



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ÍNDICE COMPOSTO DE QUALIDADE AMBIENTAL DO PARQUE
ESTADUAL DOM OSÓRIO STOFFEL (MT) E ENTORNO DA ÁREA DE
CONSERVAÇÃO**

AMANDA FREITAS SILVA GARCIA

RONDONÓPOLIS – MT

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**ÍNDICE COMPOSTO DE QUALIDADE AMBIENTAL DO PARQUE
ESTADUAL DOM OSÓRIO STOFFEL (MT) E ENTORNO DA ÁREA DE
CONSERVAÇÃO**

AMANDA FREITAS SILVA GARCIA
BIÓLOGA

Orientador: Prof. Dr. Normandes Matos da Silva.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Rondonópolis, Mato Grosso, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

RONDONÓPOLIS – MT

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte

Ficha Catalográfica elaborada de forma automática com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

G216Í Garcia, Amanda Freitas Silva.
ÍNDICE COMPOSTO DE QUALIDADE AMBIENTAL DO
PARQUE ESTADUAL DOM OSÓRIO STOFFEL (MT) E
ENTORNO DA ÁREA DE CONSERVAÇÃO [recurso eletrônico] /
Amanda Freitas Silva Garcia. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 63 f.,
il. color., pdf). – 2026.

Orientador(a): Normandes Matos da Silva.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Rondonópolis,
Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, Rondonópolis, 2026.
Inclui bibliografia.

1. Sensoriamento remoto. 2. Cerrado. 3. Índice espectral. I.
Silva, Normandes Matos da, *orientador*. II. Título.

*Caminhar longe exige escolher bem
quem permanece ao lado.*

AGRADECIMENTOS

Tenho plena certeza de que, sem a minha base familiar, este sonho não teria se concretizado. Aos meus pais, Silmara e Pablo, minha eterna gratidão por estarem sempre ao meu lado em tudo o que já me propus a fazer, pelos valores que me ensinaram e pelo exemplo de vida. Tudo o que faço é para ver orgulho em seus olhos, agora sim, vocês podem se “metidar”.

Agradeço a Giann pela fé inabalável em mim, que, em tantos momentos, foi o impulso necessário para que eu seguisse em frente. Seu apoio e presença constante foram fundamentais ao longo desta trajetória. Esta conquista também é sua.

Aos meus irmãos, Caio e Giovana, e à minha cunhada, Ana Carolina. Tê-los por perto é sinônimo de alegria. A importância que todos vocês têm em minha vida é imensa e incomparável.

Ao professor Dr. Normandes Matos da Silva, deixo meu sincero agradecimento pela dedicação no desenvolvimento deste projeto, pelas oportunidades oferecidas e pela disponibilidade para aceitar ser meu orientador.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e à Universidade Federal de Rondonópolis, deixo meu reconhecimento e agradecimento pelo espaço de aprendizado, pesquisa e crescimento acadêmico.

Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo, essencial para a continuidade e realização desta pesquisa.

RESUMO

A intensificação das pressões antrópicas e climáticas sobre o bioma Cerrado tem comprometido a qualidade ambiental da vegetação, especialmente no entorno de Unidades de Conservação, onde os efeitos de borda e as mudanças no uso do solo são mais evidentes. Nesse contexto, o monitoramento integrado da qualidade ambiental torna-se essencial para subsidiar estratégias de manejo e conservação. Parte-se da hipótese de que a integração de múltiplos índices espectrais em um indicador sintético é capaz de representar de forma mais abrangente as variações espaço-temporais da qualidade ambiental da vegetação. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo aplicar o Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) no entorno do Parque Estadual Dom Osório Stoffel (PEDOS), em Rondonópolis–MT, analisando as transformações ambientais ocorridas entre os anos de 2016 e 2024, em períodos de seca e chuva. Para tanto, foram utilizadas imagens Sentinel-2, processadas em ambiente SIG, a partir das quais foram calculados os índices para avaliar o vigor/densidade da vegetação, umidade, vulnerabilidade a incêndios e senescência. Esses índices foram normalizados, ponderados conforme a sazonalidade climática e integrados para compor o ICQA, posteriormente classificado em cinco níveis qualitativos de qualidade ambiental. Os resultados evidenciaram forte influência da sazonalidade sobre a qualidade ambiental da vegetação. No período seco de 2016, 81,4% da área foi classificada como “Muito Ruim”, percentual que aumentou para 89,46% em 2024, indicando intensificação da degradação ambiental, com redução do vigor vegetativo, da umidade e aumento da senescência. Em contraste, nos períodos chuvosos observou-se maior recuperação sazonal da vegetação, com predomínio das classes “Boa” e “Excelente”, embora sem reversão da tendência geral de perda de qualidade ambiental ao longo do tempo. A análise temporal da Diferença ICQA confirmou a ocorrência de quedas moderadas na qualidade ambiental, inclusive em condições climáticas favoráveis. Conclui-se que o ICQA se mostrou uma ferramenta sensível e eficaz para a integração de múltiplos indicadores espectrais, permitindo monitorar a qualidade ambiental da vegetação no entorno do PEDOS. O índice apresenta potencial para apoiar ações de gestão, planejamento e conservação ambiental, destacando a importância do monitoramento contínuo da zona de amortecimento para a preservação da integridade ecológica do Cerrado.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Cerrado; índice espectral.

ABSTRACT

The intensification of anthropogenic and climatic pressures on the Cerrado biome has compromised the environmental quality of vegetation, particularly in the surroundings of Conservation Units, where edge effects and land-use changes are more pronounced. In this context, integrated monitoring of environmental quality becomes essential to support management and conservation strategies. This study is based on the hypothesis that integrating multiple spectral indices into a synthetic indicator can more comprehensively represent the spatiotemporal variations in vegetation environmental quality. Accordingly, this study aimed to apply the Composite Environmental Quality Index (ICQA) in the surroundings of the Dom Osório Stoffel State Park (PEDOS), located in Rondonópolis, Mato Grosso, Brazil, by analyzing environmental transformations between 2016 and 2024 during dry and rainy seasons. Sentinel-2 imagery was processed in a GIS environment to calculate the NDVI, NDII, PSRI, and NBR indices. These indices were normalized, weighted according to climatic seasonality, and integrated to compose the ICQA, which was subsequently classified into five qualitative levels of environmental quality. The results revealed a strong influence of seasonality on vegetation environmental quality. During the dry season of 2016, 81.4% of the area was classified as “Very Poor”, increasing to 89.46% in 2024, indicating intensified environmental degradation marked by reduced vegetation vigor and moisture and increased senescence. In contrast, during the rainy seasons, greater seasonal vegetation recovery was observed, with predominance of the “Good” and “Excellent” classes, although without reversing the overall trend of environmental quality loss over time. Temporal analysis using the ICQA Difference confirmed the occurrence of moderate declines in environmental quality, even under favorable climatic conditions. It is concluded that the ICQA proved to be a sensitive and effective tool for integrating multiple spectral indicators, enabling the monitoring of vegetation environmental quality in the surroundings of PEDOS. The index shows potential to support environmental management, planning, and conservation actions, highlighting the importance of continuous monitoring of the buffer zone for preserving the ecological integrity of the Cerrado.

Keywords: remote sensing; Cerrado; spectral index.

SUMÁRIO

1. LISTA DE FIGURAS	8
2. LISTA DE TABELAS	10
3. INTRODUÇÃO	10
4. OBJETIVOS	12
4.1. Gerais.....	12
4.2. Específicos	12
5. REVISÃO DE LITERATURA	13
5.1. Contextualização do bioma Cerrado	13
5.2. Aspectos conceituais e legais das Unidades de Conservação do tipo Proteção Integral	13
5.3. Definições de Ecossistemas e Agroecossistemas	15
5.4. Contextualização sobre Parques Nacionais	15
5.5. Sensoriamento remoto aplicado a análise da Qualidade Ambiental.....	16
5.6. Contextualização teórica sobre Índice Composto	17
5.7. Aspectos conceituais do Índice Composto de Qualidade Ambiental.....	17
6. MATERIAL E MÉTODOS	19
6.1. Localização e caracterização da Área de Estudo	19
6.2. Coleta de dados.....	20
6.3. Cálculo do Índice Composto de Qualidade Ambiental.....	22
6.4. Relatório de Diagnóstico Ambiental.....	24
6.5. Análise Temporal	25
6.6. Dados de precipitação e contextualização climática	25
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
7.1. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)	27
7.2. Índice de umidade por diferença normalizada (NDII).....	29
7.3. Índice de senescência da vegetação (PSRI).....	30
7.4. Índice de queimada por diferença normalizada (NBR).....	32
7.5. Índice de qualidade ambiental no período de seca.....	34
7.6. Índice de qualidade ambiental no período de chuva.....	39
7.7. Diferença dos pontos de alerta	42
7.8. Dados de Precipitação de seca 2016 e 2024 no períodos de seca	44
7.9. Dados de Precipitação de chuva 2017 e 2024 nos períodos de chuva	47
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
9. REFERÊNCIAS	52

1. LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo partindo do estado (A) para o município (B), com caracterização do perímetro do parque e da zona de amortecimento (C).....	20
Figura 2 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no período de seca (2016 e 2024).....	27
Figura 3 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no período de chuva (2017 e 2024).....	28
Figura 4 - Índice de Umidade por Diferença Normalizada (NDII) no período de seca (2016 e 2024).....	29
Figura 5 - Índice de Umidade por Diferença Normalizada (NDII) no período de chuva (2017 e 2024).....	30
Figura 6 - Índice de Senescência da Vegetação (PSRI) no período de seca (2016 e 2024).....	31
Figura 7 - Índice de Senescência da Vegetação (PSRI) no período de chuva (2017 e 2024).....	32
Figura 8 - Índice de Queimada por Diferença Normalizada (NBR) no período de seca (2016 e 2024).....	33
Figura 9 - Índice de Queimada por Diferença Normalizada (NBR) no período de chuva (2017 e 2024).....	34
Figura 10 - Dispersão espacial do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) no período de seca (2016).....	35
Figura 11 - Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) classificado no período de seca (2016).....	36
Figura 12 - Dispersão espacial do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) no período de seca (2024).....	37
Figura 13 - Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) classificado no período de seca (2024).....	38
Figura 14 - Dispersão espacial do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) no período de chuva (2017).....	39
Figura 15 - Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) classificado no período de chuva (2017).....	40
Figura 16 - Dispersão espacial do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) no período de chuva (2024).....	41
Figura 17 - Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) classificado no período de chuva (2024).....	42

Figura 18 - Percentual de decréscimo do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) no período de seca (2016–2024)	43
Figura 19 - Percentual de decréscimo do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) no período de chuva (2017–2024).....	44
Figura 20 – Distribuição espacial da precipitação no período seco de 2016	44
Figura 21 – Precipitação no período seco de 2016.....	45
Figura 22 – Distribuição espacial da precipitação no período seco de 2024.....	46
Figura 23 – Precipitação no período seco de 2024.....	46
Figura 24 – Distribuição espacial da precipitação no período chuvoso de 2017.....	48
Figura 25 – Precipitação no período chuvoso de 2017.....	48
Figura 26 – Distribuição espacial da precipitação no período chuvoso de 2024.....	49
Figura 27 – Precipitação no período chuvoso de 2024.....	49

2. LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Datas e períodos sazonais das imagens de satélite utilizadas.....	21
Tabela 2	– Pesos atribuídos aos índices em função do período sazonal.....	23
Tabela 3	– Classes qualitativas do ICQA.....	24
Tabela 4	– Valores máximos e mínimos do NDVI no período de seca (2016 e 2024).....	27
Tabela 5	– Valores máximos e mínimos do NDVI no período de chuva (2017 e 2024)...	28
Tabela 6	– Valores máximos e mínimos do NDII no período de seca (2016 e 2024).....	29
Tabela 7	– Valores máximos e mínimos do NDII no período de chuva (2017 e 2024).....	30
Tabela 8	– Valores máximos e mínimos do PSRI no período de seca (2016 e 2024).....	31
Tabela 9	– Valores máximos e mínimos do PSRI no período de chuva (2017 e 2024).....	32
Tabela 10	– Valores máximos e mínimos do NBR no período de seca (2016 e 2024).....	32
Tabela 11	– Valores máximos e mínimos do NBR no período de chuva (2017 e 2024)...	33
Tabela 12	– Distribuição de áreas por classe do ICQA no período de seca (2016).....	35
Tabela 13	– Distribuição de áreas por classe do ICQA no período de seca (2024).....	38
Tabela 14	– Distribuição de áreas por classe do ICQA no período de chuva (2017).....	40
Tabela 15	– Distribuição de áreas por classe do ICQA no período de chuva (2024).....	42

3. INTRODUÇÃO

O estado de Mato Grosso se destaca nacionalmente na produção e exportação de produtos agropecuários em função de suas extensas áreas territoriais, solos predominantemente planos e profundos, além de um regime climático caracterizado por chuvas regulares. Esses fatores naturais, aliados ao uso crescente de tecnologias avançadas de irrigação, maquinário moderno, políticas setoriais e investimentos em pesquisa científica, resultam em elevados níveis de produtividade por hectare. Como consequência, o estado lidera a produção nacional de soja, milho, carne bovina, algodão e girassol (IMEA, 2022).

Em 2019, a soja representava aproximadamente 49% das áreas agrícolas no Brasil (IBGE, 2020). Entretanto, a conversão de áreas naturais no bioma Cerrado já corresponde a cerca de 11% de todo o desmatamento da vegetação nativa, e a taxa de supressão vegetal nesse bioma apresentou crescimento nos últimos anos (MapBiomas, 2023; INPE, 2023). Esse cenário, associado à crescente demanda global por alimentos e ao aumento populacional, intensifica a pressão sobre o setor agropecuário, exigindo estratégias de desenvolvimento que conciliem produtividade e uso sustentável dos recursos naturais (IPCC, 2022).

O Cerrado se tornou a base nacional de produção e exportação de grãos e criação de animais, contudo, apenas 8,21% de seu território encontra-se legalmente protegido (Caldeira & Parré, 2020). Nesse contexto, as Unidades de Conservação (UCs) desempenham um papel fundamental na preservação da biodiversidade e na manutenção da qualidade dos recursos naturais, especialmente em regiões submetidas a transformações antrópicas (Trevizan & Oliveira, 2022).

De acordo com o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC – Lei nº 9.985/2000), as UCs correspondem a espaços territoriais com restrições quanto ao uso humano, criados com o objetivo de assegurar a conservação e a preservação dos recursos naturais. Para o adequado cumprimento de suas funções, essas áreas devem dispor de instrumentos de gestão, como Plano de Manejo, Conselho Gestor e zonas de amortecimento, criados para mitigar os impactos do efeito de borda e regulamentar o uso sustentável dos recursos naturais (Brasil, 2000).

Diante da intensificação da pressão antrópica sobre os ecossistemas naturais, torna-se essencial a análise da evolução espaço-temporal da qualidade ambiental da vegetação, a fim de compreender os fatores naturais e antropogênicos que influenciam a

dinâmica ecológica, de forma a garantir a proteção dos ecossistemas e o aumento de estratégias eficazes voltadas ao desenvolvimento sustentável (Zhang et al., 2024).

Essas análises podem ser realizadas de forma remota por meio de índices de sensoriamento remoto desenvolvidos para avaliar a qualidade ambiental de áreas específicas. O sensoriamento remoto destaca-se como uma ferramenta estratégica devido à sua eficiência operacional, custo-benefício e ampla cobertura espacial, sendo amplamente utilizado na avaliação da distribuição espacial e das características estruturais da vegetação (Neyns & Canters, 2022).

O uso do sensoriamento remoto está diretamente associado à aplicação integrada de técnicas e ferramentas de geoprocessamento, que possibilitam a análise, manipulação e visualização de dados geográficos por meio de softwares especializados. Os índices de vegetação, por sua vez, consistem em valores derivados da reflectância espectral da superfície terrestre e permitem inferir condições relacionadas ao crescimento e à dinâmica da vegetação (Campos et al., 2024).

Apesar de sua ampla aplicação, os índices de vegetação tendem a representar propriedades específicas da cobertura vegetal, como vigor, estrutura do dossel ou teor de clorofila, podendo resultar em interpretações distintas quando utilizados de forma isolada (Yan et al., 2025). Essa limitação dificulta uma avaliação integrada da qualidade ambiental da vegetação, especialmente em áreas ambientalmente complexas, onde estudos recentes demonstram que abordagens integrativas podem reduzir limitações associadas ao uso isolado de índices espectrais, reforçando o princípio de que a combinação de múltiplos parâmetros melhora a representação das condições da vegetação (Fan et al., 2024).

Esse mesmo princípio fundamenta o uso de índices compostos, os quais integram diferentes índices de vegetação em um único indicador sintético, permitindo uma avaliação mais abrangente das condições ambientais (Tudorescu et al., 2024). Diante disso, o presente estudo tem como objetivo utilizar o Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) para estimar a qualidade da cobertura vegetal no Parque Estadual Dom Osório Stoffel, localizado no município de Rondonópolis, Mato Grosso, e em sua zona de amortecimento de 2 km.

4. OBJETIVOS

4.1. Gerais

Utilizar o Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) para estimar a qualidade da cobertura vegetal, integrando parâmetros relacionados à densidade da vegetação, umidade vegetal, senescência foliar e vulnerabilidade a incêndios florestais.

4.2. Específicos

- Estabelecer a evolução espaço-temporal da qualidade ambiental no entorno do Parque Estadual Dom Osório Stoffel, considerando períodos de precipitação e de estiagem nos anos de 2016 e 2024, de modo a caracterizar o estado de conservação dos ecossistemas e agroecossistemas da área de estudo.
- Aplicar rotinas automatizadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) visando apoiar e otimizar protocolos de monitoramento ambiental utilizados por profissionais da área.

5. REVISÃO DE LITERATURA

5.1. Contextualização do bioma Cerrado

O Brasil contém uma diversidade de biomas que diferem entre si por gradientes climáticos e de solo, variando de floresta tropical atlântica, floresta tropical seca, savanas e áreas úmidas. O segundo maior bioma da América do Sul, o Cerrado, ocupa aproximadamente 24% da área total do território brasileiro (Rosan et al., 2022). O bioma é considerado um “hotspot” pela sua diversidade de espécies de plantas, com cerca de 10.000 espécies, e aproximadamente 44% das quais são endêmicas (Alencar et al., 2020; Souza, 2021).

É formado por florestas decíduas, semidecíduas, florestas ripárias perenes, bosques de savana e campos abertos. Acredita-se que essa alta biodiversidade do Cerrado seja devido a variação espacial no clima, topografia, disponibilidade de água e qualidade do solo (Silva-Souza et al., 2023).

A ampla diversidade de fatores, como a vasta extensão territorial e a significativa contribuição para os serviços ecossistêmicos, faz do bioma Cerrado um dos principais cenários agrícolas do Brasil. A incorporação de novas terras, por meio da expansão da fronteira agropecuária, tem sido frequentemente utilizada como justificativa para o aumento da produção na região Centro-Oeste (Aguiar et al., 2023).

A dinâmica agrícola do bioma Cerrado tem sido historicamente marcada pela conversão de paisagens naturais em áreas cultivadas e pastagens. Contudo, a partir do início do século XXI, diante do esgotamento de terras disponíveis, escassez de recursos e a intensificação do mercado global de commodities sob o contexto das mudanças climáticas, esse cenário passou por uma transformação significativa (Parreiras et al., 2025).

