

# Aplicação Integrada de TGI e NDMI para Identificação de Desmatamento Químico no Pantanal, Brasil

## Integrated Application of TGI and NDMI for Identifying Chemical Deforestation in the Pantanal, Brazil

Jean Carlos Ferreira\*, André Pereira Dias\*\*, Joberth Firmino Gambati\*\*\*

\* Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Estado de Mato Grosso – SEMA/MT, [jeancarfloresta7@gmail.com](mailto:jeancarfloresta7@gmail.com)

\*\* Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, [andrefloresta@gmail.com](mailto:andrefloresta@gmail.com)

\*\*\* Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Estado de Mato Grosso – SEMA/MT, [joberth.gambati@gmail.com](mailto:joberth.gambati@gmail.com)

<https://doi.org/10.5380/raega.v63i2.99969>

### Resumo

Este estudo apresenta uma abordagem inovadora para detecção e monitoramento de desmatamento químico no Pantanal brasileiro, revelando impactos alarmantes da pulverização aérea de herbicidas sobre a vegetação nativa. Através da integração dos índices espectrais Índice Triangular de Verdor (TGI) e de Umidade por Diferença Normalizada (NDMI) aplicados a imagens Sentinel-2A, identificamos padrões característicos de degradação química em 158 776 hectares de áreas úmidas e formações vegetais nativas no Pantanal de Barão de Melgaço, Mato Grosso, ocorridos entre 2021 e 2023. A metodologia desenvolvida demonstrou alta precisão (89% de acurácia) na discriminação entre danos por agrotóxicos e outros distúrbios naturais ou antrópicos, revelando assinaturas espectrais específicas e padrões espaciais típicos de aplicação aérea. Os resultados forneceram evidências científicas cruciais que embasaram ações de fiscalização ambiental, culminando no embargo das áreas afetadas e aplicação em multas e compromissos de recuperação ambiental. Além de comprovar a eficácia da integração TGI-NDMI para monitoramento ambiental, o estudo alerta para uma nova fronteira de degradação em ecossistemas úmidos tropicais, destacando a urgência de políticas públicas específicas para regulamentação da pulverização aérea e proteção desses ecossistemas sensíveis. A abordagem desenvolvida se apresenta como ferramenta estratégica para fiscalização ambiental, permitindo a rápida detecção e valoração precisa de danos em larga escala, com potencial aplicação em outros biomas tropicais ameaçados por práticas similares de desmatamento químico.

### Palavras-chave:

Agrotóxicos, Degradação ambiental, Fiscalização ambiental, Índices espectrais.

### Abstract

This study presents an innovative approach for detecting and monitoring chemical deforestation in the Brazilian Pantanal, revealing alarming impacts of aerial herbicide spraying on native vegetation.

Through the integration of the Triangular Greenness Index (TGI) and Normalized Difference Moisture (NDMI) spectral indices applied to Sentinel-2A images, we identified characteristic patterns of chemical degradation in 158,776 hectares of wetlands and native vegetation formations in the Pantanal of Barão de Melgaço, Mato Grosso, that occurred between 2021 and 2023. The developed methodology demonstrated high precision (89% accuracy) in discriminating between pesticide damage and other natural or anthropogenic disturbances, revealing specific spectral signatures and spatial patterns typical of aerial application. The results provided crucial scientific evidence that supported environmental inspection actions, culminating in the embargo of the affected areas and the application of fines and environmental recovery commitments. In addition to demonstrating the effectiveness of TGI-NDMI integration for environmental monitoring, the study warns of a new frontier of degradation in tropical humid ecosystems, highlighting the urgency of specific public policies to regulate aerial spraying and protect these sensitive ecosystems. The approach developed presents itself as a strategic tool for environmental monitoring, allowing for the rapid detection and accurate assessment of large-scale damage, with potential application in other tropical biomes threatened by similar chemical deforestation practices.

**Keywords:**

Agrochemicals, Environmental degradation, Environmental monitoring, Spectral indices.

## I. INTRODUÇÃO

O avanço das geotecnologias e do sensoriamento remoto tem transformado o monitoramento ambiental, permitindo a detecção ágil de perturbações na vegetação e mudanças no uso do solo, resultando no planejamento de ações mais eficazes de controle ambiental (Penha et al., 2023; Assis et al., 2019). Essas ferramentas são essenciais para fiscalização em países de grande extensão territorial, como o Brasil, reduzindo a dependência de inspeções presenciais e aumentando a eficácia no combate a crimes ambientais (Paranhos et al., 2021). As ações de fiscalização mais rápidas resultam em um aumento significativo na apreensão de maquinários ilegais e na responsabilização dos infratores, contribuindo para a descapitalização dessas atividades ilícitas no estado (Mato Grosso, 2024).

Entretanto, à medida que as tecnologias de monitoramento evoluem, as práticas ilegais também se sofisticam. Métodos alternativos ao desmatamento à corte raso, como o uso do fogo para reduzir gradualmente a cobertura arbórea, resulta em desmatamento causado pelas perturbações antrópicas sucessivas (Lapola et al., 2023).

Nos últimos anos, o desmatamento químico, caracterizado pela pulverização aérea de herbicidas para induzir a mortalidade florestal progressiva, tem se destacado como uma ameaça crescente aos ecossistemas tropicais. Esse método evita alterações abruptas na cobertura do solo, mimetizando processos naturais de

declínio vegetativo e dificultando sua identificação por sistemas de monitoramento tradicionais. Segundo Armentaras (2024), a degradação gradual resultante retarda a detecção por satélites, permitindo a conversão ilegal de florestas para outros usos, como pastagens, comprometendo a eficácia dos sistemas de monitoramentos e dificultando a fiscalização ambiental.

Como maior consumidor global de agrotóxicos (FAO, 2023), o Brasil enfrenta uma crise regulatória dupla: a flexibilização das leis ambientais - evidenciada pelo recorde histórico de registros de novos pesticidas em 2022, incluindo substâncias proibidas em outros países (Hess et al., 2023) e a escalada do comércio ilegal desses produtos. Em Mato Grosso, epicentro desse problema, a recente aprovação do PL 1833/2025, que reduz as zonas de amortecimento para pulverização próxima a comunidades e mananciais, coincide com a alarmante estatística de que 65% dos agrotóxicos contrabandeados apreendidos no país entre 2012-2022 foram interceptados neste estado, embora represente apenas 4,5% das operações federais no período (Ferreira et al., 2025). Essa combinação entre uso ilegal de produtos não registrados ou contrabandeados e aplicação irregular em desacordo com normas de proteção ambiental potencializa exponencialmente os riscos ecológicos, comprometendo tanto a biodiversidade do Pantanal quanto a saúde das populações tradicionais da região.

Casos de desmatamentos químicos têm sido documentados em diferentes regiões (Freitas, 2021; Gonzalez, 2022; Nicas; Milhorange, 2024; Brown, 2024), inclusive em Terras Indígenas e áreas protegidas (Montenegro; Colce, 2023). Um caso recente, com ampla repercussão nacional e internacional (MPMT, 2024) revelou a prática de desmatamento químico em larga escala no Pantanal de Barão de Melgaço (MT). O Pantanal, um dos maiores ecossistemas úmidos do planeta e reconhecido como Patrimônio Natural da Humanidade, é altamente vulnerável a contaminantes químicos, o que reforça a necessidade de um monitoramento com metodologias robustas para a preservação da sua integridade ecológica.

Nesse contexto, índices espectrais como o TGI (Triangular Greenness Index) e o NDMI (Normalized Difference Moisture Index) emergem como ferramentas promissoras para a caracterização desse tipo de perturbação florestal. O TGI detecta alterações bioquímicas precoces associadas à degradação vegetal, como redução de clorofila, além de captar variações estruturais e biofísicas da vegetação, sem a necessidade do infravermelho próximo, sendo menos suscetível à saturação que índices convencionais (Huete et al., 2002; Hunt et al., 2011). Esse índice tem se mostrado eficaz na distinção entre vegetação saudável e estressada (Garza et al., 2020; Lemes et al., 2022), mas apesar de sua ampla utilização na agricultura, há poucos estudos sobre sua aplicação em florestas destacando os trabalhos de Polat (2020) e Polat et al. (2024).

Já o NDMI é sensível ao teor de umidade da vegetação (Gao, 1996), permitindo diferenciar vegetação saudável das impactadas por perturbações ambientais (Lastovicka et al., 2020; Strashok et al., 2022), sua combinação com outros índices melhora a detecção de degradação, especialmente em ambientes de cobertura vegetal esparsa (Schultz et al., 2018).

Ao integrar análises multitemporais dos índices espectrais TGI e NDMI com técnicas de processamento geoespacial, esse estudo visa superar limitações dos métodos convencionais de detecção de degradação florestal através de uma abordagem metodológica inovadora para o monitoramento ambiental em ecossistemas úmidos tropicais, com foco na detecção e caracterização de áreas de vegetação nativa impactadas por desmatamento químico.

O principal objetivo é desenvolver e validar uma metodologia capaz de: (i) quantificar com alta acurácia a extensão espacial dos danos induzidos por herbicidas; (ii) reconstruir a cronologia dos eventos de degradação a partir de assinaturas espectrais; (iii) discriminar com robustez os impactos causados por herbicidas em relação a outros agentes de distúrbio, como incêndios e variações sazonais; e (iv) fornecer subsídios técnicos qualificados para fortalecer mecanismos de fiscalização, monitoramento e responsabilização ambiental.

