agravar ainda mais o processo de degradação. Desta forma, o uso desses dados pode orientar para que estratégias de queimadas controladas não sejam destinadas a uma área de recorrência, além de fomentar políticas de preservação mediante o entendimento da dinâmica das queimadas no cerrado.

REFERÊNCIAS

- ARRUDA, V. L. da S. Mapeamento de cicatrizes de áreas queimadas no Cerrado usando imagens Landsat, Google Earth Engine e Deep Learning. **Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)—Universidade de Brasília, Brasília**, n. 81, p. 31, 2021.
- BATISTA, E. K. L.; RUSSELL-SMITH, J.; FRANÇA, H.; FIGUEIRA, J. E. C. An evaluation of contemporary savanna fire regimes in the Canastra National Park, Brazil: Outcomes of fire suppression policies. **Journal of Environmental Management**, v. 205, p. 40–49, 2018. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.09.053
- CARVALHO, J. X. DE. FOGO NO CERRADO: Causas e Conseqüências da Ação do Fogo no Bioma Cerrado no Município de Goiás. **Goiás: Universidade Estadual de Goiás**, v. 2009, n. 75, p. 31–47, 2009.
- DIDAN, K. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>, v. 5, p. 2002–2015, 2015.
- FERNANDEZ-MANSO, A.; QUINTANO, C.; ROBERTS, D. A. Burn severity analysis in Mediterranean forests using maximum entropy model trained with EO-1 Hyperion and LiDAR data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 155, p. 102–118, 2019. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.07.003
- FIDELIS, A.; ALVARADO, S. T.; BARRADAS, A. C. S.; PIVELLO, V. R. The year 2017: Megafires and management in the cerrado. **Fire**, v. 1, n. 3, p. 1–11, 2018. DOI: 10.3390/fire1030049
- GIGLIO, L.; JUSTICE, C.; BOSCHETTI, L.; ROY, D. MCD64A1 MODIS/Terra+ Aqua Burned Area Monthly 13 Global 500 m sin Grid v006 [Data Set]. 2015. **Available online: doi**, v. 10, 2015.
- GUARIM NETO, G.; MORAIS, R. G. de. Recursos medicinais de espécies do Cerrado de Mato Grosso: um estudo bibliográfico. **Acta Botanica Brasílica**, v. 17, n. 4, p. 561–584, 2003. DOI: 10.1590/s0102-33062003000400009
- HAMADEH, N.; KAROUNI, A.; DAYA, B.; CHAUVET, P. Using correlative data analysis to develop weather index that estimates the risk of forest fires in Lebanon & Mediterranean: Assessment versus prevalent meteorological indices. **Case Studies in Fire Safety**, v. 7, p. 8–22, 2017. DOI: 10.1016/j.csfs.2016.12.001
- JOLLY, W. M.; COCHRANE, M. A.; FREEBORN, P. H.; HOLDEN, Z. A.; BROWN, T. J.; WILLIAMSON, G. J.; BOWMAN, D. M. J. S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. **Nature Communications**, v. 6, n. 1, p. 1–11, 2015. DOI: 10.1038/ncomms8537
- LEHMANN, C. E. R.; ANDERSON, T. M.; SANKARAN, M.; HIGGINS, S. I.; ARCHIBALD, S.; HOFFMANN, W. A.; HANAN, N. P.; WILLIAMS, R. J.; FENSHAM, R. J.; FELFILI, J.; HUTLEY, L. B.; RATNAM, J.; SAN JOSE, J.; MONTES, R.; FRANKLIN, D.; RUSSELL-SMITH, J.; RYAN, C. M.; DURIGAN, G.; HIERNAUX, P.; HAIDAR, R.; BOWMAN, D. M. J. S.; BOND, W. J. Savanna vegetation-fire-climate relationships differ among continents. **Science**, v. 343, n. 6170, p. 548–552, 2014. DOI: 10.1126/science.1247355

