

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO TRIÂNGULO MINEIRO – CAMPUS UBERABA
MESTRADO PROFISSIONAL EM PRODUÇÃO VEGETAL**

ROBERSON BORGES RODRIGUES

**RELAÇÃO ENTRE A APTIDÃO DO USO DO SOLO E O DESENVOLVIMENTO DA
CANA-DE-AÇÚCAR NA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DO RIO UBERABA**

**UBERABA - MG
2025**

ROBERSON BORGES RODRIGUES

**RELAÇÃO ENTRE A APTIDÃO DO USO DO SOLO E O DESENVOLVIMENTO DA
CANA-DE-AÇÚCAR NA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DO RIO UBERABA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mestrado Profissional em Produção Vegetal, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Renato Farias do Valle Júnior

**UBERABA - MG
2025**

Ficha Catalográfica elaborada pelo Setor de Referência do IFTM –
Campus Uberaba-MG

R618r Rodrigues, Roberson Borges
 Relação entre a aptidão do uso do solo e o desenvolvimento
da cana-de-açúcar na área de proteção ambiental do Rio
Uberaba / Roberson Borges Rodrigues - 2025.
59 f.: il.

 Orientador: Prof. Dr. Renato Farias do Valle Junior.
 Dissertação (Mestrado Profissional em Produção Vegetal) –
Instituto Federal do Triângulo Mineiro- *Campus Uberaba-MG*,
2025.

 1. Aptidão do solo. 2. Avaliação espectral. 3. Manejo susten-
tável. I. Valle Júnior, Renato Farias do. II. Título.

CDD 631.4

ROBERSON BORGES RODRIGUES

**“RELAÇÃO ENTRE A APTIDÃO DO USO DO SOLO E O DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA
ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DO RIO UBERABA”**

FOLHA DE APROVAÇÃO DEFESA DISSERTAÇÃO

Data da aprovação: 09/05/2025

MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA:

Presidente

Prof. Dr. Renato Farias do Valle Júnior

IFTM Campus Uberaba

Membro Titular

Prof. Dr. Eusímio Felisbino Fraga Júnior

UFU - Monte Carmelo

Membro Titular

Prof. Dr. Ricardo Vicente Ferreira

UFTM

Local: Google Meet link: meet.google.com/vjc-powz-jft

RENATO FARIAS DO VALLE JUNIOR
PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO



Documento assinado eletronicamente por RENATO FARIAS DO VALLE JUNIOR, PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO, em 09/05/2025, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

EUSIMIO FELISBINO FRAGA JÚNIOR
MEMBRO PERMANENTE - PROGRAMA DE MESTRADO EM PRODUÇÃO VEGETAL



Documento assinado eletronicamente por EUSIMIO FELISBINO FRAGA JÚNIOR, MEMBRO PERMANENTE - PROGRAMA DE MESTRADO EM PRODUÇÃO VEGETAL, em 09/05/2025, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

RICARDO VICENTE FERREIRA
MEMBRO EXTERNO DE BANCA DE QUALIFICAÇÃO E DEFESA DE MESTRADO / DOUTORADO



Documento assinado eletronicamente por RICARDO VICENTE FERREIRA, MEMBRO EXTERNO DE BANCA DE QUALIFICAÇÃO E DEFESA DE MESTRADO / DOUTORADO, em 09/05/2025, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://iftm.edu.br/autenticacao/> informando o código verificador **0B509C2** e o código CRC **5748730A**.

Referência: NUP: 23200.006102/2025-44

DOCS nº 0000714914

Aos meus pais, Roslaine e Roberval, e, ao meu irmão Rodrigo. Embora as circunstâncias não lhes tenham permitido trilhar os mesmos caminhos acadêmicos, seu apoio incondicional, palavras de incentivo e orgulho em cada etapa foram a força que me moveu nos momentos mais desafiadores. A vocês, com todo carinho e amor, dedico este trabalho!

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão ao Instituto Federal do Triângulo Mineiro – Campus Uberaba. Instituição que não apenas me proporcionou conhecimento técnico e científico, mas também valores e oportunidades que levarei para toda a vida. Agradeço a todos os professores, técnicos e colegas que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação.

Um agradecimento especial ao Prof.^o Dr. Renato Farias do Valle Júnior, meu orientador, cuja sabedoria, paciência e dedicação foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Sua orientação minuciosa e estímulo constante foram essenciais para superar os desafios desta jornada.

A Deus, agradeço a saúde, sabedoria e perseverança concedidas ao longo desta caminhada. Seus ensinamentos foram minha base nos momentos de incerteza e minha celebração nas conquistas.

Aos amigos que se tornaram família durante essa trajetória, meu eterno reconhecimento. Pelas noites de estudos, cafés intermináveis, risadas que aliviaram o estresse e palavras de motivação nos momentos de cansaço – vocês foram parte indispensável desta vitória!

Um agradecimento especial à Usina Santo Ângelo, empresa que trabalho, que acreditou no meu potencial e possibilitou a conciliação entre trabalho e estudos. A flexibilidade às sextas-feiras em meio período foi decisiva para que eu pudesse dedicar-me integralmente às atividades acadêmicas e adquirir conhecimentos que, além de enriquecerem minha formação, também serão aplicados em benefício da organização.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta conquista – colegas de turma, funcionários da instituição, familiares e mentores que me inspiraram. Cada conselho, cada ajuda e cada gesto de apoio foram peças fundamentais nessa construção.

Esta dissertação não é apenas um trabalho acadêmico, mas a materialização de um sonho. A todos, meu mais sincero obrigado!

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma cultura essencial para a economia brasileira, mas sua expansão em Áreas de Proteção Ambiental (APAs) pode gerar impactos ambientais significativos. Este estudo investiga a relação entre a aptidão do uso do solo e a resposta espectral do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na cana-de-açúcar, avaliando os efeitos dos conflitos ambientais na APA do Rio Uberaba. A região foi segmentada em três níveis de conflito de uso: Classe 0 (sem conflito), Classe 1 (conflito moderado) e Classe 2 (conflito elevado). Para analisar o vigor da vegetação, foram coletados 3.600 pontos amostrais de NDVI ao longo do ano de 2023, permitindo um acompanhamento mensal da variação espectral. Os resultados indicam que as áreas de uso compatível com a Classe 0 mantiveram maior estabilidade vegetativa, com valores médios de NDVI variando de 0,546 em janeiro a 0,474 em dezembro. As regiões com conflito moderado (Classe 1) apresentaram maior oscilação, com NDVI variando entre 0,524 em março e 0,129 em agosto, sugerindo impactos ambientais. Já as áreas de conflito elevado (Classe 2) registraram os menores valores médios, atingindo 0,125 em outubro, evidenciando degradação acentuada do solo e redução da cobertura vegetal. As equações de regressão ajustadas aos valores de NDVI apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,80, destacando padrões distintos entre os níveis de conflito. Observou-se que as áreas sem conflito apresentaram maior estabilidade ao longo do ciclo produtivo, enquanto as regiões de maior impacto demonstraram quedas expressivas no NDVI, refletindo deficiências no manejo agrícola. Diante dos resultados, sugere-se a adoção de um sistema de monitoramento contínuo baseado no uso do NDVI, permitindo identificar áreas mais suscetíveis à degradação a possibilitar intervenções adequadas para mitigar impactos. Estratégias como a conservação do solo, uso de palhada e aplicação controlada de vinhaça são recomendadas para reduzir os possíveis efeitos dos conflitos de uso da terra e garantir a sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar na APA do Rio Uberaba.

Palavras-chave: aptidão do solo; monitoramento espectral; manejo sustentável.

ABSTRACT

Sugarcane is a vital crop for the Brazilian economy; however, its expansion into Environmental Protection Areas (APAs) can lead to significant environmental impacts. This study investigates the relationship between land use suitability and the spectral response of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in sugarcane cultivation, assessing the effects of environmental conflicts within the Uberaba River APA. The region was segmented into three levels of land use conflict: Class 0 (no conflict), Class 1 (moderate conflict), and Class 2 (high conflict). To analyze vegetation vigor, 3,600 NDVI sampling points were collected throughout the year 2023, allowing monthly monitoring of spectral variation. The results indicate that areas with compatible use (Class 0) maintained greater vegetative stability, with average NDVI values ranging from 0.546 in January to 0.474 in December. Regions with moderate conflict (Class 1) showed higher variability, with NDVI values ranging from 0.524 in March to 0.129 in August, suggesting environmental impacts. Areas with high conflict (Class 2) recorded the lowest average NDVI values, reaching 0.125 in October, indicating severe soil degradation and a reduction in vegetation cover. The regression equations fitted to the NDVI values presented coefficients of determination (R^2) above 0.80, highlighting distinct patterns among the conflict levels. Areas without conflict demonstrated greater stability throughout the production cycle, whereas regions with higher environmental impact exhibited significant declines in NDVI, reflecting deficiencies in agricultural management. Based on the findings, the adoption of a continuous monitoring system based on NDVI is recommended to identify areas more susceptible to degradation and enable appropriate interventions to mitigate impacts. Strategies such as soil conservation, straw retention, and controlled application of vinasse are suggested to reduce the potential effects of land use conflicts and ensure the sustainability of sugarcane production within the Uberaba River APA.

Keywords: land suitability; spectral assessment; sustainable management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG)	27
Figura 2 - Geologia e tipos de solos da área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG)	28
Figura 3 - Aptidão do solo e uso e ocupação da área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG)	29
Figura 4 - Áreas de plantio de cana-de-açúcar, áreas escolhidas para o estudo e vegetação inicial do local e pontos de coleta via NDVI na área de estudo com a cultura da cana-de-açúcar na área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG).....	32
Figura 5 - Fluxograma metodológico das avaliações das áreas de estudo com a cultura da cana-de-açúcar na área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG).....	34
Figura 6 - Mapa de conflito na área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG).....	35

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Regressão polinomial cúbica do NDVI a longo dos meses do ano de 2023 em área sem conflito (classe 0) em relação ao vigor do cultivo de cana de açúcar da Área 1.....	40
Gráfico 2 - Regressão polinomial cúbica do NDVI a longo dos meses do ano de 2023 em área de conflito (classe 1) em relação ao vigor do cultivo de cana de açúcar da Área 2.....	41
Gráfico 3 - Regressão polinomial cúbica do NDVI a longo dos meses do ano de 2023 em área de conflito (classe 2) em relação ao vigor do cultivo de cana de açúcar da Área 3.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análises descritivas a partir dos dados de NDVI gerados entre os meses de janeiro a dezembro de 2023 da Área 01 com plantio de cana de açúcar, sem conflito (classe 0), na Área 2 com plantio de cana de açúcar, conflito classe 1 e da Área 3 com plantio de cana de açúcar, conflito classe 2, na área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG).....36

Tabela 2 - Análises descritivas a partir dos dados de NDVI gerados entre os meses de janeiro a dezembro de 2023 da Área 2 com plantio de cana de açúcar, conflito classe 1, na área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG).....38

Tabela 3 - Análises descritivas a partir dos dados de NDVI gerados entre os meses de janeiro a dezembro de 2023 da Área 3 com plantio de cana de açúcar, conflito classe 2, na área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG).....39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 História e expansão da cana-de-açúcar e seus impactos no Brasil	16
2.2 Conflitos de uso do solo na agricultura e modelos de avaliação de aptidão do solo	18
2.3 Sensoriamento remoto, monitoramento agrícola via NDVI e conflitos do uso do solo na cultura da cana – de – açúcar.....	19
2.4 Área de proteção ambiental (APA), uso do solo e conflitos ambientais	21
2.5 APA do Rio Uberaba e conflitos do uso do solo na agricultura	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 Área de estudo	27
3.2 Classificação da aptidão do solo e identificação de conflitos	29
3.3 Metodologia para classificação da aptidão do solo	30
3.4 Mapeamento da cana de açúcar e escolha das áreas de cultivo	32
3.5 Coleta e análise de dados.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

A agricultura moderna enfrenta desafios significativos para aumentar a produtividade e atender às crescentes demandas alimentares e energéticas da sociedade e ao mesmo tempo busca práticas mais sustentáveis do ponto de vista ambiental.

Nesse contexto, o cultivo da cana-de-açúcar desempenha um papel crucial na agricultura, não apenas para a produção de açúcar, mas também como fonte de energia limpa. O Brasil emergiu como líder no desenvolvimento de biocombustíveis de cana-de-açúcar, com um histórico de avanços científicos e tecnológicos (Grandis *et al.*, 2024).

No Brasil, país líder na produção de cana-de-açúcar, a expansão dessa cultura agrícola tem desempenhado um papel central na economia. Entretanto, esta expansão não está isenta de desafios ambientais. A conversão de áreas degradadas ou de vegetação nativa em plantios de cana-de-açúcar tem gerado preocupação, especialmente em regiões ambientalmente sensíveis, como a Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Uberaba.

Em áreas agrícolas, conflitos ambientais estão geralmente associados à conversão de terras originalmente adequadas para florestas ou pastagens em áreas de cultivo (Pacheco; Fernandes, 2016; Kim; Arnhold, 2018). Contudo, mudanças planejadas no uso da terra podem mitigar esses impactos, reduzindo perdas de solo e melhorando a qualidade da água (Pacheco *et al.*, 2014; Kim; Arnhold, 2018). Segundo estudos recentes, a sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar depende de práticas agrícolas que respeitem a aptidão do solo e evitem o esgotamento dos recursos naturais (Freitas *et al.*, 2021).

A identificação e análise de conflitos no uso da terra, juntamente com a avaliação das compensações ecológicas associadas aos serviços ecossistêmicos, são estratégias essenciais para o desenvolvimento de políticas de manejo mais sustentáveis (Kim; Arnhold, 2018). Endereçar esses conflitos é fundamental para alcançar um equilíbrio entre progresso socioeconômico e conservação ambiental, promovendo o uso sustentável dos recursos hídricos e do solo (Pacheco, 2020).

Na APA do Rio Uberaba, a conversão de áreas anteriormente destinadas a pastagens, muitas delas degradadas, em plantações de cana-de-açúcar tem aumentado os conflitos de uso do solo. A conversão da vegetação nativa do Cerrado

em pastagens e terras agrícolas, particularmente plantações de cana-de-açúcar, resultou em conflitos ambientais e declínio da fertilidade do solo (Valera *et al.*, 2016).

Além disso, as ferramentas de agricultura de precisão, como os índices de vegetação, têm se tornado cada vez mais relevantes. O NDVI é um desses índices, amplamente utilizado como um indicador remoto do vigor e da saúde das plantas, permitindo monitorar a produtividade agrícola e identificar possíveis limitações no manejo do solo. Além disso, este índice tem sido usado para detectar o estresse em plantas causado por pragas, como pulgões da cana-de-açúcar (Elliott *et al.*, 2015).

Em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, práticas inadequadas de manejo podem resultar em respostas espectrais menos favoráveis no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), indicativas de baixo vigor vegetativo e potencial redução no rendimento econômico da cultura. A correlação entre os dados espectrais e a produtividade da cana-de-açúcar é influenciada por variáveis como a remoção de resíduos vegetais, níveis de nutrientes no solo e os regimes de precipitação (Lisboa *et al.*, 2018)

As ferramentas de sensoriamento remoto, como imagens de satélite e veículos aéreos não tripulados (VANTs), têm transformado a agricultura de precisão ao possibilitar o acompanhamento em tempo real das condições do solo e das culturas agrícolas (Inoue, 2020; Sishodia *et al.*, 2020). Essas tecnologias oferecem dados de alta resolução, tanto espaciais quanto temporais, abrangendo parâmetros como umidade do solo, temperatura, pH e concentração de nutrientes (Shafi *et al.*, 2019). A integração do sensoriamento remoto com Sistemas de Informações Geográficas (GIS) e inteligência artificial (IA) promove análises detalhadas e o mapeamento de áreas agrícolas, aprimorando a tomada de decisões fundamentadas em dados pelos produtores rurais (Jung *et al.*, 2021). Essas estratégias não apenas otimizam a produtividade, mas também promovem a conservação do solo, o planejamento ambiental, fornecendo análises integradas de bacias hidrográficas e paisagens (Silva; Farias, 2019)

A expansão do cultivo de cana-de-açúcar na APA do Rio Uberaba, no entanto, destaca a necessidade de um manejo adequado do solo onde o uso do NDVI pode contribuir significativamente para a gestão das áreas cultivadas. Estudos recentes apontam que o manejo inadequado da cultura pode levar a uma série de problemas ambientais, como a erosão do solo, a perda de biodiversidade e alterações nos ciclos hidrológicos (Santos *et al.*, 2022).