A aplicação da metodologia foi conduzida no Pantanal de Barão de Melgaço (MT), região emblemática por registros recentes de pulverização aérea de herbicidas sobre vegetação nativa. Ao preencher uma lacuna crítica nos atuais sistemas de alerta e detecção de degradação, este estudo oferece uma ferramenta baseada em evidências para o diagnóstico preciso desse tipo específico de perturbação antrópica, contribuindo diretamente para a conservação da biodiversidade e a governança ambiental em ecossistemas altamente vulneráveis.

### **Área do estudo**

A área do estudo está localizada em 11 imóveis rurais contíguos, destinados à pecuária extensiva, que somam uma área de 277 325 hectares, situados no Pantanal de Barão de Melgaço, sub-região do bioma Pantanal (Silva; Abdon, 1998). Essa sub-região apresenta uma heterogeneidade espacial de solos que, associada aos tipos de inundação e variações hídricas sazonais, gera grande diversidade de microhabitats.

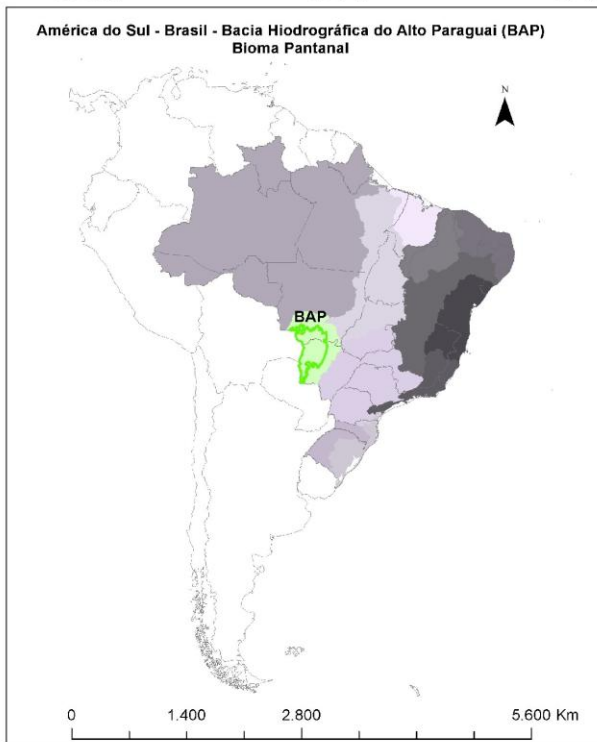
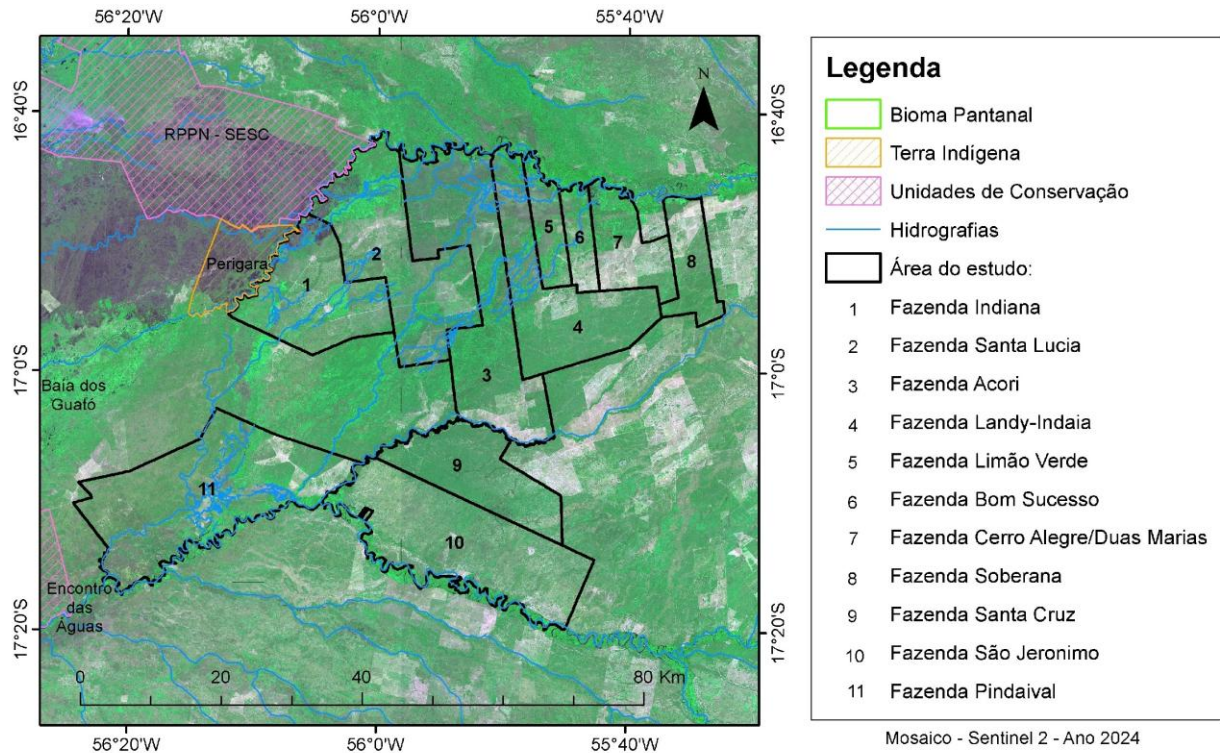


Figura 1 – Mapa de localização da área do estudo na Bacia Hidrográfica do Alto Paraguai. Limite das sub-regiões do bioma Pantanal, adaptado de Silva & Abdon (1998), obtido em [https://forest-gis.com/shapefiles/Pantanal\\_SubR\\_Estimated.zip](https://forest-gis.com/shapefiles/Pantanal_SubR_Estimated.zip).

As altitudes variam de 100 a 150 m e a declividade é inexpressiva, segundo estudo de Beirigo (2008). A vegetação da área de estudo é composta por Savana Arborizada, Savana Gramíneo-Lenhosa e Savana Parque,

Floresta Estacional Semidecidual das Terras Baixas e Aluvial, com dossel emergente, de acordo com a Classificação da Vegetação Brasileira (IBGE, 2012).

Os imóveis rurais, objeto da área de estudo, obtidos do Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR), se situam entre o rio São Lourenço e o rio Piquiri, na divisa com o estado de Mato Grosso do Sul, e estão no entorno das Terras Indígenas Perigara e Baía dos Guatós e próximo a duas unidades de conservação, o Parque Estadual Encontro das Águas e com a maior Reserva Particular do Patrimônio Natural do Brasil, a R.P.P.N. SESC Pantanal (Figura 1)

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foram realizadas inspeções terrestres e aéreas em março de 2023, período de cheias no Pantanal, para a verificar e registrar das áreas naturais afetadas e não afetadas por herbicidas, abrangendo diferentes formações vegetacionais, como florestas, savanas, campos nativos, além dos plantios de capins exóticos, áreas úmidas e secas, incluindo regiões com restrições de uso, como Áreas de Preservação Permanente (APP) e Áreas de Reserva Legal (ARL).

Após a constatação dos danos nas áreas afetadas por herbicidas, foi conduzida uma análise temporal, desde 2019, para caracterizar a dinâmica das alterações na vegetação nativa e no uso do solo ao longo dos anos e comparar os cenários em diferentes momentos, através de imagens dos satélites Sentinel-2 e da constelação PlanetScope. Foram usados alertas de desmatamento derivados das imagens diárias dos satélites Planet, para identificar áreas com degradação e cicatrizes de incêndios. Esses dados forneceram uma base exploratória inicial para estimar a extensão dos impactos, determinar o período de ocorrência para subsidiar a escolha das imagens utilizadas no estudo e avaliar a progressão do processo de degradação na região.

A análise temporal permitiu mapear as áreas afetadas e compreender a dinâmica das alterações ao longo do tempo, porém, não forneceu informações detalhadas sobre as respostas fisiológicas e biofísicas da vegetação ao estresse químico. Embora as abordagens iniciais tenham sido eficazes na identificação dos danos, foi realizado uma análise mais refinada para caracterizar e quantificar a magnitude dos impactos da pulverização de herbicidas sobre a vegetação nativa. Para suprir essa lacuna, foram empregados os índices TGI e NDMI. De acordo com Hunt et al. (2013), o TGI é sensível para verificar mudanças na concentração de clorofila nas folhas na escala do dossel, mas relativamente insensível ao índice de área foliar, garantindo maior robustez em diferentes condições vegetacionais (Jelínek et al., 2020). A aplicação do NDMI permite detectar variações no teor de umidade da vegetação, degradação ou mortalidade, conforme explicam Delgado-Moreno e Gao (2021).

Para otimizar o fluxo de processamento, a geração dos índices de vegetação foi realizada por meio do Copernicus Browser, uma plataforma que permite o acesso a toda a série temporal da constelação Sentinel-2, oferecendo uma ampla gama de índices espectrais pré-configurados, além da possibilidade de implementação de scripts customizados para processamento avançado de imagens orbitais (ESA, 2024a).

Os índices de vegetação foram aplicados às imagens do satélite Sentinel-2, abrangendo todas as cenas disponíveis entre 2019 e 2023 que apresentavam cobertura de nuvens inferior a 20%. As imagens utilizadas encontram-se no nível de processamento L2A, caracterizado como Analysis Ready Data (ARD), e já submetidas ao algoritmo Sen2Cor, responsável pela correção atmosférica. Esse processamento minimiza interferências atmosféricas, como a presença de vapor d'água e aerossóis, assegurando maior precisão nos valores espectrais (ESA, 2024) e eliminando a necessidade de pré-processamentos adicionais.