- LENTILE, L. B.; MORGAN, P.; HUDAK, A. T.; BOBBITT, M. J.; LEWIS, S. A.; SMITH, A. M. S.; ROBICHAUD, P. R. Post-Fire Burn Severity and Vegetation Response Following Eight Large Wildfires Across the Western United States. **Fire Ecology**, v. 3, n. 1, p. 91–108, 2007. DOI: 10.4996/fireecology.0301091
- LOPES, S. de F.; VALE, V. S. do; SCHIAVINI, I. Efeito de queimadas sobre a estrutura e composição da comunidade vegetal lenhosa do cerrado sentido restrito em Caldas Novas, GO. **Revista Árvore**, v. 33, n. 4, p. 695–704, 2009. DOI: 10.1590/s0100-67622009000400012
- LOPRESTI, M. F.; DI BELLA, C. M.; DEGIOANNI, A. J. Relationship between MODIS-NDVI data and wheat yield: A case study in Northern Buenos Aires province, Argentina. **Information Processing in Agriculture**, v. 2, n. 2, p. 73–84, 1 set. 2015. DOI: 10.1016/j.inpa.2015.06.001. Acesso em: 2 abr. 2019.
- MAILLARD, O. Post-Fire Natural Regeneration Trends in Bolivia: 2001–2021. **Fire**, v. 6, n. 1, p. 18, 2023. DOI: 10.3390/fire6010018
- MARIANO, D. A. Detecção e Avaliação de Seca Agrônômica através da análise de séries temporais de dados MODIS e PERSIANN. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, p. 112, 2015.
- MARINHO-FILHO, J.; JUAREZ, K. M. 14. The Cerrado Mammals: Diversity, Ecology, and Natural History. **The Cerrados of Brazil**, n. 1942, p. 266–284, 2016. DOI: 10.7312/oliv12042-015
- MELO, J. A. Valorização Da Flora Do Cerrado Com. p. 42, 2011.
- MENESES, B. M. Vegetation recovery patterns in burned areas assessed with landsat 8 oli imagery and environmental biophysical data. **Fire**, v. 4, n. 4, p. 76, 2021. DOI: 10.3390/fire4040076
- MIRANDA, H. S.; SATO, M. N.; NETO, W. N.; AIRES, F. S. Fires in the cerrado, the Brazilian savanna. **Tropical Fire Ecology**, p. 427–450, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-77381-8_15
- MIRANDA, J. da R.; JUVANHOL, R. S.; DA SILVA, R. G. Use of maximum entropy to improve validation and prediction of active fires in a Brazilian savanna region. **Ecological Modelling**, v. 475, p. 110219, 2023. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2022.110219
- MIRANDA, J. da R.; SILVA, R. G. da; JUVANHOL, R. S. Forest fire action on vegetation from the perspective of trend analysis in future climate change scenarios for a Brazilian savanna region. **Ecological Engineering**, v. 175, p. 106488, 2022. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2021.106488
- PACHECO, A. da P.; DA SILVA JUNIOR, J. A. Spatio-temporal analysis of burning areas in the state of maranhão based on modis images and random forest classification. **Anuario do Instituto de Geociências**, v. 44, n. 1, p. 1–12, 2021. DOI: 10.11137/1982-3908_2021_44_36119
- PEREIRA, A. A.; PEREIRA, J. M. C.; LIBONATI, R.; OOM, D.; SETZER, A. W.; MORELLI, F.; MACHADO-SILVA, F.; DE CARVALHO, L. M. T. Burned area mapping in the Brazilian Savanna using a one-class support vector machine trained by active fires. **Remote Sensing**, v. 9, n. 11, p. 1161, 2017. DOI: 10.3390/rs9111161
- PILAR MARTIN, M.; CHUVIECO, E. Mapping and evaluation of burned land from multitemporal analysis of AVHRR NDVI images. **EARSel**, v. 4, n. 3, p. 7–13, 1995.
- PIVELLO, V. R. The use of fire in the cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: Past and present. **Fire Ecology**, v. 7, n. 1, p. 24–39, 2011. DOI: 10.4996/fireecology.0701024
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. **Biologia**, v. 16, n. 1, p. 127, 2009. DOI: 10.4025/bolgeogr.v16i1.12157
- RIBEIRO, R.; RODRIGUES, F. Genética da conservação em espécies vegetais do cerrado. **Revista de Ciências Médicas e Biológicas**, v. 5, n. 3, p. 253–260, 2006.
- SCHMIDT, I. B.; ELOY, L. Fire regime in the Brazilian Savanna: Recent changes, policy and management. **Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 268, p. 151613, 2020. DOI: 10.1016/j.flora.2020.151613



VERMOTE, E.; WOLFE, R. MYD09GA MODIS/Aqua Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m SIN Grid V006. **NASA EOSDIS Land Processes DAAC**, p. 1–35, 2015.

VIANA-SOTO, A.; AGUADO, I.; MARTÍNEZ, S. Assessment of post-fire vegetation recovery using fire severity and geographical data in the mediterranean region (Spain). **Environments - MDPI**, v. 4, n. 4, p. 1–17, 2017. DOI: 10.3390/environments4040090