Mesquita Júnior, *et al.* (2022), ao avaliar os impactos do manejo do solo na produtividade da cana-de-açúcar e nos índices de vegetação, verificaram que o NDVI pode ser utilizado para identificar áreas de maior e menor vigor. Essa abordagem permitiu a distinção entre práticas de manejo eficientes e inadequadas, evidenciando a influência dessas práticas no rendimento da cultura.

Para evitar tais impactos, práticas como a rotação de culturas, o plantio direto e o uso de tecnologias de monitoramento, como o NDVI, são fundamentais. Além disso, é necessário considerar a aptidão do solo auxilia no zoneamento ambiental e no planejamento sustentável de áreas protegidas (Santos *et al.*, 2022).

Dessa forma, este estudo parte do princípio de que o cultivo da cana-de-açúcar em áreas na qual não se respeita a aptidão do solo pode impactar negativamente a resposta espectral do NDVI, resultando em um vigor vegetativo reduzido. Essa condição está associada a restrições ambientais e edáficas que limitam o desenvolvimento da cultura, tornando-a mais suscetível a estresses hídricos, nutricionais e físicos do solo. Como consequência, espera-se que essas áreas apresentem menor produtividade ao longo do ciclo agrícola, o que pode comprometer a viabilidade econômica do cultivo e acentuar a degradação ambiental.

A análise do NDVI permite avaliar de forma remota a influência dos conflitos de uso do solo na dinâmica vegetativa da cana-de-açúcar, fornecendo subsídios para a adoção de práticas de manejo mais eficientes. Dessa maneira, o estudo busca demonstrar que a incompatibilidade entre o uso atual e a aptidão do solo compromete a estabilidade produtiva da cultura, reforçando a necessidade de estratégias que integrem o monitoramento ambiental e a conservação do solo para mitigar impactos negativos e promover um sistema agrícola mais sustentável e economicamente viável.

Portanto o objetivo deste trabalho é avaliar a relação entre a aptidão do uso do solo e a resposta espectral do NDVI na cultura da cana de açúcar em áreas de diferentes níveis de conflito ambiental na APA do Rio Uberaba. Além disso, busca-se propor diretrizes que possibilitem a gestão sustentável do uso do solo e um desempenho econômico mais eficiente da cultura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 História e expansão da cana-de-açúcar e seus impactos no Brasil

A trajetória histórica da cana-de-açúcar no Brasil representa um dos mais significativos capítulos da formação econômica, social e cultural do país. Conforme documentado por Schwartz (2018) em seu estudo sobre a economia açucareira do período colonial, esta cultura agrícola foi oficialmente introduzida em território brasileiro em 1532, pelas mãos de Martim Afonso de Sousa, que trouxe as primeiras mudas provenientes das Ilhas da Madeira e Açores, onde os portugueses já haviam desenvolvido considerável expertise na produção açucareira.

Ferlini (2000) ao analisar documentos históricos que revelam como o conhecimento técnico dos mestres açucareiros das ilhas atlânticas portuguesas foi transferido para o Brasil, observou que às condições locais favoráveis e permitiu o estabelecimento dos primeiros engenhos bem-sucedidos, principalmente nas capitanias de Pernambuco e Bahia. Pouco tempo depois o estabelecimento da agroindústria açucareira brasileira se insere em um complexo comercial atlântico português, beneficiando-se diretamente das experiências prévias desenvolvidas por Portugal em suas possessões insulares atlânticas (Alencastro 2014).

As plantações de cana eram destinadas a produção de açúcar, que era exportado principalmente para a Europa, dentro do sistema colonial mercantilista, em que o Brasil atuava como fornecedor de matérias-primas para a metrópole portuguesa. A produção era realizada em grandes propriedades com uso intensivo de mão de obra escravizada africana, o que moldou profundamente a estrutura social do país (Fausto, 2006).

Segundo Szmrecsányi (1990) três partes moviam a produção, eram, o extrativismo, que alimentou a monocultura voltada à exportação de açúcar, movida pela grande propriedade fundiária, e permitiu a ocupação extensiva pela cana e, finalmente, o trabalho escravo, que foi o motor da produção.

Muitas crises remodelaram o cenário em que colocava o Brasil como principal produtor de cana o ano de 1857 foi importante, pois Dom Pedro II elaborou um programa de modernização da produção de açúcar, que realmente estava em dafasagem no Brasil, contando com o apoio de tecnologias provenientes da Revolução Industrial (Camelini, 2008).

No início do século XX, a produção de açúcar no Brasil enfrentava forte concorrência do açúcar de beterraba europeu, que dominava o mercado internacional. No entanto, a eclosão da Primeira Guerra Mundial, em 1914, alterou significativamente esse cenário (Rodrigues; Ross, 2020). Durante este a produção de açúcar voltada à exportação foi bastante estimulada e a inovação do engenho a vapor foi amplamente incorporada no Brasil (Camelini, 2008).

Esse declínio na produção europeia levou a um aumento nos preços do açúcar no mercado mundial, criando uma oportunidade para os produtores brasileiros expandirem sua participação no mercado internacional (Rodrigues; Ross, 2020). Além disso, a escassez de açúcar durante a guerra levou à construção de novas usinas no Brasil, especialmente no estado de São Paulo, onde muitos fazendeiros de café buscavam diversificar suas atividades agrícolas (UDOP, 2003)

Em 1929, outra crise, dessa vez mundial a queda da bolsa de Nova York, afetou a produção de açúcar e levou a uma crise internacional (Camelini, 2008). Segundo Cano (2012) a transição econômica e social do Brasil na década de 1920, marcada pela prevalência do modelo primário exportador, rumo a um novo padrão de acumulação baseado na industrialização e urbanização, iniciado após a crise de 1929 e a Revolução de 1930, mostra como a crise rompeu as formas de acumulação assentadas na economia agroexportadora, favorecendo o crescimento e o desenvolvimento do mercado interno.

O desenvolvimento do mercado interno possibilitou criar em 1933 o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), que forçou o setor a passar por modernizações (Camelini, 2008). Já em 1975 além do açúcar, com a crise do petróleo, surgiu o Proálcool, programa do governo federal que incentivou a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, impulsionou a produção de bioenergia no Brasil nas últimas quatro décadas e é uma das maiores conquistas da ciência e tecnologia genuinamente brasileiras (Stolf; Oliveira, 2020).

A cana-de-açúcar, portanto, não representa apenas uma cultura agrícola de relevância histórica para o Brasil, desempenha então um papel central na economia brasileira desde a colônia até os tempos atuais, posicionando o país como o maior produtor mundial dessa cultura, responsável por cerca de um terço da safra global (Lacerda *et al.*, 2022).

Do ponto de vista ambiental, a expansão da cana-de-açúcar tem sido associada à substituição de ecossistemas nativos, como o Cerrado e a Mata

Atlântica, resultando em perda de biodiversidade e fragmentação de habitats (Rodrigues *et al.*, 2022). No entanto, o crescimento acelerado da cultura trouxe consigo uma série de impactos ambientais e socioeconômicos que merecem atenção inclusive o uso de solos que não deveriam ser usados para fins agricultáveis principalmente em áreas de proteções ambientais (APAs), gerando conflitos do uso do solo.

2.2 Conflitos de Uso do Solo na Agricultura e Modelos de Avaliação de Aptidão do Solo

A intensificação da agricultura, especialmente em áreas de expansão como o Cerrado brasileiro, tem gerado conflitos de uso do solo, resultando em degradação ambiental, perda de biodiversidade e impactos socioeconômicos. A produção de cana-de-açúcar, por exemplo, tem sido associada a impactos significativos quando realizada em áreas com baixa aptidão agrícola ou sem práticas de manejo sustentável. Grego *et al.* (2019) destacam que a expansão da cana-de-açúcar em solos inadequados pode levar à compactação, erosão e perda de matéria orgânica, comprometendo a produtividade e a sustentabilidade dos agroecossistemas.

Para mitigar esses impactos e orientar o uso racional da terra, os modelos de avaliação da aptidão do solo surgem como ferramentas estratégicas no planejamento territorial e ambiental (Valle Júnior *et al.*, 2015). Estudos como o de Mesquita Júnior *et al.* (2022) demonstram que a aplicação do Sistema de Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras (SAAAT), aliada ao uso de tecnologias de sensoriamento remoto, permite identificar áreas com potencial agrícola e orientar o uso sustentável do solo.

Esses modelos consideram atributos físicos, químicos e morfológicos do solo — como textura, profundidade, matéria orgânica, suscetibilidade à erosão, acidez, drenagem e topografia — e os cruzam com as exigências específicas de culturas agrícolas para definir classes de aptidão. Como demonstrado por Valera *et al.* (2016), a ausência de compatibilidade entre o uso do solo e sua vocação natural é um fator recorrente em regiões com conflitos de uso, resultando em perda de fertilidade, contaminação de mananciais e aumento da instabilidade ecológica.

A expansão do cultivo de cana-de-açúcar na bacia do rio Uberaba e regiões adjacentes levou a mudanças significativas no uso da terra e nos impactos

ambientais. Estudos mostram que a expansão agrícola, particularmente a produção de cana-de-açúcar em solos mal manejados ou de baixa aptidão, alterou a estrutura do solo e a dinâmica hidrológica, comprometendo a qualidade da água e a conservação da biodiversidade (Almeida; Valle Júnior, 2013; Costa *et al.*, 2023)

Para diagnosticar e mitigar esses problemas, além dos modelos de aptidão, a aplicação de índices espectrais como o NDVI tem se mostrado eficaz. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) derivado de imagens de satélite é uma ferramenta valiosa para avaliar o vigor da vegetação e sua relação com os atributos do solo, revelando áreas mais ou menos adequadas para uso agrícola (Cândido *et al.*, 2015). O NDVI tem sido usado para mapear o uso da terra e a dinâmica da vegetação em várias regiões, incluindo áreas agrícolas e bacias hidrográficas (Souza; Folharini, 2019).

Essas abordagens integradas entre análise edafopedológica, sensoriamento remoto e modelagem de uso e ocupação do solo são fundamentais para garantir a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e reduzir os riscos socioambientais dos territórios rurais.

2.3 Sensoriamento remoto, monitoramento agrícola via NDVI e conflitos do uso do solo na cultura da cana – de – açúcar

O uso de tecnologias de sensoriamento remoto tem se consolidado como uma importante ferramenta no contexto da agricultura de precisão, especialmente na cultura da cana-de-açúcar. A capacidade de captar informações multiespectrais sobre o solo e a vegetação permite acompanhar em tempo quase real o desenvolvimento de culturas, avaliar impactos ambientais e propor estratégias de manejo localizado (Shiratsuchi *et al.*, 2014).

Dentre os instrumentos mais utilizados, destaca-se o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), amplamente empregado na avaliação do vigor vegetativo, identificação de estresses hídricos e estimativas de produtividade. O NDVI é, de longe, o índice mais empregado globalmente, sendo calculado a partir da razão entre a refletância nas bandas do vermelho (RED) e do infravermelho próximo (NIR), conforme a fórmula:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}).$$

Esses índices são essenciais para a agricultura de precisão, o planejamento ambiental e o acompanhamento de políticas públicas voltadas à conservação dos biomas.

Shiratsuchi *et al.* (2014) apontam que sensores ópticos ativos, como o Crop Circle, têm demonstrado alto desempenho na captação do NDVI em campo, viabilizando a delimitação de zonas homogêneas de manejo e otimizando a aplicação localizada de insumos.

A pesquisa de Rosa *et al.* (2024) também destaca a importância do uso de geotecnologias aliadas à colheita mecanizada. Em um experimento realizado na Usina Agrovale, em Juazeiro-BA, o uso de drones para o mapeamento da área resultou na redução de 4,39% na perda de matéria-prima durante a colheita, quando comparado ao método tradicional.

A combinação de Agricultura de Precisão, georreferenciamento e piloto automático demonstrou alto potencial para práticas agrícolas mais sustentáveis. No caso da cana de açúcar o uso do NDVI tem se consolidado como uma ferramenta essencial para o monitoramento permitindo avaliações fenológicas, estimativas de produtividade e o mapeamento de zonas de manejo agrícola.

Nanni e Schuler (2002), por sua vez, aplicaram o NDVI derivado de imagens NOAA para comparar a fenologia da cana com a vegetação nativa da Mata Atlântica, demonstrando o valor do índice para acompanhar variações sazonais e prever safras. Vicente *et al.* (2009) demonstraram que o NDVI proveniente de séries temporais do sensor SPOT Vegetation, aliado ao algoritmo SAM, permite a classificação espectral acurada de áreas cultivadas com cana, revelando seu potencial para fins de mapeamento agrícola automatizado.

Segundo estudos conduzidos por Grego *et al.* (2014), a integração de dados de solo, planta e NDVI obtidos por sensores como o Crop Circle permite delimitar áreas com diferente potencial produtivo, possibilitando práticas agrônômicas mais sustentáveis.

De forma complementar, Fernandes *et al.* (2017) utilizaram séries temporais de NDVI obtidas pelo sensor MODIS para prever a produtividade da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, aplicando redes neurais artificiais, com resultados que demonstraram forte correlação entre os índices espectrais e os dados de colheita. Fensholt e Proud (2019) destacam que o monitoramento contínuo dos índices de

vegetação também auxilia na avaliação da degradação do solo, sendo ferramenta indispensável em regiões de uso intensivo como o Cerrado.

Simões *et al.* (2023) mostraram que tanto o NDVI quanto o EVI2 são eficazes na delimitação de zonas de manejo da cana-de-açúcar no Cerrado brasileiro, utilizando imagens do Landsat 8 processadas na plataforma Google Earth Engine.

No que diz respeito aos conflitos ambientais de uso do solo é possível evidenciar a produtividade agrícola através do NDVI como feito por Mesquita Júnior *et al.* (2022), que demonstraram a correlação negativa entre práticas de manejo degradantes e os índices espectrais de vegetação, como o NDVI. Em áreas de conflito, esses índices tendem a diminuir, indicando perda de vigor vegetativo e baixa eficiência fotossintética das lavouras.

O uso de tecnologias de geoprocessamento e sensoriamento remoto tem sido crucial para diagnosticar e monitorar essas áreas. Santos *et al.* (2022) aplicaram o NDVI em áreas de cultivo de cana-de-açúcar no Cerrado e constataram que os menores valores do índice coincidem com regiões afetadas por práticas agrícolas intensivas e ausência de cobertura vegetal protetora.

A bacia do Rio Uberaba, por exemplo, tem sido um caso emblemático de conflito de uso do solo. Como resultado, há acentuada perda de solo, degradação da fertilidade e risco de contaminação dos recursos hídricos, comprometendo a resiliência ambiental da região (Valera *et al.*, 2016; Valle Júnior *et al.*, 2013).

Em síntese, os conflitos ambientais relacionados ao uso do solo na agricultura, e particularmente a atividade canavieira, representam um desafio multifacetado que demanda ações coordenadas entre políticas públicas, produtores, instituições de pesquisa e fiscalização. O mapeamento dessas áreas com base em dados espectrais e modelagem territorial constitui um passo fundamental para mitigar os impactos e promover a transição para sistemas agrícolas mais sustentáveis.

2.4 Área de proteção ambiental (APA), uso do solo e conflitos ambientais

As Áreas de Proteção Ambiental (APAs) são uma das categorias de Unidades de Conservação (UCs) instituídas pela Lei nº 9.985/2000, que estabelece o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC). Trata-se de uma

modalidade de uso sustentável que visa compatibilizar a conservação da biodiversidade com o desenvolvimento de atividades econômicas e sociais.