As imagens do Sentinel-2 revelaram-se eficazes para esse tipo de monitoramento, combinando acesso gratuito, resolução espacial de 10 metros e alta frequência de revisita. Essa combinação oferece um equilíbrio vantajoso entre detalhamento espacial, cobertura temporal e viabilidade operacional, características essenciais para o acompanhamento contínuo e multitemporal da dinâmica da vegetação.

O NDMI foi processado diretamente na plataforma Copernicus Browser, que disponibiliza uma camada pré-configurada para cálculo deste índice. O NDMI é definido como:

$$NDMI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \quad (1)$$

onde NIR representa a reflectância na banda do infravermelho próximo (B8A no Sentinel-2) e SWIR a reflectância na banda do infravermelho de ondas curtas (B11 no Sentinel-2).

O TGI, por sua vez, foi aplicado por meio de um script customizado na mesma plataforma, utilizando as bandas do espectro visível do Sentinel-2 (Azul (B02), Verde (B03) e Vermelho (B04)), conforme proposto por Hunt et al. (2011):

$$TGI = -0,5 \times [190 \times (\text{Vermelho} - \text{Verde}) - 120 \times (\text{Vermelho} - \text{Azul})] \quad (2)$$

onde as cores Azul, Verde e Vermelho representam a reflectância das bandas B02, B03 e B04, respectivamente, e os coeficientes 190 e 120 correspondem às diferenças de reflectância entre as bandas.

Adotou-se uma abordagem multiespectral integrando os índices TGI e NDMI para analisar a dinâmica da vegetação e as mudanças no uso do solo ao longo do tempo, bem como a progressão dos distúrbios ambientais.

Esses índices foram submetidos a uma classificação supervisionada utilizando o algoritmo Support Vector Machine (SVM), com classes espectrais definidas com base em limiares específicos: vegetação saudável (alto TGI e NDMI moderado), vegetação degradada (baixo TGI e NDMI), solo exposto (TGI e NDMI muito baixos ou negativo) e corpos d'água (NDMI alto e TGI baixo). Os limiares espectrais foram ajustados para garantir a máxima separabilidade entre as classes, seguido da aplicação do classificador em imagens do mês de julho, período seco entre 2019 e 2023, minimizando interferências sazonais e a cobertura de nuvens. Para reduzir ruídos e pequenas regiões isoladas foi empregado um filtro majoritário (3x3).

A classe vegetação degradada foi isolada como o primeiro produto temático para análise detalhada, servindo de base para direcionar a interpretação visual em composições RGB (bandas 4-8-3). Para reduzir a ocorrência de falsos positivos na detecção de áreas degradadas, foram excluídas, em sua maioria, regiões previamente convertidas para outros usos, como pastagens estabelecidas e áreas com solo exposto, com base no mapa de cobertura e uso da terra do MapBiomias (Coleção 9, 2023).

Essa etapa consistiu na análise integrada entre os resultados da classificação espectral e a interpretação visual das imagens Sentinel-2A, com o objetivo de refinar a identificação de áreas impactadas por pulverização aérea de herbicidas. Foram mapeados padrões espaciais recorrentes, como faixas lineares de mortalidade vegetal, polígonos com formas geométricas regulares e contornos compatíveis com rotas de voo, os quais indicam planejamento na aplicação dos produtos químicos sobre a vegetação nativa. A combinação dessas evidências espectrais e espaciais permitiu a delimitação precisa das áreas afetadas, posteriormente classificadas como "Desmatamento Químico". Essa abordagem também contribuiu para a validação preliminar dos padrões de degradação observados, aumentando a confiabilidade da detecção e reduzindo a possibilidade de confusão com outros tipos de distúrbio.

No entanto, áreas de pastagem que ainda mantinham elementos de vegetação arbórea nativa ou apresentavam significativa presença de espécies exóticas com biomassa relevante foram mantidas na delimitação, por apresentarem características espectrais compatíveis com os padrões de degradação investigados. Essa decisão visou preservar a representatividade dos processos de degradação em mosaicos vegetacionais mistos, comuns em regiões de fronteira agrícola, sem comprometer a acurácia na identificação dos efeitos da pulverização química.

A confirmação de degradação por herbicidas exigiu três critérios principais: (1) declínio simultâneo nos valores de TGI e NDMI em vegetação nativa, (2) padrões espaciais característicos de pulverização química por via aérea, e (3) correlação temporal com registros de denúncias ou fiscalizações. Adicionalmente, descartaram-

se áreas com alertas de desmatamento baseados em imagens diárias (Planet) ou dados históricos de incêndios ativos em tempo quase real (NRT) do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), e do Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), obtidos da plataforma Fire Information for Resource Management System (NASA FIRMS, 2024).

A análise temporal foi aprofundada mediante a avaliação de tendências nos índices espectrais, com ênfase na detecção de pontos de mudança abrupta. O NDVI foi incorporado como referência para distinguir variações sazonais naturais de eventos anômalos. Essa etapa permitiu associar períodos críticos de degradação a registros de aplicação de agrotóxicos, reforçando a inferência causal. Para garantir precisão, as áreas degradadas foram vetorizadas manualmente no QGIS 3.28 (2021–2023), considerando assinaturas espectrais, padrões espaciais e os dados obtidos nas vistorias de inspeção como as fotografias georreferenciadas das áreas.

Como o Cadastro Ambiental Rural (CAR) ainda não havia sido validado pelo órgão ambiental, a delimitação das APP dos imóveis foi realizada em ambiente SIG, através de interpretação de séries históricas de imagens de satélite, respaldadas por constatação em campo considerando os corixos, as lagoas e as áreas inundadas por mais de três meses, seguindo as dimensões previstas na legislação ambiental. A sobreposição dos polígonos de degradação com os de APP, permitiu a quantificação das APP Degradadas, evidenciando os impactos da pulverização de agrotóxicos nessas áreas protegidas.

A validação da classe "Desmatamento Químico" foi realizada com base em evidências coletadas durante vistorias de campo conduzidas por equipes técnicas da SEMA/MT, o que permitiu a validação in loco de áreas afetadas. Durante essas inspeções, foram produzidas fotos aéreas georreferenciadas e registros detalhados com coordenadas precisas das regiões impactadas, possibilitando a identificação direta de padrões característicos de degradação por pulverização aérea, como faixas lineares de vegetação morta e ausência de sinais de distúrbios mecânicos.

Além disso, foram utilizadas imagens PlanetScope com resolução espacial de 3 metros para complementar a análise, oferecendo maior precisão na verificação visual dos padrões espectrais identificados na classificação. A combinação entre os registros de campo, evidências fotográficas e imagens de alta resolução permitiu aferir a confiabilidade da classificação supervisionada, garantindo que os padrões espectrais detectados fossem compatíveis com os impactos observados em campo.

Para validar os dados obtidos a partir dos índices de vegetação, foi gerada uma matriz de confusão, na qual foram calculadas a exatidão global, além da descrição detalhada da acurácia do produtor e do usuário. Para isso, foram distribuídos aleatoriamente 100 pontos amostrais dentro da área de estudo, considerando duas

classes: "Desmate Químico" e "Sem Desmate Químico". Essa abordagem fortalece a robustez da validação ao integrar dados empíricos, análise espectral e imagens de alta resolução, especialmente em áreas de difícil acesso, como as zonas alagadas do Pantanal.

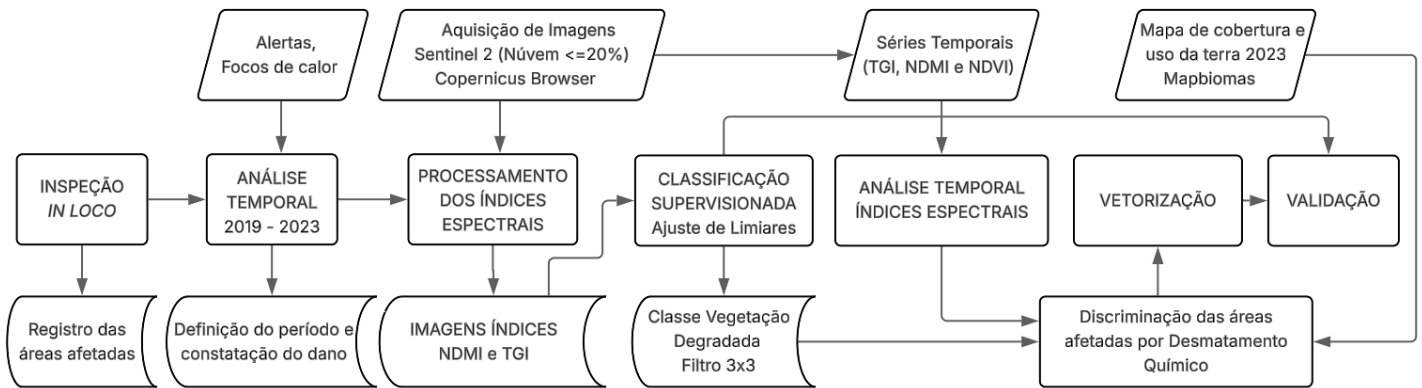


Figura 2 – Etapas do procedimento para a identificação das áreas florestais nativas afetadas por agentes químicos.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As vistorias de inspeção nas áreas do estudo revelaram um padrão anômalo de desfolhação em diversas espécies arbóreas, indicando um impacto severo e não natural sobre a vegetação nativa. A perda foliar foi abrupta e concentrada em áreas específicas, contrastando com as regiões adjacentes, onde as árvores apresentavam dossel íntegro e saudável. Essa diferença não pode ser atribuída a variações climáticas ou edáficas, uma vez que, no período da vistoria a disponibilidade hídrica era abundante, proporcionando um aspecto verdejante e saudável às formações florestais da região (Figura 3).