Paralelamente, o bioma enfrenta pressões antrópicas crescentes, com destaque para a perda acelerada de vegetação nativa resultante da conversão de terras para atividades humanas, que ocorre em ritmo anual aproximadamente duas vezes superior ao observado na Floresta Amazônica. Estima-se que cerca de 60% das pastagens cultivadas no Cerrado brasileiro apresentam algum nível de degradação (Aguiar et al., 2023).

5.2. Aspectos conceituais e legais das Unidades de Conservação do tipo Proteção Integral

A legislação que aborda as questões ambientais brasileiras é estruturada a partir de princípios constitucionais e um conjunto de normas que regulamentam diferentes

aspectos da proteção ambiental e do uso sustentável dos recursos naturais, refletindo em um dos sistemas legais mais desenvolvidos para responder às peculiaridades ambientais do país (Kokke; Custódio, 2023). Entre os principais marcos legislativos, lista-se a Lei nº 9.985/00, que cria o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), estabelecendo um conjunto de diretrizes e procedimentos oficiais que possibilita ao governo federal, estadual e municipal a implantação e gestão de Unidades de Conservação (UCs) (Brasil, 2000).

As categorias de UCs estão divididas em dois grupos: Unidade de Proteção Integral (UC-PI) e Unidade de Uso Sustentável (UC-US), que consistem em treze categorias, cada uma com diferentes formas de manejo do ambiente e utilização dos recursos naturais. Essas diferenças impactam diretamente na maneira como estão correlacionados aspectos socioeconômicos e aspectos ambientais no interior e no entorno de cada UC (Brasil, 2000; Videira et al., 2024).

As Unidades de Proteção Integral (UC-PI) têm como objetivo preservar a natureza, autorizando apenas o uso indireto dos seus recursos naturais para fins de pesquisas científicas, educação ambiental, e turismo ecológico, sendo composto pelas categorias: Estação Ecológica (ESEC); Reserva Biológica (REBIO); Parque Nacional (PARNA); Monumento Natural (MN); e Refúgio de Vida Silvestre (REVIS) (Cerezini & Castro, 2022).

Geralmente os parques são constituídos em locais onde há a presença significativa de recursos naturais, assim como remanescentes florestais e hídricos que possam proporcionar recreação e pesquisa (Videira et al., 2024). O Parque Estadual Dom Osório Stoffel foi criado em 12 de novembro de 2002, com o intuito de garantir a proteção dos recursos hídricos, de espécies da fauna e flora nativa, preservando amostra representativa dos ecossistemas existentes na área e proporcionando oportunidades controladas para uso público (Mato Grosso, 2002).

Para uma gestão eficaz das unidades de conservação, o diagnóstico e o monitoramento das mudanças no uso e cobertura do solo são essenciais para identificar tendências de degradação e subsidiar decisões de manejo e políticas de conservação (Schmitz; Couto; Xavier, 2023). De acordo com a Lei Federal Nº 9.985, a integridade das UCs depende da criação das Zonas de Amortecimento (ZA) ou “Zonas Tampão”, que consiste em delimitações com o propósito de minimizar os impactos negativos externos no entorno das UCs (Brasil, 2000).

5.3. Definições de Ecossistemas e Agroecossistemas

O conceito de Ecossistema foi estruturado por Tansley (1935), como sistemas físico-biológicos integrados, constituídos pela interação entre organismos e seu ambiente abiótico. Para o autor, esses sistemas representam as unidades fundamentais da natureza, como solo, água e clima. Enquanto Currie (2011) destaca que ecossistemas devam ser compreendidos como um conjunto de processos integrados, envolvendo produção, ciclagem de nutrientes, respiração e a decomposição, que ocorrem em múltiplas escalas e se associam aos processos sociais e econômicos.

Contudo, a noção de agroecossistema surge como expressões específicas da interação entre sociedade e natureza. Práticas agroecológicas estão diretamente relacionadas ao fornecimento de serviços ecossistêmicos, como controle biológico, fertilidade do solo, polinização e regulação hídrica (Santos; Vestena, 2024). Entretanto, dimensões sociais e políticas da agroecologia ainda são pouco exploradas, o que limita a adoção plena do conceito em políticas públicas e práticas de manejo (Palomo-Campesino et al., 2018).

5.4. Contextualização sobre Parques Nacionais

Os Parques nacionais são uma das categorias de unidades de conservação, classificados como unidades de proteção integral, tendo como objetivo básico a preservação de ecossistemas naturais de grande relevância ecológica e beleza cênica (Brasil, 2000). O conceito foi alterado diversas vezes ao longo dos anos, resultando em diferentes classificações que passaram a seguir as particularidades de cada estado e município. No Brasil, a criação de Parques obteve relevância durante a história das Unidades de Conservação (UC), e uma vez aceitos, tornaram-se importantes para a preservação da natureza e promoção de atividades científicas e turísticas (Ratton & Ramos, 2024).

Geralmente são constituídos em locais onde há a presença significativa de recursos naturais, assim como remanescentes florestais e hídricos que possam proporcionar recreação e pesquisa (Videira et al., 2024). O Parque Estadual Dom Osório Stoffel (PEDOS), por exemplo, foi criado em 12 de novembro de 2002 (Mato Grosso, 2002). Possui 6.491,31 ha, e está em uma região de Cerrado que abrange tanto a nascente como a calha do rio Ponte de Pedra até seu encontro com o rio Vermelho (IBGE, 2002).

5.5. Sensoriamento remoto aplicado a análise da Qualidade Ambiental

A rápida urbanização e o crescimento socioeconômico têm promovido alterações significativas no uso e ocupação da terra, impulsionadas principalmente pela expansão agrícola e urbana (Huang et al., 2022). Esse processo resulta em um dos principais vetores da perda de biodiversidade terrestre, comprometendo diretamente a integridade dos serviços ecossistêmicos, que são definidos como os benefícios essenciais fornecidos pelos ecossistemas aos seres vivos (Huang et al., 2022).

Segundo Li et al. (2020), existe a necessidade de monitorar a qualidade ambiental e as principais modificações espaço-temporais do ecossistema, para proteger e gerir os recursos naturais de forma eficiente, e dessa forma, alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável. Mas infelizmente, as técnicas de análise e medições in situ que eram tradicionalmente utilizadas no monitoramento ambiental geralmente são pouco eficientes em termos de tempo e mão de obra (Li et al., 2020).

Nos últimos anos, a avaliação dos ecossistemas e agroecossistemas foi impulsionada pelo avanço das tecnologias de observação da Terra, através de geoprocessamento (Sishodia et al., 2020). Diante disso, o sensoriamento remoto é uma das tecnologias mais revolucionárias para a observação da Terra, e projetos como o Sentinel-2 da Agência Espacial Europeia, são ferramentas que se tornaram acessíveis para pesquisadores e gestores em todo o mundo (Li et al., 2020). Entretanto, para avaliar e monitorar técnicas de regeneração da vegetação, reflorestamento, ajustar medidas de mitigação para a restauração ambiental, garantindo a eficiência dos projetos de recuperação ambiental (Silva et al., 2021), é necessário a análise de vários índices espectrais.

Devido à diversidade e complexidade dos ecossistemas, um único índice não pode refletir de forma abrangente a qualidade ambiental ecológica (Keith et al., 2022). Entre esses índices que mais vem se destacando nesse estudo tem-se o ICQA (Índice Composto de Qualidade Ambiental), que agrega informações de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), NDII (Índice de Umidade por Diferença Normalizada), NBR (Índice de Queimada por Diferença Normalizada) e PSRI (Índice de Senescência da Vegetação), oferecendo um diagnóstico da qualidade ambiental, para ser utilizado em projetos de monitoramento e recuperação ambiental.

5.6. Contextualização teórica sobre Índice Composto

Índices compostos são métricas espectrais que surgem da combinação de dois ou mais métodos ou índices pré-existentes, geralmente a partir de abordagens empíricas testando a sinergia entre variáveis espectrais ou estatísticas, extraídas do processamento de bandas de imagens de satélite, para realizar uma estimativa de atributos da vegetação, para melhorar o poder explicativo em relação a índices isolados (Kumar et al., 2011).

A construção envolve selecionar índices, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) ou bandas espectrais, que respondem a diferentes fatores ambientais como teor clorofila, estresse hídricos, vegetal ou umidade do solo, organizando-os em relações matemáticas, como as razões entre bandas (Zhao & Huang, 2017).

Ao reunir variáveis com sensibilidades distintas, um índice composto pode elevar a acurácia na predição de parâmetros como umidade vegetal, perda foliar e teor clorofila, reduzindo a necessidade de medições exaustivas in situ (vistorias terrestres), já que pode servir como um insight para estabelecimento de medidas de manejo preventivas numa dada área, sendo que o componente estatístico ajusta essas predições, permitindo generalizações (Kumar et al, 2015).

Os índices compostos têm potencial para ampliar a robustez das estimativas remotas, ao integrar sensibilidades complementares a diferentes variáveis do ambiente, como umidade relativa do ar, fogo e excesso de pluviosidade, mas exigem cautela nas suas generalizações (Abdelbaki & Udelhoven, 2022).

5.7. Aspectos conceituais do Índice Composto de Qualidade Ambiental

O Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) é um indicador calculado por meio de diferentes índices espectrais a partir de imagens obtidas do Sentinel-2, sendo aplicado para análise ambiental de áreas nativas e sistemas agrícolas no nível de pixel. A utilização de sensores remotos orbitais e suborbitais, inclusive embarcados em drones, tem se mostrado estratégica tanto em pesquisas acadêmicas quanto em aplicações práticas, permitindo avaliações da qualidade ambiental de rápida e em alta resolução espacial (Silva et al., 2024).

O ICQA é viabilizado via código Python e utiliza bibliotecas como PyQGIS, GDAL e NumPy, facilitando o processamento e a integração de dados geoespaciais. O índice é gerado a partir de uma equação previamente definida que conta com quatro

índices espectrais, todos obtidos pela Diferença entre bandas Sentinel 2A. Então, o índice é derivado dos índices NDVI, NDII, PSRI e NBR (Kim et al., 2021).

- **Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)**

Função: Calcular o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes resoluções, sendo fundamental para monitoramento da saúde da vegetação e análise de queimadas, conforme discutido em trabalhos aplicados no Pantanal. O NDVI pode variar de -1 a +1, onde os maiores valores indicam mais vigor vegetativo, e os mais próximos de 0 indicam menos vegetação fotossinteticamente ativa.

- **Normalized Difference Infrared Index (NDII)**

Função: Mede a umidade da vegetação e do solo usando bandas NIR e SWIR, importante para o monitoramento de estresse hídrico e diagnóstico de áreas agrícolas. O Índice de umidade por diferença normalizada (NDII) apresenta valores teóricos entre -1 e +1, sendo que valores mais próximos de +1 indicam maior conteúdo hídrico na vegetação e no solo, enquanto valores próximos de -1 refletem baixa umidade e possível estresse hídrico (Abdelbaki & Udelhoven, 2022).

- **Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)**

Função: Calcular o índice PSRI, usado para avaliar senescência foliar e alterações nos pigmentos das plantas, contribuindo para diagnósticos ambientais de áreas sob degradação. O Índice de senescência da vegetação (PSRI) apresenta valores teóricos que podem variar aproximadamente de -1 a +5, sendo que valores mais altos indicam maior senescência foliar, ou seja, degradação dos pigmentos verdes (clorofila) e aumento relativo de pigmentos como carotenoides (Abdelbaki & Udelhoven, 2022).

- **Normalized Burn Ratio (NBR)**

Função: O Índice de queimada por diferença normalizada (NBR) é amplamente utilizado para detectar áreas queimadas, sendo eficiente na distinção entre vegetação sadia e queimada, como mostrado em estudos no Pantanal. O índice apresenta valores teóricos entre -1 a +1. Valores mais altos indicam vegetação densa e saudável, enquanto valores baixos ou negativos estão associados a áreas queimadas, solo exposto ou vegetação severamente degradada (Silva, 2021).

6. MATERIAL E MÉTODOS

6.1. Localização e caracterização da Área de Estudo

A unidade de conservação objeto de estudo é denominada Parque Estadual Dom Osório Stoffel (PEDOS), localizado no município de Rondonópolis, na região sudeste do estado de Mato Grosso ($16^{\circ}35'49,09''S$; $54^{\circ}45'19,97''W$) (IBGE, 2002). Esta Unidade de Conservação (UC) foi criada por meio da Lei Estadual nº 5.437, de 12 de novembro de 2002 (Mato Grosso, 2002), e integra a categoria de Proteção Integral do Sistema Nacional de Unidades de Conservação.

O parque possui área de 6.491,31 ha e perímetro de 69,07 km, apresentando paisagens compostas por cursos d'água, cachoeiras, paredões rochosos e fitofisionomias típicas do bioma Cerrado, constituindo um importante fragmento florestal para a manutenção ambiental regional. De acordo com o Plano de Manejo, a UC apresenta Zona de Amortecimento (ZA) com larguras variáveis: 100 m na região Norte; 300 m na região Leste, exceto na área do aeroporto, onde a ZA é de 600 m; 300 m na região Sul e 300 m na região Oeste (Mato Grosso, 2024).

Do ponto de vista climático, a área do PEDOS está inserida em região de clima tropical do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por estação chuvosa no verão, entre novembro e abril, e estação seca bem definida no inverno, de maio a outubro. A temperatura média anual é em torno de 25 °C, com precipitações anuais variando entre 750 mm e 1.800 mm, condições que influenciam diretamente a dinâmica ecológica e o regime hidrológico da unidade (Mato Grosso, 2024).

Quanto aos aspectos pedológicos, predominam no parque Solos Litólicos, Areias Quartzosas, Latossolos e Solos Aluviais. Os solos litólicos ocorrem principalmente em áreas de maior declividade, enquanto as areias quartzosas, pobres em nutrientes e com baixa retenção hídrica, são comuns em áreas mais planas. Os latossolos apresentam boas condições físicas e drenagem eficiente, e os solos aluviais estão associados às margens dos cursos d'água, desempenhando papel importante na dinâmica ecológica do parque (Mato Grosso, 2024).

Para o presente estudo, adotou-se um buffer de 2 km ao redor do Parque Estadual Dom Osório Stoffel (PEDOS) para o cálculo do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA). Essa delimitação corresponde a uma opção metodológica, definida a partir da necessidade de contemplar uma área espacialmente representativa do entorno da unidade de conservação. A escolha desse raio buscou garantir uma base territorial

adequada para a análise, evitando um recorte espacial excessivo, conforme ilustrado na Figura 1.

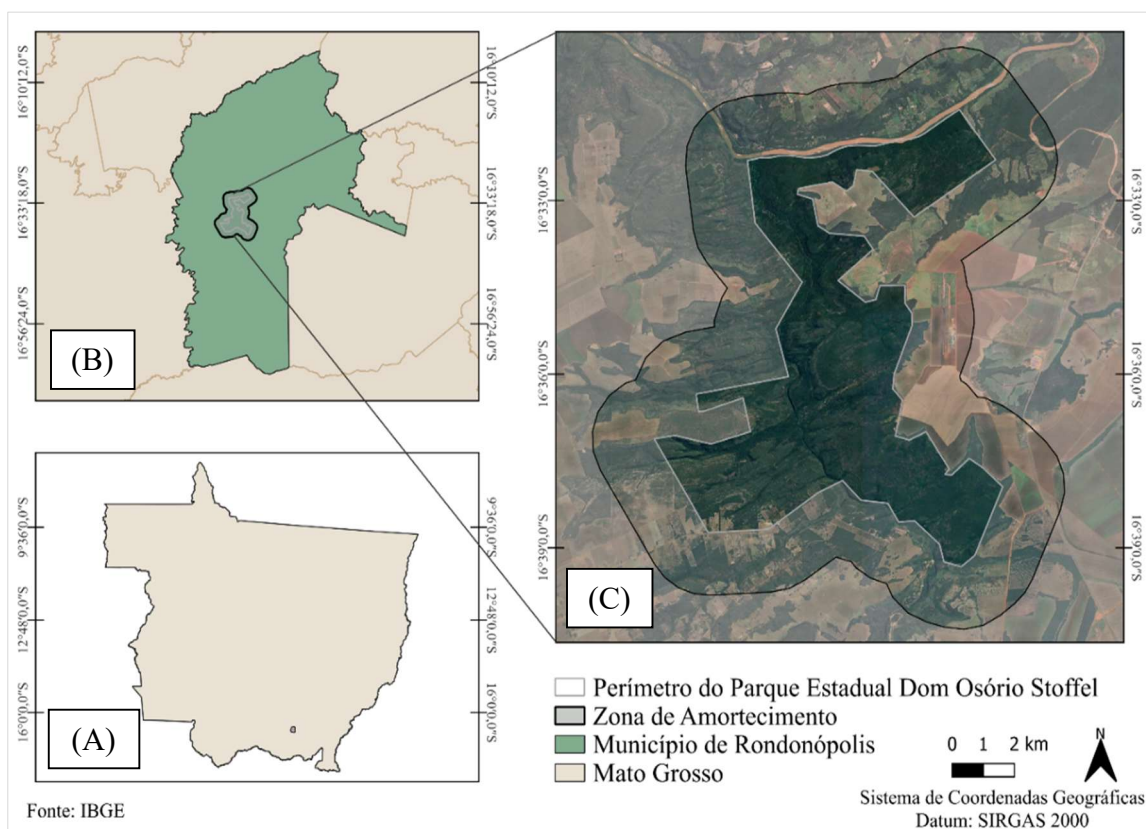


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo partindo do estado (A) para o município (B), com caracterização do perímetro do parque e da zona de amortecimento (C).

Fonte: Autora, 2025.

6.2. Coleta de dados

As imagens de satélite utilizadas neste estudo foram obtidas por meio da plataforma Copernicus, no site <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2>, onde estão disponíveis as imagens de satélite de forma gratuita, selecionadas por período de eventos climáticos extremos de seca e chuva.

Para minimizar interferências associadas à cobertura de nuvens e potencializar a identificação da vegetação e das alterações no uso do solo, foi selecionada manualmente uma imagem de satélite para cada data de coleta, conforme apresentado na Tabela 1. No entanto, para o ano de 2016, as imagens disponíveis para o período chuvoso apresentaram elevada cobertura de nuvens, o que inviabilizaria o processamento e a análise das informações espectrais. Diante dessa limitação, optou-se por utilizar uma imagem representativa do período chuvoso do ano de 2017, mantendo-se a imagem do período seco de 2016, de modo a garantir a qualidade dos dados e, simultaneamente, preservar um intervalo temporal adequado para a análise comparativa entre os anos de 2016 e 2024.

Tabela 1 - Datas e períodos sazonais das imagens de satélite utilizadas

Ano	Data	Período
2016	27/08/2016	Seca
2017	24/04/2017	Chuva
2024	05/08/2024	Seca
2024	28/01/2024	Chuva

Fonte: Autora, 2025.