O papel das APAs é conciliar a conservação ambiental com o desenvolvimento social e econômico local, o que exige planejamento territorial participativo e efetivo. Instrumentos como o plano de manejo e o zoneamento ambiental são essenciais para ordenar o uso do solo, disciplinar a ocupação e assegurar a proteção dos ecossistemas presentes nessas unidades (Carvalho *et al.*, 2022; Carvalho; Magalhães Filho, 2021).

Em geral, o uso do solo dentro das APAs deve ser orientado por um plano de manejo, instrumento técnico e legal que define o zoneamento ambiental da unidade e estabelece diretrizes para o uso sustentável dos recursos naturais. Essas diretrizes visam conciliar a conservação ambiental com atividades produtivas, incentivando práticas como a manutenção da vegetação nativa, o uso de técnicas conservacionistas, a recuperação de áreas degradadas, a agricultura orgânica e os sistemas agroflorestais, considerados mais adequados ao equilíbrio ecológico local (ICMBio, 2021).

Apesar de sua proposta conciliadora, as APAs enfrentam diversas limitações em relação à eficácia de conservação, sobretudo em biomas sob intensa pressão antrópica, como o Cerrado. Essa fragilidade ocorre, em grande parte, devido ao baixo grau de restrição de uso e à ausência ou inefetividade dos planos de manejo (Carvalho *et al.*, 2022).

No Cerrado, o uso do solo nas APAs tem sido marcado por conflitos decorrentes da expansão agropecuária e da urbanização não controlada. Melo e Martins (2020) realizaram uma análise de 14 APAs no estado de Goiás e no Distrito Federal e constataram que 8 delas apresentaram redução significativa na cobertura vegetal do Cerrado. Adicionalmente, a substituição de vegetação nativa por práticas agropecuárias extensivas gera impactos como compactação e perda da fertilidade do solo, erosão hídrica, assoreamento de corpos d'água e contaminação por agrotóxicos (Oliveira *et al.*, 2021).

A expansão da agricultura intensiva, e da cultura da cana-de-açúcar, tem sido uma das principais fontes de conflitos ambientais relacionados ao uso do solo, tanto em áreas de preservação como em bacias hidrográficas agrícolas. Esses conflitos ocorrem quando diferentes formas de uso e ocupação da terra entram em choque,

comprometendo a conservação dos recursos naturais e a qualidade ambiental (Pacheco, 2020; Valle Júnior *et al.*, 2014).

Estudos como o de Kim e Arnhold (2018) revelam que os conflitos ambientais emergem com maior intensidade em bacias agrícolas, onde a sobreposição entre áreas produtivas, zonas de recarga hídrica e reservas legais é mal gerenciada. A conversão de áreas naturais para agricultura, sem planejamento ambiental adequado, provoca perda de biodiversidade, erosão do solo, declínio na fertilidade e contaminação dos recursos hídricos.

Grego *et al.* (2019) reforçam que, na produção de cana-de-açúcar, a aptidão do solo frequentemente é negligenciada, favorecendo o avanço de cultivos em áreas suscetíveis à degradação. A pressão por produtividade, associada ao manejo inadequado, tem intensificado o uso de insumos e a mecanização, acentuando a compactação do solo e a perda de matéria orgânica (Souza *et al.*, 2012)

É nesse contexto que o sensoriamento remoto e os índices espectrais de vegetação, como o NDVI, emergem como soluções tecnológicas capazes de contribuir significativamente para o acompanhamento contínuo das condições ambientais e agrícolas dentro das APAs. A aplicação dessas ferramentas permite identificar padrões de uso do solo, avaliar o vigor da cobertura vegetal e, principalmente, detectar áreas em processo de degradação ou em conflito de uso.

2.5 APA do Rio Uberaba e conflitos do uso do solo na agricultura

A Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Uberaba, situada no município de Uberaba, Minas Gerais, é uma unidade de conservação de uso sustentável que desempenha papel essencial na preservação dos recursos hídricos da região. Criada como resposta à crescente demanda por proteção ambiental e garantia do abastecimento hídrico para a cidade, a APA cobre uma área de aproximadamente 528 km², o que representa cerca de 22% da bacia hidrográfica do Rio Uberaba e 12% da área total do município, segundo o Diagnóstico Ambiental publicado pela Prefeitura de Uberaba (Uberaba, 2005). Esta área integra regiões de nascentes, recarga do aquífero Guarani e importantes remanescentes do bioma Cerrado, estando fortemente ameaçada pela expansão agropecuária e pelo uso intensivo do solo.

A região destaca-se pelo predomínio da agricultura, especialmente pela monocultura da cana-de-açúcar, o que contribui para a economia local, mas também implica impactos ambientais significativos. O estudo de Siqueira *et al.* (2022) destaca que a substituição da vegetação nativa por práticas agrícolas intensivas tem resultado em degradação do solo, assoreamento dos corpos d'água e aumento da carga de nutrientes nos recursos hídricos, devido ao uso excessivo de fertilizantes e à aplicação de vinhaça. Esses impactos são agravados pela ausência ou ineficácia de instrumentos de planejamento, como o plano de manejo, que deveria regular o uso do solo na APA com base na aptidão ambiental e nos limites legais de uso.

A qualidade da água do Rio Uberaba tem sofrido constantes quedas, resultado direto da degradação das áreas de recarga hídrica e da ocupação desordenada. Estudo conduzido por Valera *et al.* (2016) demonstrou que os conflitos de uso do solo na bacia comprometem a fertilidade dos solos e aumentam a vulnerabilidade ecológica, especialmente nas zonas de transição entre uso agrícola e áreas de preservação. Como forma de responder a essa crise, a Companhia Operacional de Desenvolvimento, Saneamento e Ações Urbanas (Codau) lançou o programa “Águas Cristalinas”, que propõe ações como o reflorestamento de áreas de nascentes, o incentivo ao manejo sustentável e o pagamento por serviços ambientais a produtores rurais inseridos na APA (Uberaba, 2012).

No contexto da gestão ambiental e do monitoramento da paisagem, o uso de tecnologias de sensoriamento remoto, como o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), tem se mostrado uma ferramenta indispensável. Almeida, Silva e Souza (2020) destacam que o NDVI permite mapear áreas em processo de degradação, monitorar a cobertura vegetal e detectar padrões de uso incompatíveis com a conservação ambiental.

Esses dados auxiliam na delimitação de zonas prioritárias para ações de recuperação ambiental e manejo, além de subsidiarem a formulação de políticas públicas mais eficazes. Burgess (2024) reforça que séries temporais de NDVI extraídas de imagens de satélite podem identificar com precisão os estágios fenológicos da cana-de-açúcar e ajudar a correlacionar práticas agrícolas com respostas ecológicas em áreas sensíveis.

A necessidade de zoneamento ambiental e a implementação efetiva do plano de manejo tornam-se ainda mais urgentes diante da intensificação dos impactos ambientais na APA do Rio Uberaba. O atual modelo de ocupação da APA apresenta

uma configuração fragmentada, com elevada sobreposição de áreas agrícolas em zonas de recarga hídrica e preservação permanente, evidenciando a fragilidade institucional na gestão da unidade.

A literatura aponta para a importância de um modelo de governança territorial participativa, com articulação entre órgãos ambientais, instituições de pesquisa, produtores e sociedade civil. A abordagem integrativa, que combine sensoriamento remoto, análises edafoclimáticas e políticas públicas eficazes, deve ser vista como o caminho mais promissor para reconciliar os interesses produtivos e a conservação ambiental na APA, como destaca Brasil (2021) que propõe que o sensoriamento remoto e sistemas de monitoramento climático e edafológico sejam usados para diagnosticar vulnerabilidades, orientar decisões técnicas e políticas e definir áreas prioritárias para ação ambiental e produtiva, onde o uso de modelos agroclimáticos e mapas de aptidão agrícola é fundamental para ajustar práticas ao contexto edafoclimático local, como o da APA do Rio Uberaba.

A APA do Rio Uberaba, representa uma das regiões mais emblemáticas no contexto dos conflitos de uso do solo entre conservação ambiental e atividades agropecuárias. Instituída com o objetivo de proteger os recursos hídricos que abastecem o município de Uberaba (MG), a APA tem enfrentado intensa pressão antrópica, sobretudo pela expansão da cultura da cana-de-açúcar e práticas de manejo agrícola intensivo. Pesquisas recentes apontam que a erosão é um dos principais problemas, afetando aproximadamente 30% do território da unidade de conservação com áreas classificadas como de risco elevado (Siqueira *et al.*, 2022). A recuperação florestal das Áreas de Preservação Permanente (APPs) tem sido indicada como uma estratégia eficaz, com potencial para reduzir em até 48% a produção de sedimentos na região (De Oliveira *et al.*, 2021). Desta forma, o escoamento superficial representa uma vulnerabilidade importante, exigindo ações integradas de manejo das bacias hidrográficas para mitigar seus impactos (Oliveira *et al.*, 2024).

Além disso, a legislação ambiental que rege o uso do solo na APA apresenta fragilidades na sua aplicação prática, tornando os instrumentos de controle e fiscalização insuficientes para conter o avanço da degradação (Caldas; Pissarra, 2023). Estudos na APA do Rio Uberaba revelam desafios ambientais significativos. Mais de 60% da área apresenta uso do solo incompatível com sua aptidão natural (Torres; Fabian, 2006). Estimativas de perda de solo indicam altos riscos de erosão,

com aproximadamente 30% da área apresentando taxas de erosão natural potencialmente extremamente altas (Siqueira *et al.*, 2022).

A situação é ainda mais crítica em áreas de nascente e de recarga do Aquífero Guarani, que sofrem com a supressão da vegetação e uso inadequado do solo, comprometendo a qualidade e disponibilidade hídrica.

Almeida, Silva e Souza (2020) utilizaram o NDVI para mapear variações na cobertura vegetal e identificar áreas em conflito de uso, associando baixos valores do índice a práticas agrícolas degradantes. De forma similar, Barros *et al.* (2023) integraram dados de NDVI com análises de nutrientes foliares, demonstrando que o estresse ambiental e nutricional das plantas reflete diretamente na produtividade da cana-de-açúcar em áreas mal manejadas. As ferramentas de agricultura de precisão e a coleta contínua de dados ambientais, como defendido por Jung *et al.* (2021), são estratégicas para compatibilizar produção e sustentabilidade em territórios vulneráveis como este.

Nesse cenário, os modelos de zoneamento ambiental e a implementação de práticas conservacionistas tornam-se indispensáveis. A manutenção da cobertura vegetal, a gestão adequada da vinhaça, a adoção do cultivo mínimo e o respeito às áreas de preservação permanente são algumas das ações recomendadas para restaurar a integridade ecológica da APA (Freitas; Melo, 2021; Gomes *et al.*, 2019).

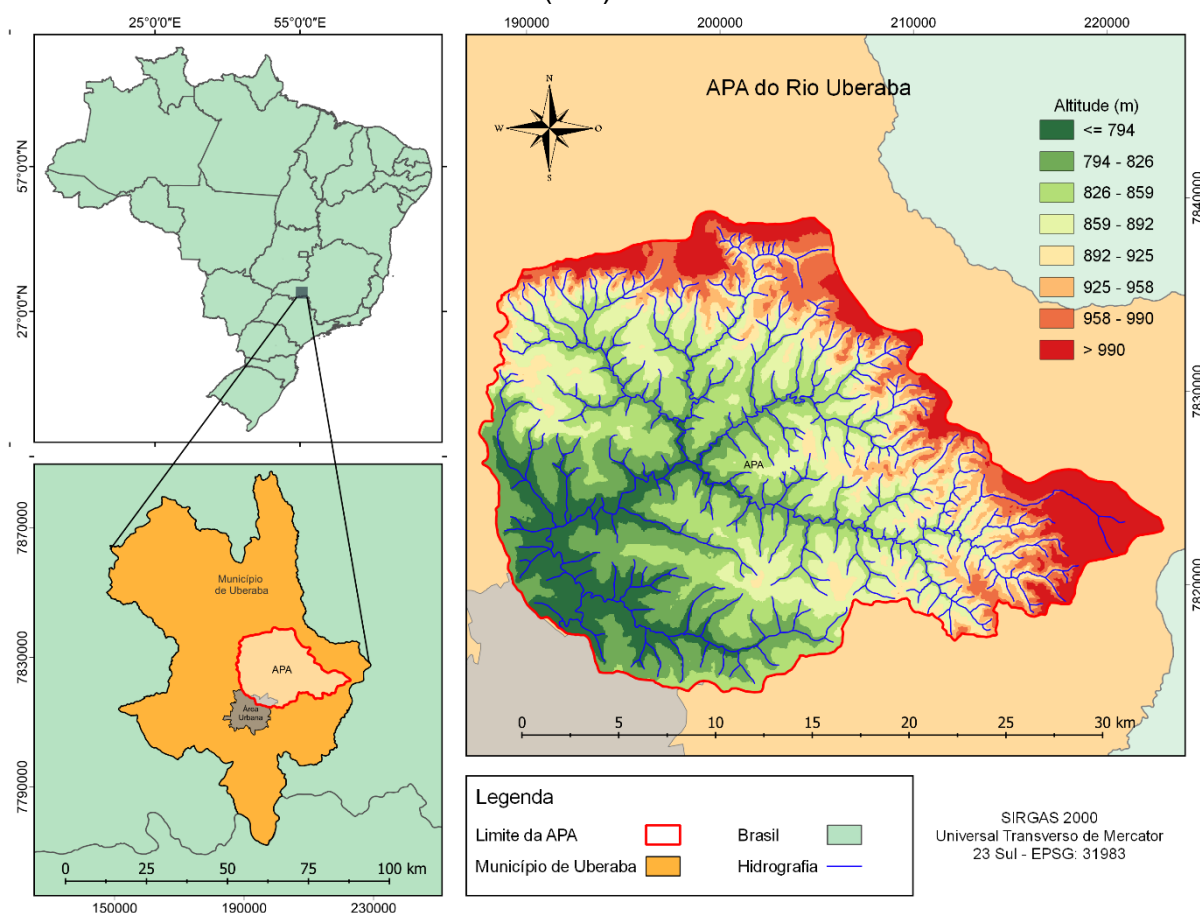
Portanto, o caso da APA do Rio Uberaba ilustra de maneira clara os desafios da gestão territorial em áreas ambientalmente frágeis, exigindo uma abordagem integrada entre políticas públicas, tecnologia, ciência do solo e participação social para assegurar a sustentabilidade de suas funções ecossistêmicas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Área de Preservação Ambiental (APA) do Rio Uberaba (Figura 1), localizada no município de Uberaba, no Triângulo Mineiro, estado de Minas Gerais. Atualmente, a APA compreende um total de 16 microbacias, abrangendo uma área de 528 km², situada entre as coordenadas geográficas 19°31'06.05"S, 47°58'43.60"O e 19°44'34.98"S, 47°38'33.68"O.

Figura 1 – Área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

De acordo com o Plano Municipal de Uberaba (Uberaba, 2004) em um relatório elaborado pela Secretaria do Meio Ambiente do município, o clima predominante na APA é do tipo Tropical (Aw), conforme a classificação de Köppen-Geiger. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.400 mm, sendo que os

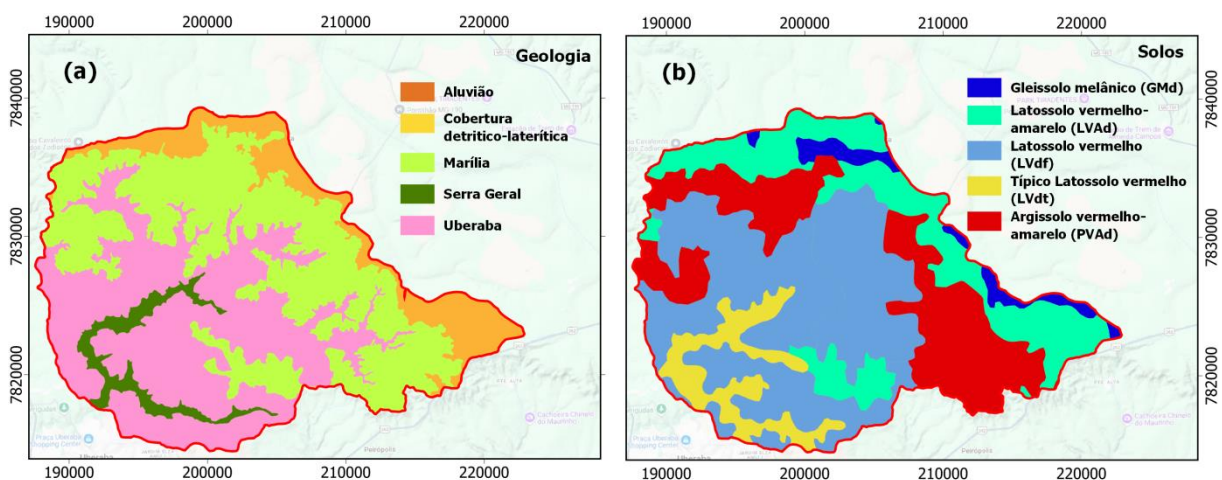
meses mais chuvosos são dezembro e janeiro, responsáveis por cerca de 34% da precipitação anual total. Já os meses mais secos ocorrem entre julho e agosto.