As áreas impactadas por herbicidas encontravam-se alagadas no momento da vistoria de campo e apresentavam padrões organizados de degradação, com limites bem definidos e elevada mortalidade de árvores. Observou-se, de forma consistente, um contraste marcante entre a morte expressiva de espécies dicotiledôneas e a manutenção do vigor de gramíneas, incluindo tanto forrageiras nativas quanto capins exóticos, as quais não apresentavam sinais visíveis de estresse. Esse padrão seletivo de mortalidade é compatível com a aplicação direcionada de herbicidas específicos, corroborando as evidências coletadas em campo.



Figura 3 – Imagens da constatação da mortandade de espécies arbóreas na área de estudo, com presença de capim não afetado pelo agrotóxico, em 2023. Lat. 16°52'9"S e Long. 55°49'40"W.Gr.; Lat. 17°08'29"S e Long. 56°09'39"W.Gr.; Lat. 16°51'37"S e Long.55°54'59"W.Gr.; Lat. 16°57'13"S e Long. 55°56'1"W.Gr.; Lat. 16°56'2"S e Long.55°57'59"W.Gr.; Lat. 16°54'32"S e Log. 55°47'13"W.Gr. Imagens do autor.

Durante a inspeção, foram encontrados sacos estocados de sementes de forrageiras nas propriedades, além de embalagens de mais de 25 tipos de agrotóxicos, com predominância de herbicidas seletivos para folhas largas. Entre eles, destacam-se os compostos à base de auxinas sintéticas, como o 2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético, picloram), amplamente reconhecido por sua ação em dicotiledôneas, onde provoca crescimento desordenado, colapso estrutural e morte celular, resultando em mortalidade generalizada de espécies arbóreas. Este composto, notoriamente utilizado como um dos principais ingredientes do "Agente Laranja" durante a Guerra do Vietnã, é associado a efeitos ecotóxicos severos e persistentes. Além disso, alguns dos produtos encontrados apresentam ação residual prolongada, dificultando a regeneração da vegetação lenhosa ao longo do tempo, enquanto outros, inibem o rebrotamento das árvores afetadas (à base de triclopyr), prolongando significativamente os efeitos da degradação ambiental.

Os dados obtidos junto ao Instituto de Defesa Agropecuária do Estado de Mato Grosso (INDEA/MT) reforçam a escala da aplicação de agrotóxicos na região. Entre 2021 e 2023, foram registrados 215 587 litros e 1353 kg de herbicidas, cujas notas fiscais e registros de aplicação aérea confirmam a utilização extensiva desses compostos. A presença de embalagens descartadas de forma inadequada, misturadas ao lixo comum e em locais próximos a corpos d'água, em descumprimento às normas ambientais, ampliam o risco de contaminação hídrica e os impactos ecotoxicológicos (SEMA-MT, 2023).

Destaca-se que a aplicação sistemática de herbicidas seletivos voltados à eliminação de espécies arbóreas e arbustivas não se alinha às práticas tradicionalmente adotadas na pecuária extensiva do Pantanal, que historicamente se baseia na utilização de pastagens nativas e em manejos de baixo impacto (Junk; Nunes; Da Cunha, 2012).

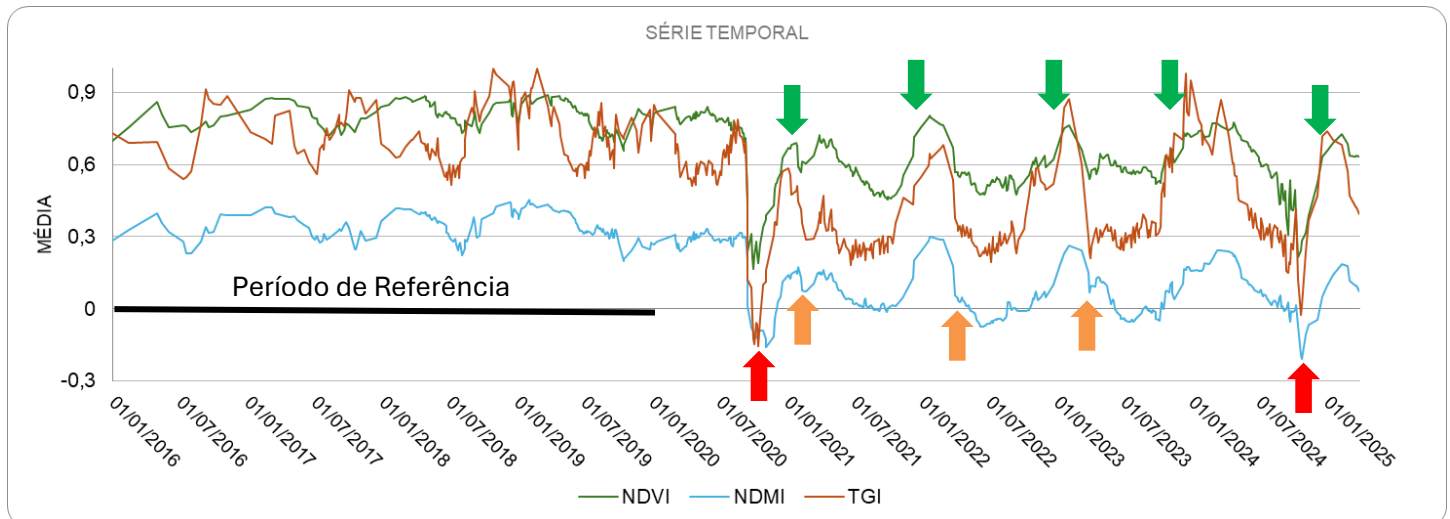


Figura 4 – Série temporal dos índices NDVI, NDMI e TGI para área localizada na Fazenda Landy-Indaiá, delimitada pelo polígono com vértices em: Lat. 16°53'0,75''S e Long. 55°48'23,91''W.Gr.; Lat. 16°53'2,92''S e Long. 55°46'52,56''W.Gr.; Lat. 16°53'23,26''S e Long. 55°46'49,38''W.Gr.; Lat. 16°53'18,35''S e Long. 55°48'21,53''W.Gr.

A série temporal dos índices espectrais (NDVI, NDMI e TGI), representada na Figura 4 – Figura 4, evidencia a trajetória da vegetação nativa na área de estudo entre 2015 e 2024, destacando eventos de degradação e recuperação. A análise da série revela que, durante o período de referência entre 2015 e 2019, a vegetação nativa da área de estudo mantinha-se em condições ecológicas íntegras. Os valores dos índices NDVI, NDMI e TGI permaneceram elevados, refletindo a saúde da vegetação.

O comportamento dos índices espectrais na área amostral observados no período de referência, entre 2016 e agosto de 2020, segue o padrão sazonal típico do Pantanal, com reduções nos valores dos índices entre os meses de julho e outubro, estação seca,, mas ainda mantendo níveis mínimos relativamente altos, com o NDVI raramente inferior a 0,7. A oscilação no TGI reflete o predomínio de espécies decíduas, que perdem folhas na estação seca e o NDMI, em torno de 0,2 a 0,3, indica uma umidade do dossel relativamente estável, com redução esperada durante os meses secos. Esse padrão confirma a integridade da vegetação no período pré-distúrbios.

A partir de agosto de 2020, indicada pela primeira seta vermelha, observa-se uma queda abrupta nos três índices, associada a um grande incêndio que atingiu a região entre 16/08 e 02/11/2020, o que causou a morte de muitas espécies da flora, consumiu a matéria seca e aumentou a exposição do solo, ou seja, resultou

em um colapso espectral evidente, com NDVI, NDMI e TGI atingindo valores mínimos e marca o início de um processo de degradação severa da vegetação nativa. Com o início das chuvas após o incêndio, a vegetação inicia a rebrota, a regeneração natural e o aparecimento das novas folhas, onde observa-se uma recuperação com aumento gradual dos índices NDVI, TGI e do NDMI, até o final do mês de janeiro de 2021, indicada pela primeira seta verde.

Entre os dias 10 e 20 de fevereiro de 2021, observa-se uma queda nos três índices espectrais analisados, ocorrendo antes do início da estação seca típica do Pantanal, com reduções menos abruptas que as causadas por incêndios, porém significativas, indicadas pela primeira seta laranja na série temporal.

Devido à resiliência parcial da vegetação, novas aplicações de herbicidas foram realizadas em 2022 e 2023, que apresentaram padrões similares aos de 2021, intensificando o processo de degradação e provocando novas quedas nos índices, sempre precedendo a estação seca e coincidindo com registros de pulverizações aéreas, sugerem um padrão consistente de degradação química, portanto, não pode ser atribuída apenas à sazonalidade climática, que costuma impactar a vegetação entre julho e outubro.

A queda está associada à perda foliar e à mortalidade de árvores emergentes, sobretudo em áreas com alta densidade de vegetação nativa de grande porte, e em menor intensidade, esse efeito também se manifesta em áreas com capins exóticos e a presença de árvores e arbustos.