Em 27 de agosto de 2016, os registros meteorológicos da estação do Instituto Nacional de Meteorologia indicaram ausência de precipitação, temperatura máxima próxima de 36,7 °C, temperatura média diária em torno de 27,5 °C e umidade relativa média de aproximadamente 47%. Esse conjunto de condições caracteriza de forma consistente o período seco na região do Cerrado, associado a maior estresse hídrico da vegetação e maior exposição do solo, aspectos relevantes para a interpretação das respostas espectrais observadas nas imagens de satélite (INMET, 2016).

De maneira distinta, em 24 de abril de 2017, embora não tenha sido registrado precipitação, os dados indicaram temperatura máxima em torno de 33,5 °C, temperatura média diária aproximada de 25,7 °C e umidade relativa média elevada, cerca de 77,2%. Esses valores refletem condições típicas do final da estação chuvosa, favorecendo maior vigor da vegetação e menor exposição do solo (INMET, 2017).

Para 05 de agosto de 2024, os dados meteorológicos evidenciaram novamente ausência de precipitação, associada a temperatura máxima de aproximadamente 34,7 °C, temperatura média diária em torno de 24,9 °C e umidade relativa média de cerca de 46,1%. Esse cenário reforça o padrão climático da estação seca regional, marcado por baixa disponibilidade hídrica, intensificação do estresse vegetal e maior exposição do solo (INMET, 2024).

Já em 28 de janeiro de 2024, os dados disponíveis da estação indicaram ausência de precipitação registrada. Para essa data, não houve disponibilidade de registros válidos de temperatura do ar e umidade relativa, conforme a base de dados do INMET. Optou-se por manter a data em função da qualidade da imagem de satélite, reconhecendo-se a limitação dos dados meteorológicos pontuais, sem comprometer a análise sazonal. Ainda assim, janeiro é climatologicamente caracterizado por elevada umidade atmosférica e intensa atividade convectiva, contexto relevante para a interpretação das respostas espectrais observadas nas imagens de satélite (INMET, 2024).

Para o cálculo do ICQA, foram utilizadas imagens multitemporais do Sentinel-2 dos anos de 2016, 2017 e 2024, com resolução espacial de 10 a 20 metros. Após o

download, as cenas foram organizadas e preparadas no software QGIS, sendo convertidas para o sistema de coordenadas UTM Zona 21S – Datum SIRGAS 2000, garantindo alinhamento com a base cartográfica utilizada no estudo.

6.3. Cálculo do Índice Composto de Qualidade Ambiental

A análise da qualidade ambiental da área de estudo foi realizada por meio do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA), desenvolvido no Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal de Rondonópolis (UFR). O índice reúne informações espectrais derivadas de quatro índices principais: NDVI (vigor da vegetação), NDII (conteúdo hídrico/estresse hídrico), NBR (ocorrência e severidade de queimadas) e PSRI (grau de senescência foliar) (Fan et al., 2024; Kumar et al., 2025).

As imagens utilizadas foram previamente corrigidas geometricamente e recortadas a partir de um buffer de 2 km em torno do Parque Estadual Dom Osório Stoffel, abrangendo a área de influência da unidade de conservação. Inicialmente, realizou-se a seleção das bandas espectrais (B2, B4, B8, B11 e B12) e o recorte com base no polígono de estudo. Cada índice foi calculado segundo as equações 1, 2, 3 e 4.

(1) $NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})}$	(2) $NDII = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{SWIR})}{(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR})}$
(3) $NBR = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{SWIR2})}{(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR2})}$	(4) $PSRI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{BLUE})}{(\rho_{NIR})}$

Em que:

- ρ_{NIR} = reflectância na faixa do infravermelho próximo;
- ρ_{RED} = reflectância na faixa do vermelho;
- ρ_{SWIR} = reflectância no infravermelho de ondas curtas (primeira faixa);
- ρ_{SWIR2} = reflectância no infravermelho de ondas curtas (segunda faixa);
- ρ_{BLUE} = reflectância na faixa do azul.

Sendo que “ ρ ” consiste na porcentagem de energia emitida por um objeto, em determinado comprimento de onda, sendo denominado simplesmente de refletância (ρ) (Baptista, 2021).

Após o cálculo individual, cada índice espectral foi normalizado para a mesma escala e sentido, garantindo sua comparabilidade na composição do índice (Fan et al., 2024; Nativel & Ayari, 2022; Kumar et al., 2025). A normalização converteu os valores para o intervalo de 0 a 1, de modo que valores mais elevados representassem melhores

condições ambientais. No caso do PSRI, foi aplicada uma inversão após a normalização, assegurando coerência entre os índices, de forma que valores mais altos indicassem condições ambientais mais favoráveis (Zhang et al., 2018).

A metodologia do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) prevê, de forma opcional, a atribuição de pesos aos índices normalizados, com valores variando de 1 a 3, conforme a ênfase analítica desejada. Essa ponderação permite ajustar a contribuição relativa de cada índice de acordo com os processos ambientais predominantes no período analisado, como vigor vegetativo, umidade, senescência ou impactos por queimadas, conforme ilustrado na Tabela 2 (LAGEO, 2025).

Tabela 2 - Pesos atribuídos aos índices em função do período sazonal

	Pesos atribuídos	
	Período de seca	Período de chuva
NDVI	1	3
NDII	1	3
NBR	3	1
PSRI	3	1

Fonte: Autora, 2025.

A integração dos índices é realizada por meio de uma média ponderada, na qual cada índice normalizado é multiplicado por seu respectivo peso, e o resultado é dividido pela soma total dos pesos, conforme descrito na Equação 5 (LAGEO, 2025).

$$(5) \text{ ICQA} = \frac{(w_1 \cdot \text{NDVI}_{\text{norm}} + w_2 \cdot \text{NDII}_{\text{norm}} + w_3 \cdot \text{NBR}_{\text{norm}} + w_4 \cdot \text{PSRI}_{\text{norm}})}{(w_1 + w_2 + w_3 + w_4)}$$

Em que:

- $\text{NDVI}_{\text{norm}}$ = índice de vegetação normalizado;
- $\text{NDII}_{\text{norm}}$ = índice de umidade normalizado;
- NBR_{norm} = índice de queimadas normalizado;
- $\text{PSRI}_{\text{norm}}$ = índice de senescência da vegetação normalizado;
- w_i = peso atribuído a cada índice, podendo variar de 1 a 3 conforme a relevância no período analisado.

Após a integração ponderada, o ICQA é reescalado para o intervalo de -1 a $+1$, mantendo a proporcionalidade dos valores e facilitando a interpretação dos resultados, em que valores próximos a -1 indicam piores condições ambientais, valores próximos a 0 representam condição média ou neutra, e valores próximos a $+1$ correspondem às melhores condições ambientais (LAGEO, 2025).

-1	→ Pior condição ambiental
0	→ Média/neutra
+1	→ Melhor condição ambiental

O resultado final consiste em um raster georreferenciado, no qual cada pixel representa uma área no solo correspondente a 20×20m, ao qual é atribuído o valor do ICQA calculado. Para fins de interpretação, a escala contínua do índice foi organizada em classes qualitativas (LAGEO, 2025), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Classes qualitativas do ICQA

Intervalo	Rótulo
< 0,2	Muito Ruim
0,2 – 0,4	Ruim
0,4 ≤ – < 0,6	Moderada
0,6 ≤ – < 0,8	Boa
≥ 0,8	Excelente

Fonte: Fonte: Autora, 2025.

6.4. Relatório de Diagnóstico Ambiental

Para a interpretação dos resultados, o código do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) gera automaticamente um Relatório de Diagnóstico Ambiental, no qual são sintetizadas as principais estatísticas descritivas do raster processado. Esse relatório inclui os valores mínimo, máximo, média e desvio-padrão dos pixels, permitindo resumir de forma objetiva a condição ambiental da área analisada, conforme a metodologia proposta para o ICQA (LAGEO, 2025).

O valor mínimo representa o pixel associado às condições ambientais mais críticas, enquanto o valor máximo indica a melhor condição ambiental identificada na área de estudo. A média atua como um indicador síntese da qualidade ambiental, representando o comportamento geral da área analisada, ao passo que o desvio-padrão expressa o grau de heterogeneidade espacial, indicando se os valores estão concentrados em torno da média ou se apresentam elevada variabilidade interna.

Adicionalmente, o relatório associa o valor médio do ICQA a uma classificação qualitativa padronizada, organizada em cinco categorias: Muito Ruim (<0,2), Ruim (0,2–0,4), Moderada (0,4–0,6), Boa (0,6–0,8) e Excelente (≥0,8). Essa classificação tem por objetivo traduzir os valores numéricos do índice em categorias de interpretação mais intuitiva, facilitando tanto a análise científica quanto o apoio à tomada de decisão no

âmbito da gestão ambiental, conforme descrito na metodologia do ICQA (LAGEO, 2025; Fan et al., 2024).

6.5. Análise Temporal

Para analisar a dinâmica temporal da qualidade ambiental, foi utilizado o modelo Diferença_ICQA, que consiste na comparação dos valores do Índice Composto de Qualidade Ambiental entre dois momentos distintos no tempo, correspondentes às datas de aquisição das imagens de satélite. Nesse contexto, T1 representa o tempo inicial da análise, associado às imagens dos anos de 2016 (período seco) e 2017 (período chuvoso), enquanto T2 corresponde ao tempo posterior, representado pelas imagens do ano de 2024, selecionadas nos mesmos períodos sazonais (LAGEO, 2025).

O cálculo da Razão_ICQA é realizado por meio da diferença pixel a pixel entre os valores do índice nos dois momentos temporais, conforme a Equação 6:

$$(6) \text{Diferença_ICQA} = \text{ICQA_T2} - \text{ICQA_T1}$$

Em que:

- ICQA_T1 corresponde ao valor do índice no tempo inicial (época de coleta T1);
- ICQA_T2 corresponde ao valor do índice no tempo posterior (época de coleta T2);
- Diferença_ICQA expressa a variação da qualidade ambiental entre os dois momentos.

Valores positivos da Diferença_ICQA indicam melhoria na condição ambiental do pixel ao longo do tempo, enquanto valores negativos representam piora da qualidade ambiental. Valores próximos de zero sugerem estabilidade, sem alterações significativas entre os períodos analisados (LAGEO, 2025).

Adicionalmente, para a identificação de áreas críticas, foi utilizado o Percentual de Decréscimo do ICQA, calculado a partir da variação relativa entre os valores iniciais e finais do índice. Pixels que apresentaram perdas iguais ou superiores a 25% foram classificados como pontos de alerta, por indicarem reduções expressivas na qualidade ambiental ao longo do período analisado (LAGEO, 2025).

6.6. Dados de precipitação e contextualização climática

Para contextualizar climaticamente as datas selecionadas das imagens Sentinel-2 (seca e chuva) e apoiar a interpretação dos padrões espaciais do ICQA, foram utilizados dados diários de precipitação do produto MERGE (CPTEC/INPE), que combina estimativas por satélite com observações de estações, produzindo campos contínuos de chuva (mm/dia) (INPE, [s.d.]).

Os arquivos do MERGE foram obtidos no repositório oficial do CPTEC em formato GRIB2, padrão amplamente empregado em meteorologia para armazenamento eficiente de variáveis georreferenciadas em grade, com metadados estruturados e organização adequada para séries temporais operacionais (World Meteorological Organization, 2019).

O processamento foi realizado em ambiente Python (estrutura em pipeline para reprodutibilidade), utilizando biblioteca específica para leitura de GRIB2 (ex.: pygrib) para extrair, dia a dia, o campo de precipitação e suas coordenadas (latitude/longitude). Em seguida, o município de interesse foi definido a partir de malha oficial, e o polígono municipal foi utilizado para mascarar a grade (seleção dos pixels internos/associados ao município), permitindo o cálculo de uma estatística diária representativa da precipitação municipal e a geração de uma série temporal diária exportada em formato tabular.

Adicionalmente, a rotina identificou o dia de maior precipitação no período analisado e exportou produtos espaciais para auditoria e integração em SIG: (i) mapa do campo diário com o recorte/contorno municipal e (ii) GeoTIFF georreferenciado do dia mais chuvoso, com recorte espacial otimizado e padronização de valor NoData, garantindo compatibilidade para visualização e análises no QGIS (INPE, [s.d.]; World Meteorological Organization, 2019).

Foram consideradas métricas estatísticas de avaliação amplamente adotadas em estudos hidroclimáticos, como RMSE, PBIAS e RSR, conforme diretrizes clássicas de quantificação de desempenho, e fundamentos de estatística aplicada às ciências atmosféricas para interpretação dos resultados (Moriasi et al., 2007; Wilks, 2011). Esses procedimentos permitiram caracterizar objetivamente o contexto de precipitação associado às imagens utilizadas e fortalecer a discussão da sazonalidade (seca/chuvosa) na análise da qualidade ambiental.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

No período seco, o NDVI apresentou diferenças marcantes entre os anos analisados. Em 2016, os valores variaram entre 0,09 e 0,49, indicando a presença de vegetação com vigor baixo a moderado. Em contraste, no período seco de 2024, o índice apresentou valores significativamente mais baixos, variando entre 0,001 e 0,12, o que evidencia uma redução expressiva da biomassa verde e maior exposição do solo (Tabela 4). Esse padrão sugere que, em 2024, a vegetação esteve mais intensamente impactada durante a estação seca, quando comparada ao ano de 2016.

Tabela 4 - Valores máximos e mínimos do NDVI no período de seca (2016 e 2024)

NDVI SECA 2016	NDVI SECA 2024
Max: 0,49	Max: 0,12
Min: 0,09	Min: 0,001

Fonte: Autora, 2025.

As plantas saudáveis absorvem a maior parte da luz vermelha visível, enquanto suas estruturas celulares refletem a maior parte da luz infravermelha, pois não são absorvidas. De acordo com Silva et al. (2021), isso significa que quanto maior o valor de luz vermelha visível, e menor o valor da luz infravermelha, mais a vegetação está escassa.

A análise espacial do NDVI no período seco (Figura 2) reforça essa interpretação, ao revelar maior predominância de áreas com baixos valores do índice em 2024, indicando menor cobertura vegetal e possível intensificação do estresse hídrico. Em 2016, embora também se observe a influência da estação seca, ainda permanecem áreas com valores intermediários, associadas a fragmentos vegetados mais preservados.

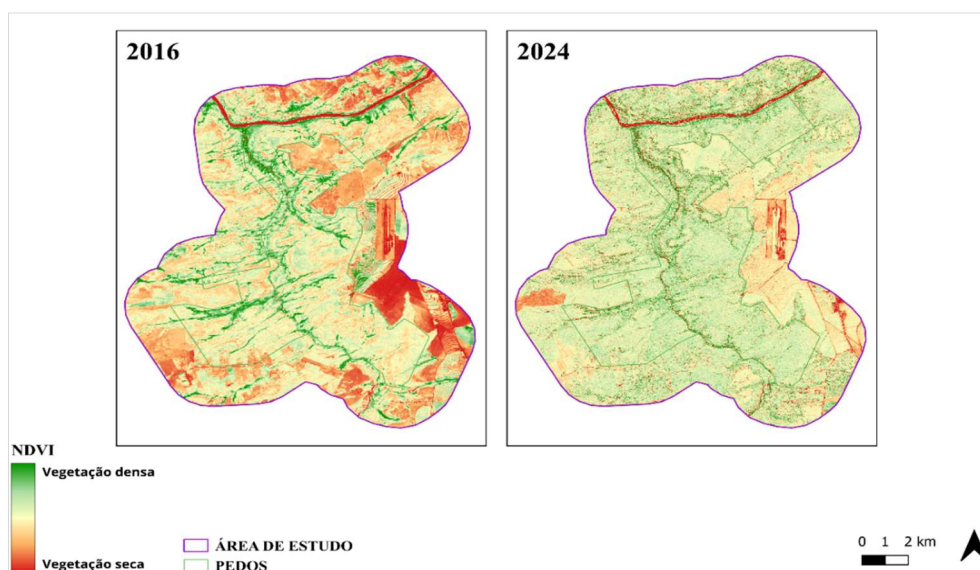


Figura 2 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no período de seca (2016 e 2024)

Fonte: Autora, 2025.

A diferença mais acentuada entre os anos de 2016 e 2024 no período seco sugere que 2024 apresentou condições ambientais mais restritivas, possivelmente associadas a menor disponibilidade hídrica acumulada e a eventos de seca mais intensos ou prolongados. Estudos indicam que anos com déficits pluviométricos acumulados tendem a apresentar quedas mais expressivas nos valores de NDVI, especialmente em regiões de Cerrado, onde a vegetação responde rapidamente à limitação hídrica (Carvalho et al., 2022).

Na Tabela 5, é possível observar que durante a estação chuvosa houve áreas com maiores valores para este índice, para ambos os anos. Importante ressaltar que devido a quantidade de nuvens nesse período no ano de 2016, as imagens de satélite utilizadas nesta etapa do estudo foram de 2017, que obtiveram valores máximos de 0,56 e mínimo de 0,13. Em 2024, os valores diversificaram entre 0,67 e 0,18, conforme ilustrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores máximos e mínimos do NDVI no período de chuva (2017 e 2024)

NDVI CHUVA 2017	NDVI CHUVA 2024
Max: 0,56	Max: 0,67
Min: 0,13	Min: 0,18

Fonte: Autora, 2025.

A Figura 3 evidencia que no período chuvoso, o aumento dos valores do NDVI é explicado pelo maior teor de água no solo, que favorece a absorção de nutrientes, o acúmulo de clorofila e a intensificação da atividade fotossintética.

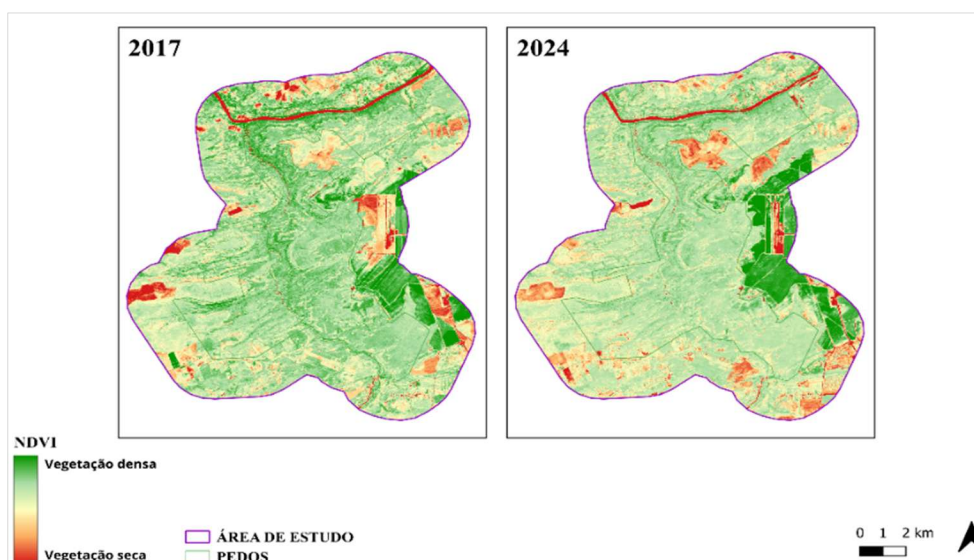


Figura 3 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no período de chuva (2017 e 2024)

Fonte: Autora, 2025.