A temperatura média anual é de 22,2°C, sendo os meses mais quentes janeiro (23,6°C), dezembro e fevereiro (23,4°C), enquanto os mais frios são junho (18,6°C) e julho (18,5°C). A umidade relativa média anual oscila entre 70 e 75%, com um pico de 81% em dezembro e um mínimo de 52% em agosto (Uberaba, 2013).

A geologia da APA do Rio Uberaba (Figura 2a) localiza-se na borda oriental da Bacia do Paraná, caracterizando-se pela presença de derrames basálticos na borda nordeste da bacia. Esses derrames foram depositados sobre rochas de idade pré-cambriana, posteriormente recobertas por sedimentos terciários e quaternários. A maior parte desses sedimentos é de origem continental, com uma pequena fração de origem marinha (Uberaba, 2013).

A APA apresenta duas principais unidades litológicas, compostas por arenitos e conglomerados do período Cretáceo. A transição entre essas unidades é marcada por uma mudança abrupta, evidenciada pela presença de um nível de sillexito e conglomerado rico em grãos de quartzo cimentados por calcita (Vianna *et al.*, 2019). Esse substrato sofreu intensa intemperização, resultando predominantemente na formação de latossolos e argissolos (Figura 2b), que são os solos predominantes na APA.

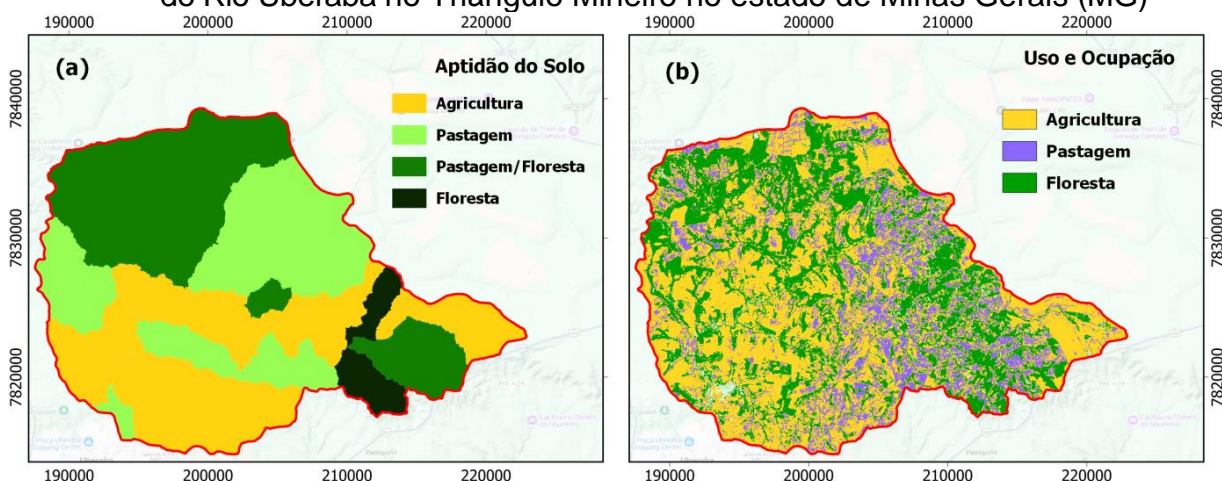
Figura 2 – Geologia e tipos de solos da área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG)



Fonte: Adaptação de Oliveira *et al.*, 2019.
 Legenda: (a) Geologia e (b) Tipos de solos.

A maior parte dos solos da APA apresenta aptidão para atividades agrícolas e pastagens, conforme indicado por Oliveira *et al.* (2019) (Figura 3a). Essas áreas aptas se intercalam com regiões de solos adequados para vegetação nativa, influenciadas pelo relevo e pela rede de drenagem das microbacias presentes na APA.

Figura 3 – Aptidão do solo e uso e ocupação da área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG)



Fonte: Adaptação de Oliveira *et al.*, 2019.

Legenda: (a) Aptidão do solo e (b); Uso e ocupação do solo.

3.2 Classificação da aptidão do solo e identificação de conflitos

A classificação da aptidão do solo e a identificação de conflitos de uso foram realizadas com base em dados geospaciais obtidos por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e imagens de satélite. As variáveis analisadas incluíram declividade, densidade de drenagem e uso atual da terra.

Para a análise da aptidão de uso das microbacias hidrográficas pertencentes à Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Uberaba, utilizou-se como base o Modelo Digital de Elevação (MDE) do projeto Topodata, derivado do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com resolução espacial de 30 metros, disponível no portal do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O arquivo raster correspondente foi submetido a um recorte (clip) espacial no software QGIS 3.22, utilizando como limite a delimitação oficial da APA.

Posteriormente, foi aplicada a ferramenta “Calcular Declividade” (Slope) para obtenção do mapa de declividade em porcentagem. A partir desse dado, foi possível

calcular a declividade média de cada microbacia inserida na área de estudo. Utilizando a metodologia proposta por Rocha e Kurtz (2001) foi estimado o Ruggedness Number (RN) para cada unidade, por meio da multiplicação da declividade média (em %) pela densidade de drenagem da respectiva microbacia. O valor do RN, portanto, reflete a relação entre os fatores morfométricos da bacia e sua aptidão ao uso, sendo uma métrica fundamental na análise integrada da fragilidade ambiental e da suscetibilidade à ocupação antrópica.

Para avaliar a suscetibilidade à erosão e a aptidão do solo para diferentes usos (agricultura, pastagens ou reflorestamento), foi utilizado o Número de Rugosidade (RN), um índice que integra informações entre o produto entre a declividade média e densidade de drenagem das microbacias. O cálculo da densidade de drenagem foi realizado pela razão entre o comprimento total da rede de drenagem e a área da microbacia (km.km^{-2}), enquanto a declividade média foi determinada com base nas inclinações médias do terreno em percentagem (%) dentro da área de estudo. Esse coeficiente reflete o potencial de erosão do solo e suas limitações físicas, sendo um critério essencial para a classificação da aptidão das áreas conforme sua viabilidade para uso agrícola, pecuário ou de reflorestamento.

3.3 Metodologia para classificação da aptidão do solo

A classificação das áreas quanto à aptidão do solo foi realizada com base na metodologia do Número de Rugosidade (RN), conforme proposta por Rocha e Kurtz (2001) e aplicada por Valle Junior *et al.* (2013). Essa metodologia permite a segmentação dos solos em quatro categorias principais:

Classe A – Aptidão para agricultura (menor valor de RN).

Classe B – Aptidão para pastagem.

Classe C – Aptidão para pastagem/florestamento.

Classe D – Aptidão para reflorestamento (maior valor de RN).

Para quantificar e definir os intervalos de aptidão, foram calculados os parâmetros Amplitude (A) e Intervalo (I) dos coeficientes de rugosidade, conforme a seguinte formulação:

$$A = (\text{maior valor de RN} - \text{menor valor de RN}) \quad (1)$$

$$I = A/4 \quad (2)$$

onde o denominador 4 representa o número de classes de aptidão (A, B, C, D).

Os intervalos de domínios foram definidos progressivamente, iniciando-se pela classe inferior, incluindo o menor valor de RN, e adicionando-se o valor do intervalo de classe para definir os limites superiores subsequentes (Valle Junior *et al.*, 2013).

Com base nos valores do Número de Rugosidade (RN), as microbacias que compõem a APA foram classificadas em quatro categorias principais de aptidão do solo. A Classe A corresponde a solos com baixos valores de RN, sendo adequados para agricultura intensiva. A Classe B abrange áreas de aptidão moderada, indicadas para pastagens. A Classe C compreende regiões com valores mais elevados de RN, apropriadas para usos extensivos, como pastagem e reflorestamento. Por fim, a Classe D engloba solos com os maiores valores de RN, recomendados exclusivamente para reflorestamento ou preservação ambiental.

Para cada classe de aptidão, foram atribuídos pesos específicos, representando as limitações de uso do solo. Os solos classificados como Classe A receberam peso 1, indicando alta aptidão para agricultura. As Classes B, C e D foram atribuídas com pesos de 2, 3 e 4, respectivamente, conforme o aumento das restrições de uso. De forma semelhante, as classes do mapa de uso e ocupação da terra (da sigla em inglês LULC - Land Use and Land Cover) também receberam pesos específicos: uso agrícola (Peso 1), pastagem (Peso 2), pastagem/floresta (Peso 3) e floresta (Peso 4).

O mapa dos conflitos de uso do solo foi realizado por meio da operação de mapas na calculadora raster QGIS 3.22, utilizando a diferença entre o mapa de aptidão do solo e o mapa de uso e ocupação da terra (LULC). A diferença entre os pesos atribuídos à aptidão do solo e ao LULC foi utilizada para determinar o nível de conflito, que foi categorizado em três classes:

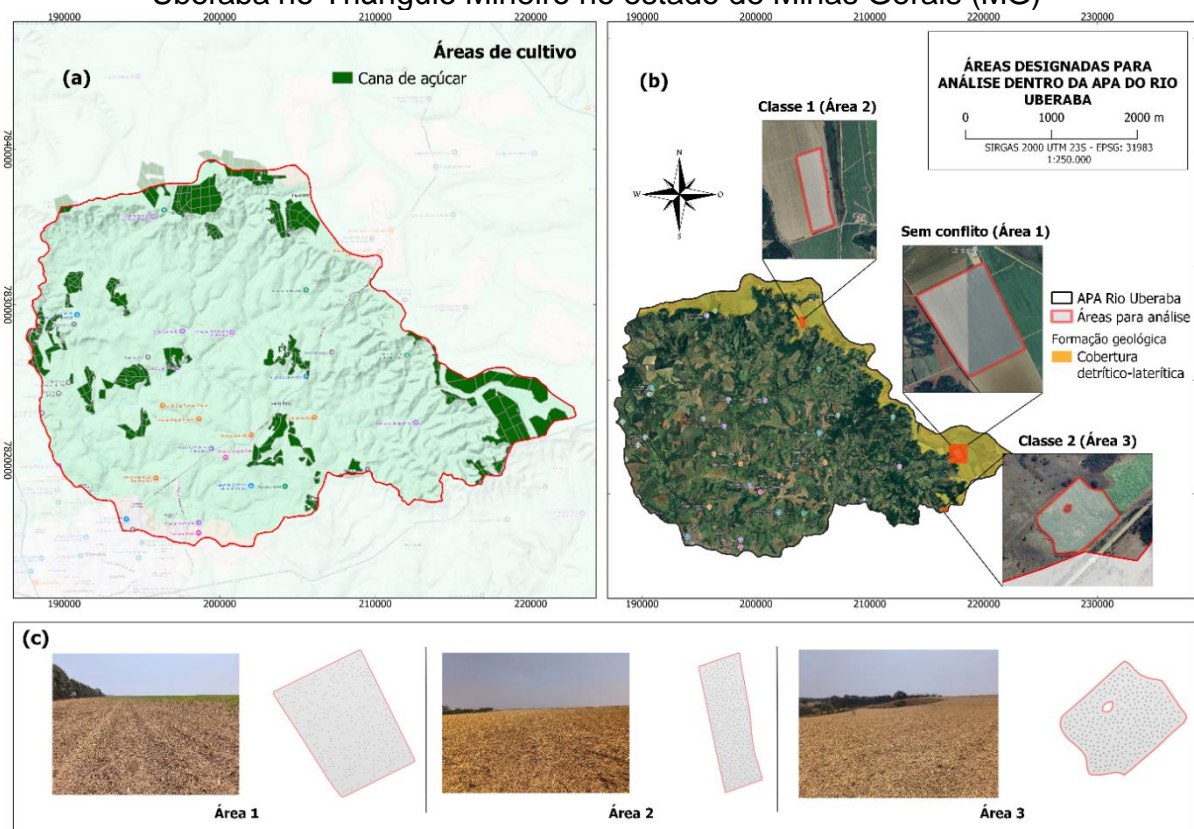
- Classe 1 – Diferença de peso igual a 1, indicando baixo impacto.
- Classe 2 – Diferença de peso igual a 2, representando impacto moderado.
- Classe 3 – Diferença de peso maior ou igual a 3, caracterizando impacto severo.

Os conflitos de uso do solo foram identificados por meio da análise espacial da diferença entre os mapas de aptidão e uso atual do solo. Áreas onde o uso atual diverge da aptidão natural foram classificadas como zonas de conflito, apresentando graus de severidade variáveis (Pacheco *et al.*, 2014; Valle Junior *et al.*, 2013).

3.4 Mapeamento da cana de açúcar e escolha das áreas de cultivo

As áreas de cultivo de cana-de-açúcar na APA do Rio Uberaba foram mapeadas por meio de classificação supervisionada, utilizando imagens do satélite Sentinel 2B (quadro 22KHD) de 2023, em conjunto com o mapa de uso e ocupação fornecido pelo Projeto MapBiomas Coleção 9. Com base nos dados obtidos, foram selecionadas três áreas de cana soca, possuindo o mesmo estágio de corte (2º Corte) e desenvolvimento pós-colheita similar dentro da APA, com coordenadas centrais posicionadas em 47° 41' 20,421" O e 19° 39' 45,756" S (Área 1 – 90 hectares), 47° 49' 14,0406" O e 19° 33' 24,1676" S (Área 2 – 15 hectares), e 47° 49' 14,0406" O e 19° 33' 24,1676" S (Área 3 – 6 hectares).

Figura 4 – Áreas de plantio de cana-de-açúcar, áreas escolhidas para o estudo e vegetação inicial do local e pontos de coleta via NDVI na área de estudo com a cultura da cana-de-açúcar na área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Legenda: a) Áreas de plantio; (b) áreas escolhidas; (c) vegetação inicial e pontos de coleta via NDVI.

Foi realizada uma visita de campo para verificar as áreas de cultivo e o estágio vegetativo da cultura de cana-de-açúcar (Figura 4). A partir dessa etapa, foi elaborado o mapa de conflitos da APA do Rio Uberaba, aplicando a metodologia de subtração da aptidão dos solos pela ocupação atual (Aptidão – Uso = Conflito), conforme proposta por Valle Júnior (2008). O processamento das imagens foi realizado no software QGIS 3.22 Białowieża mensalmente durante o ano de 2023, permitindo a geração de mapas categorizados em diferentes níveis de conflito: Classe 0 (Sem conflito), Classe 1 e Classe 2. Esse procedimento, fundamentado na metodologia de Valle Junior *et al.* (2013), possibilita a identificação de áreas com diferentes níveis de impacto, direcionando o cultivo para regiões com menor risco ambiental e socioeconômico, promovendo um uso mais sustentável e planejado do território.

3.5 Coleta e análise de dados

A avaliação do vigor vegetativo da cultura da cana-de-açúcar foi realizada com base no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), ao longo do período de janeiro a dezembro de 2023. A geração dos dados espectrais teve como objetivo analisar a resposta da cultura tanto em relação ao seu desenvolvimento vegetativo quanto à aptidão do uso e ocupação do solo.