O TGI evidenciou áreas com estresse severo e perda de atividade fotossintética, enquanto o NDMI indicou forte estresse hídrico. As oscilações do TGI ao longo do tempo sugerem alterações florísticas, com predominância de gramíneas invasoras e regeneração desigual de espécies nativas. A resposta dos índices NDVI e NDMI reforça a presença de estresse vegetacional prolongado.

Ao final da série temporal, uma nova queda abrupta nos índices é registrada em setembro e outubro de 2024, compatível com um novo incêndio florestal, indicado pela segunda seta vermelha. Esse evento ocorre sobre uma vegetação já degradada, impactada severamente pelo fogo de 2020 e pelas aplicações sucessivas de agrotóxicos, resultando em menor biomassa acumulada, presença significativa de material seco e, conseqüentemente, maior severidade do fogo.

Esse cenário revela um ciclo de retroalimentação positiva, no qual a degradação da vegetação aumenta a carga de combustível e intensifica os incêndios subsequentes. A repetição desse ciclo compromete a resiliência do ecossistema, aumentando substancialmente a susceptibilidade das árvores à mortalidade, levando à abertura do dossel, ao acúmulo de biomassa morta e à aceleração do processo de secagem do material combustível, conforme já observado por Cochrane et al. (1999).

A abordagem multivariada demonstrou elevada sensibilidade na detecção de assinaturas espectrais típicas da degradação química da vegetação, mesmo em contextos ambientais complexos como os ecossistemas úmidos do Pantanal. A combinação dos índices TGI e NDMI permitiu identificar padrões espectrais específicos relacionados à aplicação de herbicidas, caracterizados pelo declínio simultâneo de ambos os índices. Essa assinatura se distingue nitidamente das variações associadas a processos naturais ou sazonais.

Notadamente, a metodologia mostrou-se eficaz também em áreas alagadas, onde foram observadas assinaturas paradoxais, como altos valores de NDMI (indicando saturação hídrica do ambiente) combinados com valores severamente reduzidos de TGI, sinalizando perda acentuada de clorofila. Essa combinação específica representa uma evidência robusta da ação de herbicidas em estágio avançado de degradação, reforçando a aplicabilidade e precisão do método em ambientes com alta complexidade hidrológica.

As Figuras 5, 6 e 7 exibem as áreas afetadas em três composições distintas: (i) imagem em cores verdadeiras (true color) à esquerda, (ii) índice de clorofila (TGI) ao centro e (iii) índice de umidade (NDMI) à direita. Essa representação visa facilitar a interpretação visual e permitir uma análise comparativa direta entre a aparência real da cena (cores verdadeiras) e os indicadores de clorofila foliar (TGI) e umidade da vegetação (NDMI), auxiliando na identificação de áreas degradadas ou sob estresse hídrico.

Os valores do TGI foram categorizados em quatro níveis: preto (0), indicando ausência ou mínima vegetação; vermelho (0,25), representando vegetação sob forte estresse ou degradação; amarelo (0,5), correspondendo a vegetação com estresse moderado; e verde ( $>0,75$ ), associado a vegetação saudável com altos teores de clorofila. Para o NDMI, adotou-se a padronização do Copernicus Browser, classificando os valores em: vermelho ( $\text{NDMI} \leq -0,8$ ), indicando solo exposto ou vegetação extremamente degradada; laranja ( $-0,8 < \text{NDMI} \leq -0,24$ ), representando vegetação sob forte estresse hídrico; amarelo/verde ( $-0,24 < \text{NDMI} \leq -0,032$ ), correspondendo a vegetação moderadamente estressada; ciano ( $-0,032 < \text{NDMI} \leq 0,032$ ), associado a umidade moderada; e azul-escuro ( $\text{NDMI} \geq 0,8$ ), indicando vegetação altamente saudável e sem estresse hídrico.

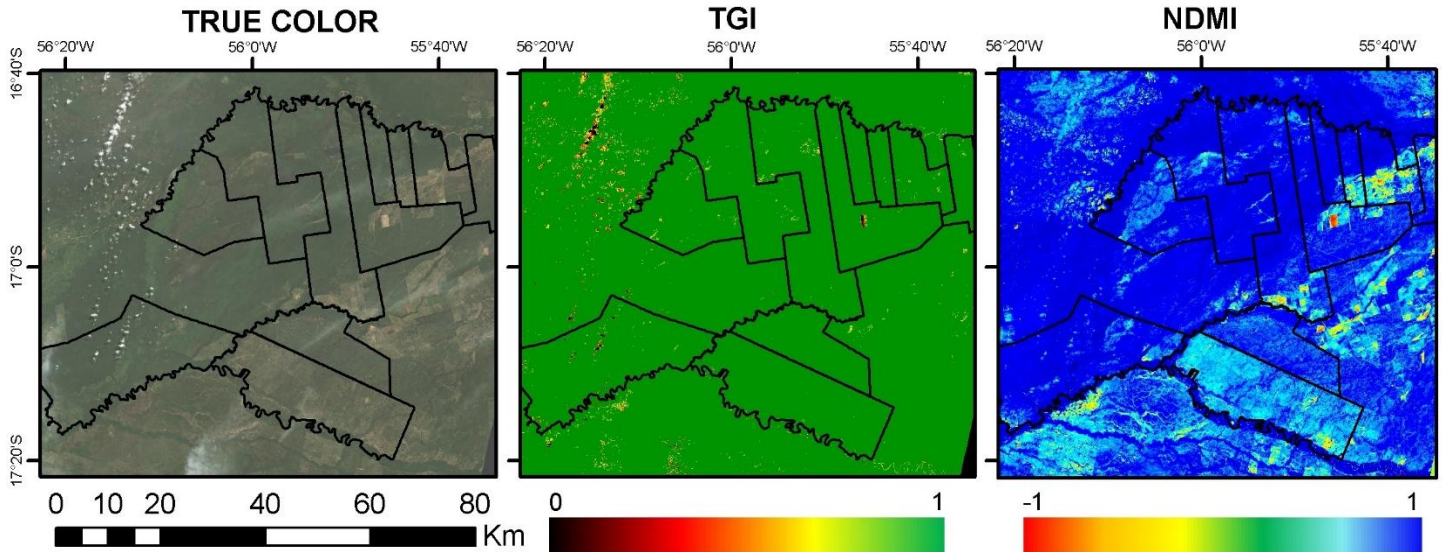


Figura 5 – Cena 2019-04-27-23\_59\_Sentinel-2\_L2A, de 27/04/2019 – Estação Chuvosa. A vegetação apresenta alta integridade, com florestas e cerrado densos e saudáveis. O TGI exhibe predominância de verde-escuro, indicando alto vigor de clorofila, e o NDMI mostra altos valores (azul-escuro), sinalizando ausência de estresse hídrico. Destaca-se que a parte sul (Faz. São Jerônimo), com Savana Parque, apresenta menor umidade mesmo antes da ocorrência dos distúrbios. Fonte: elaborada pelo autor.

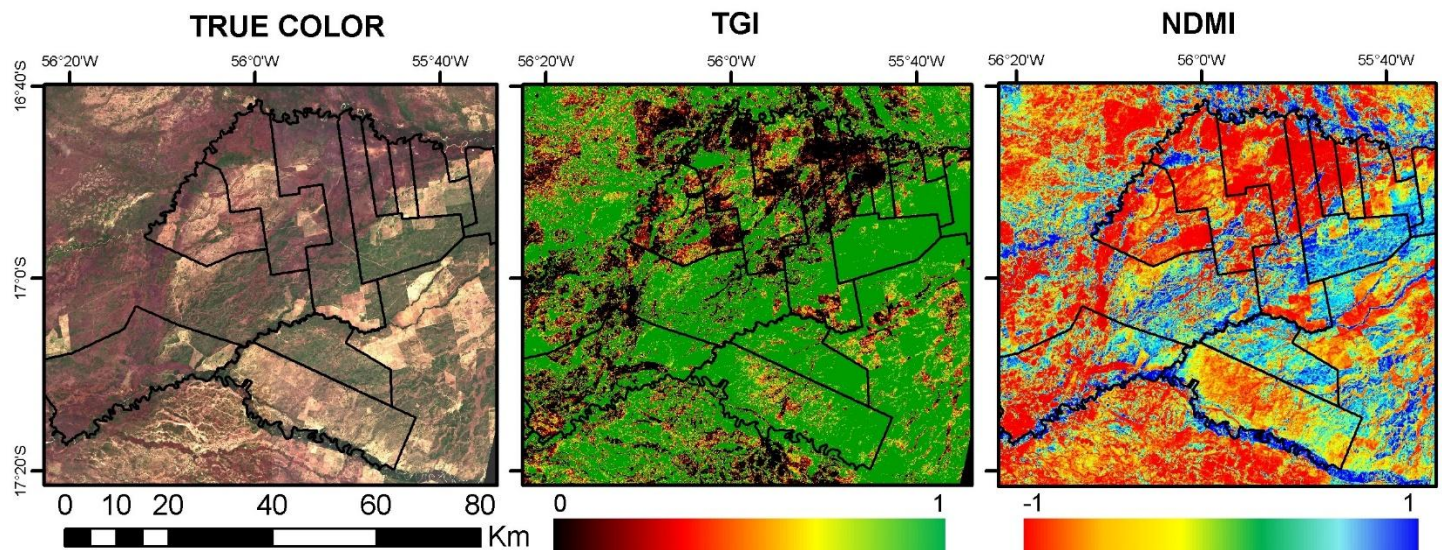


Figura 6 – Cena 2020-11-02-23\_59\_Sentinel-2\_L2A, de 02/11/2020 – Estação Seca. A imagem True Color mostra extensa degradação causada pelos incêndios, com grandes áreas em marrom-escuro. O TGI destaca regiões queimadas em vermelho e preto, com baixa atividade fotossintética. O NDMI reforça o impacto, com manchas em tons de amarelo a vermelho, indicando forte estresse hídrico e vegetação severamente afetada. Fonte: elaborada pelo autor.