Quanto maior o teor de clorofila nos tecidos vegetais, maior é a reflectância do dossel no infravermelho próximo, resultando em valores mais elevados do NDVI (Peng,

2017). Esse padrão também foi observado por Silva et al. (2023), ao analisarem variações temporais do índice em diferentes contextos climáticos.

7.2. Índice de umidade por diferença normalizada (NDII)

Em 2016, os valores do NDII variaram entre $-0,23$ e $0,18$, indicando predominância de vegetação com umidade moderada a baixa. Em 2024, no mesmo período sazonal, o índice apresentou variação semelhante, entre $-0,21$ e $0,17$, evidenciando um padrão consistente de limitação hídrica durante a estação seca nos dois anos analisados, conforme apresentado na Tabela 6. A distribuição espacial do NDII no período seco (Figura 4) revela a predominância de valores baixos, associados a áreas com menor conteúdo hídrico na vegetação e maior exposição ao estresse hídrico.

Tabela 6 - Valores máximos e mínimos do NDII no período de seca (2016 e 2024)

NDII SECA 2016	NDII SECA 2024
Max: 0,18	Max: 0,17
Min: -0,23	Min: -0,21

Fonte: Autora, 2025.

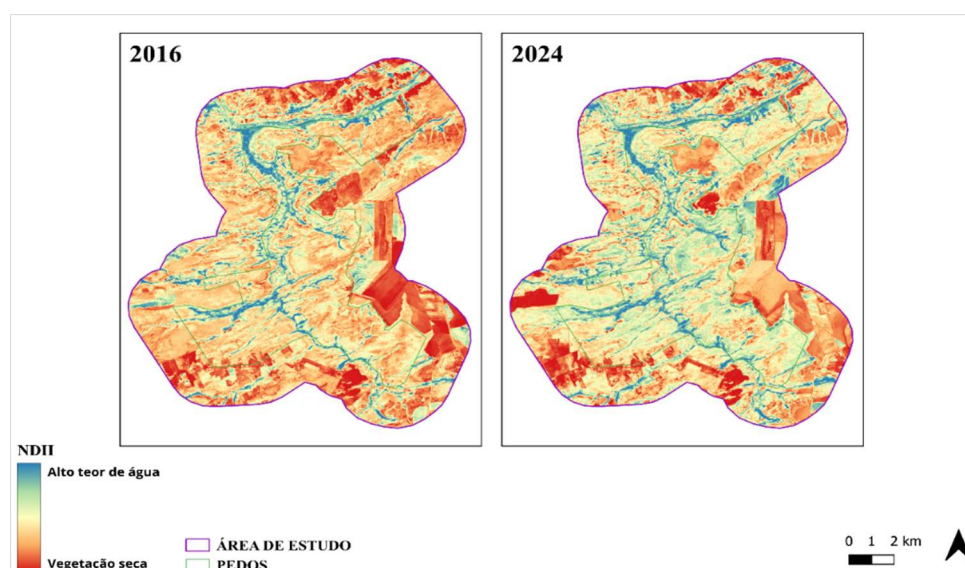


Figura 4 - Índice de Umidade por Diferença Normalizada (NDII) no período de seca (2016 e 2024)

Fonte: Autora, 2025.

Esses resultados confirmam que o NDII é sensível às variações sazonais de umidade, uma vez que o teor de água nos tecidos vegetais influencia diretamente a resposta espectral do índice. Valores mais baixos do NDII estão associados a condições de estresse hídrico, enquanto valores mais elevados indicam maior disponibilidade de água na vegetação, padrão amplamente descrito na literatura (Hossain et al., 2025).

No período chuvoso, observou-se um aumento expressivo dos valores do NDII. Em 2017, os valores oscilaram entre $-0,18$ e $0,20$, enquanto em 2024 variaram de $-0,13$

a 0,33, indicando maior conteúdo de água na vegetação em relação ao período seco (Tabela 7). A análise espacial do índice no período chuvoso (Figura 5) evidencia uma ampliação das áreas com valores positivos, refletindo a resposta da cobertura vegetal ao aumento da disponibilidade hídrica sazonal.

Tabela 7 - Valores máximos e mínimos do NDII no período de chuva (2017 e 2024)

NDII CHUVA 2017	NDII CHUVA 2024
Max: 0,20	Max: 0,33
Min: -0,18	Min: -0,13

Fonte: Autora, 2025.

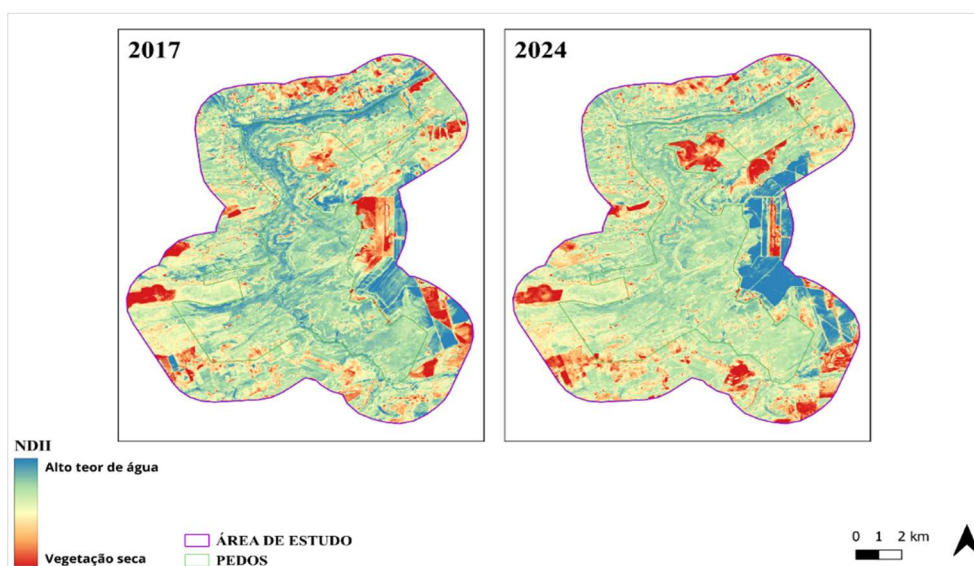


Figura 5 - Índice de Umidade por Diferença Normalizada (NDII) no período de chuva (2017 e 2024)

Fonte: Autora, 2025.

A variabilidade climática, especialmente a frequência e a intensidade das chuvas, exerce papel determinante na elevação dos valores do NDII, favorecendo maior cobertura vegetal e incremento do conteúdo hídrico, conforme observado nos períodos chuvosos analisados e corroborado por estudos recentes que identificaram aumento de áreas com alta umidade vegetal em função da sazonalidade climática (Wijesinghe et al., 2024; Barman et al., 2024).

7.3. Índice de senescência da vegetação (PSRI)

No período seco de 2016, os valores do PSRI variaram entre 0,011 e 0,30, indicando a presença de áreas com distintos níveis de senescência foliar e estresse fisiológico da vegetação. Em 2024, no mesmo período sazonal, o índice apresentou valores entre 0,024 e 0,36, revelando um aumento do valor máximo do PSRI em relação a 2016, o que sugere maior intensidade de senescência e degradação da clorofila em parte da área analisada (Tabela 8). A distribuição espacial do índice no período seco (Figura 6)

evidencia manchas com valores mais elevados, associadas a áreas com maior estresse foliar e possível redução do vigor da vegetação.

Tabela 8 - Valores máximos e mínimos do PSRI no período de seca (2016 e 2024)

PSRI SECA 2016	PSRI SECA 2024
Max: 0,30	Max: 0,36
Min: 0,011	Min: 0,024

Fonte: Autora, 2025.

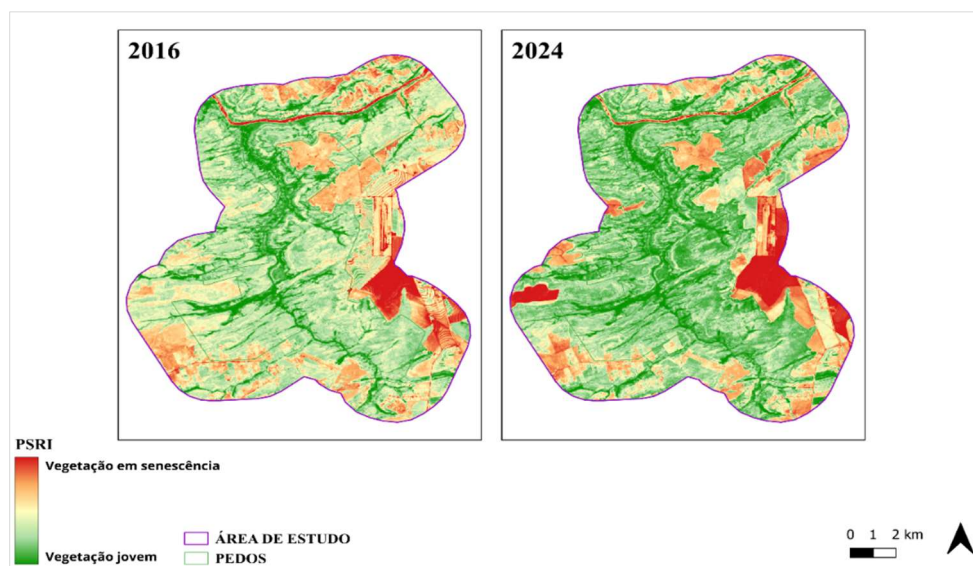


Figura 6 - Índice de Senescência da Vegetação (PSRI) no período de seca (2016 e 2024)

Fonte: Autora, 2025.

O aumento dos valores máximos do PSRI observado no período seco de 2024 sugere que a vegetação esteve mais sujeita a condições adversas, possivelmente relacionadas à maior duração ou intensidade da estação seca. Esses resultados refletem a sensibilidade do PSRI às condições hídricas e térmicas da vegetação. Valores mais elevados do índice estão associados à degradação da clorofila e ao aumento relativo de carotenoides, características típicas de plantas submetidas a estresse hídrico ou maturação avançada (Cole et al., 2014; Zagajewski et al., 2017). Os resultados corroboram com Labenski et al. (2024), em estudo indicando que por possuir mais dias sem chuva, as plantas perdem clorofila, o que influencia na senescência da vegetação.

No período chuvoso de 2017, o índice apresentou valores de 0,002 a 0,22, enquanto em 2024 os resultados variaram de -0,006 a 0,20 (Tabela 9). Os resultados evidenciam a predominância de vegetação em condições mais saudáveis, com teores maiores de clorofila e metabolismo fotossintético ativo, embora se destaquem pequenas áreas com indícios de estresse fisiológico, conforme ilustrado na Figura 7.

Tabela 9 - Valores máximos e mínimos do PSRI no período de chuva (2017 e 2024)

PSRI CHUVA 2017	PSRI CHUVA 2024
Max: 0,22	Max: 0,20
Min: 0,002	Min: -0,006

Fonte: Autora, 2025.

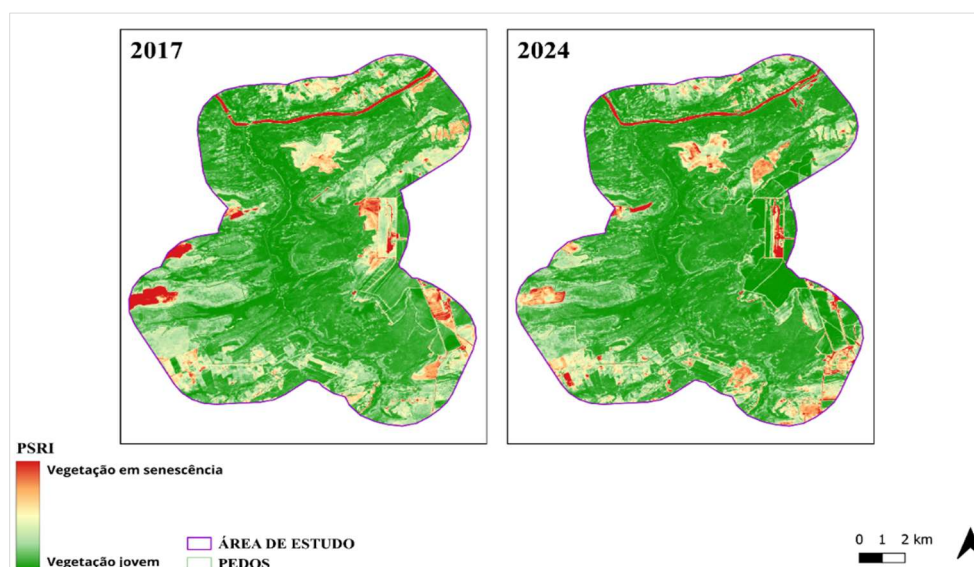


Figura 7 - Índice de Senescência da Vegetação (PSRI) no período de chuva (2017 e 2024)
Fonte: Autora, 2025.

Esse padrão é esperado em função da maior disponibilidade hídrica e da menor incidência de estresse térmico típico desta estação, fatores que retardam o processo de senescência foliar e mantêm a integridade dos pigmentos fotossintéticos. Observou-se que plantas com menores teores de carotenoides apresentaram valores de PSRI mais negativos, indicando maior concentração de clorofila e, conseqüentemente, menor índice de senescência (Amaral et al., 2022).

7.4. Índice de queimada por diferença normalizada (NBR)

No período seco de 2016, os valores do NBR variaram entre $-0,12$ e $0,37$, indicando a coexistência de áreas com vegetação preservada e setores com sinais de degradação ou possível ocorrência de queimadas (Tabela 10). Em 2024, no mesmo período sazonal, o índice apresentou variação semelhante, entre $-0,09$ e $0,36$, sugerindo a manutenção de um padrão geral comparável ao observado em 2016, com leve redução na ocorrência de valores mais negativos. A distribuição espacial do NBR no período seco (Figura 8) evidencia manchas com valores reduzidos, associadas a áreas com maior exposição do solo, intercaladas com áreas de vegetação mais íntegra.

Tabela 10 - Valores máximos e mínimos do NBR no período de seca (2016 e 2024)

NBR SECA 2016	NBR SECA 2024
Max: 0,37	Max: 0,36

Min: -0,12

Min: -0,09

Fonte: Autora, 2025.

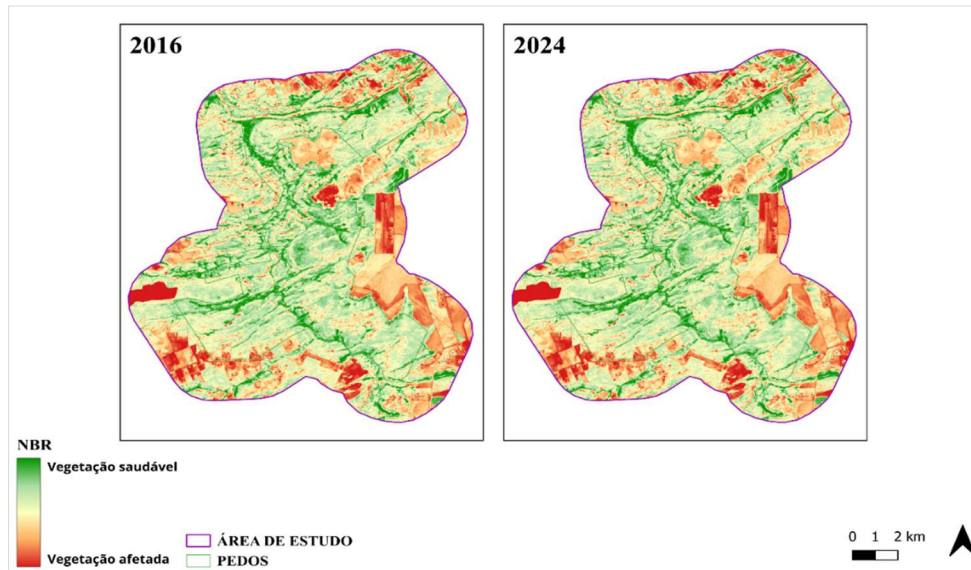


Figura 8 – Índice de Queimada por Diferença Normalizada (NBR) no período de seca (2016 e 2024)
Fonte: Autora, 2025.

A variação observada do NBR reflete não apenas a resposta da vegetação a eventos de queima, mas também mudanças naturais associadas à fenologia vegetal. De acordo com Bright et al., (2019), valores mais baixos do índice durante a estação seca podem estar relacionados à redução da biomassa verde e à maior exposição do solo.

Durante o período chuvoso, observou-se aumento dos valores máximos do NBR em ambos os anos analisados. Em 2017, os valores variaram entre $-0,05$ e $0,41$, enquanto em 2024 oscilaram entre $-0,004$ e $0,52$ (Tabela 11). A análise espacial do índice no período chuvoso (Figura 9) revela predominância de valores positivos, sugerindo recuperação vegetativa após o período seco, compatível com o aumento da disponibilidade hídrica sazonal.

Tabela 11 - Valores máximos e mínimos do NBR no período de chuva (2017 e 2024)

NBR CHUVA 2017	NBR CHUVA 2024
Max: 0,41	Max: 0,52
Min: -0,05	Min: -0,004

Fonte: Autora, 2025.

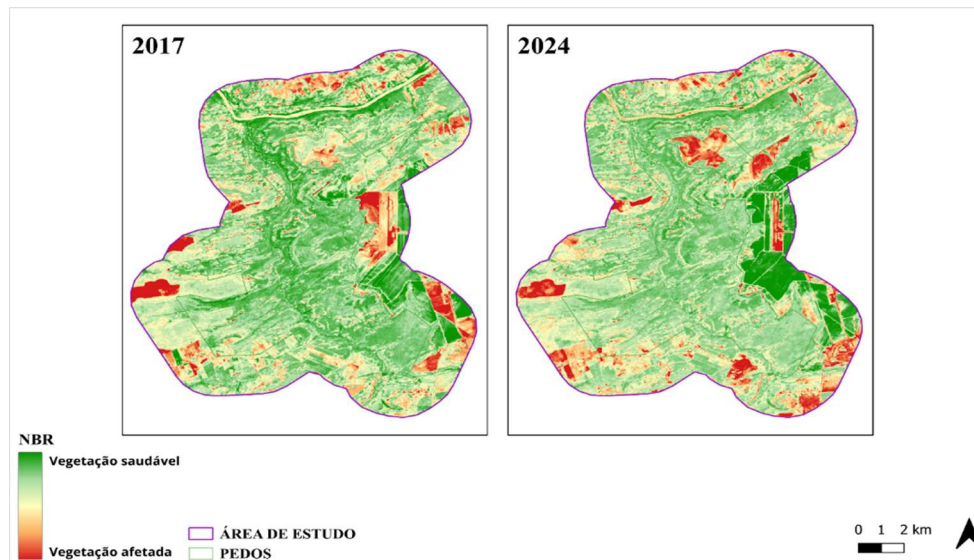


Figura 9 - Índice de Queimada por Diferença Normalizada (NBR) no período de chuva (2017 e 2024)
 Fonte: Autora, 2025.

Os resultados da Figura 9 sugerem recuperação vegetativa pós-seca, condizente com a maior disponibilidade hídrica do período e com o comportamento do índice descrito no trabalho de Júnior et al. (2015), que diz que métodos tradicionais que comparam valores do NBR entre períodos secos e chuvosos podem apontar variações naturais da fenologia vegetal que podem ser interpretadas como queimadas.