As imagens utilizadas foram provenientes do satélite Sentinel-2, e o cálculo do NDVI foi realizado a partir das bandas espectrais B4 (Red, 665 nm) e B8 (NIR, 842 nm), por meio da equação:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}) \quad (3)$$

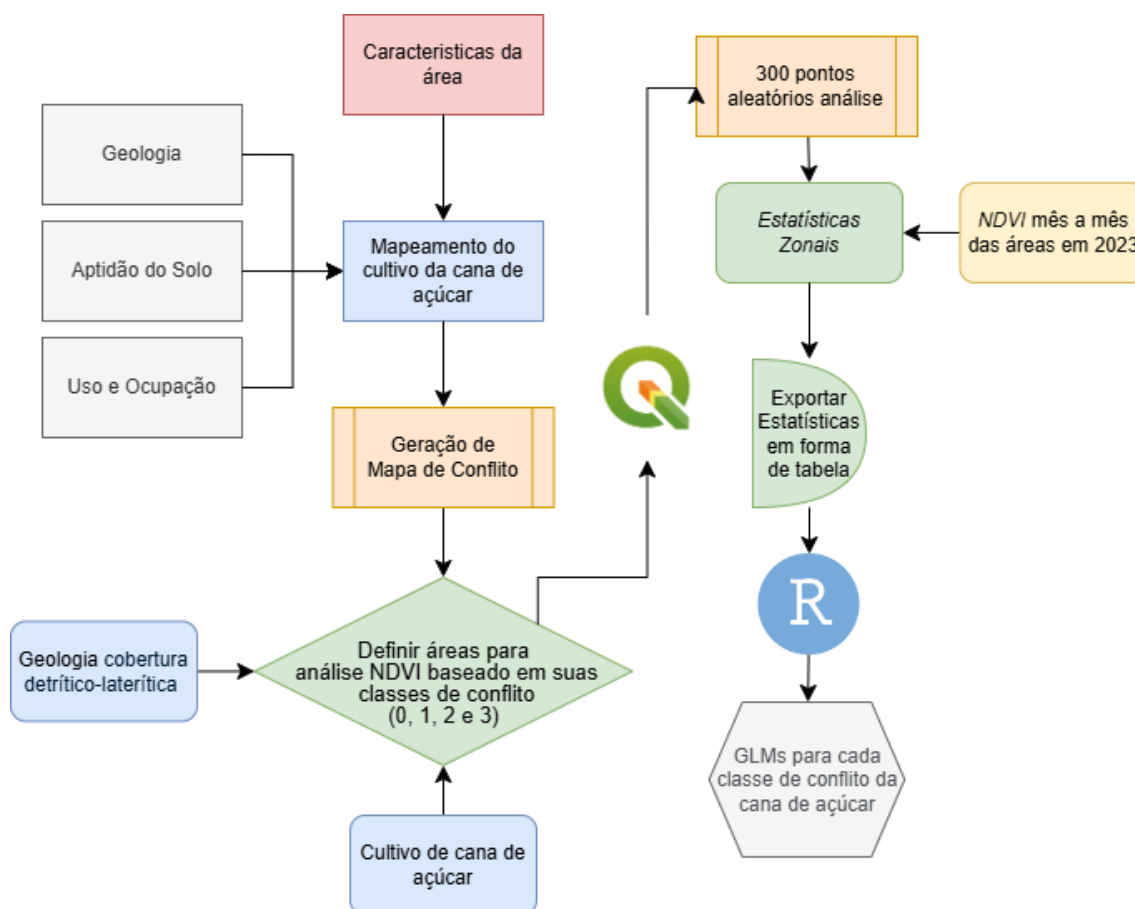
O processamento das imagens e o cálculo do índice foram realizados por meio de um script desenvolvido na plataforma Google Earth Engine (GEE), que aplicou a fórmula para cada pixel, com filtros temporais mensais e de cobertura de nuvens, assegurando a qualidade dos dados analisados.

Para a coleta amostral, utilizou-se o software QGIS, aplicando a ferramenta “Pontos aleatórios no interior dos polígonos”, com a geração de 300 pontos aleatórios por área de estudo (talhão de cana), totalizando 3.600 amostras ao longo do ano (Figura 4c). Esses pontos permitiram extrair os valores mensais de NDVI nas áreas-alvo, possibilitando uma análise detalhada da variação temporal do vigor da cultura.

Os dados obtidos foram submetidos a análises estatísticas descritivas, incluindo média, mediana, valores mínimo e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação. Em seguida, foram aplicados modelos de regressão polinomial, com o auxílio do software R versão 3.3.0 (R Core Team, 2016), para identificar padrões sazonais e tendências no comportamento espectral da cultura.

Por fim, os valores ajustados foram interpolados espacialmente, gerando mapas temáticos que representam a distribuição espacial do vigor da cana-de-açúcar ao longo do tempo. Todo o processo metodológico está sistematizado na Figura 5, demonstrando a integração entre dados espectrais, validação em campo e técnicas estatísticas para a avaliação da dinâmica vegetativa da cultura.

Figura 5 – Fluxograma metodológico das avaliações das áreas de estudo com a cultura da cana-de-açúcar na área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG)

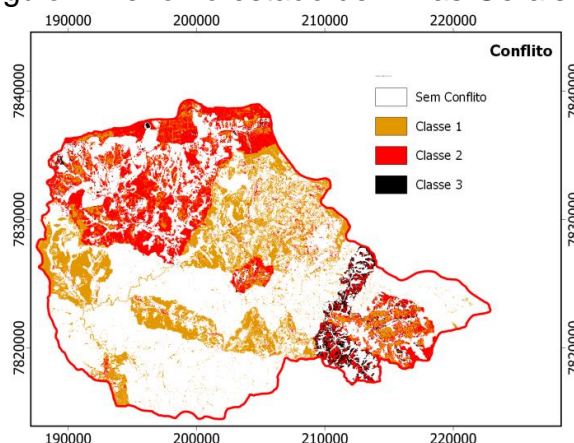


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapa de conflitos ambientais da Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Uberaba (Figura 6) revela a ocorrência de diferentes níveis de conflito em grande parte de sua extensão territorial. As classes de conflito 2 e 3 são predominantes nas porções central e leste da APA, refletindo áreas sob maior pressão antrópica e com elevados impactos ambientais. Em contrapartida, as áreas sem conflito, representadas em branco, aparecem de forma restrita e fragmentada, indicando zonas com menor intervenção e maior preservação ambiental.

Figura 6 – Mapa de conflito na área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A identificação e a espacialização dessas zonas de conflito são fundamentais para subsidiar políticas públicas e estratégias de manejo territorial sustentável, principalmente em áreas com maior fragilidade ambiental, como ressaltado por Castro *et al.* (2020). As incongruências entre a aptidão natural do solo (Figura 3a) e seu uso atual para atividades agrícolas foram os principais fatores associados aos conflitos detectados no mapa (Figura 6). Esse descompasso contribui para processos de degradação do solo, incluindo redução da matéria orgânica, aumento da compactação e erosão.

Estudos realizados no bioma Cerrado, como o de Grego *et al.* (2019), evidenciam que o uso agrícola intensivo em solos de baixa aptidão agrava os processos de degradação, reduzindo a produtividade e a resiliência dos ecossistemas. Nesse contexto, a manutenção da cobertura vegetal por meio do manejo da palhada destaca-se como prática conservacionista eficaz, sobretudo em áreas de cultivo de cana-de-

açúcar, cuja monocultura intensifica os efeitos negativos da exploração agrícola inadequada.

As áreas com baixa cobertura de matéria orgânica são especialmente susceptíveis à erosão e aos conflitos de uso, o que corrobora os padrões observados nas Classes 1, 2 e 3 de conflito. Ferramentas de sensoriamento remoto, como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), têm se mostrado essenciais no monitoramento da saúde da vegetação e na detecção de impactos do manejo agrícola. Conforme evidenciado por Santos *et al.* (2022), áreas mal manejadas exibem baixos valores de NDVI, enquanto regiões sob manejo sustentável apresentam maiores índices, indicando melhores condições de biomassa e qualidade do solo.

As análises descritivas dos dados de NDVI ao longo de 2023 (Tabelas 1, 2 e 3) demonstraram variações temporais significativas nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar.

Tabela 1 - Análises descritivas a partir dos dados de NDVI gerados entre os meses de janeiro a dezembro de 2023 da Área 01 com plantio de cana de açúcar, sem conflito (classe 0), na área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG)

Variável	Tempo (mês)	Área 1: Sem conflito (Classe 0)					
		Média	DesvPad	Minimo	Mediana	Máximo	CV(%)
NDVI	1	0,54607	0,00793	0,51900	0,54719	0,56214	0,01452
	2	0,49409	0,01432	0,42704	0,49733	0,51719	0,02898
	3	0,50914	0,00932	0,48049	0,50935	0,53056	0,01830
	4	0,45964	0,04176	0,34104	0,47982	0,51114	0,09085
	5	0,41899	0,01370	0,37869	0,41841	0,46151	0,03269
	6	0,23454	0,01157	0,19161	0,23576	0,26035	0,04933
	7	0,11157	0,00381	0,10306	0,11103	0,12897	0,03414
	8	0,15129	0,01062	0,11623	0,15214	0,18596	0,07019
	9	0,20660	0,00918	0,18575	0,20653	0,22981	0,04443
	10	0,32608	0,01388	0,28036	0,32750	0,35971	0,04256
	11	0,45590	0,01677	0,39751	0,45910	0,49032	0,03678
	12	0,47497	0,02306	0,38607	0,47468	0,53931	0,04855
Amplitude(Range)		0,43616					
Média		0,368237					

CV(%)

3,981135

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Nas áreas sem conflito (Classe 0), os valores médios de NDVI variaram entre 0,11157 em julho e 0,54607 em janeiro, com recuperação expressiva a partir de outubro e pico em dezembro (0,47497), refletindo a influência da sazonalidade climática sobre o vigor vegetativo da cultura.

Estudos recentes, como os de Liu *et al.* (2023), demonstram que índices derivados do NDVI, como o NBSI, são eficazes para monitorar os estágios fenológicos da cana-de-açúcar, demonstrando alta precisão na extração de áreas de cana, superando classificadores tradicionais como SVM e Random Forest, com uma precisão geral de 95,24% e coeficiente Kappa de 0,93. De forma semelhante, Milazzo *et al.* (2024) identificaram que áreas com menor impacto de seca mantêm NDVI mais estável ao longo do tempo, comportamento compatível com as áreas classificadas como Classe 0 na APA do Rio Uberaba.

Nas áreas classificadas como Conflito Classe 1 (Tabela 1), caracterizadas por conflito moderado, observou-se uma maior oscilação nos valores de NDVI, com médias variando entre 0,14904 e 0,52472 ao longo do ano. Essa variabilidade acentuada sugere a presença de práticas de manejo menos adequadas, possivelmente associadas a solos mais degradados e expostos, com menor capacidade de retenção hídrica e nutricional.

Entre as estratégias para mitigar os impactos em áreas com conflito Classe 1, destaca-se a aplicação de vinhaça como prática de manejo conservacionista. A vinhaça, resíduo da indústria sucroalcooleira, possui elevado teor de potássio e matéria orgânica, podendo melhorar a estrutura física do solo, sua capacidade de retenção de água e sua atividade microbiana. Segundo Gomes *et al.* (2019), a aplicação de vinhaça reduz a compactação do solo, promovendo maior porosidade e infiltração.

Os efeitos positivos da vinhaça também são refletidos nos índices de vegetação. O trabalho de Barbosa *et al.* (2012) avaliou o impacto da aplicação de vinhaça, isoladamente e em combinação com adubos minerais, na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. Os resultados indicaram que a fertirrigação com vinhaça, especialmente quando combinada com adubação mineral, proporcionou melhorias significativas na produção de colmos e no rendimento de açúcar, além de influenciar positivamente os atributos químicos do solo. Estudos relatam aumento na produtividade

da cana de 7,51-16,43% em comparação com condições de sequeiro (Rodrigues *et al.*, 2020).

Na APA do Rio Uberaba, a aplicação de vinhaça é permitida com restrições, conforme regulamentações do Plano de Manejo da unidade de conservação e da legislação ambiental brasileira (BRASIL, 2006) O cumprimento rigoroso dessas normas é essencial para garantir a sustentabilidade da atividade agrícola e preservar os recursos naturais da região.

Tabela 2 - Análises descritivas a partir dos dados de NDVI gerados entre os meses de janeiro a dezembro de 2023 da Área 2 com plantio de cana de açúcar, conflito classe 1, na área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG)

Variável	Tempo (mês)	Area 2: Conflito 1					
		Média	DesvPad	Minimo	Mediana	Máximo	CV (%)
NDVI	1	0,45959	0,02676	0,39732	0,46201	0,50156	0,05823
	2	0,48233	0,00775	0,44072	0,48331	0,49887	0,01607
	3	0,52472	0,00766	0,49142	0,52571	0,53785	0,01460
	4	0,51855	0,01112	0,46971	0,52019	0,53672	0,02144
	5	0,47955	0,01293	0,41424	0,48231	0,50090	0,02696
	6	0,48026	0,02631	0,36135	0,48937	0,50721	0,05478
	7	0,14904	0,00521	0,12370	0,14929	0,16287	0,03496
	8	0,12989	0,00305	0,11670	0,12993	0,13776	0,02348
	9	0,14740	0,00967	0,12310	0,14793	0,17550	0,06560
	10	0,25119	0,02391	0,19593	0,24881	0,31042	0,09519
	11	0,36947	0,02312	0,30096	0,37288	0,42661	0,06258
	12	0,45229	0,02073	0,39918	0,44951	0,50697	0,04583
Amplitude (Range)		0,39578					
Média		0,371771					
CV (%)		3,994844					

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Além disso, o uso do NDVI como ferramenta de monitoramento permite detectar a pressão antrópica sobre o uso do solo em regiões como a APA do Rio Uberaba. A expansão da cana-de-açúcar, frequentemente em substituição a áreas nativas ou sistemas agrícolas menos intensivos, pode comprometer o balanço hídrico, a

biodiversidade e a resiliência do agroecossistema. Nesse contexto, políticas de manejo sustentável, como a colheita mecanizada sem queima, já demonstraram reduzir impactos negativos e aumentar a sustentabilidade do sistema produtivo (Rosa *et al.*, 2024)

Na área de conflito classe dois (Tabela 1), áreas de alto conflito refletem degradação severa, com NDVI altamente variável e valores mais baixos, exemplo: 0,12518 em outubro. Essas condições podem indicar degradação estrutural e perda de matéria orgânica, afetando diretamente o potencial produtivo.