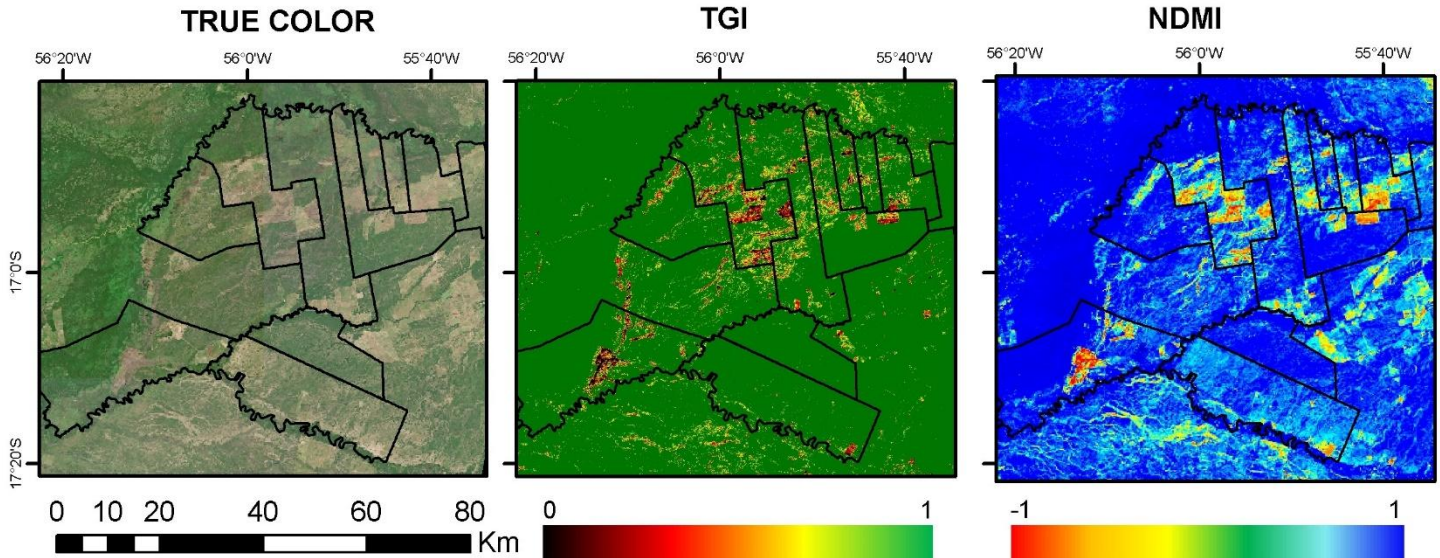


Figura 7 – Cena 2021-04-21-23\_59\_Sentinel-2, de 21/04/2021 – Estação Chuvosa. Diferente dos anos anteriores, a vegetação apresenta sinais evidentes de degradação por agrotóxicos, com grandes áreas em cinza e marrom-claro. O TGI mostra baixos valores (vermelho e preto), indicando forte estresse e atividade fotossintética reduzida, e o NDMI revela perda de umidade com tons de ciano a vermelho. Fonte: elaborada pelo autor.

As imagens nas figuras Figura 8 e Figura 9 apresentam em detalhe o resultado da classe “Desmate Químico” obtida da classificação supervisionada integrando os índices TGI e NDMI.

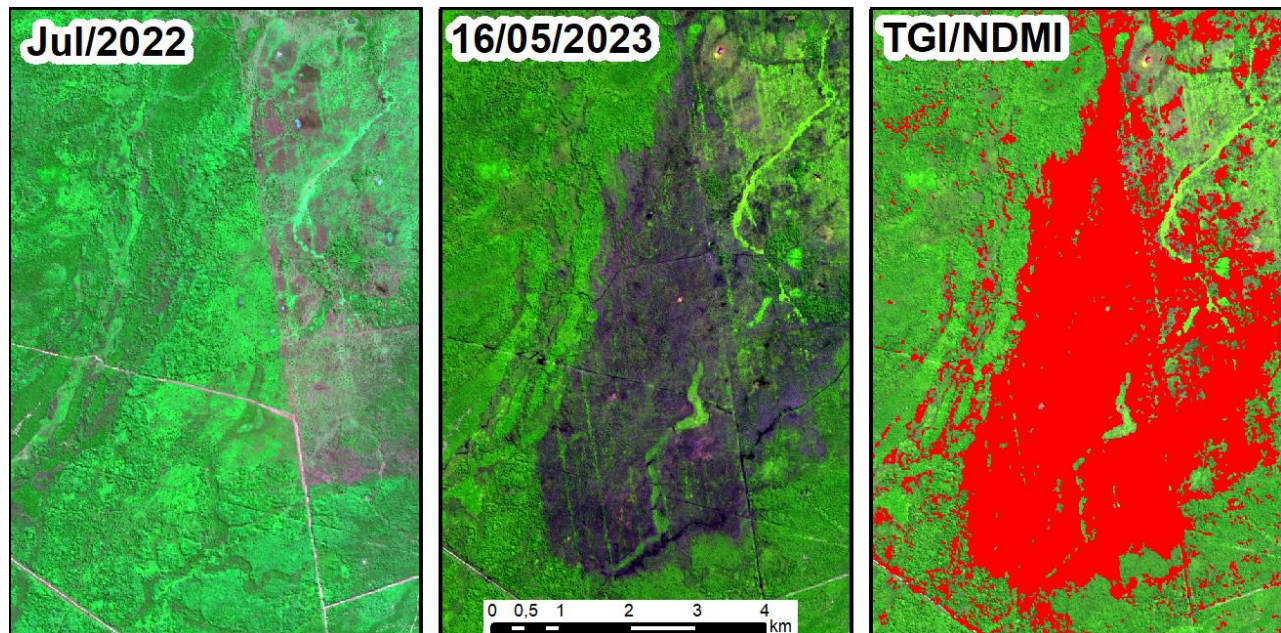


Figura 8 – Detecção da Degradação Florestal. Imagem Sentinel-2\_L2A de julho de 2022 (esquerda), de 16/05/2023 (centro) e resultado da integração TGI e NDMI em 16/05/2023 (direita). Coordenada central: Long. 55°49'58"W.Gr e Long. 16°54'2,07"S. Fonte: elaborada pelo autor.

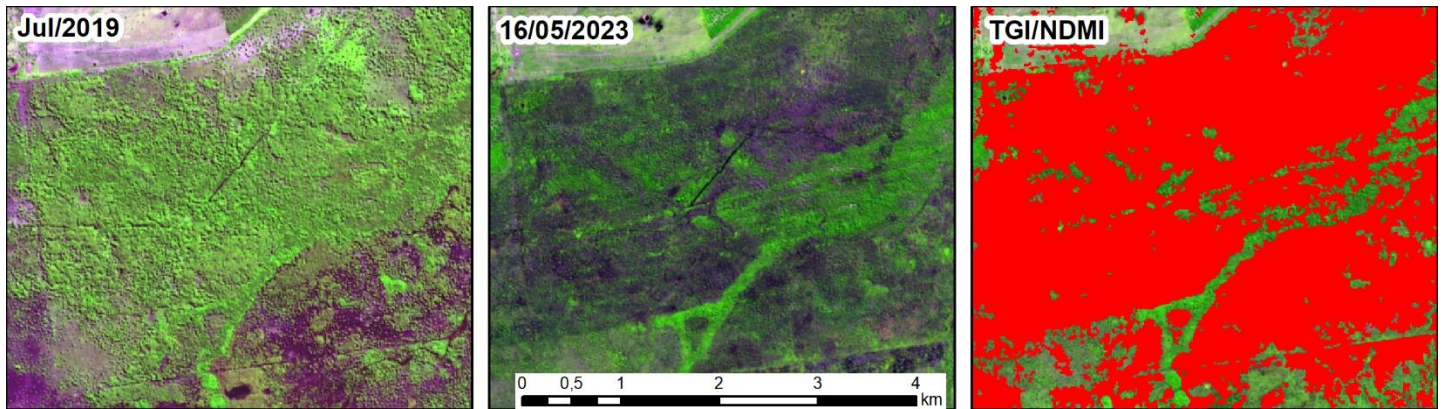


Figura 9 – Detecção da Degradação Florestal. Imagem Sentinel-2\_L2A de julho de 2019 (esquerda), de 16/05/2023 (centro) e resultado da integração TGI e NDMI na cena de 16/05/2023 (direita). Destaca-se a detecção de degradação, incluindo da vegetação em área úmida no sudeste da imagem. Coordenada central: Long. 55°54'13,37"W. Gr e Long. 16°49'29,02"S. Fonte: Elaborada pelo autor.

A abordagem adotada possibilita distinguir com precisão os diferentes agentes de degradação florestal, permitindo avaliar não apenas a extensão, mas também a intensidade e a frequência dos impactos sobre a vegetação nativa. O diferencial metodológico reside na articulação de múltiplas dimensões da análise (espectral, temporal e espacial) aliada à aplicação de filtros rigorosos para minimizar interferências de origem natural ou antrópica não relacionadas ao uso de agrotóxicos.