7.5. Índice de qualidade ambiental no período de seca

O ICQA apresenta inicialmente um mapa de dispersão com os valores contínuos do índice, já ponderados e reescalados para a faixa de -1 a +1. A variação espacial da qualidade ambiental no entorno do PEDOS em 2016, no período de seca, considerando simultaneamente o vigor da vegetação (NDVI), umidade (NDII), ocorrência de queimadas (NBR) e senescência foliar (PSRI) pode ser observada na (Figura 10).

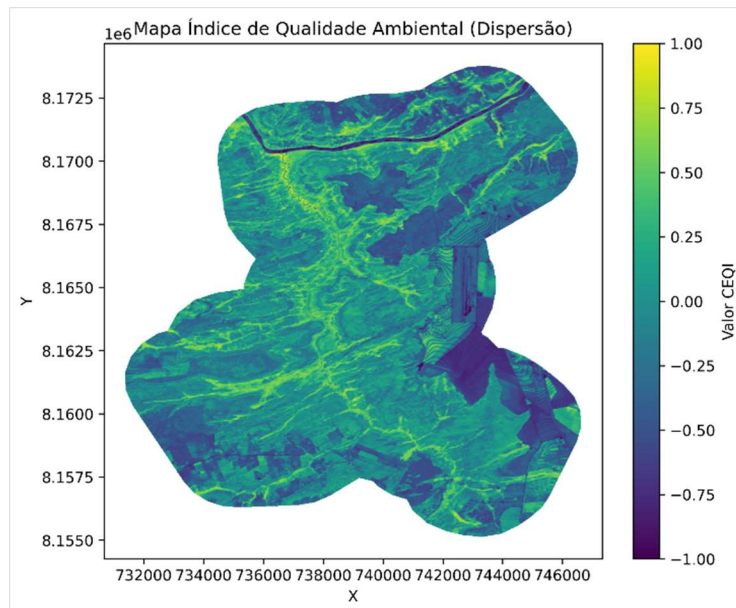


Figura 10 - Dispersão espacial do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) no período de seca (2016)

Fonte: Autora, 2025.

Predominam tons azulados e arroxeados, correspondentes a valores negativos e próximos a zero, indicando áreas de baixa qualidade ambiental, com menor biomassa verde, menor umidade e maior estresse foliar ou presença de solo exposto. Manchas esverdeadas e amareladas, representando valores positivos, estão presentes de forma pontual, associadas a trechos de vegetação mais preservada, especialmente nas proximidades de cursos d'água.

Esse padrão de dispersão espacial é consistente com os resultados apresentados por Gessner et al. (2023), ao identificarem que anos de seca apresentaram fases extensas e persistentes de desvios negativos nos índices de vegetação, com poucas áreas resilientes. No mesmo sentido, Markov (2018) destaca que índices como NDII, quando negativos, indicam estresse hídrico na vegetação, e que a combinação de múltiplos índices é mais eficaz para caracterizar a seca do que índices isolados. Além disso, Satapathy et al. (2024) demonstram que um índice combinado, integrando vegetação e estresse hídrico, melhora a detecção de áreas críticas em comparação a indicadores únicos.

A partir do raster, o ICQA foi classificado em cinco classes qualitativas: “Muito Ruim”, “Ruim”, “Moderada”, “Boa” e “Excelente”, permitindo a interpretação. Com base na classificação, a Figura 11 evidencia um cenário de forte limitação ambiental durante o período de seca de 2016, com predomínio de condições desfavoráveis para a vegetação.

Esse predomínio das classes mais baixas é coerente com o padrão observado por Gessner et al. (2023), em que eventos de seca apresentaram estresse na vegetação, assim

como também mostra o estudo de Satapathy et al. (2024) sobre a utilidade de índices compostos para identificar zonas prioritárias de manejo e mitigação.

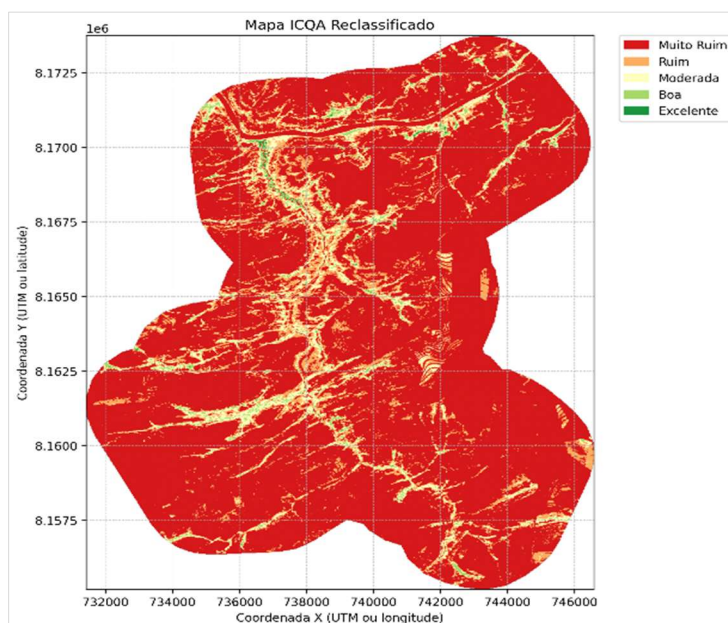


Figura 11 - Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) classificado no período de seca (2016)
Fonte: Autora, 2025.

A análise quantitativa revelou que 81,4% da área foi classificada como “Muito Ruim”, 11,1% como “Ruim” e apenas 1,5% como “Moderada”, enquanto as classes “Boa” e “Excelente” somaram juntas menos de 2% da área total (Tabela 12).

Tabela 12 - Distribuição de áreas por classe do ICQA no período de seca (2016)

Áreas por classe(ha) - ICQA Classificado		
Classe	Critério	Área (ha)
Muito ruim	<0.2	15.401,56
Ruim	0.2 - < 0.4	2.102,60
Moderada	0.4 - < 0.6	1.118,80
Boa	0.6 - < 0.8	275,96
Excelente	≥ 0.8	13,88
Total	-	18.912,80

Fonte: Autora, 2025.

Em sequência, o mapa de dispersão para o ano de 2024 (Figura 12) revelou predominância de valores negativos e próximos de zero, correspondentes a áreas com baixa biomassa verde, teor reduzido de água e sinais de estresse foliar ou exposição do solo. Contudo, nota-se uma redução ainda maior na ocorrência de valores positivos, agora restritos a pequenas manchas isoladas, em geral associadas a fragmentos de vegetação mais preservada e zonas próximas a cursos d’água.

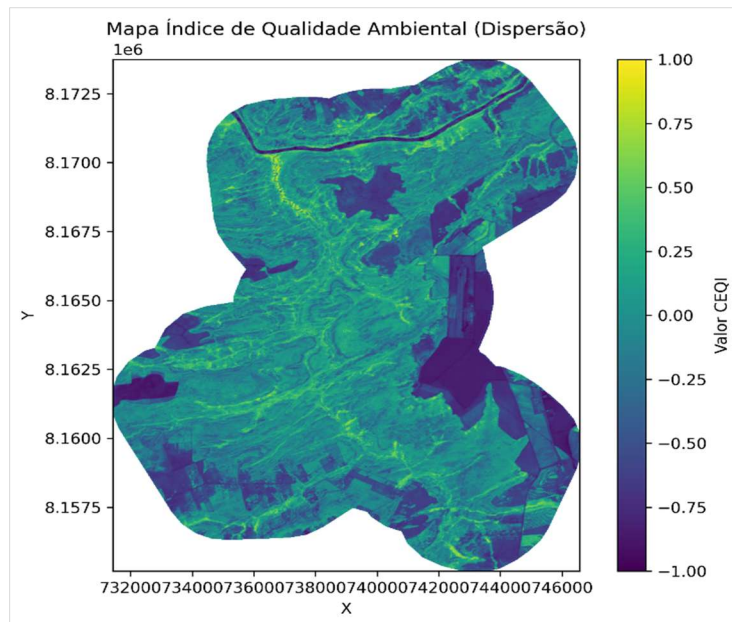


Figura 12 - Dispersão espacial do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) no período de seca (2024)

Fonte: Autora, 2025.

A classificação do índice observado na Figura 13 reforça que a classe “Muito Ruim” expande-se e passa a ocupar a maior parte da área analisada, enquanto “Ruim” mantém participação significativa. As classes “Moderada”, “Boa” e “Excelente” tornam-se ainda mais pontuais e dispersas, indicando que os poucos núcleos de melhor qualidade ambiental se encontram cada vez mais fragmentados.

O uso de um índice composto para sintetizar múltiplas dimensões (vigor, umidade, cicatriz de queimada, senescência) está alinhado a estudos recentes que mostram que o uso de índices compostos pode ser validado frente a indicadores independentes (Santos et al., 2025).

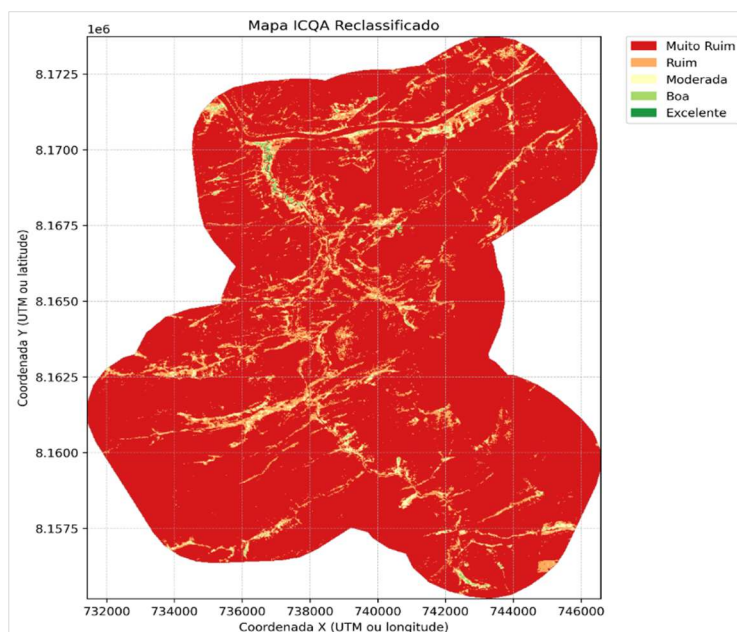


Figura 13 - Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) classificado no período de seca (2024)
 Fonte: Autora, 2025.

A análise quantitativa ressalta que 89,46% da área pertencente ao PEDOS em hectares foram classificados como “Muito Ruim” e 8,34% como “Ruim”, totalizando 97,8% da área em condições críticas. Apenas 1,85% estão em “Moderada”, 0,31% em “Boa” e 0,02% em “Excelente”, conforme observado na Tabela 13.

Tabela 13 - Distribuição de áreas por classe do ICQA no período de seca (2024)

Áreas por classe(ha) - ICQA Classificado		
Classe	Critério	Área (ha)
Muito ruim	<0.2	16.922,52
Ruim	0.2 - < 0.4	1.576,36
Moderada	0.4 - < 0.6	350,28
Boa	0.6 - < 0.8	59,36
Excelente	≥ 0.8	4,28
Total	-	18.912,80

Fonte: Autora, 2025.

Ao se comparar o ano de 2016 com 2024 para o mesmo período, verifica-se aumento da participação da classe “Muito Ruim” e redução proporcional das demais, evidenciando que, no período de seca de 2024, a pressão sobre a vegetação do entorno do PEDOS se intensificou, resultando em um quadro ambiental ainda mais restritivo e homogêneo nas classes mais baixas do índice. Essa predominância das classes inferiores é coerente com relatos de anomalias negativas e evidencia a redução de vigor da vegetação em períodos de seca (Liu et al., 2024; Crespo-Antía et al., 2024).

7.6. Índice de qualidade ambiental no período de chuva

No período chuvoso, o mapa de dispersão do ICQA de 2017 observado na Figura 14, exibe valores predominantemente positivos e médios-altos. O padrão visual é dominado por tons verdes a amarelos, indicando condições ambientais melhores e maior conteúdo hídrico da vegetação, como esperado para a estação chuvosa. As áreas mais escuras possuem valores mais baixos em áreas antropizadas ou com solo exposto, mas não dominam a paisagem, resultando em um mosaico mais homogêneo e favorável em relação ao período de seca, padrão também relatado por Aizizi et al. (2023).

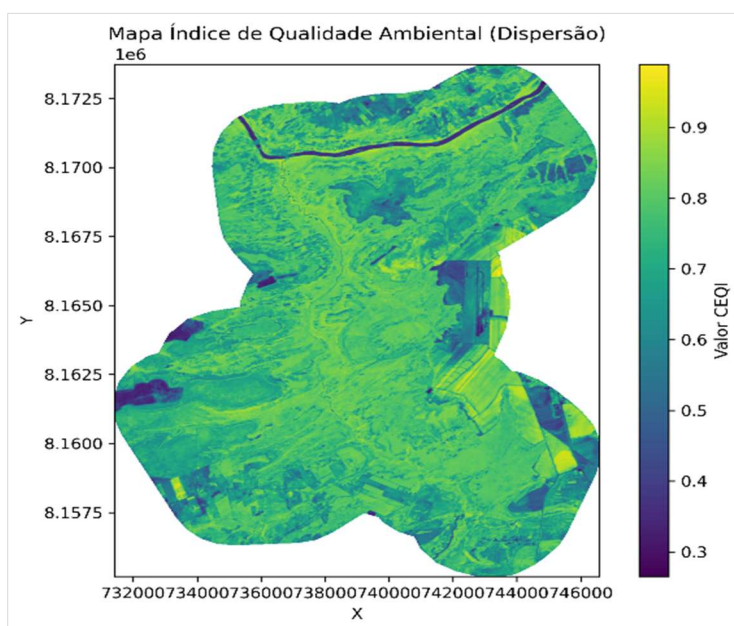


Figura 14 - Dispersão espacial do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) no período de chuva (2017)

Fonte: Autora, 2025.

A classificação em cinco classes qualitativas reforça a predominância de áreas “Boas” e “Excelentes”, abrangendo grande parte do território, especialmente nas regiões centrais e próximas a cursos d’água presentes no PEDOS (Figura 15). As classes “Moderada”, em tons de amarelo, estão distribuídas em manchas esparsas, enquanto “Ruim” e “Muito Ruim” aparecem de forma pontual, concentradas em alguns trechos periféricos e possivelmente antropizados. Essa predominância de classes altas durante a estação úmida é consistente com os achados de Miao et al. (2024).

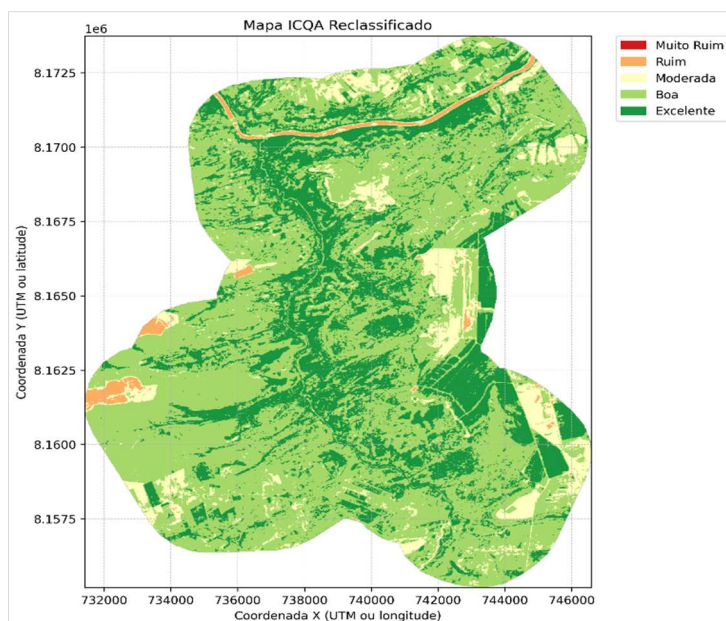


Figura 15 - Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) classificado no período de chuva (2017)
 Fonte: Autora, 2025.

A análise quantitativa indicou que 62,1% da área foi classificada como “Boa”, e “Excelente” 27,7%, totalizando quase 90% da área analisada. A classe “Moderada” representa 8,8%, enquanto “Ruim” soma 1,4% e “Muito Ruim” não apresenta área registrada (0%) (Tabela 14). Esses números indicam que, no período chuvoso de 2017, a qualidade ambiental da região era amplamente favorável, com predominância de vegetação saudável e condições ambientais estáveis, corroborando o observado por Wang et al. (2023).

Tabela 14 - Distribuição de áreas por classe do ICQA no período de chuva (2017)

Áreas por classe(ha) - ICQA Classificado		
Classe	Critério	Área (ha)
Muito ruim	<0.2	0,00
Ruim	0.2 - < 0.4	272,84
Moderada	0.4 - < 0.6	1.657,60
Boa	0.6 - < 0.8	11.742,12
Excelente	≥ 0.8	5.240,24
Total	-	18.912,80

Fonte: Autora, 2025.

No período chuvoso de 2024, o mapa de dispersão do ICQA apresenta valores majoritariamente altos, com predominância de tons verdes e amarelos, refletindo condições ambientais favoráveis e elevado conteúdo hídrico da vegetação. A Figura 16 apresenta pequenas áreas em tons mais escuros, associadas a zonas com solo exposto ou uso antrópico intensivo, aparecem de forma pontual e não comprometem o padrão geral.

Esse cenário é coerente com o observado por Liu et al. (2024), ao relatarem, que áreas com maior cobertura vegetal e melhor estrutura topográfica tendem a apresentar valores mais elevados do índice, especialmente em condições úmidas.

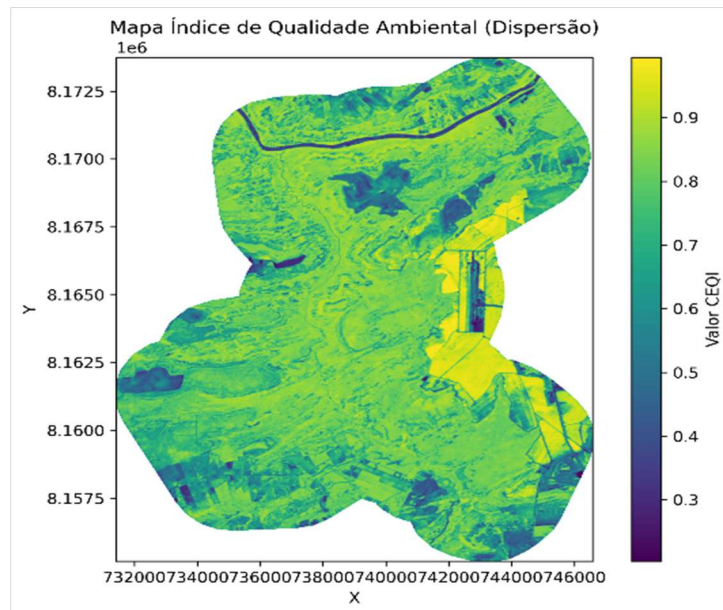


Figura 16 - Dispersão espacial do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) no período de chuva (2024)
Fonte: Autora, 2025.