Tabela 3 - Análises descritivas a partir dos dados de NDVI gerados entre os meses de janeiro a dezembro de 2023 da Área 3 com plantio de cana de açúcar, conflito classe 2, na área de preservação ambiental (APA) do Rio Uberaba no Triângulo Mineiro no estado de Minas Gerais (MG)

		Área 3: Conflito 2					
Variável	Tempo (mês)	Média	DesvPad	Mínimo	Mediana	Máximo	CV (%)
NDVI	1	0,4157	0,03426	0,2565	0,41727	0,4788	0,0824
	2	0,4042	0,02109	0,3293	0,40717	0,4464	0,0522
	3	0,5238	0,02842	0,3739	0,53112	0,5646	0,0543
	4	0,4519	0,02501	0,3164	0,45392	0,5067	0,0554
	5	0,5102	0,02606	0,3711	0,50891	0,557	0,0511
	6	0,4873	0,02873	0,3635	0,49108	0,5372	0,059
	7	0,3873	0,03047	0,2434	0,39078	0,4441	0,0787
	8	0,3518	0,03045	0,2139	0,35217	0,4375	0,0866
	9	0,1622	0,00771	0,1286	0,16268	0,1785	0,0475
	10	0,1252	0,00539	0,1107	0,12479	0,1483	0,0431
	11	0,1583	0,01456	0,128	0,15618	0,2395	0,092
	12	0,2332	0,01382	0,2054	0,2308	0,2821	0,0593
Amplitude (Range)		0,40633					
Média		0,352239					
Máxima		6,292362					

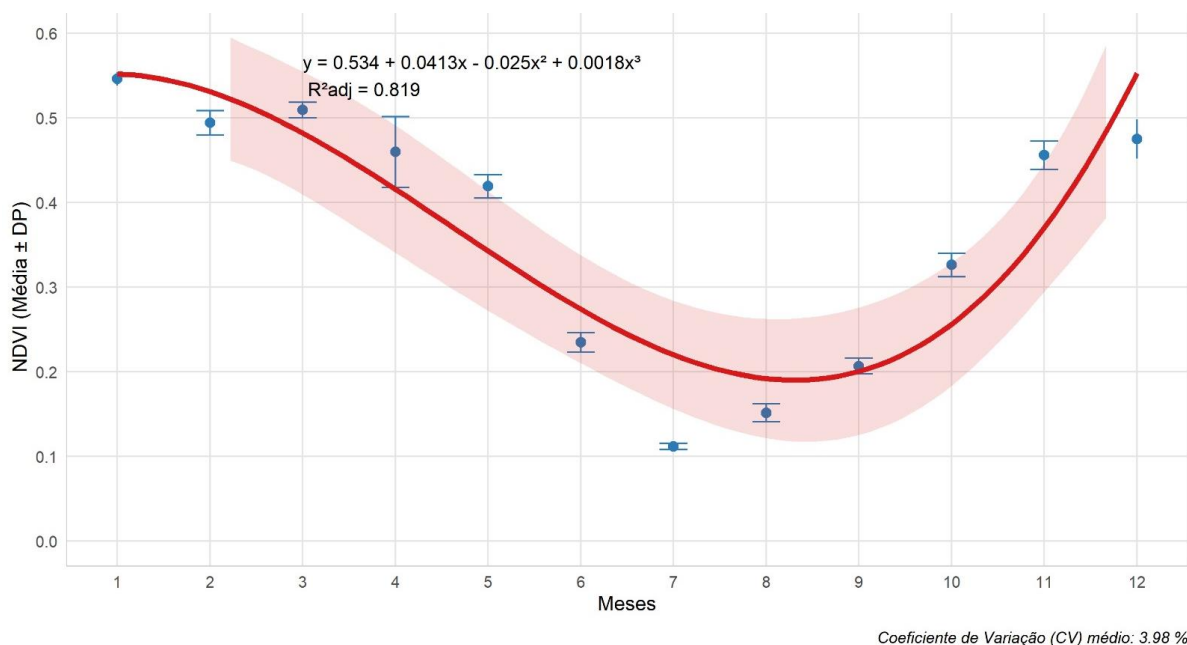
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Diante desses resultados, ressalta-se a necessidade de estratégias integradas de uso e manejo da terra, aliando sustentabilidade ambiental à viabilidade produtiva. A incorporação do NDVI a dados de precipitação, tipo de solo e clima pode constituir uma ferramenta poderosa para o planejamento territorial sustentável da cultura da cana-de-

açúcar, como sugerido por Souza *et al.* (2023). Dessa forma, torna-se possível monitorar a interação entre o vigor vegetativo e as condições ambientais, fornecendo subsídios técnicos para a conservação dos recursos naturais e a redução de conflitos de uso na APA do Rio Uberaba.

O modelo polinomial cúbico ajustado aos dados de NDVI da área 1 (Gráfico 1) apresentou coeficiente de determinação ajustado (R^2) de 0,8194, indicando que 82% da variabilidade observada é explicada pelo modelo proposto. Esse ajuste evidencia um padrão claro de declínio vegetativo nos meses secos, seguido de recuperação gradual durante o período chuvoso, revelando a estabilidade ecológica das áreas sem conflito. A positividade do coeficiente cúbico sugere aceleração no crescimento vegetativo após o período crítico, enquanto o coeficiente quadrático negativo aponta uma desaceleração progressiva após o pico, características típicas de áreas com menor interferência antrópica.

Gráfico 1 – Regressão polinomial cúbica do NDVI a longo dos meses do ano de 2023 em área sem conflito (classe 0) em relação ao vigor do cultivo de cana de açúcar da Área 1

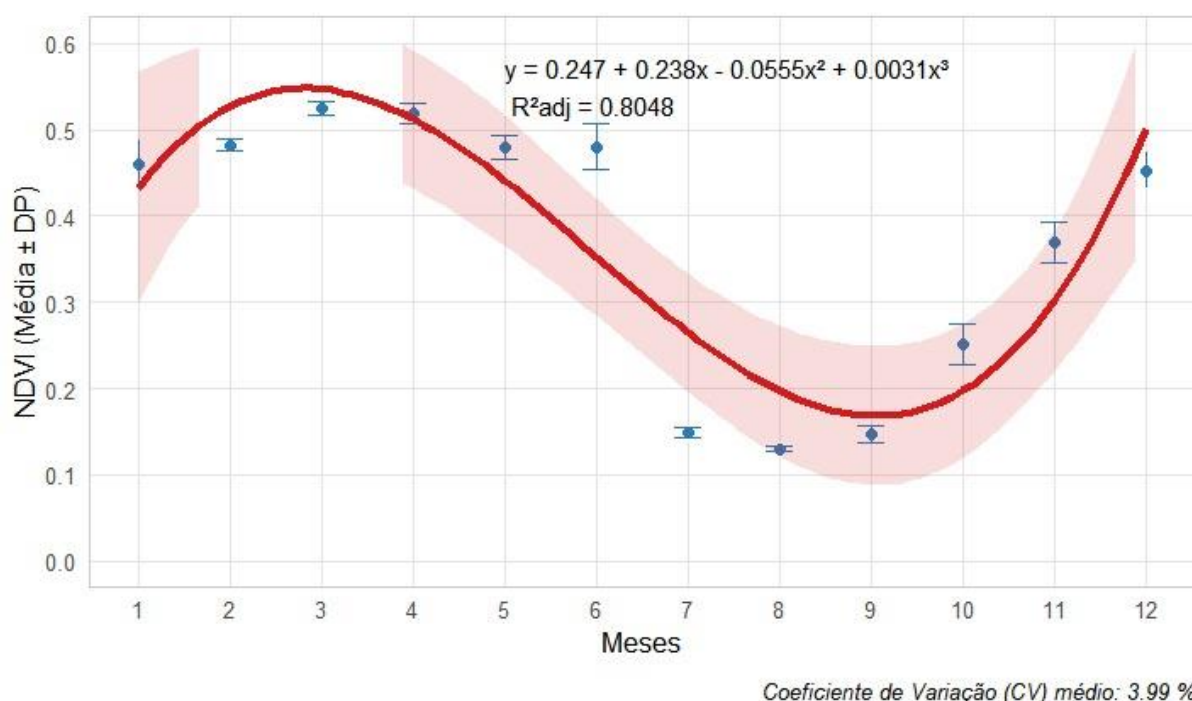


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A regressão polinomial cúbica ajustada aos dados de NDVI (Gráfico 2) apresentou um coeficiente de determinação ajustado (R^2) de 0,8048, o que indica um bom ajuste do modelo e uma explicação significativa (80,48%) da variabilidade temporal do NDVI. O padrão da curva revela uma redução acentuada entre os meses de junho e

setembro, coincidindo com o período seco e as possíveis operações de colheita, impactando diretamente o vigor da vegetação.

Gráfico 2 – Regressão polinomial cúbica do NDVI a longo dos meses do ano de 2023 em área de conflito (classe 1) em relação ao vigor do cultivo de cana de açúcar da Área 2

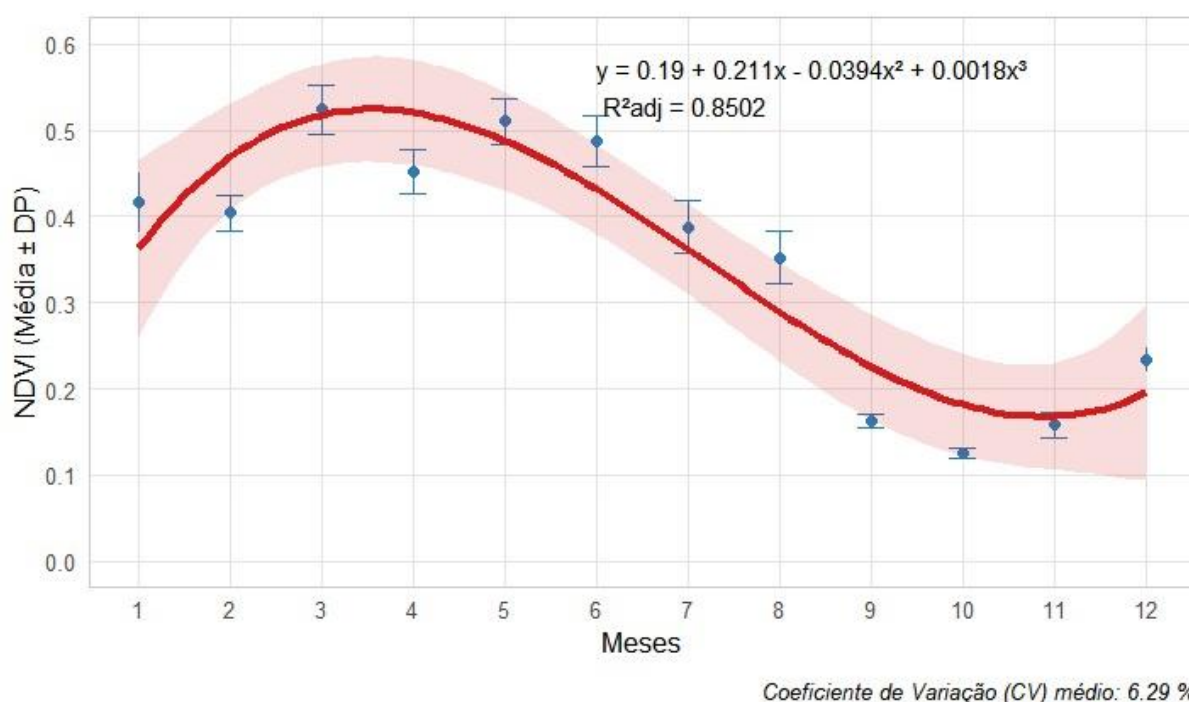


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

No gráfico 3 o valor de R^2 ajustado (0,8502) mostra que o modelo explica 85,02% da variabilidade dos dados, onde o NDVI começa alto no início do ano, meses 1 a 4, indicando boa saúde vegetativa, após o pico, ocorre uma queda gradual a partir do mês 5, atingindo valores mínimos entre os meses 9 e 11, possivelmente indicando períodos de colheita ou estresse vegetativo. O valor inicial de NDVI, nesta área é o mais baixo entre as três zonas, confirmando a hipótese de que áreas de maior conflito tendem a começar o ano com valores de NDVI mais baixos. Esse padrão reflete a deterioração contínua da vegetação nas zonas de conflito elevado, onde fatores como a má gestão do uso do solo, desmatamento ou

atividades agrícolas intensivas podem estar contribuindo para a menor qualidade vegetativa ao longo do tempo.

Gráfico 3 – Regressão polinomial cúbica do NDVI a longo dos meses do ano de 2023 em área de conflito (classe 2) em relação ao vigor do cultivo de cana de açúcar da Área 3



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O comportamento da curva na Classe 1 revela um coeficiente linear elevado, que representa um crescimento inicial acelerado do NDVI, seguido por uma queda abrupta, evidenciada por um coeficiente quadrático fortemente negativo. Essa dinâmica reflete uma vegetação sujeita a intensa resposta às variações ambientais, com picos vegetativos pronunciados e subsequente redução rápida, denotando instabilidade ecológica e pressões antrópicas mais intensas. Embora os valores iniciais de NDVI sejam inferiores aos observados na Classe 0, a alta taxa de crescimento inicial sugere

que, sob condições adequadas de manejo, essas áreas podem atingir níveis de vigor semelhantes aos de áreas não conflitivas.

O NDVI, por refletir a densidade da vegetação verde ativa, é sensível às fases fenológicas da cultura da cana-de-açúcar, sobretudo nos estágios de crescimento inicial e alongamento do colmo, os quais são altamente dependentes da disponibilidade de água e nutrientes. Em áreas de conflito moderado, a inconsistência no manejo do solo durante essas fases críticas pode resultar em valores mais baixos de NDVI e, conseqüentemente, em reduções na produtividade agrícola.

Modelos matemáticos aplicados ao NDVI, como a regressão polinomial cúbica, são ferramentas robustas para monitorar variações temporais, prever tendências de produtividade e apoiar a tomada de decisão no uso sustentável do solo. A matéria orgânica e seu manejo adequado influenciam diretamente o NDVI, pois melhoram a retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e, por conseqüência, a produtividade agrícola como visto em estudos feitos por Serrano-Grijalva *et al.* (2024). Em contrapartida, práticas insustentáveis intensificam os conflitos de uso e promovem a degradação dos recursos naturais

Yu e Liu (2022) analisam o impacto do cultivo intensivo de cana-de-açúcar em regiões tropicais, com foco no uso do NDVI para monitorar a dinâmica da vegetação. Os autores apontam que as práticas agrícolas intensivas, como o cultivo de cana-de-açúcar, frequentemente levam à redução inicial dos valores de NDVI devido a diversos fatores, incluindo degradação do solo, compactação e manejo inadequado. Esses fatores promovem uma vegetação mais pobre e comprometem a capacidade de regeneração ao longo do tempo. O padrão observado na pesquisa corrobora diretamente o dado que sugere que áreas de maior conflito iniciam o ciclo com menor qualidade vegetativa, reforçando a hipótese de que atividades agrícolas intensivas, como as analisadas no estudo, contribuem significativamente para essa tendência.

Shrestha e Pandey (2021) também identificam padrões semelhantes, indicando que áreas com maior conflito ambiental apresentam baixos valores de NDVI, associados à intensificação da pressão antrópica e ao uso inadequado do solo. Fensholt e Proud (2019) reforçam que o NDVI é uma métrica sensível para detectar a degradação do solo, especialmente em regiões impactadas por atividades agrícolas.

Nogueira *et al.* (2021), analisam como mudanças no uso da terra e melhores práticas de manejo impactam a sustentabilidade no cultivo de cana-de-açúcar no

Brasil. Ele destaca que práticas como o preparo conservacionista do solo, gestão sustentável de resíduos, fertilização racional e reciclagem de subprodutos podem minimizar impactos negativos, como compactação do solo e perda de biodiversidade. Para áreas de conflito classe dois, essas práticas poderiam ser aplicadas para mitigar a degradação ambiental e melhorar os valores de NDVI associados a coberturas vegetais mais saudáveis. O estudo também reforça a importância de políticas públicas, como o Código Florestal e o programa RenovaBio, para compatibilizar a produção de bioenergia com o uso sustentável da terra.

As equações ajustadas demonstraram comportamentos distintos para o índice de vegetação, confirmam parcialmente a hipótese de que nas zonas de conflito um e dois os valores de NDVI ao longo do ano seriam menores em comparação às áreas sem conflito (zero), onde se obteve maior estabilidade. Estas áreas apresentaram maior estabilidade no NDVI devido a um conjunto de fatores que refletem condições mais favoráveis ao crescimento e desenvolvimento da vegetação, como melhor qualidade do solo, pois há menor pressão antrópica, permitindo que os ecossistemas naturais mantenham seu equilíbrio, o que se reflete na resposta espectral mais estável observada no NDVI (Souza *et al.*, 2023).

Comparando os coeficientes cúbicos entre as zonas de conflito, é possível observar que, embora as áreas de conflito zero e dois apresentem o mesmo valor, o comportamento geral dessas áreas é distinto, sendo que a área sem conflito (zero) mostra uma estabilidade maior nos valores de NDVI ao longo do ano, enquanto a área de conflito dois é caracterizada por um crescimento vegetativo inicial mais acelerado, seguido por uma diminuição menos intensa do que a observada na área de conflito um.