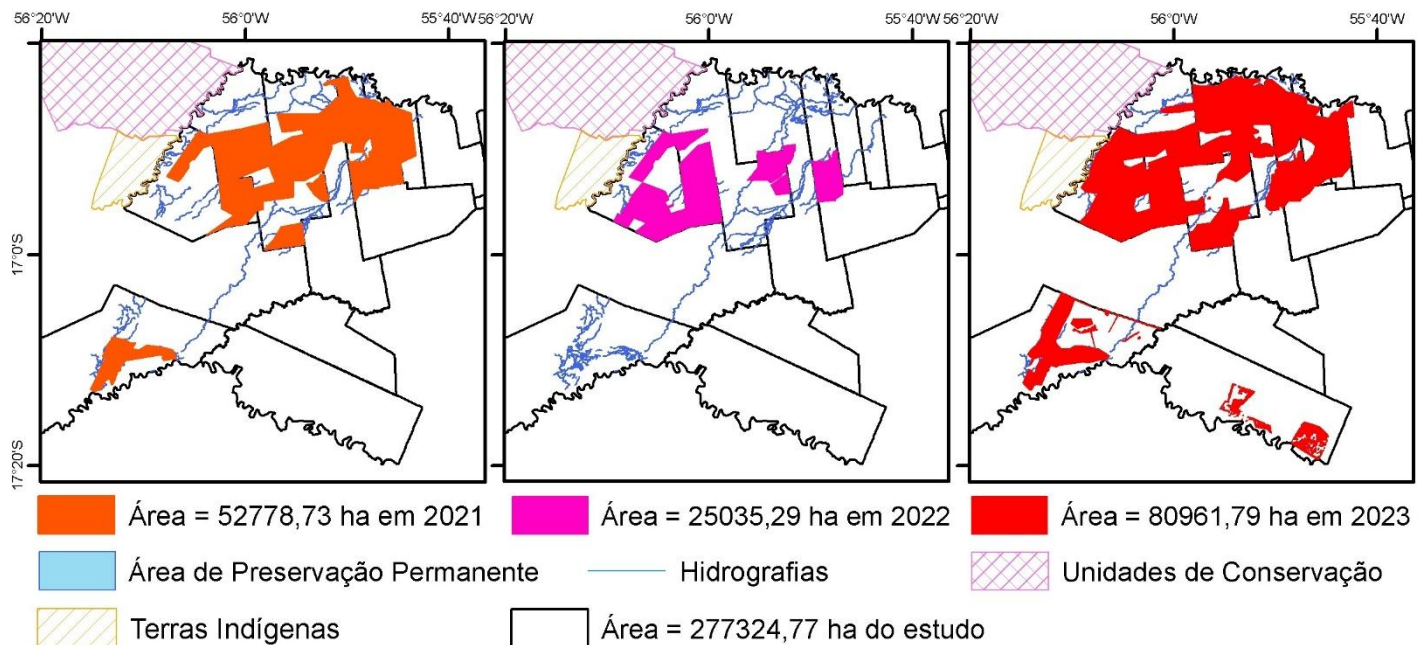


Figura 10 – Áreas degradadas por agentes químicos nos anos de 2021, 2022 e 2023. Fonte: elaborada pelo autor.

Essa metodologia fortalece a capacidade de detecção de assinaturas espectrais associadas especificamente à degradação química, conferindo maior confiabilidade aos resultados e possibilitou a delimitação precisa das áreas afetadas especificamente pela pulverização de herbicidas, sendo quantificadas

em 52 779 hectares detectados no ano de 2021, 25 035 hectares em 2022 e 80 962 hectares em 2023, totalizando 158 776 hectares impactados ao longo do período analisado (Figura 10). Desse total, 5 223 hectares correspondem a APP degradadas, o que acentua a gravidade dos danos ambientais constatados.

Esses dados não apenas evidenciam a extensão do impacto ambiental, como também desempenham um papel crucial na orientação de políticas públicas e medidas de controle. As informações obtidas foram essenciais para subsidiar tecnicamente as ações de fiscalização, oferecendo subsídios estratégicos para a execução das operações *in loco*.

A pulverização aérea dos herbicidas sobre vegetação nativa, mantida de forma recorrente ao longo de três anos, resultou em impactos severos à biodiversidade, cujos efeitos são difíceis de mensurar em sua totalidade. Além da destruição de formações vegetais em estágios de regeneração natural, incluindo regiões com restrições de uso, foram registrados indícios de poluição dos recursos hídricos e efeitos adversos sobre a fauna silvestre. Esses achados evidenciam a urgência da implementação de medidas eficazes de monitoramento e controle do uso de herbicidas, especialmente em regiões ecologicamente sensíveis.

Os dados obtidos pela classificação supervisionada, resultantes da integração dos índices TGI e NDMI, foram corroborados por um processo de validação, que combinou inspeções em campo com fotos aéreas georreferenciadas, complementadas por imagens de alta resolução espacial.

Tabela 1 – Matriz de confusão e métricas de acurácia da classificação supervisionada

Tabela de validação		Referência de campo		Total	Acurácia do usuário
		Desmate Químico	Sem Desmate Químico		
Mapa temático	Desmate Químico	19	11	30	0.63
	Sem Desmate Químico	6	64	70	0.91
Total		25	75	100	
Acurácia do produtor		0.69	0.89		<b>0.8483</b>

Fonte: os autores.

A acurácia global de 0,85 evidencia a efetividade do modelo na detecção de áreas afetadas por desmatamento químico, especialmente ao captar assinaturas espectrais típicas da aplicação de herbicidas, como a queda simultânea de TGI e NDMI. A classe "Desmatamento Químico" obteve acurácias moderadas, mas apresentou forte coerência espacial com os padrões documentados durante as vistorias, como a mortalidade seletiva de espécies, a disposição linear da vegetação afetada e a presença de produtos químicos. Por outro lado, a alta acurácia da classe "Sem Desmatamento Químico" contribuiu para minimizar falsos positivos, aumentando a confiabilidade do mapeamento. Esses resultados reforçam o potencial da abordagem para

aplicações operacionais no monitoramento de degradação química, mesmo em ecossistemas complexos e sazonalmente alagados.

Os resultados evidenciam a efetividade do modelo em detectar padrões espectrais associados à aplicação de agrotóxicos, especialmente quando integrados com validações em campo. A capacidade de distinguir alterações específicas causadas por herbicidas de outros distúrbios ambientais reflete a robustez da abordagem adotada, mesmo diante da complexidade espectral das áreas degradadas. Ainda que haja sobreposição parcial entre classes, como esperado em ambientes naturais com alta heterogeneidade, a classificação demonstrou desempenho satisfatório, sobretudo pela incorporação de critérios espectrais refinados e da interpretação temporal e espacial das anomalias detectadas.

A dinâmica de regeneração natural após eventos de degradação química, caracterizada por elevações graduais nos valores de TGI e NDMI, ilustra a complexidade do cenário analisado. Essa regeneração inclui a substituição das espécies arbóreas por herbáceas, a rebrota sob o dossel e o avanço de gramíneas exóticas, o que pode suavizar os sinais espectrais da degradação recente, tornando os limites das áreas afetadas menos evidentes. Além disso, em regiões com predomínio de capins nativos, sujeitos a variações sazonais e ao pastejo intensivo, a exposição do solo e a reconfiguração estrutural da vegetação contribuem para assinaturas espectrais semelhantes às da degradação química.

Esse desafio é exemplificado na porção sul da área de estudo, na área denominada Fazenda São Jeronimo, onde uma área de Savana Parque, com elevada exposição de solo (30–45%) e uso extensivo para pastagem, apresentou valores de NDMI moderado, persistentemente abaixo do restante da vegetação nativa da área de estudo ao longo do período analisado (2019–2023). Embora inicialmente esses valores pudessem indicar degradação, a análise temporal revelou estabilidade no comportamento espectral e ausência de padrões espaciais característicos da pulverização aérea, permitindo a exclusão dessa área como um falso positivo. Esse tipo de análise integrada contribuiu diretamente para a acurácia alcançada, demonstrando a capacidade da metodologia em lidar com as sutilezas do ambiente natural e reduzir erros de classificação.

Os resultados deste estudo forneceram evidências técnicas cruciais que subsidiaram ações de fiscalização ambiental integrada entre a SEMA e órgãos parceiros, culminando no embargo das áreas degradadas e na aplicação de multas ambientais no valor total de R\$ 2,9 bilhões, além da imposição de medidas de recuperação ambiental estimadas em R\$ 2,3 bilhões. Estes valores representam um marco nas penalizações por desmatamento químico no Brasil, destacando a eficácia do sensoriamento remoto como ferramenta estratégica para a detecção, quantificação e comprovação de ilícitos ambientais em larga escala.

A capacidade de gerar informações georreferenciadas, temporalmente consistentes e legalmente robustas fortalece a atuação dos órgãos de controle, conferindo maior celeridade à responsabilização dos infratores e contribuindo para a consolidação de uma política pública de combate à degradação química da vegetação nativa. Além disso, os achados reforçam o papel das geotecnologias como suporte técnico-científico essencial à promoção de justiça ambiental e à conservação de biomas sensíveis como o Pantanal.