A classificação em cinco classes qualitativas mostra a predominância marcante das classes “Excelente” (54,7%) e “Boa” (34,7%), que juntas correspondem a quase 90% da área estudada, concentradas principalmente em regiões centrais e ao longo dos cursos d’água. As classes “Moderada” (9,1%) e “Ruim” (1,5%) ocorrem em manchas esparsas, enquanto “Muito Ruim” não foi registrada. Esse padrão está alinhado com os achados de Qin et al. (2025), ao identificarem que, em áreas protegidas e vegetadas, a qualidade ecológica atinge níveis mais altos durante a estação úmida, mantendo um predomínio das classes superiores (Figura 17).

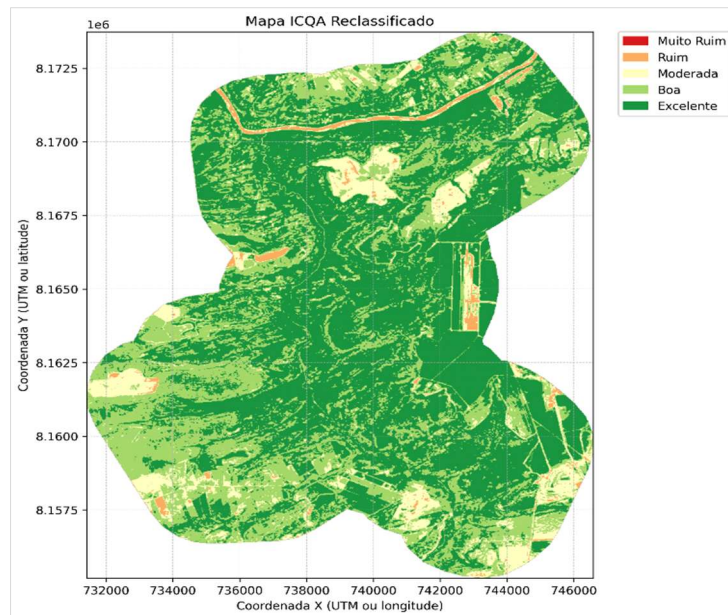


Figura 17 - Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) classificado no período de chuva (2024)
Fonte: Autora, 2025.

A análise quantitativa para 2024 confirma as condições ambientais no período chuvoso, com a combinação de “Excelente” e “Boa” atingindo 89,4% da área total, conforme tabela 15. Esse resultado reforça a tendência observada por Santos et al. (2025), cujo índice composto de seca demonstrou clara recuperação e elevação de indicadores ambientais em períodos de maior disponibilidade hídrica, evidenciando o papel determinante da sazonalidade no aumento da qualidade ecológica.

Tabela 15 - Distribuição de áreas por classe do ICQA no período de chuva (2024)

Áreas por classe(ha) - ICQA Classificado		
Classe	Critério	Área (ha)
Muito ruim	<0.2	0,00
Ruim	0.2 - < 0.4	294,04
Moderada	0.4 - < 0.6	1.711,40
Boa	0.6 - < 0.8	6.563,64
Excelente	≥ 0.8	10.343,72
Total	-	18.912,80

Fonte: Autora, 2025.

Vale ressaltar que a estação chuvosa associada a 2016 foi representada por cenas do ano de 2017, escolhidas devido à alta incidência de nuvens em 2016 e à necessidade de usar imagens do pico chuvoso mais próximo com melhor qualidade.

7.7. Diferença dos pontos de alerta

A análise dos histogramas de variação do ICQA entre os anos avaliados evidencia padrões distintos para os períodos de seca e de chuva, embora ambos revelem a tendência

de degradação ambiental na área de estudo. Os histogramas foram construídos a partir de dois tipos de métricas: A Diferença_ICQA, que expressa a diferença absoluta entre os valores do índice em dois momentos temporais, e o Percentual Decréscimo, que traduz essa variação em termos proporcionais em relação ao valor inicial.

Para o período de seca, os histogramas apresentaram uma distribuição concentrada na faixa entre aproximadamente $-0,45$ e $-0,25$, com destaque para o intervalo de maior frequência entre $-0,32$ e $-0,28$ (Figura 18). Esse resultado indica uma redução moderada, em torno de 0,3 pontos na qualidade ambiental, enquanto pontos isolados atingiram quedas mais próximas de $-0,45$.

Quando expressos em termos percentuais, os dados reforçam essa interpretação, conforme Figura 18. A distribuição concentrou-se entre -35% e -25% , evidenciando que a maioria da área estudada perdeu qualidade ambiental em 2016. A ausência de valores positivos no histograma confirma que não houve melhora significativa em nenhum ponto crítico durante o período seco, caracterizando um cenário de degradação homogênea e consistente, em linha com os padrões reportados por Santos et al. (2025).

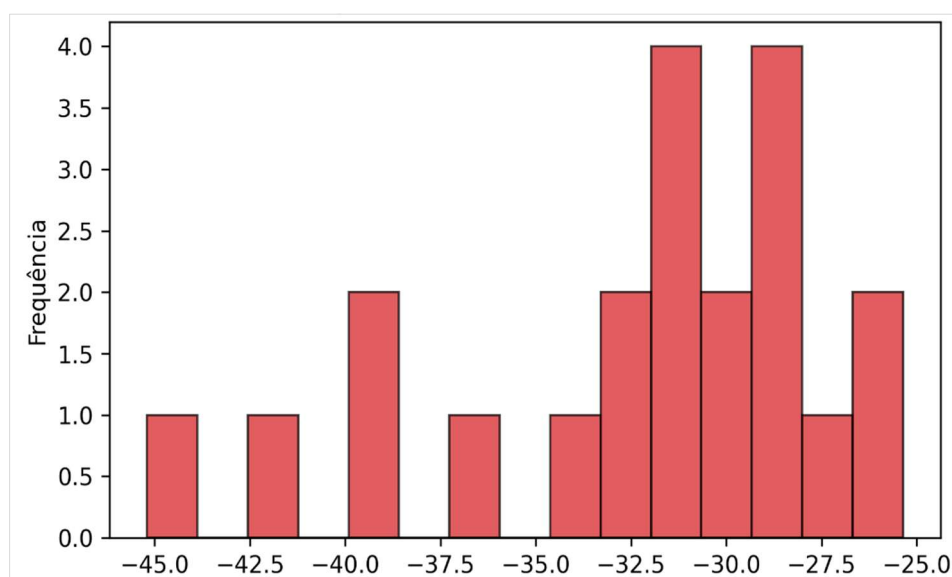


Figura 18 - Percentual de decréscimo do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) no período de seca (2016–2024)
Fonte: Autora, 2025.

Para o período de chuva, a expectativa seria de recuperação ambiental devido ao aumento da disponibilidade hídrica e ao vigor sazonal da vegetação. No entanto, os resultados mostram que a tendência de queda também se manteve. O histograma do Percentual Decréscimo de 2017 e 2024 da Figura 19 apresentou maior concentração entre -30% e -25% .

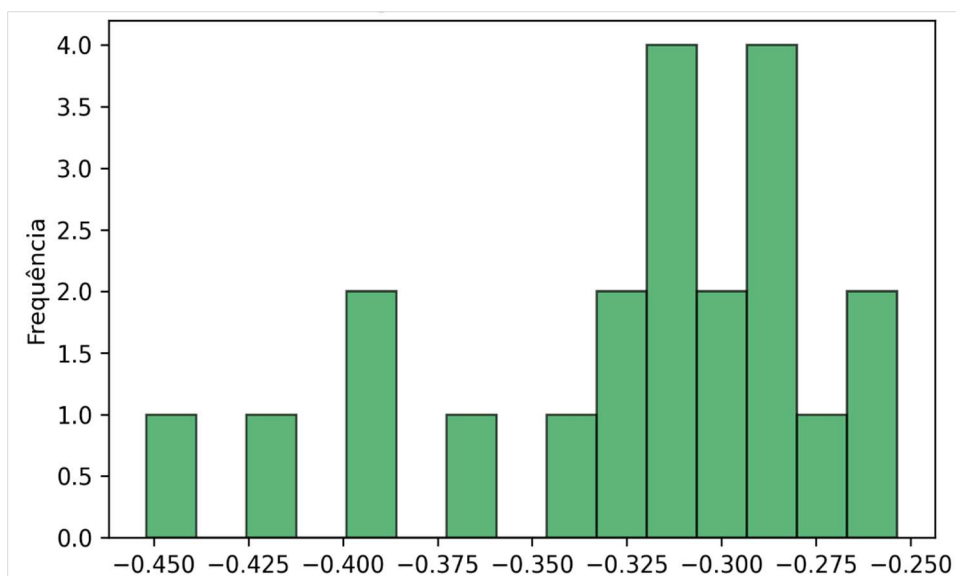


Figura 19 – Percentual de decréscimo do Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) no período de chuva (2017–2024)
Fonte: Autora, 2025.

Esse padrão revela que a maioria das unidades espaciais apresentou queda moderada, mas contínua, mesmo em um contexto mais favorável de precipitação. Apenas um número reduzido de pixels exibiu reduções mais drásticas, próximas a -45% , reforçando que os casos de degradação severa foram localizados e menos frequentes. Ainda assim, a ausência completa de valores positivos no período chuvoso confirma que, em escala regional, não se verificaram processos de recuperação ambiental, corroborando os achados de Gong et al. (2025).

7.8. Dados de Precipitação de seca 2016 e 2024 no períodos de seca

As imagens de precipitação diária máxima estimada para o município de Rondonópolis-MT evidenciam padrões espaciais contrastantes entre os anos de 2016 e 2024. Para 2016, no período de 23 de agosto a 1º de setembro, a distribuição espacial da precipitação mostra forte heterogeneidade, com a formação de núcleos localizados de maior intensidade, sobretudo nas porções sul e sudeste do município.

Esses núcleos são representados nas imagens por valores mais elevados de precipitação diária máxima, enquanto áreas adjacentes apresentam valores reduzidos ou nulos. A área do PEDOS encontra-se posicionada em uma zona intermediária desse gradiente espacial, sendo parcialmente influenciada pelos eventos pluviométricos mais intensos, ainda que não coincida exatamente com os máximos absolutos observados no município (Figura 20).

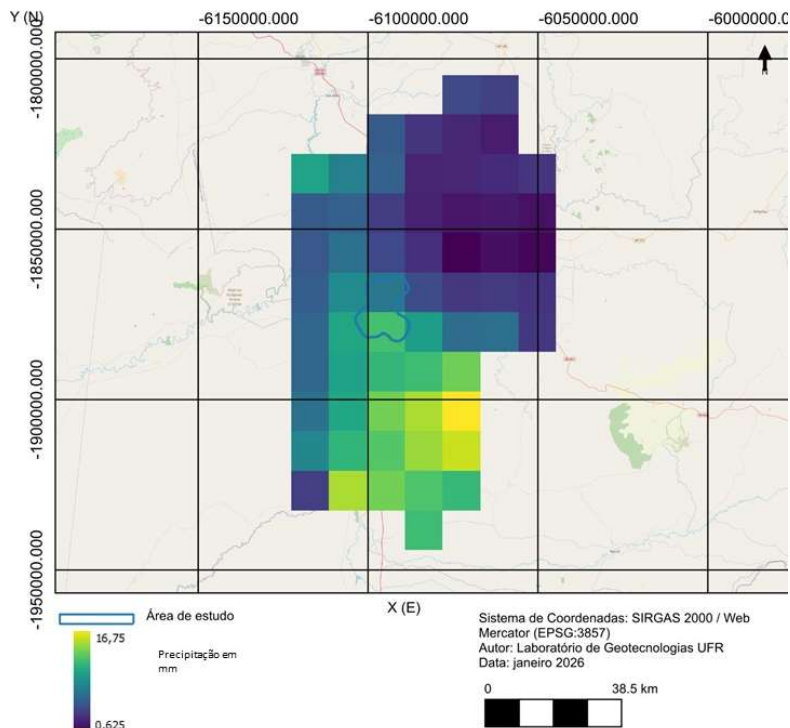


Figura 20 – Distribuição espacial da precipitação no período seco de 2016
 Fonte: Autora, 2026.

Esse padrão espacial reflete a ocorrência de eventos convectivos isolados, característica típica do período seco na região. Foram registrados quatro dias com precipitação igual ou superior a 1 mm e três dias completamente secos, com a maior sequência de estiagem limitada a dois dias consecutivos. Os maiores eventos concentraram-se ao final do período, destacando-se o dia 30/08/2016, com precipitação diária máxima de aproximadamente 16,8 mm, seguido por 31/08/2016, com 14,0 mm. Na área específica do PEDOS, a precipitação associada a esse evento variou entre aproximadamente 7,1 e 12 mm, evidenciando a influência direta desses núcleos convectivos sobre a área de interesse (Figura 21).

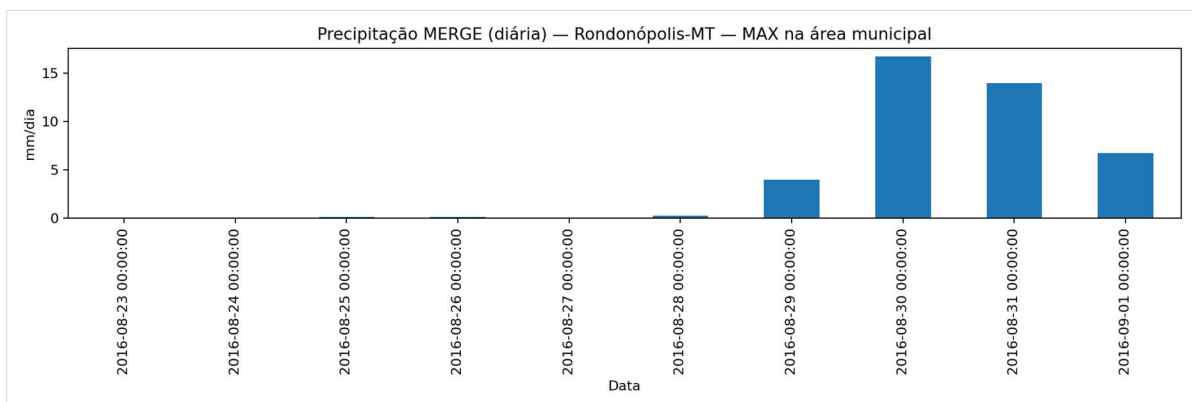


Figura 21 – Precipitação no período seco de 2016
 Fonte: Autora, 2026.

Em contraste, a imagem referente a 2024, para o período de 1º a 10 de agosto, revela um cenário espacialmente homogêneo, dominado por valores mínimos ou nulos de precipitação em praticamente toda a extensão do município. Não se observa a formação de núcleos pluviométricos relevantes, e a área do PEDOS encontra-se completamente inserida em uma região de precipitação nula, indicando ausência total de eventos significativos durante o intervalo analisado (Figura 22).

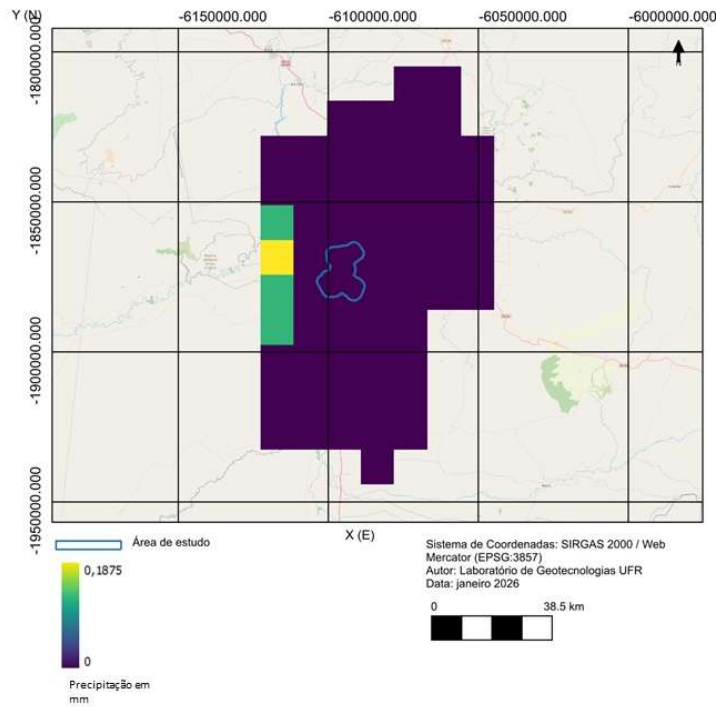


Figura 22 – Distribuição espacial da precipitação no período seco de 2024
 Fonte: Autora, 2026.

Não houve registro de dias com precipitação ≥ 1 mm, e o número de dias secos alcançou nove em um total de dez dias analisados. A maior sequência seca foi de oito dias consecutivos, caracterizando uma estiagem prolongada e contínua. O único valor ligeiramente diferente de zero ocorreu em 09/08/2024, com cerca de 0,2 mm, o que não representa impacto hidrológico ou ambiental significativo, especificamente na área do PEDOS, a precipitação nesse dia foi de 0 mm (Figura 23).

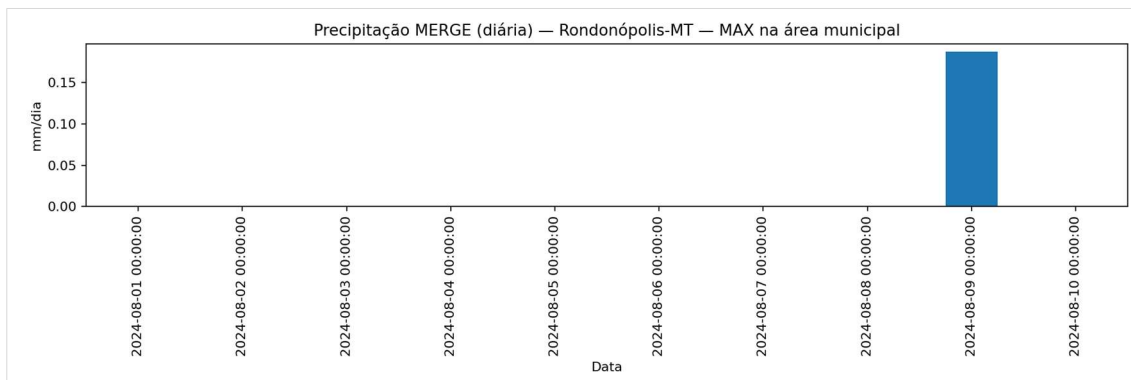


Figura 23 – Precipitação no período seco de 2024
Fonte: Autora, 2026.

Os padrões de precipitação observados em 2016 indicam que, mesmo durante o período seco, ocorreram eventos capazes de gerar núcleos localizados de chuva sobre o município. Esse comportamento é consistente com a natureza convectiva das chuvas na região tropical, nas quais eventos isolados podem produzir volumes significativos em curtos intervalos de tempo, ainda que o regime climático geral seja seco (Funk et al., 2015). Produtos de precipitação baseados em sensoriamento remoto, como CHIRPS e MERGE, são amplamente utilizados para capturar esse tipo de variabilidade espacial e temporal em escala regional, sendo adequados para a identificação de extremos e eventos pontuais (Funk et al., 2015; Rozante et al., 2020).