Essa diferença sugere que a degradação nas áreas de conflito dois não é tão severa quanto em conflito um, mas ainda apresenta uma vegetação que não consegue se manter tão estável quanto nas áreas de menor conflito. Apesar de as zonas de conflito um e dois apresentarem picos temporários de NDVI, especialmente nos primeiros meses do ano, seus valores iniciais são consideravelmente menores do que na área de conflito zero. Além disso, a rápida queda nos valores de NDVI observada nas áreas de conflito sugere que a vegetação nessas zonas é mais suscetível a mudanças ambientais e práticas de manejo inadequadas.

Os diferentes valores de NDVI entre áreas de conflito podem ser associados à cobertura vegetal e ao manejo do solo. Em um estudo realizado no Nordeste brasileiro, foi observado que áreas com vegetação densa apresentam NDVI mais elevado, enquanto áreas com solo nu ou vegetação esparsa possuem valores mais baixos. Isso está diretamente ligado à intensidade do uso da terra e às práticas de manejo, que influenciam na capacidade de retenção de nutrientes e água (Santos *et al.*, 2020)

Logo, os resultados confirmam a hipótese inicial de que as áreas de conflito um e dois apresentam valores de NDVI consistentemente inferiores ao longo do ano, especialmente no início do ciclo vegetativo, em comparação com as áreas sem conflito (zero). As discrepâncias nos coeficientes das equações ressaltam a intensidade da degradação ambiental nessas regiões, evidenciando seu impacto negativo na capacidade de a vegetação se desenvolver de maneira saudável e sustentável.

A fim de mitigar esses efeitos e promover um desenvolvimento econômico sustentável é possível que práticas sejam adotadas como já citado em diversas áreas de conflito, junto ao monitoramento com NDVI ao longo dos ciclos da cultura, dentre essas práticas das mais comuns como o uso da palhada da cana e o uso de vinhaça podem auxiliar no período de seca e possibilitar a sustentabilidade do ecossistema de uma forma viável. Um exemplo é um estudo realizado aqui no Brasil por Barros *et al.* (2023) que analisou os efeitos da remoção de palha em áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Os resultados indicaram que áreas com menor remoção de palha apresentaram maior estabilidade nos valores de NDVI ao longo do ciclo de crescimento. Esse comportamento reflete uma vegetação mais robusta, com menor degradação do solo, semelhante ao padrão observado em áreas de menor impacto antrópico descrito neste trabalho. Por outro lado, maior remoção de palha levou a picos de NDVI mais acentuados no estudo analisado seguido por quedas rápidas, apontando para instabilidade ambiental e manejo inadequado.

Assim, o uso do NDVI pode auxiliar na obtenção de dados para monitoramento do vigor da cana e auxiliar ao longo do tempo onde o manejo adequado na região da APA do Rio Uberaba pode possibilitar maior sustentabilidade ao local e ainda assim promover o setor sucro-alcooleiro da região através de estudos com práticas que possibilitem maior retorno econômico com manejo

sustentável do solo a fim de minimizar os conflitos observados e promover estudos dos recursos hídricos de cada localidade da APA do Rio Uberaba.

5 CONCLUSÃO

Existe relação entre a aptidão do uso do solo, e a resposta espectral do NDVI na cultura da cana-de-açúcar com os conflitos ambientais presentes na APA do rio Uberaba. As áreas de maior aptidão para o uso do solo (classificadas como Conflito Zero) apresentam maior estabilidade vegetativa, refletida em valores mais elevados e consistentes de NDVI ao longo do ano. Essas áreas demonstram condições ambientais mais favoráveis e práticas de manejo adequadas, promovendo uma vegetação mais vigorosa e resiliente às variações sazonais e ambientais. Por outro lado, as áreas classificadas como de Conflito Moderado (Classe 1) e Alto (Classe 2) exibem oscilações acentuadas nos valores de NDVI, indicando possível instabilidade vegetativa, degradação do solo e ou práticas de manejo insuficientes.

As equações de regressão ajustadas aos dados de NDVI evidenciaram padrões distintos entre as diferentes classes de conflito, com maior estabilidade nas áreas sem conflito e maior variabilidade nas zonas de maior impacto ambiental. Esses resultados reforçam a relação direta entre a aptidão do solo, a resposta espectral do NDVI e os conflitos ambientais, destacando a importância de alinhar o uso do solo com sua capacidade natural para minimizar impactos e melhorar a produtividade.

As áreas de conflito elevado apresentaram os menores valores iniciais de NDVI e padrões mais irregulares ao longo do ano. As equações revelaram uma rápida queda após o pico vegetativo, refletindo possível deterioração da cobertura vegetal e a compactação do solo. Esse comportamento reforça a gravidade da degradação em áreas de alto conflito, associada à falta de manejo adequado e à intensificação de atividades agrícolas. As diferenças nos coeficientes das equações entre as classes de conflito destacam a importância do manejo adaptativo. Áreas de menor conflito exibem maior resiliência, enquanto regiões de conflito elevado demandam intervenções urgentes, como conservação do solo e uso de tecnologias sustentáveis, para melhorar a saúde do solo e aumentar a produtividade.

Como estratégia de manejo sustentável na APA do Rio Uberaba, recomenda-se a implementação de sistemas de monitoramento baseados no NDVI, permitindo identificar áreas de maior fragilidade e direcionar práticas adequadas a cada zona de conflito. Práticas como o uso de palhada, aplicação de vinhaça e conservação do solo devem ser priorizadas para melhorar a retenção de água e nutrientes,

promovendo maior estabilidade ambiental e produtividade agrícola em áreas de conflito.

Por fim, a implementação de políticas públicas que incentivem práticas conservacionistas, aliada à capacitação técnica dos produtores, é essencial para garantir a preservação dos recursos naturais da APA e a viabilidade econômica da produção de cana-de-açúcar. A integração dessas ações pode reduzir os conflitos ambientais, aumentar a resiliência do solo e promover um modelo de gestão sustentável que beneficie tanto o meio ambiente quanto a economia local.

REFERÊNCIAS

ALENCASTRO, L. F. de. The Portuguese Atlantic and the Sugar Plantation Complex: Brazil in Comparative Perspective. **Journal of Global History**, Cambridge, v. 9, n. 2, p. 72-94, 2014. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199366439.013.645>. Disponível em: https://www.mediationsjournal.org/files/Mediations23_1_06.pdf. Acesso em: 22 maio 2025.

ALMEIDA, A. M. de; VALLE JUNIOR, R. F. do. Diagnóstico da expansão agropecuária na Bacia do Rio Uberaba, Veríssimo – MG, utilizando-se do sistema de informação geográfica. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 14, p. 168–180, 2013. <https://doi.org/10.14393/RCG144620911>. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/20911>. Acesso em: 22 maio 2025.

BARBOSA, E. A. A.; ARRUDA, F. B.; PIRES, R. C. M.; SILVA, T. J. A.; SAKAI, E. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça e adubos minerais via irrigação por gotejamento subsuperficial: ciclo da cana-planta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 952–958, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000900005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/cyqXx9cyyN9SkrrCK69GKRk/>. Acesso em: 22 maio 2025.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. **Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 19 jul. 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso em: 22 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Estratégias de adaptação às mudanças do clima dos sistemas agropecuários brasileiros**. Brasília: MAPA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/estrategias-de-adaptacao-as-mudancas-do-clima-dos-sistemas-agropecuarios-brasileiros.pdf>. Acesso em: 22 maio 2025.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução CONAMA nº 369, de 28 de março de 2006. Dispõe sobre os casos excepcionais, de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental, que possibilitam a intervenção ou supressão de vegetação em Área de Preservação Permanente – APP. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 61, p. 150–151, 29 mar. 2006. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2006_Res_CONAMA_369.pdf. Acesso em: 22 maio 2025.

BURGESS, P. J. Automating the Derivation of Sugarcane Growth Stages from Earth Observation Time Series. **Remote Sensing**, Basel, v. 16, n. 22, p. 4244, 2024. <https://doi.org/10.3390/rs16224244>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/22/4244>. Acesso em: 22 maio 2025.

CALDAS, A. M.; PISSARRA, T. C. T. Environmental conflicts in municipality areas: land use policy for zoning regulation. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, Uberaba, v. 7, p. 70–83, 2023. DOI: <https://doi.org/10.18554/rbcti.v7i2.6981>. Disponível em: <https://seer.uftm.edu.br/revistaelectronica/index.php/rbcti/article/view/6981>. Acesso em: 22 mai. 2025.

CAMELINI, C. A. **A construção territorial do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar no Brasil: um estudo geográfico**. 2008. Monografia (Graduação em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. Disponível em: <https://www.ige.unicamp.br/wp-content/uploads/sites/22/2010/03/monografiacamelini.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2025.

CÂNDIDO, A. K. A. A.; SILVA, N. M. da; BARBOSA, D. S. Spatial and temporal dynamics of land use and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) sector in bedside of São Lourenço River, Campo Verde, MT/Dinâmica espacial e temporal do uso do solo e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) em setor de cabeceira do rio São Lourenço, Campo Verde, MT. **RA'E GA – O Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, v. 33, p. 94–119, 2015. <https://doi.org/10.5380/raega.v33i0.36338>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/36338>. Acesso em: 22 mai. 2025.

CANO, W. Da década de 1920 à de 1930: transição rumo à crise e à industrialização no Brasil. **Revista Economia**, Brasília, v. 13, n. 3, p. 897-916, 2012. Disponível em: https://www.anpec.org.br/revista/vol13/vol13n3bp897_916.pdf. Acesso em: 17 abr. 2025.

CARVALHO, G. O. T.; SILVA, N. C.; SALVIO, G. M. M. Vulnerabilidade ambiental em Áreas de Proteção Ambiental (APA) do Bioma Mata Atlântica na região sudeste brasileira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, n. 3, p. 1575–1593, 2022. <https://doi.org/10.5902/1980509867261>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/67261>. Acesso em: 17 abr. 2025.

SANTOS CARVALHO, W. dos; MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; DOS SANTOS, T. L. Uso e cobertura do solo utilizando a Plataforma Google Earth Engine (GEE): Estudo de caso em uma Unidade de Conservação / Land use and land cover using the Google Earth Engine Platform (GEE): Case study in a Conservation Unit. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba v. 7, n. 2, p. 15280–15300, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-243>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/24622/19673>. Acesso em: 17 abr. 2025.

COSTA, H. R. de O.; MOREIRA, E. S.; NUNES, J. O. R. O uso da terra por atividades agropecuárias e seu impacto sobre bacias hidrográficas. **GeoGraphos**, Alicante, v. 14, p. 64–90, 2023. <https://doi.org/10.14198/geogra2023.14.154>. Disponível em: <https://rua.ua.es/bitstream/10045/132519/1/Geographos-v14-n2-154.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2025.

ELLIOTT, N. C.; BACKOULOU, G. F.; BREWER, M. J.; GILES, K. L. NDVI to detect sugarcane aphid injury to grain sorghum. **Journal of Economic Entomology**, Oxford, v. 108, p. 1452–1455, 2015. <https://doi.org/10.1093/jee/tov080>. Disponível em: <https://academic.oup.com/jee/article-abstract/108/3/1452/2379925?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 17 abr. 2025.

FAUSTO, B. **História do Brasil**. São Paulo: Edusp, 2006. Disponível em: <https://mizanzuk.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/02/boris-fausto-historia-do-brasil.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2025.

FENSHOLT, R.; PROUD, S. R. Long-term trends in vegetation indices and their relation to land degradation. **Remote Sensing of Environment**, Nova York, v. 230, p. 111193, 2019. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111193. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31811831/>. Acesso em: 17 abr. 2025.

FERLINI, V. L. A. **Açúcar e colonização da América Portuguesa ao Brasil: ensaios de interpretação**. 2000. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001121219>. Acesso em: 23 maio 2025

FERNANDES, J. L.; EBECKEN, N. F. F.; ESQUERDO, J. C. D. M. Sugarcane yield prediction in Brazil using NDVI time series and neural networks ensemble. **International Journal of Remote Sensing**, Oxford, v. 38, n. 16, p. 4631–4644, 2017. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1325531>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2017.1325531>. Acesso em: 17 abr. 2025.

FREITAS, A. C.; MELO, D. S. Conservação do solo e agricultura sustentável: um enfoque na cana-de-açúcar. **Revista de Agricultura Sustentável**, Viçosa, v. 10, n. 3, p. 15-30, 2021.

GRANDIS, A.; FORTIRER, J. d. S.; PAGLIUSO, D.; BUCKERIDGE, M. S. Scientific research on bioethanol in Brazil: history and prospects for sustainable biofuel. **Sustainability**, Basel, v. 16, n. 10, p. 4167, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16104167>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/10/4167>. Acesso em: 17 abr. 2025.

GREGO, S.; BORTOLUZZI, G. L.; LIMA, D. G.; ROCHA, G. R.; PEREIRA, M. C. S. Aptidão do solo e impactos ambientais: análise na produção de cana-de-açúcar. **Agricultural Systems**, Países Baixos, v. 176, p. 102674, 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1002020/1/4225.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2025.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). **Unidades de Conservação: Áreas de Proteção Ambiental**, Brasília: ICMBio, 2021. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br>. Acesso em: 23 abr. 2025.

INOUE, Y. Satellite- and drone-based remote sensing of crops and soils for smart farming: A review. **Soil Science and Plant Nutrition**, Reino Unido, v. 66, p. 798–810, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1738899>. Acesso em:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00380768.2020.1738899>. Acesso em: 23 abr. 2025.

JUNG, J.; MAEDA, M.; CHANG, A.; BHANDARI, M.; ASHAPURE, A.; LANDIVAR-BOWLES, J.; YANG, J.; PARK, D. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems. **Current Opinion in Biotechnology**, Oxford, v. 70, p. 15–22, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.09.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958166920301257?via%3Dihub>. Acesso em: 23 abr. 2025.

KIM, I.; ARNHOLD, S. Mapping environmental land use conflict potentials and ecosystem services in agricultural watersheds. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 630, p. 827–838, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.176>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718305692?via%3Dihub>. Acesso em: 23 abr. 2025.

LACERDA, M. S.; SILVA JUNIOR, J. C. A.; EMILIANO, P. C. Expansão da cana-de-açúcar: uma investigação via cópulas. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 31, n. 2, p. 33–49, abr./maio/jun. 2022. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1144704/1/Expansao-da-cana-de-acucar.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2025.

LISBOA, I. P.; DAMIAN, M.; CHERUBIN, M. R.; BARROS, P. P. S.; FIORIO, P. R.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Prediction of sugarcane yield based on NDVI and concentration of leaf-tissue nutrients in fields managed with straw removal. **Agronomy**, Madison, v. 8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy8090196>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/8/9/196>. Acesso em: 17 abr. 2025

LIU, Y.; YANG, L.; WANG, H.; LIU, Z.; ZHAO, X.; LIU, W.; CHEN, J.; LI, S.; CHEN, C. A robust index based on phenological features to extract sugarcane from multisource remote sensing data. **Remote Sensing**, Basel, v. 15, n. 24, p. 5783, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15245783>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/24/5783>. Acesso em: 17 abr. 2025

MELO, A. C. A.; MARTINS, P. T. A. Contribuição das Áreas de Proteção Ambiental na conservação do Cerrado. **Revista de Geografia**, Recife, v. 37, n. 2, p. 53–67, 2020. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2020.242444>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/242444>. Acesso em: 17 abr. 2025

MESQUITA JÚNIOR, S.; OLIVEIRA, M. A.; SANTOS, F. L.; PEREIRA, G. R.; SOUZA, T. S.; ALMEIDA, A. P.; COSTA, R. D. Impactos do manejo do solo na produtividade da cana-de-açúcar e nos índices de vegetação. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 2, p. 53–67, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/a6d7e445-e9f1-40e3-854b-67deac816aa1>. Acesso em: 30 nov. 2024.

MILAZZO, F.; BROCCA, L.; VANWALLEGHEM, T. NDVI prediction of Mediterranean permanent grasslands using soil moisture products. **Agronomy**, Madison, v. 14, n. 8, p. 1798, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14081798>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/8/1798>. Acesso em: 30 nov. 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Áreas de Proteção Ambiental (APAs)**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/unidades-de-conservacao>. Acesso em: 23 abr. 2025.