#### IV. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstraram a eficácia da abordagem baseada nos índices espectrais Triangular Greenness Index (TGI) e Normalized Difference Moisture Index (NDMI) na detecção de impactos relacionados ao desmatamento químico sobre a vegetação nativa, especialmente em áreas úmidas do Pantanal. A sensibilidade desses índices revelou-se adequada para identificar assinaturas espectrais compatíveis com processos de degradação química, evidenciando seu potencial como ferramenta operacional para o monitoramento e diagnóstico precoce de estresse vegetal induzido por agrotóxicos.

Entretanto, observou-se uma capacidade limitada de separação espectral entre a degradação química e outros tipos de distúrbios, como os incêndios, especialmente em áreas com vegetação naturalmente esparsa, sendo necessária a análise dos padrões espaciais das áreas degradadas para possibilitar a discriminação mais precisa entre diferentes agentes de degradação. Recomenda-se, portanto, o aprimoramento metodológico por meio da incorporação de métricas espectrais e espaciais adicionais, bem como da adoção de técnicas de classificação orientadas a objetos (Object-Based Image Analysis – OBIA), que permitem integrar atributos espectrais, geométricos e contextuais das feições mapeadas.

A aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina supervisionado, com destaque para o Random Forest, pode contribuir significativamente para o aumento da acurácia, robustez e grau de automação do processo de classificação, sobretudo em ambientes heterogêneos como o Pantanal. Além disso, sugere-se a integração de dados provenientes de sensores ativos e passivos — como sensores hiperespectrais, LiDAR e radar de abertura sintética (SAR) — com o objetivo de captar características estruturais e biofísicas mais específicas da vegetação afetada por agentes químicos, como altura do dossel, densidade foliar e composição florística.

Recomenda-se, ainda, o uso de modelos baseados em séries temporais, como o BFAST (Breaks For Additive Season and Trend), para detectar pontos de inflexão e analisar os componentes de tendência e sazonalidade, o que pode refinar a detecção de alterações anômalas associadas à degradação química.

A adoção de estratégias de monitoramento contínuo, associadas ao ajuste dinâmico de limiares espectrais conforme os diferentes estágios sucessionais da vegetação, mostra-se promissora para ampliar a sensibilidade e a precisão na detecção de impactos ao longo do tempo, especialmente em áreas sujeitas a distúrbios recorrentes.

A sobreposição entre estresse hídrico, uso intensivo de herbicidas e recorrência de incêndios estabelece um cenário de elevada vulnerabilidade ecológica, comprometendo a capacidade de regeneração e a resiliência dos ecossistemas úmidos do Pantanal. Ainda assim, a metodologia proposta demonstrou alto potencial de aplicação, com resultados consistentes mesmo em ambientes hidrologicamente complexos. Seu caráter replicável e a capacidade de identificar padrões específicos de degradação química tornam essa abordagem uma aliada estratégica à fiscalização ambiental.

Com os aprimoramentos sugeridos, a abordagem tende a se consolidar como uma ferramenta robusta para o monitoramento contínuo de impactos antrópicos, contribuindo de forma efetiva para o controle do desmatamento químico e para a conservação de biomas ecologicamente sensíveis.

## V. REFERÊNCIAS

ARMENTERAS, D. La amenaza silenciosa de la deforestación química en los países amazónicos: un nuevo desafío para la conservación y la legislación ambiental. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, v. 48, n. 189, p. 967–969, 2024.

ASSIS, L. F. et al. TerraBrasilis: a spatial data analytics infrastructure for large-scale thematic mapping. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 8, n. 11, p. 513, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi8110513>. Acesso em: 9 jun. 2025.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE MATO GROSSO (ALMT). Deputados aprovam projeto que trata da aplicação de agrotóxicos em MT. 2025. Disponível em: <https://www.al.mt.gov.br/midia/texto/deputados-aprovam-projeto-que-trata-da-aplicacao-de-agrotoxicos-em-mt/visualizar>. Acesso em: 27 mar. 2025.

BEIRIGO, R. M. Sistema pedológico Planosolo-Plintossolo no Pantanal de Barão de Melgaço-MT. 2008. 86 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008. DOI: 10.11606/D.11.2008.tde-11022009-090704.

BROWN, S. Report exposes meatpackers' role in recent chemical deforestation in Brazil. *Mongabay – Conservation News*, 2024. Disponível em: <https://news.mongabay.com/2024/09/report-exposes-meatpackers-role-in-recent-chemical-deforestation-in-brazil/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

COCHRANE, M. A. et al. Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. *Science*, v. 284, n. 5421, p. 1832–1835, 1999.

DELGADO-MORENO, D.; GAO, Y. Forest degradation estimation through trend analysis of annual time series NDVI, NDMI and NDFI (2010–2020) using Landsat images. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSPATIAL INFORMATION SCIENCES*, 2021, Cham. Anais [...]. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 149–159.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). Sentinel-2 Level-2A: Top of Canopy (TOC). Copernicus Data Space Ecosystem, 2024. Disponível em: <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html#sentinel-2-level-2a-top-of-canopy-toc>. Acesso em: 3 fev. 2025.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). Copernicus Browser: User Documentation. Copernicus Data Space Ecosystem, 2024a. Disponível em: <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Applications/Browser.html>. Acesso em: 3 fev. 2025.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Pesticides Use and Trade, 1990–2021. FAOSTAT Analytical Briefs, 2023.

FERREIRA, A. M. D. S. D.; LIMA, R. B.; COSTA NETO, S. V. O crescimento agrícola e comércio ilegal de agrotóxicos no Brasil. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, v. 23, n. 2, e8894, 2025.

FREITAS, H. Fazendeiros jogam agrotóxico sobre Amazônia para acelerar desmatamento. *Repórter Brasil*, 2021. Disponível em: <https://reporterbrasil.org.br>. Acesso em: 18 mar. 2025.

GAO, B. C. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, v. 58, n. 3, p. 257–266, 1996.

GARZA, B. N. et al. Quantifying citrus tree health using true color UAV image. *Remote Sensing*, v. 12, 170, 2020. DOI: 10.3390/rs12010170.

GONZALES, J. Chemical defoliants sprayed on Amazon rainforest to facilitate deforestation in Brazil. 2022.

HESS, S. C. et al. Agrotóxicos no Brasil: cenários de políticas sinistras. *Revista da ANPEGE*, v. 20, n. 42, 2024.

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, p. 195–213, 2002. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.

HUNT JR, E. R. et al. Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index. *Agronomy Journal*, v. 103, n. 4, p. 1090–1099, 2011.

HUNT JR, E. R. et al. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 21, p. 103–112, 2013.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manual técnico da vegetação brasileira. 2. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

JELÍNEK, Z. et al. Winter wheat, winter rape and poppy crop growth evaluation with the help of remote and proximal sensing measurements. *Agronomy Research*, v. 18, n. 3, p. 2049–2059, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.20.176>.

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

LASTOVICKA, J. et al. Sentinel-2 data in an evaluation of the impact of the disturbances on forest vegetation. *Remote Sensing*, v. 12, 1914, 2020. DOI: 10.3390/rs12121914.

LAPOLA, D. M. et al. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, v. 379, n. 6630, eabp8622, 2023.

LEMES, E. M. et al. Triangular greenness index to evaluate the effects of dicamba in soybean. *AgriEngineering*, v. 4, n. 3, p. 758–769, 2022.

MAPBIOMAS. Coleção 9 da série anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. 2025. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 18 fev. 2025.

MONTENEGRO, M.; COLCE, J. (Orgs.). Atlas dos agrotóxicos: fatos e dados sobre agrotóxicos na agricultura. Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll, 2023. 68 p. ISBN 978-65-87665-17-7. Disponível em: <https://br.boell.org/sites/default/files/2023-12/atlasdo-agrotoxico-2023.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2024.

MATO GROSSO. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. Parceria SEMA-REM/MT: apreensão de maquinários flagrados em desmate ilegal interrompe ciclo de crimes ambientais. 2024. Disponível em: <https://rem.sema.mt.gov.br/imprensa/parceria-sema-rem-mt-apreensao-de-maquinarios-flagrados-em-desmate-ilegal-interrompe-ciclo-de-crimes-ambientais/>. Acesso em: 25 mar. 2025.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MATO GROSSO (MPMT). Desmatamento químico em MT repercute na imprensa internacional. 2024. Disponível em: <https://www.mpmt.mp.br/conteudo/58/149273/desmatamento-quimico-em-mt-repercute-na-imprensa-internacional>. Acesso em: 27 mar. 2025.

NASA FIRMS. Fire Information for Resource Management System (FIRMS), 2024. Disponível em: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>. Acesso em: 18 jan. 2025.

NICAS, J.; MILHORANCE, F. La nueva amenaza para los bosques brasileños: los productos químicos. *The New York Times*, 2024. Acesso em: 25 mar. 2025.

PARANHOS, A. C. et al. Geotecnologias para aplicações ambientais. Criciúma: Uniedusul, 2021. p. 394.

PENHA, A. R. et al. Análise de dados Harmonized Landsat Sentinel para mapeamento de uso e cobertura da terra em área de expansão agrícola no Cerrado. *Boletim de Geografia*, v. 41, p. 38–56, e64865, 2 abr. 2023.

POLAT, N. An investigation of Triangular Greenness Index performance in vegetation detection. *Intercontinental Geoinformation Days*, v. 1, p. 166–168, 2020.

POLAT, N.; MEMDUHOĞLU, A.; KAYA, Y. Triangular Greenness Index Analysis for Monitoring Fungal Disease in Pine Trees: A UAV-based Approach. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, v. 26, n. 2, p. 1-15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.24011/barofd.1352729>.