A presença desses eventos em 2016 sugere que a precipitação influenciou primeiramente a umidade superficial e, de forma indireta, a resposta da vegetação. Estudos em ambientes tropicais demonstram que a dinâmica da vegetação apresenta sensibilidade à precipitação antecedente, com respostas que podem ocorrer dias ou semanas após os eventos de chuva, especialmente em regiões onde a limitação hídrica é um fator dominante (Hilker et al., 2014; Moraes et al., 2022).

Em contraste, os resultados de 2024 caracterizam um cenário de estiagem persistente, nessa condição, a precipitação passa a representar uma limitação contínua, reduzindo significativamente a possibilidade de respostas fisiológicas de curto prazo detectáveis por índices espectrais (Hilker et al., 2014). Esse tipo de comportamento já foi documentado em diferentes regiões tropicais, onde períodos prolongados sem chuva resultam em estabilização de sinais de estresse hídrico e ausência de recuperação da vegetação (Moraes et al., 2022).

As diferenças entre 2016 e 2024 reforçam a importância de interpretar produtos de precipitação e índices ambientais de forma integrada e cautelosa, considerando limitações de escala e incertezas inerentes aos dados orbitais. Embora produtos como CHIRPS e MERGE apresentem bom desempenho para análises regionais, sua resolução espacial pode suavizar extremos locais, o que exige agregações espaciais e temporais compatíveis ao relacionar precipitação com indicadores derivados de sensores ópticos (Funk et al., 2015).

7.9. Dados de Precipitação de chuva 2017 e 2024 nos períodos de chuva

Em 2017, no intervalo de 17 a 27 de abril, observa-se um padrão espacial caracterizado por variabilidade, com presença de núcleos bem definidos de precipitação

mais intensa, sobretudo nas porções sul e sudoeste do município. As imagens (Figura 24) mostram áreas com valores elevados de precipitação diária máxima contrastando com setores de menores acumulados, evidenciando um regime chuvoso ativo e espacialmente heterogêneo. A área do PEDOS encontra-se inserida em uma zona de precipitação intermediária, sendo influenciada diretamente por esses eventos, ainda que não coincida com os máximos absolutos observados no município.

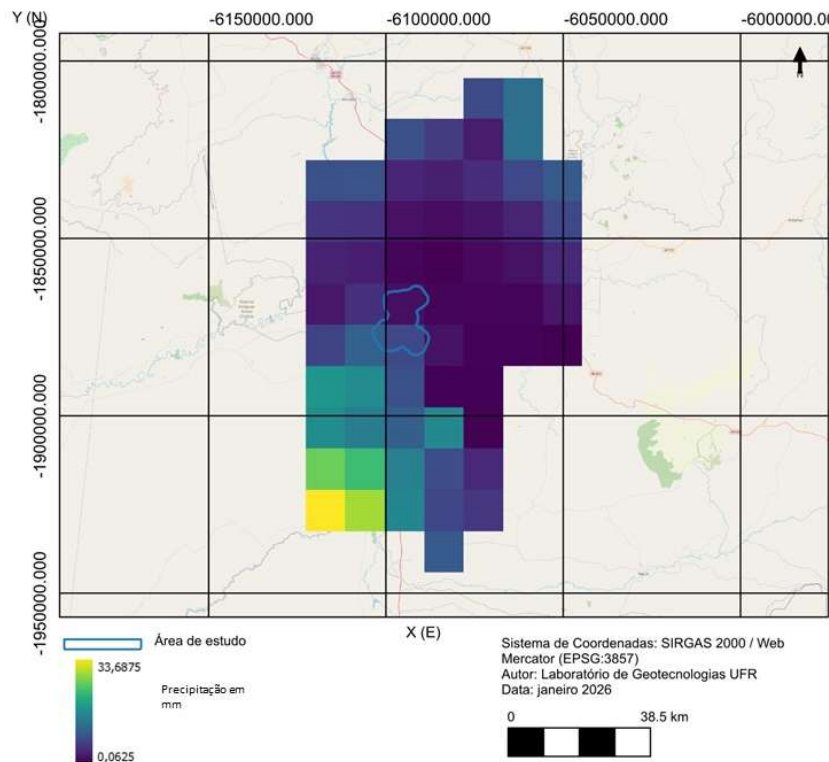


Figura 24 – Distribuição espacial da precipitação no período chuvoso de 2017
 Fonte: Autora, 2026.

Foram registrados seis dias com precipitação igual ou superior a 1 mm e não houve dias completamente secos, resultando em ausência de sequência seca. O evento mais intenso ocorreu em 20/04/2017, quando a precipitação diária máxima no município atingiu aproximadamente 33,7 mm. Na área do PEDOS, a precipitação associada a esse evento variou entre 1,437 e 7,437 mm, confirmando a influência direta das chuvas intensas sobre a área de interesse (Figura 25).

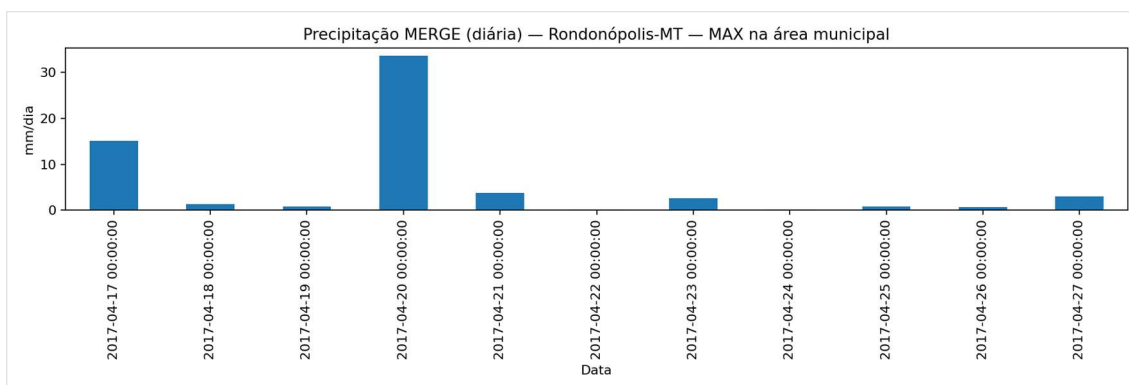


Figura 25 – Precipitação no período chuvoso de 2017
 Fonte: Autora, 2026.

Para 2024, no período de 25 de janeiro a 5 de fevereiro, o padrão espacial da precipitação também indica ocorrência de eventos chuvosos, porém com menor intensidade máxima e maior fragmentação espacial em comparação a 2017. As imagens revelam núcleos de precipitação moderada distribuídos de forma relativamente mais homogênea pelo município, sem a presença de valores extremos tão elevados quanto os observados no período chuvoso de 2017. A área do PEDOS permanece inserida em uma zona de baixos a intermediários valores de precipitação diária máxima, refletindo a natureza menos intensa dos eventos registrados (Figura 26).

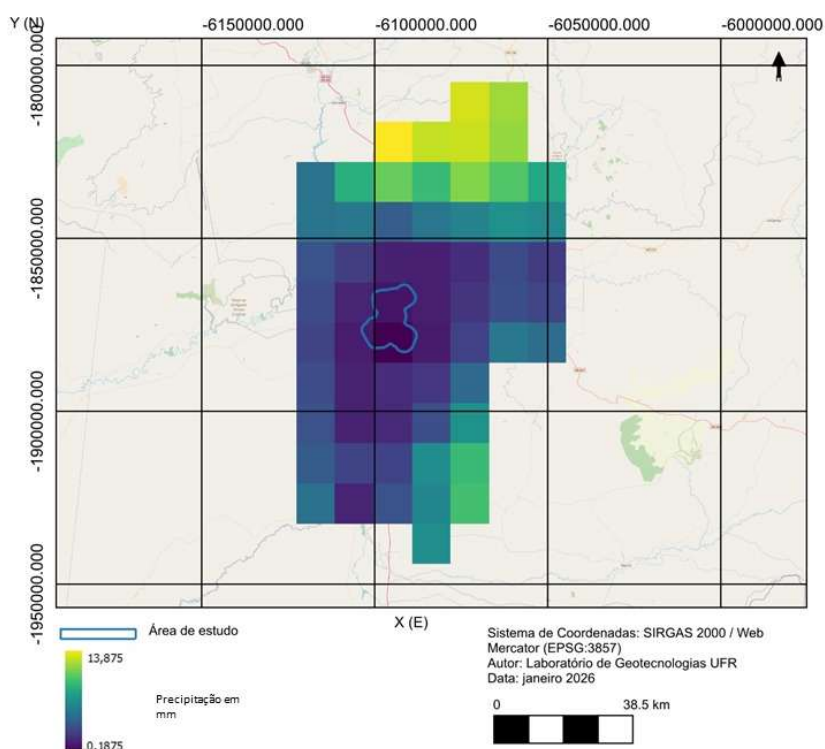


Figura 26 – Distribuição espacial da precipitação no período chuvoso de 2024
 Fonte: Autora, 2026.

Foram contabilizados oito dias com precipitação ≥ 1 mm e três dias secos, com a maior sequência seca atingindo três dias consecutivos. O maior evento do período ocorreu

em 05/02/2024, com precipitação diária máxima de aproximadamente 13,9 mm no município. No recorte do PEDOS, a precipitação nesse dia variou entre 0,187 e 0,937 mm, evidenciando que, apesar da ocorrência de eventos mais intensos em escala municipal, o impacto direto sobre a área de interesse foi relativamente limitado (Figura 27).

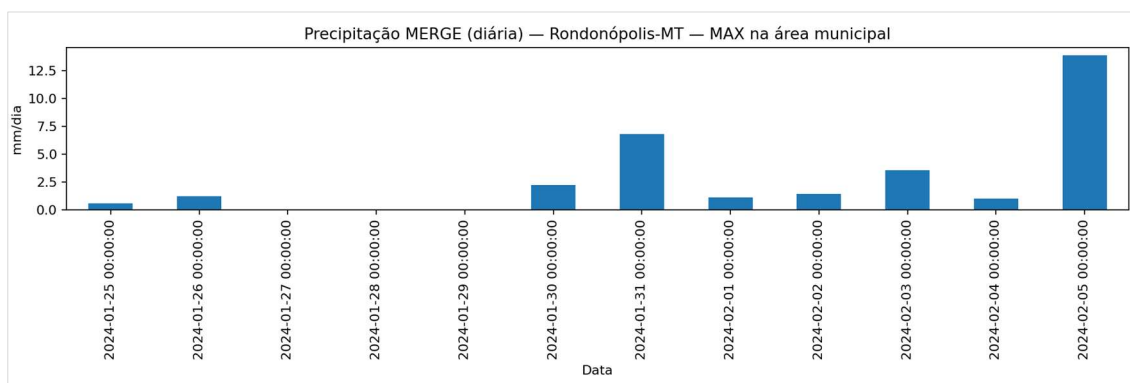


Figura 27 – Precipitação no período chuvoso de 2024

Fonte: Autora, 2026.

Durante o período chuvoso de 2017, a elevada frequência e intensidade dos eventos indicam um regime chuvoso ativo, capaz de favorecer a reposição hídrica e a recuperação das condições ambientais. A ausência de dias secos no intervalo analisado sugere um sistema menos limitado pela disponibilidade de água, no qual a precipitação se configura como principal fator controlador da dinâmica ambiental, conforme descrito para regiões tropicais (Moraes et al., 2022).

Já o período chuvoso de 2024 apresentou eventos mais moderados e maior intermitência temporal, com impactos menos expressivos sobre a área do PEDOS. Esse comportamento indica que, mesmo na estação chuvosa, a resposta ambiental depende da distribuição espacial e da persistência da precipitação, e não apenas de sua ocorrência pontual (Moraes et al., 2022).

A análise integrada com índices compostos de qualidade ambiental, como o ICQA, deve considerar que esses índices refletem a interação de múltiplos componentes ambientais, resultando em respostas não lineares à precipitação. A heterogeneidade espacial observada é, portanto, produto da combinação entre fatores climáticos, estruturais e antrópicos, conforme discutido em abordagens baseadas em índices compostos (Hu & Xu, 2018).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo aplicar o Índice Composto de Qualidade Ambiental (ICQA) para analisar a qualidade ambiental no entorno do Parque Estadual Dom Osório Stoffel (PEDOS), no município de Rondonópolis–MT, considerando períodos de seca e de chuva entre os anos de 2016, 2017 e 2024. Partiu-se da hipótese de que a integração de múltiplos índices espectrais em um indicador composto seria capaz de representar de forma mais abrangente e sensível as variações ambientais da vegetação.

O ICQA foi eficaz em integrar informações relacionadas ao vigor da vegetação (NDVI), conteúdo hídrico (NDII), senescência foliar (PSRI) e vulnerabilidade a queimadas (NBR), permitindo uma avaliação mais completa da qualidade ambiental quando comparado ao uso isolado de índices espectrais. A aplicação do índice possibilitou identificar padrões espaciais consistentes e diferenças marcantes entre os períodos sazonais analisados.

Nos períodos de seca, observou-se o predomínio expressivo das classes qualitativas “Muito Ruim” e “Ruim”, indicando condições ambientais restritivas, caracterizadas por redução do vigor vegetativo, menor disponibilidade hídrica e aumento da senescência da vegetação. Em contraste, nos períodos chuvosos verificou-se uma recuperação sazonal da cobertura vegetal, com predominância das classes “Boa” e “Excelente”. No entanto, essa recuperação não foi suficiente para reverter a tendência geral de perda de qualidade ambiental ao longo do tempo, evidenciando que a sazonalidade climática atenua, mas não elimina, os efeitos da degradação ambiental no entorno da unidade de conservação.

Conclui-se que o ICQA demonstrou potencial como ferramenta de monitoramento ambiental, classificação em cinco níveis qualitativos e análise temporal fornece subsídios importantes para o planejamento ambiental e a gestão da zona de amortecimento da unidade de conservação. As informações geradas permitem identificar áreas prioritárias para ações de mitigação de impactos, restauração ambiental e monitoramento contínuo, contribuindo para a manutenção da integridade ecológica do Cerrado na região de estudo.

9. REFERÊNCIAS

ABDELBAKI, Asmaa; UDELHOVEN, Thomas. A review of hybrid approaches for quantitative assessment of crop traits using optical remote sensing: research trends and future directions. *Remote Sensing*, v. 14, n. 15, p. 3515, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14153515>

AGUIAR, L. M. de S.; MACHADO, R. B.; MARINHO-FILHO, J. A diversidade biológica do Cerrado. In: AGUIAR, L. M. de S.; CAMARGO, A. J. A. de (org.). *Cerrado: ecologia e caracterização*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. p. 17-38 MAPBIOMAS (2023). Projeto MapBiomas - Coleção 8 - Mapa de Cobertura e Uso do Solo Brasileiro. <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org>

AIZIZI, Yimuranzi; KASIMU, Alimujiang; LIANG, Hongwu; ZHANG, Xueling; WEI, Bohao; ZHAO, Yongyu; ANIWAER, Maidina. Evaluation of ecological quality status and changing trend in arid land based on the remote sensing ecological index: a case study in Xinjiang, China. *Forests*, v. 14, n. 9, p. 1830, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14091830>

ALENCAR, Ane; SHIMBO, Julia Z.; LENTI, Felipe; MARQUES, Camila Balzani; ZIMBRES, Bárbara; ROSA, Marcos; ARRUDA, Vera; CASTRO, Isabel; RIBEIRO, João Paulo Fernandes Márcico; VARELA, Victória; ALENCAR, Isa; PIONTEKOWSKI, Valderli; RIBEIRO, Vivian; BUSTAMANTE, Mercedes M. C.; SANO, Edson Eyji; BARROSO, Mario. Mapping three decades of changes in the Brazilian Savanna native vegetation using Landsat data processed in the Google Earth Engine platform. *Remote Sensing*, v. 12, n. 6, p. 924, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12060924>

AMARAL, Lúcio de Paula; FERREIRA, Regiane Aparecida; CARVALHO, Luiz Felipe Diaz de; FOGAÇA, Aline de Oliveira; GEBLER, Luciano. Índice de reflectância de senescência de plantas em videiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO – ConBAP, 2022, Campinas, SP. Anais... Campinas: ConBAP, ago. 2022. p. 294-299. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1153410>

BARMAN, Pritam Kumar; RAWAT, Shivani; KUMARI, Avni; WANI, Afaq Majid. Monitoramento da condição da vegetação do Parque Nacional de Gorumara utilizando os índices NDVI e NDMI. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, v. 15, n. 2, fev. 2024. DOI: <https://doi.org/10.23910/1.2024.5052>

BRASIL. Decreto nº 4.340, de 22 de agosto de 2002. Regulamenta artigos da Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, que dispõe sobre o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4340.htm. Acesso em: 19 ago. 2024.

BRASIL. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Produto MERGE: precipitação diária combinada por satélite e

estações. São José dos Campos: INPE/CPTEC, [s.d.]. Disponível em: <https://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/MERGE/>. Acesso em: 2 jan. 2026.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 19 jul. 2000.

BRIGHT, Benjamin C.; HUDAK, Andrew T.; KENNEDY, Robert E.; BRAATEN, Justin D.; KHALYANI, Azad Henareh. Examinando a recuperação da vegetação pós-fogo com análise de séries temporais Landsat em três tipos de florestas do oeste da América do Norte. *Fire Ecology*, v. 15, n. 8, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42408-019-0026-4>.

CALDEIRA, Charly; PARRÉ, José Luiz. Diversificação agropecuária e desenvolvimento rural no bioma Cerrado. *Revista Americana de Empreendedorismo e Inovação*, v. 2, n. 1, p. 344-359, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.33871/26747170.2020.2.1.3356>

CAMPOS, Mikaele do Nascimento; SOUZA, Alzira Gabrielle Soares Saraiva; FREITAS, Rômulo Magno Oliveira de. Geoprocessamento aplicado à análise dos aspectos geoambientais do município de Almadina-BA. *Revista de Geografia*, v. 41, n. 5, p. 30-49, dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2024.262222>

CARVALHO JÚNIOR, Osmar Abílio de; GUIMARÃES, Renato Fontes; SILVA, Cristiano Rosa; GOMES, Roberto Arnaldo Trancoso. Séries temporais padronizadas e desvio fenológico interanual: novas técnicas para detecção de áreas queimadas usando conjunto de dados MODIS-NBR de longo prazo. *Remote Sensing*, v. 7, n. 6, p. 6950-6985, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70606950>

CARVALHO, Denise Aparecida de; BRITO, Gustavo Henrique Mendes; BLAMIREs, Daniel; MIRANDA, Jefferson Eduardo Silveira; NUNES, Lyandra de Sousa; SOUSA JUNIOR, Pedro Moreira de. Mapeamento do uso do solo em 30 anos (1985 e 2015) e análise do índice de cobertura vegetal por NDVI nas estações seca e chuvosa em Diorama, Estado de Goiás, Brasil. *Sustentare*, v. 6, n. 1, p. 51-70, 2022. Disponível em: <https://www.sustentarewipis.com.br/wp-content/uploads/artigos/2022/578665.pdf>.