NANNI, M. R.; SCHULER, C. A. B. Análise do NDVI/NOAA em cana-de-açúcar e Mata Atlântica no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 15–20, 2002. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000600009>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/7H4yVbZfjcy5c95VzrkFmhd/?lang=pt>. Acesso em: 23 abr. 2025.

NOGUEIRA, L. A. H.; SOUZA, G. M.; CANTARELLA, H. Land Use and Management Effects on Sustainable Sugarcane-Derived Bioenergy. **Land**, Basel, v. 10, n. 1, p. 72, 2021. <https://doi.org/10.3390/land10010072>. Disponível em: <http://mdpi.com/2073-445X/10/1/72>. Acesso em: 29 nov. 2024.

OLIVEIRA, A. C. de; STRAUCH, J. C. M.; FERNANDES, A. da C. Assessment of environmental service provider areas in the municipal APA of the Uberaba River, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 73, n. 1, p. 296–312, 2021. <https://doi.org/10.14393/rbcv73n1-51233>. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/51233>. Acesso em: 29 nov. 2024.

OLIVEIRA, C. F.; VALLE JUNIOR, R. F.; VALERA, C. A.; RODRIGUES, V. S.; SANCHES FERNANDES, L. F.; PACHECO, F. A. L. The modeling of pasture conservation and of its impact on stream water quality using Partial Least Squares-Path Modeling. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 697, p. 134081, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134081>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719340586?via%3Dihub>. Acesso em: 29 nov. 2024.

OLIVEIRA, F. G.; PEREIRA, J. C. T.; ALVES, V. A.; SILVA, R. C. F. da; ASSIS, L. C. de. Análise da susceptibilidade à escoamento superficial na APA do rio Uberaba. **Revista de Engenharia, Tecnologia e Inovação**, Uberaba, v. 1, p. 1–12, 2024. <https://doi.org/10.31496/retii.v1i1.1692>. Disponível em: <https://revistas.uniube.br/index.php/retii/article/view/1692>. Acesso em: 29 nov. 2024.

OLIVEIRA, J. P. C. de; CORREIA, D. B.; VERÇOSA, C. J.; FIGUEROA, M. E. V.; CABRAL, C. da P.; VITOR, L. N. A.; SANTOS, A. F. dos; MARTINS, A. S.; TEIXEIRA, L. M.; PEREIRA, G. G.; ANUNCIACÃO, J. A. O. da; PEREIRA, F. D.; VASCONCELOS, J. M. P. B. L. de; SILVA, A. S. O. da; FERNANDES, N. de S.; OLIVEIRA, P. S. de; SAMPAIO, N. K. S.; SANTOS, R. H. L. dos; BARROS, J. E. L. de; SANTOS, M. A. F. dos. Inappropriate land use and its impacts on the degradation of áreas. **Research, Society and Development**, Varge Grande Paulista, v. 10, n. 12, e35101219948, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd->

v10i12.19948. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/19948>. Acesso em: 29 nov. 2024.

PACHECO, F. A. L. Sustainable use of soils and water: The role of environmental land use conflicts. **Sustainability**, Basel, v. 12, p. 10–17, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12031163>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/3/1163>. Acesso em: 29 nov. 2024.

PACHECO, F. A. L.; SANCHES FERNANDES, L. F. Environmental land use conflicts in catchments: A major cause of amplified nitrate in river water. **Science of the Total Environment**, v. 548-549, p. 173–188, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.155>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969715313139?via%3Dihub>. Acesso em: 29 nov. 2024.

PACHECO, F. A. L.; VARANDAS, S. G. P.; SANCHES FERNANDES, L. F.; VALLE JUNIOR, R. F. Soil losses in rural watersheds with environmental land use conflicts. **Science of the Total Environment**, v. 485-486, p. 110–120, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.069>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969714003994?via%3Dihub>. Acesso em: 29 nov. 2024.

ROCHA, J. S. M.; KURTZ, S. M. J. M. **Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas**. Santa Maria: Editora da UFSM, 2001. 282 p.

RODRIGUES, G. S. de S. C.; ROSS, J. L. S. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: de cultura alimentar a commodity energética**. Uberlândia, 2020. Disponível em: https://edufu.ufu.br/sites/edufu.ufu.br/files/edufu_a_trajetoria_da_cana-de-acucar_no_brasil_2020_ficha_corrigida.pdf. Acesso em: 17 abr. 2025.

RODRIGUES, J. dos S.; SILVA, P. C.; COSTA, A. R. da; GOMES, L. F.; SILVA, F. de F.; SOARES, J. A. B.; FERREIRA, J. B. G. Produtividade da cana-de-açúcar com aplicação de água residuária da indústria sucroenergética. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 9, n. 5, e162953167, 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i5.3167>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/3167>. Acesso em: 17 abr. 2025.

RODRIGUES, S. L.; GOMES, J. M. A.; CERQUEIRA, E. B. Expansão da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) e supressão de vegetação nativa nos municípios de São Raimundo das Mangabeiras e Campestre do Maranhão (MA), Brasil. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 23, n. 89, p. 306–327, 2022. <http://doi.org/10.14393/RCG238960605>. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/60605>. Acesso em: 17 abr. 2025.

RODRIGUES, V. S.; VALLE JUNIOR, R. F.; SANCHES FERNANDES, L. F.; PACHECO, F. A. L. The assessment of water erosion using Partial Least Squares-Path Modeling: A study in a legally protected area with environmental land use conflicts. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 691, p. 1225–1241,

2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.216>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719333273?via%3Dihub>. Acesso em: 17 abr. 2025.

ROSA, L. de J.; LIMA JÚNIOR, C. de; MACEDO, M. R. O. B. C. Benefícios ambientais proporcionados pela agricultura de precisão na colheita mecanizada da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 17, n. 3, p. 2008-2022, 2024. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1170320/1/Ramos-Praticas-sustentaveis-2024.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2025.

SANTOS, R. G.; ALMEIDA, J. C.; PEREIRA, M. D.; COSTA, T. S.; OLIVEIRA, F. A.; LIMA, A. R. Aplicações do NDVI no monitoramento ambiental: um estudo de caso na cultura da cana-de-açúcar. **Journal of Environmental Management**, Amsterdã, v. 304, p. 114231, 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114231. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1170320/1/Ramos-Praticas-sustentaveis-2024.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2025.

SANTOS, W. B. dos; NUNES, M. F. S. Q. da C.; FREITAS, M. M. de; ANDRADE, F. de N.; COLACCHI, F. Aptidão agrícola e uso do solo no zoneamento ambiental da APA Macaé de Cima (RJ). **Natureza & Conservação**, v. 14, p. 94–110, 2022. <https://doi.org/10.6008/cbpc2318-2881.2021.004.0010>. Disponível em: <https://www.sustenere.co/index.php/nature/article/view/6732>. Acesso em: 21 fev. 2025.

SCHWARTZ, S. B. A Economia Açucareira do Brasil no Período Colonial. **Revista de História**, Piracicaba, v. 177, p. 33-68, 2018.

SERRANO-GRIJALVA, L.; OCHOA-HUESO, R.; VEEN, G. F.; REPETO-DEUDERO, I.; VAN RIJSSEL, S. Q.; KOORNEEF, G. J.; VAN DER PUTTEN, W. H. Normalized difference vegetation index analysis reveals increase of biomass production and stability during the conversion from conventional to organic farming. **Global Change Biology**, Reino Unido, v. 30, n. 8, e17461, 2024 <https://doi.org/10.1111/gcb.17461>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.17461>. Acesso em: 21 fev. 2025.

SHAFI, U.; MUMTAZ, R.; GARCÍA-NIETO, J.; HASSAN, S. A.; ZAIDI, S. A. R.; IQBAL, N.; LI, H. Precision agriculture techniques and practices: From considerations to applications. **Sensors**, Basel, v. 19, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19173796>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/17/3796>. Acesso em: 21 fev. 2025.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDAO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. de C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VILELA, M. de F. **Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na agricultura de precisão**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2014. 82 p.

SHRESTHA, S.; PANDEY, S. R. Dynamics of vegetation cover in response to land use and land cover changes: Insights from NDVI analysis. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Paizes Baixos, v. 102, p. 102408,

2021. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102408>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030324342100115X?via%3Dihub>. Acesso em: 21 fev. 2025.

SIMÕES, G. Z.; KUX, H. J. H.; BREUNIG, F. M.; PEREIRA, L. H. Estimativa da altura de variedades de cana-de-açúcar usando um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) e integração com imagens de satélite. **Revista Geografia**, Santa Maria, v. 31, n. 2, 2022. <https://doi.org/10.5902/2236499465070>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/65070>. Acesso em: 21 fev. 2025.

SIQUEIRA, H. E.; PEREIRA, G. T.; PISSARRA, T. C. T.; MARTINS FILHO, M. V.; CAMPOS, C. A. A. Estimativa de perdas de solo na área de proteção ambiental do rio Uberaba. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, p. 1205–1226, 2022. <https://doi.org/10.5902/1980509841259>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/41259>. Acesso em: 21 fev. 2025.

SISHODIA, R. P.; RAY, R. L.; SINGH, S. K. Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, n.6, e 3136, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/19/3136>. Acesso em: 21 fev. 2025.

SOUZA, H. A. de; MARCELO, A. V.; CENTURION, J. F. Carbono orgânico e agregação de um Latossolo Vermelho com colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 43, n. 4, p. 658–663, 2012. <https://doi.org/10.1590/s1806-66902012000400006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/BKwz6MwwQzLjDGxSf5Gnwwt/?lang=pt>. Acesso em: 21 fev. 2025.

SOUZA, S. O.; FOLHARINI, S. D. O. Mapeamento do uso e ocupação da terra do município de Petrolina (PE) – Médio Vale do Rio São Francisco através do NDVI de imagem Landsat 8 (OLI). **Revista Equador**, Teresina, v. 8, n. 2, p. 489–502, 2019. <https://doi.org/10.26694/equador.v8i2.9204>. Disponível em: <https://revistas.ufpi.br/index.php/equador/article/view/9204>. Acesso em: 21 fev. 2025.

STOLF, R.; OLIVEIRA, A. P. R. de. The success of the Brazilian alcohol program (Proalcool): a decade-by-decade brief history of ethanol in Brazil. **Engenharia Agrícola**, Viçosa, v. 40, n. 2, p. 243–248, 2020. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-ENG.AGRIC.V40N2P243-248/2020>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/z8TkLPmKtJcVkJ3gHGvGdn4r/?lang=en>. Acesso em: 21 fev. 2025.

SZMRECSÁNYI, T. J. M. K. **Pequena História da Agricultura no Brasil**. São Paulo: Editora Contexto, 1990.

TORRES, J. L. R.; FABIAN, A. J. Levantamento topográfico e caracterização da paisagem para planejamento conservacionista numa microbacia hidrográfica de Uberaba. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 7, p. 150–159, 2006. em: <https://doi.org/10.14393/rcg71915496>. Disponível em:

<https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15496>. Acesso em: 22 maio 2025.

UBERABA. Prefeitura Municipal. **Diagnóstico ambiental da APA do Rio Uberaba**. Uberaba: Secretaria do Meio Ambiente, 2020. Disponível em: <https://www.uberaba.mg.gov.br>. Acesso em: 22 maio 2025.

UBERABA. Prefeitura Municipal. **Plano de Manejo Emergencial da Área de Proteção Ambiental do Rio Uberaba**. Uberaba: Secretaria de Meio Ambiente, 2013. Disponível em: http://www.uberaba.mg.gov.br/portal/acervo/meio_ambiente/APA/Plano%20de%20Manejo%20Emergencial%20-%20APA%20Rio%20Uberaba%20-%202013.pdf. Acesso em: 22 maio 2025.

UBERABA. Secretaria de Meio Ambiente. **Diagnóstico ambiental da APA – Rio Uberaba**. Uberaba: Prefeitura Municipal de Uberaba, 2004. 127 p. Disponível em: http://www.uberaba.mg.gov.br/portal/acervo/meio_ambiente/arquivos/agenda_branca/diagnostico_apa.pdf.

UBERABA. Prefeitura Municipal. **Lei Municipal nº 9.892, de 6 de maio de 2005. Cria a Área de Proteção Ambiental Municipal de Uberaba – APA do Rio Uberaba – e dá outras providências**. Uberaba, MG, 2005. Disponível em: http://www.uberaba.mg.gov.br/portal/acervo/meio_ambiente/APA/Lei%20Mun%209892%20Criacao%20APA%20605%20-%202005.pdf. Acesso em: 22 maio 2025

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA. **A história da cana-de-açúcar: da antiguidade aos dias atuais**. Araçatuba, UDOP, 2003. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2003/01/01/a-historia-da-cana-de-acucar-da-antiguidade-aos-dias-atuais.html>. Acesso em: 17 abr. 2025.

VALERA, C. A.; VALLE JUNIOR, R. F.; VARANDAS, S. G. P.; SANCHES FERNANDES, L. F.; PACHECO, F. A. L. The role of environmental land use conflicts in soil fertility: A study on the Uberaba River basin, Brazil. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 562, p. 463–473, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.046>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969716307264?via%3Dihub>. Acesso em: 17 abr. 2025.

VALLE JUNIOR, R. F.; GALBIATTI, J. A.; PISSARRA, T. C. T.; MARTINS FILHO, M. V. Diagnosis of Conflict of Land Use and Occupancy of River Basin. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 6, p. 40–52, 2013. <http://dx.doi.org/10.14688/1984-3801.v06n01a04>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/263367591_Diagnostico_do_Conflito_de_Uso_e_Ocupacao_do_Solo_na_Bacia_do_Rio_Uberaba. Acesso em: 17 abr. 2025.

VALLE JUNIOR, R. F.; VARANDAS, S. G. P.; PACHECO, F. A. L.; PEREIRA, V. R.; SANTOS, C. F.; CORTES, R. M. V.; SANCHES FERNANDES, L. F. Impacts of land use conflicts on riverine ecosystems. **Land Use Policy**, Reino Unido, v. 43, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.10.015>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837714002324?via%3Di> hub. Acesso em: 17 abr. 2025.

VALLE JUNIOR, R. F.; VARANDAS, S. G. P.; SANCHES FERNANDES, L. F.; PACHECO, F. A. L. Environmental land use conflicts: A threat to soil conservation. **Land Use Policy**, Reino Unido, v. 41, p. 172–185, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.05.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837714002324?via%3Di> hub. Acesso em: 17 abr. 2025.

VALLE JUNIOR, R. F.; VARANDAS, S. G. P.; SANCHES FERNANDES, L. F.; PACHECO, F. A. L. Groundwater quality in rural watersheds with environmental land use conflicts. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 493, p. 812–827, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.068>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969714009413?via%3Di> hub. Acesso em: 17 abr. 2025.

VIANNA, N. B.; PEREIRA, T. T. C.; OLIVEIRA, F. S.; CAMPOS, C. A. A. Pedogeomorfologia, micromorfologia e uso dos solos no Triângulo Mineiro. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Uberlândia, v. 10, n. 1, p. 47-66, jan./jun. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/52435/2/pedogeomorfologiamicromorfologiaeusodossolos.pdf>. Acesso em: 22 maio 2025.

VICENTE, L. E.; GOMES, D.; VICTORIA, D. de C.; GARÇON, E. A. M.; BOLFE, É. L.; GUIMARÃES, R. G.; SILVA, G. B. S. Séries temporais de NDVI do sensor SPOT Vegetation e algoritmo SAM aplicados ao mapeamento de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 10, p. 1333–1341, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900019>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/fBLgmDXjgwCYmMzrKT797CP/?lang=pt>. Acesso em: 22 maio 2025.

YU, L.; LIU, J. Impacts of intensive sugarcane farming on vegetation dynamics in tropical regions. **Agricultural Systems**, Amsterdã, v. 180, p. 102789, 2022. DOI: [10.1016/j.agsy.2022.102789](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.102789). Disponível em: <https://www.mdpi.com/2300-7575/25/2/13>. Acesso em: 22 maio 2025.