CEREZINI, Monise Terra; CASTRO, César Nunes de. O Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) e a preservação da caatinga. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental*, Brasília, n. 27, p. 51-63, jan./jun. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/brua27art4>

COLE, B.; McMORROW, J.; EVANS, M.; AKUJÄRVI, A.; MAJASALMI, T.; STENBERG, P. Monitoramento espectral da fenologia de plantas de charnecas para identificar uma janela temporal para sensoriamento remoto hiperespectral de turfeiras. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 90, p. 49-58, 2014.

CRESPO-ANTIA, Juan Pablo; GAZOL, Antonio; PIZARRO, Manuel; GONZÁLEZ DE ANDRÉS, Ester; VALERIANO, Cristina; CUADRADO, Álvaro Rubio; LINARES, Juan Carlos; CAMARERO, Jesús Julio. Correspondência entre índices de vegetação e vigor

de árvores em povoamentos de abeto-prateado pirenaico. *Remote Sensing*, v. 16, n. 23, p. 4564, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16234564>

CURRIE, William Smith. Units of nature or processes across scales? the ecosystem concept at age 75. *New Phytologist*, v. 190, n. 1, p. 21-34, fev. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03646.x>

FAN, Jiahui; YAO, Yunjun; TANG, Qingxin; **et al.** Um índice híbrido para monitoramento de vegetação queimada, combinando características de textura de imagem com índices de vegetação. *Remote Sensing*, v. 16, n. 9, 2024, art. 1539. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16091539>

FAN, Jiahui; YAO, Yunjun; TANG, Qingxin; ZHANG, Xueyi; XU, Jia; YU, Ruiyang; LIU, Lu; XIE, Zijing; NING, Jing; ZHANG, Luna. Um índice híbrido para monitoramento da vegetação queimada combinando características de textura de imagem com índices de vegetação. *Remote Sensing*, v. 16, n. 9, p. 1539, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16091539>

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations (CHIRPS): a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, v. 2, art. 150066, 2015. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/sdata201566>. Acesso em: 2 jan. 2026.

GESSNER, Ursula; REINERMANN, Sophie; ASAM, Sarah; KUENZER, Claudia. Vegetation stress monitor — assessment of drought and temperature-related effects on vegetation in Germany analyzing MODIS time series over 23 years. *Remote Sensing*, v. 15, n. 22, p. 5428, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15225428>

GONG, Xi; LI, Tianqi; WANG, Run; HU, Sheng; YUAN, Shuai. Para além do Índice Ecológico de Sensoriamento Remoto: uma avaliação abrangente da qualidade ecológica usando um índice baseado em sensoriamento remoto com aprendizado profundo. *Remote Sensing*, v. 17, n. 3, p. 558, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs17030558>

HILKER, T. et al. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 45, p. 16041–16046, 2014. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1404870111>. Acesso em: 2 jan. 2026.

HOSSAIN, Md. Anik; ISLAM, Md. Rahedul; YESMIN, Tamanna; SULTANA, Rabeya; HOSSAIN, Md. Kamrul; ISLAM, Rafiqueel. Spatiotemporal assessment of environmental change in Kushtia, Bangladesh (1998–2023) using remote sensing-based environmental indices. *Environmental Challenges*, v. 19, p. 101167, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101167>

HU, X.; XU, H. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: a case from Fuzhou City, China. *Ecological Indicators*, v. 89, p. 11–21, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.006>. Acesso em: 2 jan. 2026.

HUANG, Zhixun; QIAN, Lingying; CAO, Wenzhi. Developing a novel approach integrating ecosystem services and biodiversity for identifying priority ecological reserves. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 179, p. 106128, abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106128>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Diretoria de Geociências. *Mapa de clima do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. Disponível em: https://geofp.ibge.gov.br/mapas/tematicos/mapas_murais/escala1_5.000.000/

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Levantamento sistemático da produção agrícola*. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588>

IMEA – INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA. *Indicadores*. Cuiabá: IMEA, 2022. Disponível em: <https://www.imea.com.br/imea-site/indicadores>

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Incrementos de desmatamento*. São José dos Campos: INPE, 2023. Disponível em: <http://terrabilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/desflorestamento/biomas/cerrado/incrementos>

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Mudanças climáticas 2022: impactos, adaptação e vulnerabilidade – resumo para formuladores de políticas*. Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Genebra: IPCC, 2022.

KEITH, David A.; FERRER-PARIS, José R.; NICHOLSON, Emily; et al. A function-based typology for Earth's ecosystems. *Nature*, v. 610, p. 513-518, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05318-4>

KIM, Eun-Ju; NAM, Sook-Hyun; KOO, Jae-Wuk; HWANG, Tae-Mun. Abordagem híbrida de veículo aéreo não tripulado e veículo de superfície não tripulado para avaliação de imagens de clorofila-a usando índices espectrais em riacho, Coreia do Sul. *Water*, v. 13, n. 14, p. 1930, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13141930>

Kokke, M., Custódio, M. e Siqueira, L. (2023) Marco Legal Ambiental do Brasil: Regulação de Bens Ambientais. *Beijing Law Review*, 14, 2164-2183. doi: 10.4236/blr.2023.144119 .

KUMAR, M. Naresh et al. A new hybrid spectral similarity measure for discrimination of *Vigna* species. *arXiv*, 18 set. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1509.05767>

KUMAR, Sandeep; GHOSH, Swarnendu Sekhar; MANDAL, Dipankar; BHATTACHARYA, Avik; PORWAL, Alok; KARTHIKEYAN, L.; et al. Proposta de um indicador de saúde da vegetação baseado no Sentinel-2: aprimorando o monitoramento da vegetação. *Frontiers in Remote Sensing*, v. 6, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1581355>

LABENSKI, Pia; MILLIN-CHALABI, Gail; PACHECO-PASCAGAZA, Ana María; SENN, Johannes Antenor; FASSNACHT, Fabian Ewald; CLAY, Gareth D. Uma análise fenológica e da regeneração da vegetação pós-fogo em áreas de turfeiras de altitude no Reino Unido com base em satélites ópticos. *Environmental and Sustainability Indicators*, v. 24, p. 100492, dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100492>

LAGEO – LABORATÓRIO DE GEOTECNOLOGIAS. Tutorial índice Composto de Qualidade Ambiental ICQA. Rondonópolis: UFR, 2025 (não publicado).

LI, Jun; PEI, Yanqiu; ZHAO, Shaohua; XIAO, Rulin; SANG, Xiao; ZHANG, Chengye. Uma revisão do sensoriamento remoto para o monitoramento ambiental na China. *Remote Sensing*, v. 12, n. 7, p. 1130, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12071130>

LIU, Yanan; XIANG, Wanlin; HU, Pingbo; GAO, Peng; ZHANG, Ai. Avaliação da qualidade do ambiente ecológico utilizando um modelo aprimorado do Índice Ecológico de Sensoriamento Remoto. *Remote Sensing*, v. 16, n. 18, p. 3485, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16183485>

MARKOV, Boris. Comparação de índices baseados em sensoriamento remoto para monitoramento do impacto da seca em ecossistemas florestais. *Annual of Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Faculty of Geology and Geography, Book 2 – Geography*, v. 111, p. 237-246, 2018

MATO GROSSO (Estado). Plano de manejo do Parque Estadual Dom Osório Stöffel (PEDOS). Cuiabá: Secretaria de Estado de Meio Ambiente de Mato Grosso (SEMA-MT), 2024. Elaboração técnica: Ratton & Ramos.

MATO GROSSO. Decreto nº 5.437, de 12 de novembro de 2002. Cria o Parque Estadual Dom Osório Stoffel e dá outras providências. Cuiabá: Governo do Estado de Mato Grosso, 2002. Disponível em: <https://acervo.socioambiental.org/sites/default/files/documents/F0D00502.pdf>

MIAO, Wenna; CHEN, Yue; KOU, Weili; LAI, Hongyan; SAZAL, Ahmed; WANG, Jie; LI, Youliang; HU, Jiangjie; WU, Yong; ZHAO, Tianfu. O RSEI ajustado por HANTS construído na estação de crescimento da vegetação revela os padrões espaço-temporais da qualidade ecológica. *Scientific Reports*, v. 14, n. 14686, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65659-0>

MORAES, T. J. de et al. Vegetation dynamics and precipitation sensitivity in three regions of northern Pantanal of Mato Grosso. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 57, n. 1, p. 125–136, 2022. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/download/1132/739/5765. Acesso em: 2 jan. 2026.

MORIASI, Daniel N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=23153>. Acesso em: 2 jan. 2026.

NATIVEL, Simon; AYARI, Emna; RODRIGUEZ-FERNANDEZ, Nemesio; BAGHDADI, Nicolas; MADELON, Remi; ALBERGEL, Clement; ZRIBI, Mehrez. Metodologia híbrida usando Sentinel-1/Sentinel-2 para estimativa da umidade do solo. *Remote Sensing*, v. 14, n. 10, p. 2434, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14102434>

NEYNS, Robbe; CANTERS, Frank. Mapeamento da vegetação urbana com sensoriamento remoto de alta resolução: uma revisão. *Remote Sensing*, v. 14, n. 4, p. 1031, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14041031>

PALOMO-CAMPESINO, Sara; GONZÁLEZ, José Antonio; GARCÍA-LLORIENTE, Marina. Exploring the connections between agroecological practices and ecosystem services: a systematic literature review. *Sustainability*, v. 10, n. 12, p. 4339, nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10124339>

PARREIRAS, Taya Cristo; BOLFE, Edson Luis; PEREIRA, Paulo Roberto Mendes; SOUZA, Abner Matheus de; ALVES, Vinícius Fernandes. Aplicações, desafios e perspectivas para o monitoramento da dinâmica agrícola no Cerrado brasileiro com sensoriamento remoto multiespectral. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 37, p. 101448, jan. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101448>

PENG, Yi; NGUY-ROBERTSON, Anthony; ARKEBAUER, Timothy; GITELSON, Anatoly A. Avaliação da recuperação do conteúdo de clorofila do dossel em milho e soja: implicações da histerese no desenvolvimento de algoritmos genéricos. *Remote Sensing*, v. 9, n. 3, p. 226, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9030226>

QIN, Weirong; ISMAIL, Mohd Hasmadi; RAMLI, Mohammad Firuz; DENG, Junlin; WU, Ning. Avaliação e predição da qualidade ecológica com base no Índice Ambiental de Sensoriamento Remoto e no modelo Autômato Celular-Markov. *Sustainability*, v. 17, n. 8, p. 3640, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17083640>

ROSAN, Thais M.; SITCH, Stephen; MERCADO, Lina M.; HEINRICH, Viola; FRIEDLINGSTEIN, Pierre; ARAGÃO, Luiz E. O. C. Fragmentação impulsiona tendências divergentes em áreas queimadas na Amazônia e no Cerrado. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 5, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.801408>

ROZANTE, J. R.; GUTIERREZ, E. R.; FERNANDES, A. A.; VILA, D. A. Performance of precipitation products obtained from combinations of satellite and surface observations. *International Journal of Remote Sensing*, v. 41, n. 19, p. 7585–7604, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1763504>. Acesso em: 2 jan. 2026.

SANTOS, Claudinei Oliveira dos; MESQUITA, Vinícius Vieira; PARENTE, Leandro Leal; PINTO, Alexandre de Siqueira; FERREIRA JUNIOR, Laerte Guimarães. Avaliando a dinâmica espacial e qualitativa das pastagens brasileiras de 2010 a 2018, com base na análise do arquivo de dados Landsat. *Remote Sensing*, v. 14, n. 4, p. 1024, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14041024>

SANTOS, João F.; CARRIÇO, Nelson; MIRI, Morteza; RAZIEI, Tayeb. Índice composto distribuído de seca baseado em análise de componentes principais e avaliação da dependência temporal. *Water*, v. 17, n. 1, p. 17, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17010017>

SANTOS, M. C. R. et al. Effects of precipitation and fire on land surface phenology in protected areas of the Brazilian Savannas (Cerrado). *Remote Sensing*, v. 17, n. 12, art. 2077, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/17/12/2077>. Acesso em: 2 jan. 2026.

SANTOS, Rebeqa Aparecida Almeida dos; VESTENA, Leandro Redin. *A agroecologia e os serviços ecossistêmicos no contexto latino-americano: uma revisão sistemática*. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 19, n. 3, 2024. DOI: <https://doi.org/10.33240/rba.v19i3.53881>

SATAPATHY, Trupti; DIETRICH, Jörg; RAMADAS, Meenu. Monitoramento e alerta precoce de secas agrícolas em escala regional usando um índice combinado baseado em sensoriamento remoto. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 196, e1132, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13265-y>

SCHMITZ, M. H.; DO COUTO, E. V.; XAVIER, E. C.; et al. Avaliando o papel das áreas protegidas na dinâmica de mudanças do uso da terra em um hotspot de biodiversidade. *Ambio*, v. 52, p. 1603–1617, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01886-5>

SEPBAH, Boutaina; YAZIDI ALAOUI, Otmane; WAHBI, Miriam; MAATOUK, Mustapha; [mais 1]. QGIS-Landsat Indices plugin (Q-LIP): ferramenta para cálculo de índices ambientais usando dados Landsat. *Environmental Modelling & Software*, v. 137, p. 104972, jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.104972>

SILVA JUNIOR, Ubiratan Joaquim da; GONÇALVES, Rodrigo Mikosz; OLIVEIRA, Leidjane Maria Maciel de; SILVA JÚNIOR, Juarez Antonio da. Sensibilidade espectral dos índices de vegetação: GNDVI, NDVI e EVI na mata ciliar do reservatório de Serrinha II – PE, Brasil. *Revista Brasileira de Ciências da Vegetação*, v. 73, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv73n1-55252>

SILVA, Normandes Matos; BARBOSA, Domingos Sávio; DYDERSKI, Marcin; PESSI, Dhonatan Diego. Um método de baixo custo para detectar espécies invasoras no ambiente urbano — um exemplo de aplicação de fluxo de trabalho baseado em drones. In: *Ecology of Tropical Cities*. v. I. Cham: Springer, 2025. p. 231-253. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-48012-6_13

SILVA, Rafael Santos; FIGUEIREDO, Múcio do Amaral; MARTINS, João Vitor de Alvarenga. Variações temporais na vegetação baseado na correlação de NDVI e de pluviometria em uma sub-bacia hidrográfica tropical em Minas Gerais. *Revista Territorium Terram*, v. 6, n. 8, 2023. ISSN 2317-5419. Disponível em: https://periodicos.ufsj.edu.br/territorium_terrarium/article/view/5252

SILVA, Renato Ferreira da; SANTOS, Matheus Simões; SANTANA, Francielle; OLIVEIRA, Yasmine. Sensoriamento remoto aplicado à análise da regeneração da vegetação natural do Parque Estadual da Lapa Grande, Montes Claros, Minas Gerais. *Caderno de Geografia*, v. 31, n. 65, p. 304-321, abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2021v31n65p304>

SILVA-SOUZA, Karla J. P.; PIVATO, Máira G.; SILVA, Vinícius C.; HAIDAR, Ricardo F.; SOUZA, Alexandre F. Novos padrões da diversidade beta de árvores e seus determinantes nos maiores biomas de savana e áreas úmidas da América do Sul. *Plant Diversity*, v. 45, n. 4, p. 369-384, jul. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pld.2022.09.006>

SISHODIA, Rajendra P.; RAY, Ram L.; SINGH, Sudhir K. Aplicações do sensoriamento remoto na agricultura de precisão: uma revisão. *Remote Sensing*, v. 12, n. 19, p. 3136, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12193136>

SOUZA, Evie dos Santos de. *Biodiversidade do Bioma Cerrado*. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-cerrado/biodiversidade>

TANSLEY, Arthur George. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, v. 16, n. 3, p. 284-307, jul. 1935. DOI: <https://doi.org/10.2307/1930070>

TREVIZAN, Ana Flávia; OLIVEIRA, Felipe Augusto Hoeflich Damaso de. Unidades de conservação como instrumentos de mitigação às alterações climáticas em Mato Grosso. *Boletim de Geografia*, v. 39, p. 254-264, e59419, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v39.a2021.e59419>

TUDORESCU, Ana-Maria; NEGRU, Catalin; MOCANU, Bogdan-Costel; **et al.** Índice de vegetação sustentável de qualidade para monitoramento de recursos naturais usando imagens de satélite. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, v. 59, nov. 2024, art. 101847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101847>

VIDEIRA, J. A. M.; MATHIAS, J. F. C. M.; YOUNG, C. E. F. Análise sobre a visitação dos Parques nas pequenas e médias cidades do Brasil após a implementação do Sistema Nacional de Unidades de Conservação. *Revista Delos, [S. l.]*, v. 17, n. 60, p. e2418, 2024. DOI: 10.55905/rdelosv17.n60-143.

WANG, Jing; WANG, Jia; XU, Jiangqi. Variação espaço-temporal e predição da qualidade ecológica com base no Índice Ecológico de Sensoriamento Remoto – estudo de caso da cidade de Zhanjiang, China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, v. 11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1153342>

WIJESINGHE, Dilnu Chanuwan; WITHANAGE, Neel Chaminda; MISHRA, Prabuddh Kumar; RANAGALAGE, Manjula; ABDELRAHMAN, Kamal; FNAIS, Mohammed S. Uma aplicação de índices derivados de sensoriamento remoto para monitoramento de

secas em um distrito de zona árida, em ilha tropical. *Ecological Indicators*, v. 167, p. 112681, out. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112681>

WILKS, Daniel S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780123850225/statistical-methods-in-the-atmospheric-sciences>. Acesso em: 2 jan. 2026.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Guide to the WMO Table Driven Code Forms (GRIB Edition 2)*. Geneva: WMO, 2019. (WMO-No. 306). Disponível em: <https://community.wmo.int/en/activity-areas/wis/grib>. Acesso em: 2 jan. 2026.

YAN, Kai; GAO, Si; YAN, Guangjian; **et al.** Uma revisão sistemática global dos índices de vegetação obtidos por sensoriamento remoto. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 139, maio 2025, art. 104560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104560>

ZAGAJEWSKI, Bogdan; TØMMERVIK, Hans; BJERKE, Jarle W.; RACZKO, Edwin; BOCHENEK, Zbigniew; KŁOS, Andrzej; JAROCIŃSKA, Anna; LAVENDER, Samantha; ZIÓŁKOWSKI, Dariusz. Diferenças intraespecíficas nas curvas de refletância espectral como indicadores de vitalidade reduzida em plantas do Alto Ártico. *Remote Sensing*, v. 9, n. 12, p. 1289, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9121289>

ZHANG, Xiaoyong; JIA, Weiwei; LU, Shixin; HE, Jinyou. Avaliação ecológica e análise de fatores determinantes em áreas de alta cobertura vegetal com base em novo índice de sensoriamento remoto. *Ecological Informatics*, v. 82, p. 102786, set. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102786>

ZHANG, Zhijiang; LIU, Meiling; LIU, Xiangnan; ZHOU, Gaoxiang. Um novo índice de vegetação baseado em imagens multitemporais do Sentinel-2 para discriminar níveis de estresse por metais pesados no arroz. *Sensors*, v. 18, n. 7, p. 2172, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18072172>

ZHAO, Yongquan; HUANG, Bo. A hybrid image fusion model for generating Good spatial-temporal-spectral resolution data using OLI-MODIS-Hyperion satellite imagery. *Zenodo*, set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1132545>